



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES

**AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS ANALÍTICOS DE
CÁLCULO DE CAPACIDADE DE TRÁFEGO UTILIZADOS EM
FERROVIA NACIONAL E INTERNACIONAL**

JOSÉ MAURO FELIPE MENDES BARROS

Belo Horizonte, novembro de 2013.

JOSÉ MAURO FELIPE MENDES BARROS

**AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS ANALÍTICOS DE
CÁLCULO DE CAPACIDADE DE TRÁFEGO UTILIZADOS EM
FERROVIA NACIONAL E INTERNACIONAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Mestrado em Geotecnia e Transporte

Orientador: Prof^o Dr^o Nilson Tadeu Ramos Nunes

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

B277a

Barros, José Mauro Felipe Mendes.

Avaliação dos principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego utilizados em ferrovia nacional e internacional [manuscrito] / José Mauro Felipe Mendes Barros. – 2013.

178 f., enc.: il.

Orientador: Nilson Tadeu Ramos Nunes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 169-178.

1. Engenharia de transportes - Teses. 2. Ferrovias - tráfego - Teses.
3. Transporte ferroviário - Teses. I. Nunes, Nilson Tadeu Ramos. II.
Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 625(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES



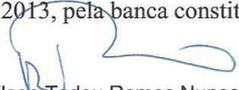
FOLHA DE APROVAÇÃO

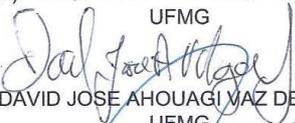
AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS ANALÍTICOS DE CÁLCULO DE CAPACIDADE DE TRÁFEGO UTILIZADOS EM FERROVIA NACIONAL E INTERNACIONAL

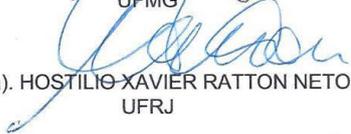
JOSE MAURO FELIPE MENDES BARROS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOTECNIA E TRANSPORTES, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, área de concentração TRANSPORTES.

Aprovada em 11 de novembro de 2013, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Nilson Tadeu Ramos Nunes - Orientador
UFMG


Prof(a). DAVID JOSE AHOUAGI MAZ DE MAGALHÃES
UFMG


Prof(a). HOSTILIO XAVIER RATTON NETO
UFRJ

Belo Horizonte, 11 de novembro de 2013.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, minha esposa, aos meus filhos, irmãos, sobrinhos e amigos.

É com eles que compartilho este momento de alegria da conclusão

de um projeto tão desafiador e ao mesmo tempo tão gratificante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e amigos por receber deles mais do que dou.

A minha mãe, Teresinha, pela alegria de viver e pelo otimismo incomparável que nos leva a enfrentar os desafios com muita serenidade e sustentados pela fé inabalável em Deus.

A meu pai, Antonino, pelo exemplo do compromisso com a busca do conhecimento acadêmico que tanto marcou a sua vida como professor.

A minha esposa, Heloisa, mulher admirável dedicada à família. Mulher, amiga, mãe absoluta, que sempre nos incentiva com muita compreensão e carinho. Pilar de nossa família.

Aos meus filhos, Izabela e Mauro, que são a minha base de confiança no futuro melhor, são meus exemplos de determinação e perseverança.

Ao meu genro, Juan, pelo compromisso e respeito a nossa família.

Aos meus irmãos, Danilo, Betânia e Maurício, pela vida em comum e confiança na nossa relação.

Aos meus sobrinhos e sobrinhas, Dáfani, Eduardo, Jordana, Fernando, Danilo Júnior, Iasmim, Caetano e Teresa, pela alegria da juventude que se faz presente neles e revitaliza nossas vidas.

Aos meus amigos e colegas da Vale que possibilitaram e tanto apoio deram ao meu curso de mestrado.

Ao Prof^o Dr^o Nilson, pela dedicação como orientador, sempre presente e disposto. Pelos conhecimentos e experiências repassadas, exemplos e conselhos dados, que engrandeceram minha formação acadêmica e possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores da UFMG, que muito contribuíram para o desenvolvimento do meu conhecimento em transporte, em especial ao Prof^o Dr^o David, que além de referencia e dos ensinamentos foi um grande incentivador.

A amiga Kátia, pela participação sempre colaboradora aos mestrandos que transcendeu ao papel de secretária do curso de mestrado.

*"É preciso força,
para sonhar,
e perceber,
que a estrada vai,
além do que se vê !"*
(*Los Hermanos*)

*"No final tudo dá certo,
se ainda não deu,
é porque o final ainda não chegou"*
(*José Mauro*)

SUMÁRIO

LISTA DE GRÁFICOS	17
LISTA DE TABELAS E QUADROS	18
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	19
LISTA DE SÍMBOLOS.....	21
1 INTRODUÇÃO.....	26
1.1 Justificativa.....	27
1.2 Objetivo.....	31
1.3 Objetivo Específico.....	31
1.4 Estrutura da Dissertação.....	32
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	34
2.1 Contextualizando o modo ferroviário de transporte.....	34
2.2 Referencial teórico de capacidade de tráfego ferroviário.....	39
2.3 Considerações sobre as informações relevantes presentes na literatura dos conceitos e métodos de cálculo de capacidade de tráfego em ferrovias.....	59
3 METODOLOGIA.....	61
3.1 Fluxo do processo metodológico.....	61
3.2 Categorização dos parâmetros dos métodos.....	62
3.3 Definição dos critérios de avaliação das categorias dos métodos.....	63
3.4 Conceituando as categorias.....	63
3.4.1 Categoria 1 - Tempo decorrente de deslocamento dos trens.....	63
3.4.2 Categoria 2 - Tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens.....	73
3.4.3 Categoria 3 - Tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção.....	76
3.4.4 Categoria 4 - Tempos decorrentes de interrupção da circulação de trens não programada.....	79
3.4.5 Categoria 5 - Tempo decorrente da Gestão Operacional.....	85
3.4.6 Categoria 6 - Tempo decorrente de recurso de via.....	87
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1 Levantamento dos métodos de cálculo analíticos existentes.....	89
4.1.1 Japão.....	89
4.1.2 Alemanha.....	93

4.1.3 UIC – União Internacional de Caminho de Ferro.....	99
4.1.4 Inglaterra	103
4.1.5 Espanha	108
4.1.6 Brasil	111
4.1.7 Itália	125
4.1.8 Rússia.....	128
4.1.9 Estados Unidos - USA.....	136
4.1.10 Canadá.....	141
4.2 Considerações sobre as condições observadas nos países onde o método de cálculo da capacidade de tráfego ferroviário foi pesquisado.....	147
4.3 Análise qualitativa dos métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego baseada na categorização dos seus parâmetros	148
4.3.1 Método - Japão.....	148
4.3.2 Método - Alemanha.....	149
4.3.3 Método - UIC	150
4.3.4 Método - Inglaterra	151
4.3.5 Método - Espanha	152
4.3.6 Método - Itália.....	153
4.3.7 Método Brasil	154
4.3.8 Método - Estados Unidos	155
4.3.9 Método - Rússia.....	156
4.3.10 Método Canadá.....	157
4.4 Apresentação da tratativa dos métodos analíticos pesquisados aos eventos não programados ou indesejáveis	159
4.5 Identificação do método analítico que melhor trata os parâmetros ferroviários.	160
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	166
6 REFERÊNCIAS	169

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Matriz de Transporte Atual e Futura. (FONTE - ANTT, 2012).....	28
FIGURA 1.2 - PAC - Projeto de expansão ferroviária em construção (FONTE - ANTT, 2012) ...	29
FIGURA 1.3 - PAC – Projetos de expansão em estudo- (FONTE - ANTT, 2012).....	29
FIGURA 2.1 – Relação entre capacidade e confiabilidade. (FONTE – KRUEGER, 2000 - adaptado)	49
FIGURA 2.2 - Fatores que interferem diretamente na capacidade de tráfego de uma ferrovia. (FONTE-LANDEX, 2008).	54
FIGURA 3.1 – Fluxograma de apresentação dos procedimentos metodológicos.	62
FIGURA 3.2 - AMV Aparelho de Mudança de Via (FONTE – AAR, 2012).....	65
FIGURA 3.3 – Componentes do Aparelho de Mudança de Via (FONTE – AAR, 2010 - adaptado)	66
FIGURA 3.4 – Componentes da estrutura da grade ferroviária (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)	66
FIGURA 3.5 - Tipos de dormentes existentes. (FONTE – AAR, 2010).....	67
FIGURA 3.6 – Esforços transversais no lastro ferroviário. (FONTE – AAR, 2010 - adaptado)	68
FIGURA 3.7 – Constituição do subleito, corte, aterros e drenagem. (FONTE – AAR, 2010 - adaptado).....	68
FIGURA 3.8 – Componentes de truque. (FONTE – AAR, 2010).....	70
FIGURA 3.9 – Conjunto choque tração de vagão. (FONTE – AAR, 2010)	71
FIGURA 3.10 – Locomotiva diesel-elétrica. (FONTE - AAR, 2012).....	72
FIGURA 3.11 – Exemplo de processo de licenciamento. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)	74
FIGURA 3.12 – Licenciamento por <i>Staff</i> . (FONTE – AAR, 2009 - adaptado)	75
FIGURA 3.13 – Centro de controle operacional – CCO. (FONTE - AAR, 2010).....	76
FIGURA 3.14 - Retirada mecanizada de fixação. (FONTE- ANTF, 2010).....	78
FIGURA 3.15 – Troca mecanizada de dormentes. (FONTE-ANTF, 2010).....	78
FIGURA 3.16 –Desguarnecimento manual de lastro em região de AMV. (FONTE-ANTF, 2010) .	79
FIGURA 3.17 – Desguarnecimento mecanizado de lastro. (FONTE-ANTF, 2010).....	79
FIGURA 3.18 - Defeitos superficiais. (FONTE – AAR, 2010).	80
FIGURA 3.19 - Fratura de trilho. (FONTE – AAR, 2010).	80
FIGURA 3.20 - Defeitos internos. (FONTE – AAR, 2010).....	80
FIGURA 3.21 - Empeno das placas de apoio. (FONTE – AAR, 2010).	80
FIGURA 3.22 - Dormentes de aço fraturados. (FONTE – AAR, 2010).	81

FIGURA 3.23 - Dormentes monobloco com o rompimento do perfil de junção. (FONTE – AAR, 2010).	81
FIGURA 3.24 - Grade da via comprometida. (FONTE – AAR, 2010).	81
FIGURA 3.25 – Indicação de desvios no nivelamento e alinhamento. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado).	81
FIGURA 3.26 – Exemplo de instabilidade de taludes (FONTE - ANTF, 2009).	82
FIGURA 3.27 –Intervenção em obra de arte especial. (FONTE - ANTF, 2009).	82
FIGURA 3.28 - Intervenção em obra de arte especial. (FONTE - ANTF, 2009).	82
FIGURA 3.29 – Cicuito de via em condição normal de uso. (FONTE - AAR, 2009 - adaptado).	83
FIGURA 3.30 – Circuito de via com defeito, sinal de ocupação indevido. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado).	83
FIGURA 3.31 –Trilho quebrado abrindo o circuito de via. (FONTE - ANTF, 2010)	84
FIGURA 3.32 – Máquina de chave de AMV elétrico. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)	84
FIGURA 3.33 – Trem com 334 vagões em operação na Africa do Sul. (FONTE - AAR, 2010)	86
FIGURA 3.34 – Gráfico de trens. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)	87
FIGURA 4.1 - Malha Ferroviária Japonesa. (FONTE - UIC, 2010)	90
FIGURA 4.2 - Malha Ferroviária Alemã. (FONTE - UIC, 2010)	94
FIGURA 4.3 – Intervalo de tempo de supressão <i>Zijk</i> . (FONTE – RIVES, 1983)	96
FIGURA 4.4 - Mapa dos Países Membros do UIC (FONTE – UIC, 2012).	100
FIGURA 4.5 - Malha Ferroviária do Reino Unido. (FONTE - UIC, 2010)	106
FIGURA 4.6 - Malha Ferroviária Espanhola. (FONTE – UIC, 2010)	109
FIGURA 4.7 - Densidade das ferrovias no Brasil na década de 1870. (FONTE – SILVEIRA, 2003).	113
FIGURA 4.8 - Ferrovias Brasileiras na década de 1930. (FONTE – SILVEIRA, 2003)	114
FIGURA 4.9 - Valores previstos pelo PIL para investimento em ferrovia. (FONTE – CNT, 2013)	120
FIGURA 4.10 – Malha ferroviária brasileira atual e a que será integrada pelo PIL. (FONTE - CNT, 2013)	121
FIGURA 4.11 – Malha ferroviária Italiana. (FONTE – UIC, 2010)	127
FIGURA 4.12 – Malha Ferroviária Russa. (FONTE – Wikipedia, 2013)	130
FIGURA 4.13 - Efeito de supressão dos trens de carga pelos trens de passageiros (FONTE-RIVES, 1983)	131

FIGURA 4.14 - Malha Ferroviária Americana Total com as Três Classes de Ferrovia (FONTE- AAR, 2011).....	138
FIGURA 4.15 - Malha Ferroviária Americana Classe I e as Operadoras (FONTE- AAR, 2011) ..	138
FIGURA 4.16 - Malha Ferroviária Canadense interligada a Ferrovia Americana (FONTE – AAR, 2011)	145

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 3.1 - Curvas de esforço trator e velocidade. (FONTE – AAR, 2011 - adaptado)	72
GRÁFICO 3.2 – Esforço trator de uma locomotiva em tração. (FONTE - AAR, 2011 - adaptado)	73
GRÁFICO 4.1 - Ferrovias brasileiras evolução de 1854 a 2012. (FONTE – CNT, 2013).....	115
GRÁFICO 4.2 - Índice de acidentes ferroviários de 1997 a 2011. (FONTE - ANTT, 2012)	116
GRÁFICO 4.3 - Coeficiente energético de 1997 a 2011. (FONTE - ANTT, 2012).....	116
GRÁFICO 4.4 - Movimentação de carga em milhões de toneladas. (FONTE – ANTF, 2012).....	117
GRÁFICO 4.5 - Movimentação de carga em milhões de toneladas por km útil. (FONTE – ANTF, 2012)	117
GRÁFICO 4.6 - Empregos diretos e indiretos na malha ferroviária. (FONTE – ANTT- 2012).....	118
GRÁFICO 4.7 - Investimentos realizados pela iniciativa privada e pública de 1997 a 2012 (FONTE - CNT, 2013).....	119
GRÁFICO 4.8 - Desempenho dos métodos categorizados, apresentados de forma gráfica.....	161
GRÁFICO 4.9 – Desempenho dos métodos na categoria 1.....	162
GRÁFICO 4.10 – Desempenho dos métodos na categoria 2.....	162
GRÁFICO 4.11 – Desempenho dos métodos na categoria 3.....	163
GRÁFICO 4.12 – Desempenho dos métodos na categoria 4.....	164
GRÁFICO 4.13 – Desempenho dos métodos na categoria 5.....	164
GRÁFICO 4.14 – Desempenho dos métodos na categoria 6.....	165

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 3.1 - Tipos de dormentes e aplicação.	68
TABELA 3.2- Relação de manga de eixo com peso bruto.	69
TABELA 3.3 - Tipos de truque e suas características.	71
TABELA 4.1- Ferrovias Brasileiras e suas respectivas bitolas e extensão de sua malha.	115
TABELA 4.2 – Produtos mais transportados por ferrovia de 2010 a 2012 (em mil ton.).	118
TABELA 4.3 – Obras não contempladas pelo governo que na visão da CNT são fundamentais. ...	122
TABELA 4.4 - Países e a relação entre área territorial e extensão da ferrovia.	147
TABELA 4.5 – Resultado da avaliação do método - Japão.	149
TABELA 4.6 - Resultado da avaliação do método - Alemanha.	150
TABELA 4.7 - Resultado da avaliação do método - UIC.	151
TABELA 4.8 - Resultado da avaliação do método - Inglaterra.	152
TABELA 4.9 - Resultado da avaliação do método - Espanha.	153
TABELA 4.10 - Resultado da avaliação do método - Itália.	154
TABELA 4.11 - Resultado da avaliação do método - Brasil.	155
TABELA 4.12 - Resultado da avaliação do método dos Estados Unidos.	156
TABELA 4.13 - Resultado da avaliação do método da Rússia.	157
TABELA 4.14 - Resultado da avaliação do método do Canadá.	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	<i>American Association of Railroads</i>
ABIFFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	<i>Automatic Block Signalling</i>
ADIF	Administrador de Infraestruturas Ferroviárias
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
ANTT	Agencia Nacional de Transporte Terrestre
ATC	<i>Automatic Train Control</i>
ATS	<i>Automatic Train Stopping</i>
AVE	<i>Alta Velocidad Española</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BRIC	Brasil, Rússia, Índia e China
CCO	Centro de Controle de Tráfego
CMS	<i>Content Management System</i>
CND	Conselho Nacional de Desestatização
CNR	<i>Canadian National Railway</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPR	<i>Canadian Pacific Railway</i>
CS	<i>Critical Section</i>
DB	<i>Deustsche Bundesbahn</i>
FIFO	<i>First in first out</i>
FND	Fundo Nacional de Desestatização
G8	Grupo dos Oito
GE	General Electric
HP	<i>Horse Power</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
JNR	<i>Japonese National Railways</i>
KGF	Quilograma Força

Km	Quilômetro
Km ²	Quilômetro Quadrado
L&MR	<i>Liverpool and Manchester Railway</i>
LASTRAN	Laboratório de Sistema de Transporte
LIFO	<i>Last in, first out</i>
MatLab	<i>Matrix Laboratory</i>
MC	Manutenção Corretiva
MP	Manutenção Preventiva
NBR	Norma Brasileira
PAC	Plano de Aceleração do Crescimento
PC	Manutenção Condicional
PIB	Produto Interno Bruto
PIL	Programa de Investimento em Logística
PM	Manutenção Preditiva
PNLT	Plano Nacional de Logística e Transporte
PPA	Plano Plurianual
PPP	Parceria Pública Privada
RENFE	<i>Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles</i>
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A
RFI	<i>Ferrovie dello Stato</i>
RZD	<i>Russian Railways</i>
SNCF	<i>Societe Nationale de Chemins de Fer</i>
SPA	<i>Treno Alta Velocità</i>
SRT	<i>Section Running Time</i>
TGV	<i>Train à Grande Vitesse</i>
TKB	Toneladas brutas transportadas por quilômetro
TKU	Toneladas transportadas por quilômetro útil
TPC	<i>Train Performance Calculator</i>
TTP	<i>Trais Timetabling Problem</i>
UE	<i>Union European</i>
UIC	<i>International Union of Railways</i>
USA	<i>United States of America</i>
USD	<i>United States Dollar</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

=	Igual
>	Maior
Σ	Somatório
x	Multiplicação
/	Divisão
+	Adição
\geq	Maior ou igual
()	Parênteses
$\sqrt{\quad}$	Raiz Quadrada

RESUMO

O transporte ferroviário está cada vez mais se consolidando como uma opção altamente viável tanto para o transporte de carga, como para o transporte de passageiros. Esta é uma realidade mundial e nos últimos anos no Brasil o sistema ferroviário tem recebido forte investimento. Todo investimento em transporte tem expressiva interferência no desenvolvimento econômico e social da região, principalmente o ferroviário, devido às suas características de grande volume e baixo custo para os usuários. Em contra partida, a ferrovia apresenta alto custo de implantação, exigindo critérios refinados na definição de suas características. Esta definição passa inevitavelmente pelo cálculo de capacidade de tráfego, que é a quantidade de trens que pode circular em suas linhas por um determinado tempo em condições de controle e segurança estabelecidos. Identificar a capacidade de tráfego de uma malha ferroviária é um grande desafio devido à complexidade e ao grande número de elementos que se correlacionam na circulação de trens. As exigências atuais são de cálculos de capacidade de tráfego mais precisos considerando que o resultado é à base da definição de viabilidade econômica e de especificação dos investimentos, tanto para a construção quanto para a reestruturação de uma malha ferroviária já em operação. Além disto, com o novo marco regulatório das ferrovias brasileiras, o excedente de capacidade de tráfego das operadoras ferroviárias será ofertado ao mercado através da ANTT, que constatará na prática se a capacidade calculada e informada pela ferrovia é real. Dessa forma, mais do que nunca o cálculo de capacidade de tráfego com precisão é importante para a gestão eficiente e eficaz da ferrovia. O presente estudo avaliou qualitativamente os principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego, que são amplamente utilizados, dos países onde o modo ferroviário tem participação significativa na matriz de transporte mais o do Brasil; são eles: Estados Unidos, Japão, Alemanha, UIC - União Internacional de Caminhos de Ferro, Inglaterra, Espanha, Itália, Rússia, Canadá e, através do uso de critérios de avaliação baseados na categorização dos parâmetros ferroviários, identificou o método de cálculo mais adequado. Os resultados demonstram fragilidade comum dos métodos, da desatenção aos eventos não programados, que podem modificar significativamente o resultado do cálculo. Cinco dos dez métodos pesquisados ao menos considera este parâmetro e da outra metade, dois métodos indicam sua inserção como fator de correção. Foram identificados os pontos fortes e fracos de cada um dos dez métodos avaliados, possibilitando a oportunidade de direcionar os esforços para a melhoria dos métodos. Pelo exposto, a presente pesquisa apresentou um tema inédito, inovador e muito relevante. Dessa forma recomenda-se que seja desenvolvida uma

definição sustentável e tecnicamente criteriosa para o tratamento do parâmetro referente aos eventos não programados ou indesejáveis e de um método que agregue o maior número das melhores práticas dos dez métodos apresentados nesta dissertação.

Palavras-Chaves: capacidade, tráfego, transporte, ferrovia, eventos.

ABSTRACT

Railroad transport is becoming an ever more highly viable option for both freight and passengers transportation. That is a world-wide reality, and in the past few years the Brazilian railroad system has been receiving strong investments. Any investment in transportation has an expressive contribution in the economic and social development of the region that receives it; specially railroads, due to its large scale at low costs for its users. On the other hand, railroad represents a high cost of implementation, demanding refined criteria for defining its characteristics. Such definition inevitably has to consider the traffic capacity calculation as a premise, which is the amount of trains that can run on its tracks for a defined period of time, under pre-established control and safety conditions. To identify the traffic capacity of a railroad mesh constitutes a great challenge due to the high complexity and great number of elements that correlates to each other during traffic flow of trains. Traffic capacity calculations demand great precision, considering that its result is the base for economic viability – both for a new railroad as for restructuration of an old one. Furthermore, with the new regulatory mark of Brazilian railroads, the surplus of railroad companies' traffic capacity will be auctioned to the market through ANTT – which is going to determine whether the current calculated and informed capacity of the railroads are in fact real. Thus, more than ever the precise calculation of mesh capacity is of extreme importance to the efficiency and efficacy management of railroads. The present study analyses qualitatively the main analytical methods available for obtaining mesh capacity that are broadly utilized in countries where the railroad transportation has a relevant share in the transportation matrix, plus Brazil; they are: USA, Japan, Germany, UIC - International Union of Railways: England, Spain, Italy, Russia and Canada. Beyond that, through the use of evaluation criteria based on categorization of railroads parameters, it was identified the most suitable calculation method. The results demonstrate a common fragility: unimportance being given to unplanned events; which should not happen, since they can significantly modify the calculation results. Five out of ten methods studied at least consider such parameter, and from the other half, only two methods indicate its insertion as a correction factor. Both strong and weak points of each of the ten methods assessed were identified, allowing an opportunity of directing efforts for their improvement. By the exposed above, the present research presented a new theme, innovative and very relevant. It is recommended that a more sustainable and technically criterious definition is developed for treating the parameter of

unplanned or undesirable events, and a new method that encloses the highest number of best practices contained on the ten methods analyzed in this dissertation.

Keys words: capacity, traffic, transportation, railroad, events.

1 INTRODUÇÃO

O economista americano Rostow (1961), em seu trabalho sobre os estágios de desenvolvimento econômico, atribuiu às ferrovias o papel de catalisador da transformação econômica vivenciada pelo ocidente desde meados do século XIX. A Revolução Industrial desencadeou profundas mudanças estruturais que demandaram, mais do que em qualquer outro momento da história, a capacidade de se transportar um grande volume de passageiros e cargas. Essas alterações na estrutura econômica permitiram o desenvolvimento do transporte ferroviário em diversos países, que se manteve como o mais importante meio de transporte terrestre até a década de 1930. A tecnologia ferroviária permitiu uma diminuição sem precedentes nos custos de locomoção no mundo, via redução do tempo de deslocamento e aumento da segurança. Com forte impacto no ritmo de desenvolvimento econômico, não apenas mediante a redução do custo de produção, mas também devido ao efeito multiplicador em várias indústrias minerais, de manufatura e do setor público.

A percepção das ferrovias como indutoras do crescimento pela redução do custo de transporte esteve presente em diversos trabalhos realizados no exterior, sendo dois de maior destaque. O primeiro, conforme Fogel (1964) estima que na ausência da infraestrutura ferroviária, o PIB dos Estados Unidos teria um valor de 10% a 20% inferior ao apresentado no final da década de 60. Em um estudo anterior para o Japão, Morisugi e Hayashiyama (1997), verificou-se também uma forte contribuição da provisão da infraestrutura ferroviária para o crescimento do PIB daquele País, no período de 1875 até 1940.

Durante e, principalmente, após a segunda guerra mundial, as ferrovias mundiais tiveram a necessidade de aumentar sua capacidade de transporte. Desde então, vários esforços de engenharia foram e estão sendo feitos para o aprimoramento do modo ferroviário de carga e de passageiros. O grande desafio é a identificação das ações necessárias para a capacitação da ferrovia de absorver o aumento de demanda de transporte de forma cada vez mais competitiva em relação a outros modos de transporte, principalmente com o rodoviário. As decisões de como capacitar a estrutura existente, ou qual deve ser a estrutura da ferrovia a ser construída, torna-se um desafio onde não existe espaço para tomada de decisão sem um embasamento técnico consistente. O incremento deve ser no aumento da quantidade de vagões e da capacidade de tração das locomotivas? Deve ser aumento da capacidade de cruzamento dos trens com a construção de mais pátios? Deve ser com um novo

sistema de licenciamento e circulação mais rápido, automático? Em quanto deve ser este investimento? Estes investimentos capacitam o sistema ferroviário para qual volume de carga e/ou de passageiros? Estes desafios levam a um esforço muito grande no sentido de identificar e quantificar com exatidão os elementos que se correlacionam definindo a capacidade de tráfego ferroviário (LANDEX, 2006).

O termo “capacidade de tráfego” expressa o número de operações de tráfego que é possível ser realizada em uma linha férrea, durante um período de tempo. Ela dependerá de vários fatores, tais como: infra e superestrutura, padrão construtivo e de manutenção da linha, tecnologia de licenciamento, característica do material rodante (locomotiva e vagões), do nível de regularidade de fluxo e heterogeneidade dos trens. Estas são condições de projeto, previsíveis e programadas (RIVES, 1983). Os eventos não programados interferem na operação e em sua maioria são tratados de forma empírica nas atuais metodologias de cálculo da “capacidade de tráfego”. Estes eventos não programados são intrínsecos à ferrovia, considerando que ela é composta por um grande e variado número de elementos que se correlacionam possibilitando o deslocamento do trem da origem ao destino de forma segura. Estes elementos, ao longo do tempo, passam por uma variação que levam a incertezas. Estas variações nos elementos ferroviários são decorrentes do desgaste natural ou provocado por condições adversas, tais como variações climáticas, composição construtiva dos elementos, apresentando anormalidade, aplicação de elementos ferroviários em estágios diferentes de desgastes, solicitação de carga ou de uso acima do originalmente previsto, uso inadequado e outros. Esta condição interfere no ciclo de manutenção programada gerando a manutenção corretiva não programada. Quando a variação ocorre passando do limite de tolerância, ocorre o acidente ferroviário, provocando impactos significativos no sistema ferroviário.

Para Dingle (2010), as ferrovias devem identificar sua capacidade de tráfego de forma real e se prepararem para novas oportunidades de aumento crescente de sua demanda de transporte. O cálculo da capacidade de tráfego em ferrovia é complexo e deve ser feita com critério considerando todos os parâmetros que envolvem sua operação.

1.1 Justificativa

Conforme o MINISTÉRIO DO TRANSPORTE (2012), a ferroviária brasileira tem uma projeção de expansão e reformulação de sua malha na ordem de 50%. Aumentando sua participação na matriz

de transporte de cargas e de passageiros em 40%. Para a mobilidade urbana este modo de transporte é contemplado nos principais projetos das 15 maiores cidades brasileiras, com aumento de 213 km de via férrea, atendendo a mais de 53 milhões de pessoas (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2012).

A FIGURA 1.1 mostra a matriz de transporte atual e futura. Apresenta o percentual de participação de cada modo de transporte em relação ao tempo, de 2005 a projeção para 2025. Indica a forte projeção de crescimento do modo de transporte ferroviário. Serão construídos cerca de 9.000 km de ferrovias de carga em bitola larga e cerca de 2.000 km em bitola métrica. Além dos projetos dos trens de alta velocidade entre Rio de Janeiro, São Paulo e Campinas (511 km) e entre Belo Horizonte, São Paulo e Curitiba (1.150 km), que serão construídos em bitola de 1,435 m (ANTT, 2012).

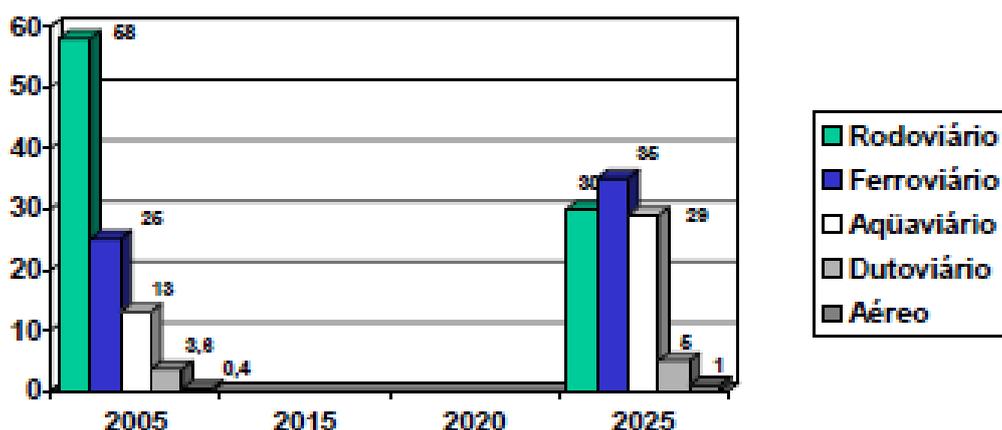


FIGURA 1.1 - Matriz de Transporte Atual e Futura. (FONTE - ANTT, 2012)

A FIGURA 1.2 mostra os projetos do PAC - Programa de Aceleração do Crescimento de expansão das ferrovias já em construção, indicando forte investimento no setor, são 6.766km: 1.728km da Transnordestina; 719km da ferrovia Norte Sul do trecho norte de Açailândia a Palmas; 1.022km do trecho de Ilhéus a Barreiras; 901km de Uruaçu a Lucas do Rio Verde; 260km da Ferronorte; 600km mais 1.536km Ferrovia Norte Sul trecho Sul.

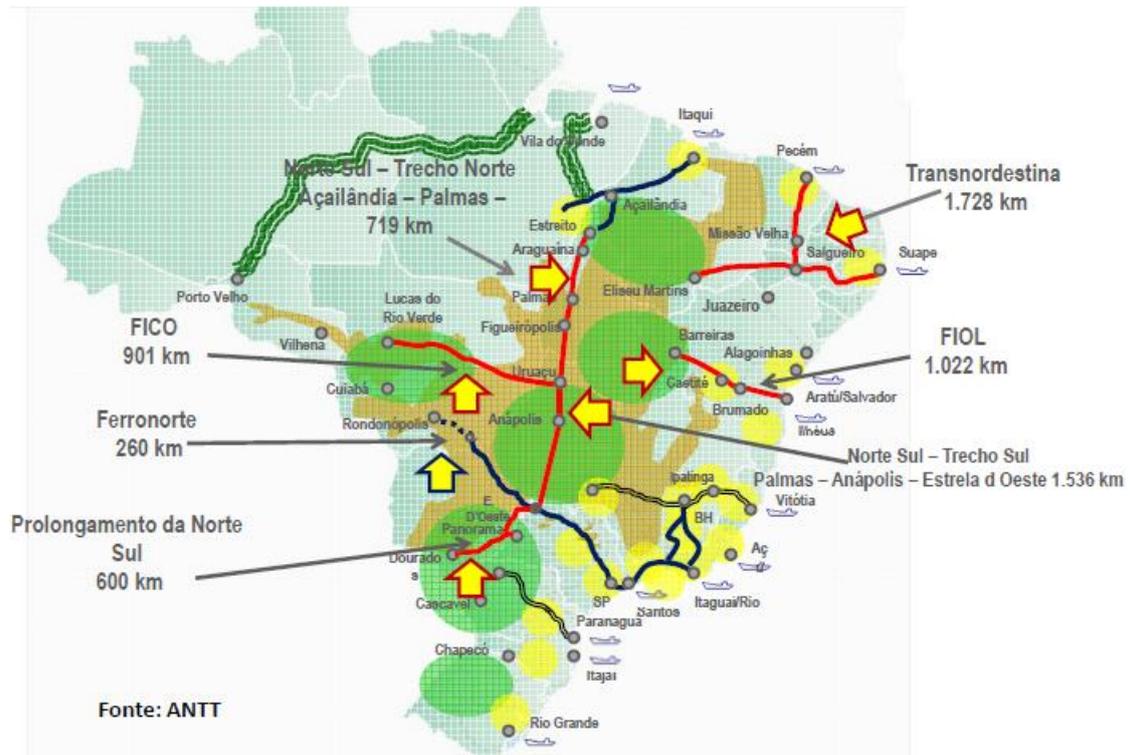


FIGURA 1.2 - PAC - Projeto de expansão ferroviária em construção (FONTE - ANTT, 2012)

Na FIGURA 1.3 são mostrados os trechos ferroviários em estudo, são 5.180 km de linha férrea em todas as regiões brasileiras.

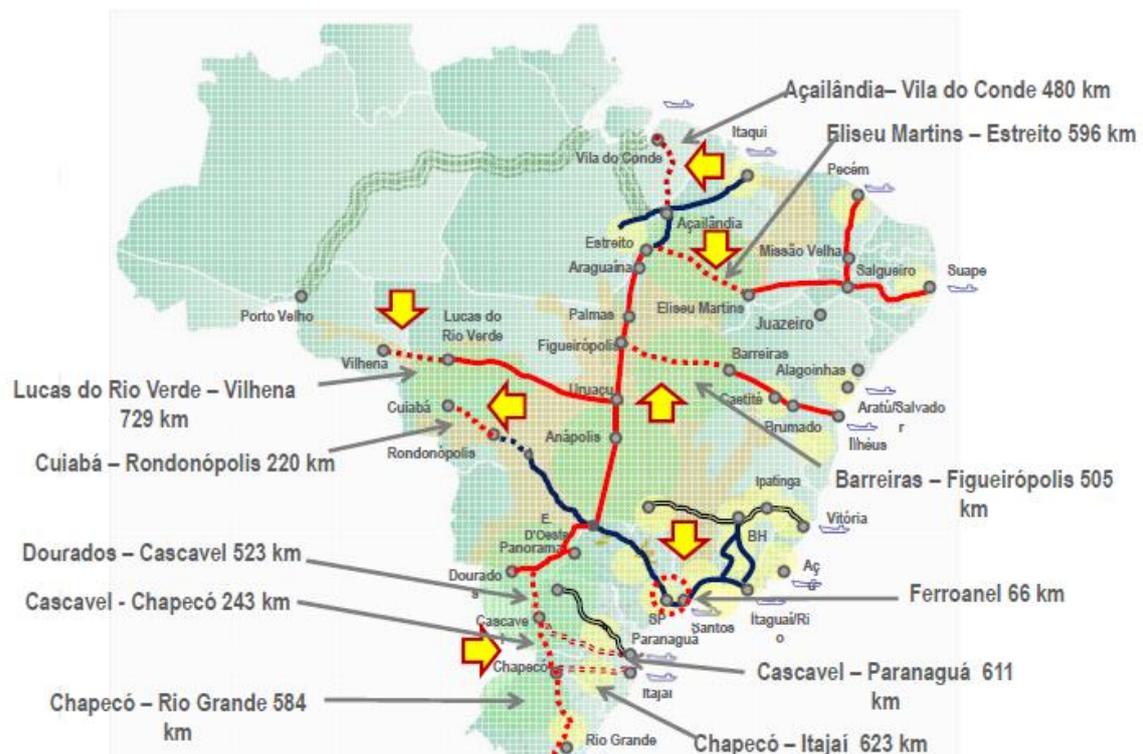


FIGURA 1.3 - PAC - Projetos de expansão em estudo- (FONTE - ANTT, 2012)

Com o novo marco regulatório ferroviário ANTT (2012), as concessionárias deverão ter conhecimento com exatidão de sua capacidade de tráfego, visto que o excedente será disponibilizado a outras operadoras ou clientes interessados através da ANTT, possibilitando melhor aproveitamento dos recursos instalados, fomentando o desenvolvimento. O cálculo sem precisão pode levar a uma condição de conflito entre a capacidade real e a calculada, expondo a ferrovia a multas e perda de receita.

É de muita relevância considerar que no Brasil existem vários projetos de revitalização e de expansão da malha ferroviária de carga e de passageiros e da importância do modo ferroviário na expectativa do desenvolvimento e na melhoria da qualidade de vida do Brasil para os próximos anos. O cálculo da capacidade de tráfego é básico e de suma importância, através deste cálculo se define a viabilidade econômica e estrutural da ferrovia. A utilização de método inadequado com a definição empírica de parâmetro pode significar a não realização de um projeto ferroviário ou até mesmo a definição incorreta de investimento para o aumento da capacidade de transporte. A utilização de método adequado representa o direcionamento correto dos recursos estruturais de via permanente, material rodante, sistema de licenciamento e controle, tanto para o planejamento de construção de novas ferrovias quanto para o conhecimento e aumento de capacidade de malha existente (PACHL, 2009).

Para o meio científico a relevância se faz em uma visão contemporânea da abordagem ferroviária com indicações de pontos impactantes até então não abordados com a atenção devida. Tendo como pressuposto básico as teorias que tratam das metodologias utilizadas para definição da capacidade de tráfego ferroviário nacional e internacional, constituindo-se, assim, em grande campo a ser explorado.

E, para a sociedade, é sempre muito importante a realização de pesquisa que possa trazer elemento de reflexão sobre sua qualidade de vida, tendo em vista a melhoria da avaliação a definição de investimento público e privado no processo de transporte ferroviário, permitindo abertura para as inovações. É ainda um caminho a se fazer, cheio de possibilidades que deveriam ser mais bem explorados na busca por uma infraestrutura de transporte mais eficiente e eficaz, atendendo prontamente as necessidades e características do país.

Todas essas questões fazem parte de um contexto onde os valores de investimentos são extremamente expressivos. Torna-se importante considerar que este tipo de investimento definido inadequadamente deflagra em consequências danosas para a empresa e inevitavelmente de impacto ambiental e social. É imprescindível reconhecer a importância de se repensar essas práticas, esses conhecimentos, tendo em vista o compromisso social de todo investimentos em transporte.

Nesta conjuntura, esta dissertação estabelece comparações sobre os atuais métodos analíticos de cálculo da capacidade de tráfego utilizados no Brasil e nos principais países onde o modo de transporte ferroviário é o mais utilizado identificando seus parâmetros e como são tratados. Destacando o parâmetro referente aos eventos operacionais e estruturais não programados de significativo impacto no cálculo de capacidade de tráfego.

Por se tratar de uma temática inovadora do modo ferroviário de transporte de carga e de passageiros, é indispensável e importante a abordagem deste trabalho pelas consequências e impactos econômicos e sociais decorrentes de parâmetros de cálculos utilizados inadequadamente. Como também, por levar a reflexão quanto à importância da escolha do método de cálculo da capacidade adequado, avaliando-o quanto a qualidade e amplitude dos parâmetros que o compõem.

Conforme Bardin (2012), a contemporaneidade demanda aceitar grandes desafios e se preparar para enfrentá-los, ela é marcada por mudanças profundas e vertiginosas que demandam reflexões e busca de novos caminhos para as tomadas de decisões. O desafio do método analítico de cálculo de capacidade de tráfego adequado é de garantir o conhecimento da real capacidade de tráfego de ferrovia em operação e de dar subsídios para os investimentos de aumento de capacidade e de novos projetos no modo de transporte ferroviário de carga e de passageiros.

1.2 Objetivo

Avaliar os principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego utilizados em ferrovia nacional, internacional e o tratamento dado aos eventos não programados, identificando o método de cálculo de capacidade de tráfego que em sua composição melhor trata os parâmetros ferroviários.

1.3 Objetivo Específico

- a) Fazer a revisão da literatura nacional e internacional sobre os métodos de cálculo de capacidade de tráfego;
- b) Levantar na literatura o método analítico utilizado no Brasil e nos principais países onde o modo de transporte ferroviário tem participação significativa na matriz de transporte;
- c) Categorizar os parâmetros destes métodos analíticos de cálculo pesquisados;
- d) Contextualizar os países destes métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego pesquisados;
- e) Definir critério de avaliação das categorias dos métodos;
- f) Analisar qualitativamente os métodos pesquisados identificando os parâmetros intervenientes no cálculo de capacidade de tráfego;
- g) Apresentar a tratativa dos métodos pesquisados aos eventos não programados ou indesejáveis;
- h) Indicar o método analítico de cálculo de capacidade de tráfego que em sua composição melhor trata os parâmetros ferroviários.

1.4 Estrutura da Dissertação

A apresentação do conteúdo do presente estudo segue a seguinte estrutura de capítulos:

- a) Capítulo 1 - Introdução: apresentam-se a influencia do modo ferroviário de transporte, as motivações do estudo, a justificativa, o objetivo geral e específico e a organização do conteúdo da dissertação;
- b) Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: são apresentadas as principais informações a respeito da definição de capacidade de tráfego e a contextualização do modo de transporte ferroviário nos diversos momentos, circunstancias e perspectivas, possibilitando entendimento da importância do cálculo de capacidade de tráfego ferroviário;
- c) Capítulo 3 – Metodologia: descreve o fluxo de ações para atender o propósito do trabalho. Definição das categorias e dos critérios de avaliação dos métodos.
- d) Capítulo 4 – Resultados e Discussões: apresentação sistematizada e avaliação criteriosa do método analítico utilizado no Brasil e nos principais países onde o modo ferroviário tem

significativa participação na matriz de transporte: Estados Unidos, Japão, Alemanha, UIC - União Internacional de Caminhos de Ferro, Inglaterra, Espanha, Itália, Rússia e Canadá.

- e) Capítulo 5 – Conclusões e Recomendações – apresenta o conteúdo da dissertação de forma sumária, interpretação dos resultados, indicação do tratamento aos eventos não programados e do método que melhor aborda as categorias propostas. As conclusões do estudo como um todo. Apresenta recomendações de pesquisas futuras decorrentes deste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

É importante considerar que a pesquisa bibliográfica é a atividade de localização e consulta de fontes diversas de informação escrita, para coletar dados gerais ou específicos a respeito de determinado tema. Essa busca por informações em publicações precisa ser elaborada, possibilitando o estabelecimento de relações entre os elementos constitutivos do tema de estudo, para que ele possa ser mais bem compreendido. (ALMEIDA JÚNIOR, 2008).

A revisão da literatura inicia-se com a contextualização do modo ferroviário de transporte e segue com o referencial teórico de capacidade de tráfego ferroviário.

2.1 Contextualizando o modo ferroviário de transporte

É importante contextualizar o modo de transporte ferroviário nos diversos momentos, circunstâncias e perspectivas, possibilitando entendimento da importância do cálculo de capacidade de tráfego.

A ferrovia desempenhou e vem desempenhando forte contribuição no desenvolvimento dos países. Ela teve importante contribuição do desenvolvimento econômico de grande parte das nações no século XIX. Influenciou a vida econômica e social e sobre os demais modos anteriores existentes de transporte. Estimulou as viagens de passageiros, aumentando a mobilidade da população, alavancando as viagens de negócio e influenciando o crescimento de cidades. Proporcionou uma significativa expansão da movimentação de cargas ao oferecer um transporte de menor custo (SAVAGE, 1959).

Locklin (1954) fornece vários exemplos históricos econômicos dos Estados Unidos com a introdução da ferrovia. Os produtos americanos, principalmente os grãos, na década de vinte, obtiveram uma redução de custo de exportação para a Europa e, principalmente para a Inglaterra de 40% a 50%.

Fogel (1964) destaca que as ferrovias assumem importância particular dentro do desenvolvimento de vários países, pela função de expansão demográfica regional. Muitos países tiveram nas ferrovias seu maior estímulo ao desenvolvimento.

Segundo Lardner (1968), as ferrovias tiveram grande impacto na expansão agrícola e industrial nos Estados Unidos. Ela propiciou inicialmente a ocupação agrícola, depois a expansão da pecuária e, em seguida, o avanço das indústrias.

Na Europa, conforme Fair e Willian (1959) e Lardner (1968), a ferrovia propiciou o desenvolvimento dos países viabilizando explorações e produções de matérias primas, industriais e agrícolas com melhora constante da prestação de serviços e do intercambio comercial.

Na Rússia Tzarista, segundo Metzger (1974), a expansão das ferrovias ocupou um importante papel na política de desenvolvimento no final do século XIX, quando se pretendia colocar o país numa rota de modernização e industrialização, partindo de um estado pré-industrial. Pelas ferrovias foi possível a integralização dos mercados. No caso da comercialização de produtos agrícolas em si, o desenvolvimento de um mercado nacional é visto como um indicador de modernização. Ele concluiu que a redução nos custos de transporte proporcionada pelas ferrovias e os recursos investidos na construção, tiveram um impacto decisivo na qualidade do comércio inter-regional na Rússia Europeia. Tiveram ainda um importante papel na melhoria dos termos de comércio, quando forçaram a queda nos diferenciais de preços dos grãos, trigo e centeio entre as regiões. Metzger estimou que 83% do declínio no diferencial dos preços foi resultante das variações nos custos de transporte. O efeito líquido desse processo foi maior especialização regional da produção agrícola na Rússia e a apresentação das ferrovias como uma nova oportunidade para investimentos.

No Brasil as ferrovias começaram a ser implantadas no período de 1840. Conforme Ducan (1932), o método utilizado pelo governo foi o subsídio ao capital privado, na forma de garantia de retorno sobre o capital investido. Nos primeiros anos, a construção de ferrovia ligando o litoral ao interior do país, teve seu investimento comprometido devido à instabilidade econômica vivida pelo país, agravados pela escassez de carvão, isto levou ao desinteresse do capital estrangeiro. Em 1854 entrou em operação a primeira ferrovia que ligava Estrela, na baía do Rio de Janeiro, às montanhas, com 14 km de extensão. Ele indica que novas construções só voltariam a acontecer após a metade da década de 1870, através da aplicação de capital pela Inglaterra. Este período sem investimento foi motivado pela entrada da Inglaterra em guerra com a Criméia, provocando problema de liquidez no mercado monetário de Londres e, posteriormente, com a entrada do Brasil em conflito armado com o Paraguai.

Para Castro e Lamy (1994), o crescimento das ferrovias no Brasil se tornou mais fortes quando em 1891 o estado decidiu afastar-se totalmente da atividade ferroviária. Ocorreu um expressivo crescimento da malha ferroviária porém sem critério de alcance macroeconômico. Outro ponto também a ser destacado foi a heterogeneidade técnica e de eficiência, a exemplo das diferenças de bitola das ferrovias. No início do século XX, o estado procurou resolver os problemas causados pela disseminação de linhas de pequena extensão e com grandes diversidades técnicas através de um intenso processo de nacionalização das ferrovias. A partir deste momento e até os anos de 1930, as ferrovias se consolidaram como o modo de transporte mais utilizado no país, proporcionando a inserção internacional do país pela expansão do café para áreas distantes (COSTA, 1966).

Para Marques (1996), as ferrovias podem ser um dos mais importantes modos de transporte terrestre se lhes forem permitidas suas próprias metas e o exercício de suas funções específicas, ou seja, sem a interferência do poder concedente. Pois continuam a ser o meio mais eficiente de realizar movimentos densos de mercadorias e de pessoas. Dependendo do vulto, localização e recursos de uma região, elas podem ser essenciais para deslocar grandes volumes de mercadorias básicas ou para movimentar contêineres em uma cadeia logística internacional; já que as tendências econômicas e técnicas recentes, como elevados preços de energia, avanços técnicos no manuseio e nas operações em terminais e fluxos de carga a granel, desviam na margem as vantagens econômicas a favor das ferrovias.

Para Ângelo (1991), o que levou ao abandono do modo de transporte ferroviário no Brasil, num passado ainda recente, foi o fato da implantação de uma ferrovia ser significativamente mais cara que a de uma rodovia nas várias alternativas imagináveis. Exigir mais tempo de construção, más principalmente a condição que ela ter sido direcionada para atender às necessidades da economia exportadora, com linhas dirigidas do interior aos portos regionais, revelando-se inadequada para servir à nova ordem econômica voltada para o mercado interno. Desta forma as rodovias foram beneficiadas, suportando um processo de industrialização intenso que passou o Brasil.

Para Fleury (2000), com gastos equivalentes a 10% do PIB, o transporte brasileiro possui uma dependência exagerada do modo rodoviário, o segundo mais caro, atrás apenas do aéreo. Enquanto no Brasil o transporte rodoviário é responsável por 58% da carga transportada (em toneladas/km), na Austrália, EUA e China os números são 30%, 28% e 19%, respectivamente. Considerando os

padrões norte-americanos, onde o custo do transporte rodoviário é três vezes e meia maior que o ferroviário, percebe-se o potencial para redução de custos se a participação do rodoviário vier a seguir os padrões internacionais. Abrindo espaço para o crescimento de modos mais baratos. Considerando-se apenas as oportunidades de migração do rodoviário para o ferroviário, pode-se estimar uma economia de mais de US\$ 1 bilhão por ano. Os longos anos de estatização dos portos e ferrovias no Brasil, assim como os subsídios implícitos que existiam no passado e que ainda perduram, com menor ênfase, para o modo rodoviário, tais como: subsídio ao diesel, a quase inexistência de pedágios e a falta de regulamentos adequados sobre condições de trabalho dos motoristas, explicam em grande parte as distorções da matriz brasileira de transportes e as enormes ineficiências ainda hoje observadas. Até o início do processo de privatização, as ferrovias brasileiras apresentavam desempenho lamentável. Enquanto a produtividade média nas ferrovias norte-americanas, medida por toneladas-km por empregado, é de 8 milhões, na antiga Rede Ferroviária Federal o valor era de 1 milhão e na Ferroviária Paulista SA de 500 mil. A baixa produtividade se reflete em custos maiores para os usuários das ferrovias no Brasil. Enquanto aqui o preço médio é de US\$ 23,00 por 1.000 toneladas-km, nos EUA é de apenas US\$ 16,25. Isto, apesar das enormes diferenças na qualidade de serviços, representados por alta disponibilidade, entrega rápida e confiabilidade de prazos que se observa nos EUA. O processo de privatização das ferrovias criam enormes oportunidades para aumento de produtividade, redução de custos e melhoria de serviços. Embora muito recente, os resultados destas mudanças já começam a aparecer. No caso da primeira ferrovia privatizada, o tempo médio de viagem na principal rota foi reduzido de 11 para 6 dias; o nível de utilização das locomotivas subiu de 37% para 65%; o número de empregados foi reduzido de 1.800 para 900. Como consequência, os preços já sofreram reduções médias entre 15% e 20%.

Segundo Caixeta-Filho e Martins *et al.* (2001), o setor ferroviário brasileiro se desenvolveu em três etapas ou ciclos. O primeiro teria ocorrido entre 1852 e 1900, quando as primeiras estradas de ferro foram financiadas, principalmente, por capital privado inglês, mediante concessões do governo brasileiro, que garantia taxas atraentes de retorno de capital. Entre 1901 e 1979 o segundo ciclo caracterizou-se pelo processo de nacionalização das ferrovias, na tentativa de sanear as dívidas do setor, já que as empresas privadas tinham parado de investir na malha. As novas implantações passaram a ser financiadas por empréstimos estrangeiros garantidos pelo Tesouro. Em 1929, o Estado era dono de 67% das companhias ferroviárias brasileiras e responsáveis pela administração

de 41% da rede. Este ciclo teve como marco a criação da Rede Ferroviária Federal S. A. (RFFSA) pela Lei nº 3.115 de 1957 e da Ferrovia Paulista S.A. (FEPASA) pela Lei Estadual nº 10.410 de 1971. O terceiro ciclo, começado no final do século XX, caracterizou-se pela devolução das ferrovias para as mãos das empresas privadas. A Lei nº 8.031/90 e suas alterações posteriores instituíram o Programa Nacional de Desestatização (PND), composto por dois principais agentes: o Conselho Nacional de Desestatização (CND), órgão decisório, e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), na qualidade de gestor do Fundo Nacional de Desestatização (FND).

Para Lacerda (2002), no Brasil pós as concessões, as operadoras ferroviárias passaram a ter obrigações quanto ao cumprimento de metas de produção, de investimentos e também quanto à redução do número de acidentes. As malhas regionais criadas pelo processo de concessão começaram a serem comparadas em termos de regularidade, segurança, produção e gestão com as ferrovias privatizadas, o que forneceu um critério de avaliação de seus desempenhos. O transporte ferroviário obtém 99,9% de sua receita total diretamente da operação (CASTRO, 2002).

Rodrigues (2004) e Freitas *et al.* (2004) indicam muitas conveniências para a utilização do modo de transporte ferroviário no Brasil, como adequado para longas distâncias e grande quantidade e volume de cargas, crescimento econômico do país voltado para exportações, produção agrícola interiorizada, baixo custo no trajeto, baixo consumo energético, provê estoques em trânsito e outros vários benefícios.

Faria e Costa (2005), define o transporte ferroviário como mais apropriado para grandes massas, e pouco eficiente e muito oneroso para deslocamento de pequenas quantidades. Geralmente, é um transporte com baixas velocidades utilizado para itens de baixo valor agregado, mas com grandes volumes de movimentação e para longas distancias. Conforme Bellen (2005), o indicador de desempenho operacional reflete as características mensuráveis do processo operacional utilizada pela organização e serve para avaliar e melhora o desempenho.

Conforme Lang (2007), ocorreu um aumento expressivo dos investimentos nas ferrovias após as privatizações, devido à entrada de capital privado no setor, que permitiu o desenvolvimento da malha nacional e aumentou o volume de produção de diversas empresas.

A ferrovia brasileira tem um panorama futuro agressivo para 2015, conforme a ANTF (2008). O transporte alcançará 972,75 milhões de toneladas úteis transportadas (TU), aumento de 2 vezes e meia o transporte de 2006 que foi de 389,1 milhões de TU. Devido as suas proporções e dimensões territoriais o Brasil tem na ferrovia um modo adequado de transporte, sejam pelas distâncias, pelas características das cargas de exportação, ou ainda pela eficiência energética e pelo baixo índice de acidentes e furtos (ANTT, 2007). O crescimento do transporte ferroviário vem acompanhando o crescimento do PIB do país chegando a uma correlação de 0,9032 (MARQUES, 1996).

A ferrovia está cada vez mais se consolidando como uma opção altamente viável no transporte de carga de grande volume em longa distancia. Isto é uma realidade mundial e nos últimos anos no Brasil, com a privatização da Rede Ferroviária Federal, o sistema ferroviário tem recebido forte investimento (VILAÇA, 2012).

2.2 Referencial teórico de capacidade de tráfego ferroviário

Para a construção do referencial teórico desta pesquisa, é importante considerar as teorias da avaliação da capacidade de tráfego ferroviário por meio de modelos analíticos que são os amplamente utilizados. Estes trabalhos apresentados a seguir são os principais a respeito da definição da capacidade de tráfego.

Os primeiros passos buscando uma metodologia de cálculo de capacidade de tráfego que obtivesse resultados mais refinados, com um tratamento matemático para os parâmetros ferroviários, foram iniciados com Frank (1965). Ele dá um tratamento matemático para o tráfego em mão dupla numa linha singela, abordando a capacidade de tráfego, o ciclo dos trens e o número de composições necessárias para efetuar o transporte num sistema de tráfego regular. Em seguida, Dreyfus (1977) apresenta alguns métodos de programação dinâmica para alocação de uma ou mais variáveis de modo a obter-se o maior aproveitamento da capacidade nas ferrovias.

Rives *et al.*(1977), define capacidade de tráfego como o número máximo de circulações que podem ocorrer em um intervalo determinado de tempo em ambos os sentidos da linha, sob determinadas condições de operação. Para ele, capacidade de transporte de uma linha é definida como tonelada máxima de mercadorias e de passageiros que se transporta em ambos os sentidos da linha, em um intervalo de tempo determinado para certas condições vinculadas à capacidade de tráfego. Estas

duas condições estão relacionadas entre si e com o tipo de tração, a carga máxima dos trens compatíveis com as características da via permanente, engenharia das obras de arte (pontes, viadutos e túneis) e material rodante. Para a definição da capacidade de uma linha devem ser consideradas as condições divididas em cinco grupos, sendo referentes ao meio ambiente, as condições físicas da linha, as características do material rodante, do nível de regularidade ou tabela de horário e da gestão operacional. A capacidade teórica considerando os grupos citados anteriormente em condições ideais, ou seja, a condição ambiental excelente, as condições físicas da linha, as condições das locomotivas e vagões atendendo perfeitamente. Por fim a tabela de horário sendo cumprida rigorosamente. Estas condições na prática não existem de onde vem o cálculo da capacidade de tráfego real. Ela é definida considerando as condições não ideais e compatíveis com a realidade da ferrovia em estudo. Neste cálculo, o resultado é influenciado também pelo processo normativo de circulação dos trens, dos tempos mortos de circulação por falta ou irregularidade de trens, das velocidades irregulares ou heterogeneidade dos tipos de trens, dos tempos destinados para a manutenção de via permanente e instalações, pelos tempos inerentes a perda de rendimento por avarias ou qualquer outro tipo de interferência não programada. Eles tratam capacidade econômica global como sendo a capacidade que melhor equilibra seus recursos. Ela é a resultante da integração dos parâmetros parciais de capacidade: da via, das estações, das instalações e da capacidade do material rodante. Ressalta a importância do grau de utilização que é o coeficiente que expressa a relação entre o nível de circulação real que a linha apresenta em um determinado período de tempo e o nível de capacidade real dela. Eles alertam que não existe uma teoria exata e nem matemática sobre o grau de utilização, o que existe é a indicação de valores baseados em experiência que vem sendo avaliados na prática e são divididos em três níveis: intervalo ótimo da capacidade da linha no ponto de vista de fluidez de circulação, de 30% a 60% de grau de utilização para intervalo de tempo igual ou superior a 24 horas; valores entre 60% a 75% representa grau médio de utilização e é o mais conveniente no ponto de vista econômico; grau de utilização acima de 75% em período igual ou superior a 24 horas indica zona elevada de densidade, sugerindo necessidade de intervenção para ações de aumento de capacidade diminuindo o grau de utilização. Utilizaram as mesmas duas variáveis que indicou o grau de utilização para identificar a capacidade residual, que ele definiu como sendo a capacidade real calculada menos o número real de trens que circulam no trecho crítico.

Para Hay (1982), o desenvolvimento de modelos analíticos, capazes de expressar com precisão o equilíbrio entre as forças envolvidas no processo de movimentação de trens, mostra que as

expressões matemáticas são difíceis de serem determinadas devido à complexidade do sistema. As expressões derivadas de formulações empíricas obtidas em campo e através de observações em laboratório mostram-se mais adequadas para representar o movimento do trem na via.

Morlok (1978) descreve os tipos de resistência ao movimento dos trens associados aos modelos de locomoção de veículos ferroviários, que somados resultam na resistência total. A parcela associada ao peso e atrito entre os componentes mecânicos (eixos e mancais) dos veículos é denominada resistência inerente ao movimento, a relativa à declividade da via é denominada força de rampa, sendo usado esse termo por ser ora favorável ao movimento, ora contrário a ele, e a força associada à pressão do ar exercida sobre o veículo em movimento é caracterizada como resistência aerodinâmica. Estas resistências interferem na velocidade dos trens e, conseqüentemente, no tempo de deslocamento e na capacidade de tráfego da ferrovia.

Segundo Assad (1980), os modelos de capacidade permitem analisar o movimento dos trens na linha, identificar os trechos que restringem o aumento do número de composições ferroviárias que circulam no sistema e avaliar os atrasos decorrentes do cruzamento entre trens com velocidades distintas que circulam em sentidos opostos. Os modelos de simulação descrevem o movimento dos trens do modo mais realista, através da criação de entidades que circulam em um sistema que se aproxima do real do trem. Assim, são estabelecidos os itinerários e a série de decisões que representam as políticas de movimentação nas linhas e estações, incluindo-se nos dados de saída informações sobre os custos de operação (movimentação e classificação dos trens) e os tempos de movimentação. Com isto o usuário é capaz de refletir sobre a política de decisão a ser adotada no sistema e buscar uma solução razoável para o problema, dentre várias alternativas disponibilizadas pela execução de repetidas simulações, ou definir o modelo mais próximo da realidade, utilizado para validar uma tabela de horários.

Cavalcante (1981) apresenta metodologia para escolha dos pátios de cruzamento a serem ampliados numa linha férrea singela, propiciando aumento na capacidade de transporte atendendo uma demanda prevista. Primeiramente fez a análise da capacidade da linha com a variação no comprimento dos trens, identificando a composição do tráfego que deve circular a fim de se obter a capacidade de transporte máxima, considerando a configuração atual dos desvios de cruzamento. Para o cálculo da capacidade da linha ou de tráfego, identificou que ele é determinado pelas características da via permanente (rampas, curvas, pátios, etc.), pelo sistema de sinalização e

licenciamento, pelo material rodante (locomotivas e vagões) e pelo gerenciamento. Indicou a necessidade considerar que a capacidade do sistema não é igual à somatória das capacidades individuais, deve haver compatibilidade entre elas. O primeiro passo foi identificar a capacidade teórica do sistema através de um gráfico teórico de espaço-tempo. A este resultado inseriu os tempos de licenciamento e o fator de rendimento ou taxa de utilização da linha. Este fator é gerado pela multiplicação do fator de disponibilidade e pelo fator de utilização da disponibilidade. Identificou que estes fatores são empíricos e variáveis em função de cada ferrovia.

Segundo Petersen e Taylor (1982), os modelos analíticos utilizam expressões algébricas para resolver, por exemplo, questões sobre a mecânica de locomoção das composições ferroviárias e a circulação de trens de diferentes tipos, com prioridades distintas, em função de suas características operacionais e da configuração da via ferroviária. Eles apresentam como limitação dos modelos de simulação o fato de, em geral, apresentarem uma estrutura pouco flexível, muitas vezes aplicável a ferrovias específicas, com necessidade de grande quantidade de dados para produzir resultados satisfatórios, e apresentarem restrições ao tratamento de dados em sistemas com intenso volume de tráfego. Para eles, os modelos de otimização tratam do problema de alocação dos trens na via com vistas a melhorar alguma medida de desempenho do sistema, como maximizar o volume de tráfego, minimizar o atraso total e outros. Conceito amplamente utilizado em modelos associados à definição dos horários dos trens (modelos de *Scheduling*).

Janic (1984) desenvolveu um modelo probabilístico para determinar a capacidade máxima de uma linha singela, considerando: trecho com múltiplas estações, características geométricas de via permanente, circulação de trens e as regras de controle do tráfego; comprimento entre as seções das estações; dos tipos, velocidades e regras de separação dos trens; da distribuição do tráfego nas duas direções. O modelo fornece a capacidade teórica da linha e a probabilidade que dois trens terão de se cruzar, independentemente do sentido em que circulam. Foi evidenciada a importância da velocidade como elemento fundamental e de sua capacidade de interferir no resultado. Em suma, ele propõe um modelo que considera a probabilidade de cruzamento entre dois trens, correlacionam as características geométricas com as condições de tráfego e regras de circulação.

Nos modelos de capacidade, os valores de velocidade nos trechos da rede ferroviária são geralmente calculados por meio de um simulador de desempenho do trem – *Train Performance Calculator* (TPC), Ramsey *et al* (1986) utilizou este princípio em seu modelo computacional de análise de

capacidade e também foi o caso de Smith *et al* (1998) em seu modelo de avaliação de desempenho ferroviário. O TPC apresenta a trajetória do trem no espaço e no tempo, possibilitando o uso de paradas na simulação e calculando diretamente considerando as características do trem tipo circulando pela linha férrea.

Brina (1988) define por capacidade de tráfego ou vazão de um trecho ferroviário, o número de trens que poderão circular num determinado intervalo de tempo. Ele indica duas possibilidades de cálculo, sendo uma através do gráfico real de circulação dos trens, lançando nele uma sequência de trens de acordo com o horário formulado para cada um, estabelecendo um limite de capacidade. A capacidade pode também ser calculada analiticamente. Em ambos deve ser sempre respeitado o intervalo de espaço de licenciamento entre os trens. Para o cálculo analítico de capacidade de tráfego, ele indica a necessidade de uso de um fator que diferencia as ferrovias conforme sua eficiência, variando de 60% a 80%, denominado de “K”. Para ele, os fatores estruturais da via férrea são relevantes na análise de um sistema e a velocidade dos trens nas seções entre estações constituem um elemento fundamental na definição da capacidade de tráfego. De certa forma a velocidade, a estrutura da via e material rodante estão fortemente interligado. Para Brina, os métodos analíticos que envolvem a circulação de trens periódicos, a capacidade de uma estação (nó) pode ser calculada de maneira simplificada, levando em consideração as distâncias entre pontos de paradas, as velocidades nas seções entre as estações e os atrasos decorrentes dos cruzamentos entre trens sentidos opostos. Considera que a capacidade utilizada da linha é igual ao intervalo de tempo definido de análise, normalmente são utilizadas 24 horas, dividido pela somatória dos tempos entre desvios ou pátios de manobra consecutivos e a estes se soma os atrasos totais dos trens em função dos cruzamentos e ultrapassagens. Para ele, as fórmulas para cálculo da capacidade são aproximadas e que uma maneira mais adequada para obtenção do número de trens em uma linha é através do diagrama espaço-tempo. Acrescentando-se o máximo de trens possíveis em um período de tempo de 24 horas, cumprindo-se as regras operacionais de tráfego pré-estabelecidas. Ele apresenta o método de Colson para o cálculo da capacidade de tráfego por um período de tempo determinado e da capacidade de transporte pela programação e característica dos trens. Por fim, indica que a capacidade de tráfego de uma ferrovia pode ser aumentada, aumentando-se a velocidade dos trens e/ou diminuindo a distância entre os pátios de cruzamento/ultrapassagens, neste caso estará sendo diminuindo o comprimento dos trechos. Estas distâncias devem ser o mais iguais entre si, possibilitando o mesmo tempo de percurso. Nos casos onde o trecho tenha uma inclinação de rampa ascendente acentuada, esta distância deve ser menor, compensando a menor

velocidade provocada e maior tempo de percurso. Vale ressaltar que além do mencionado pelo Brina, deve ser considerada a heterogeneidade do tipo de trens que também implica em diferença de velocidade e tempos diferentes de percurso.

França (1991) conceitua a capacidade em: teórica máxima, prática e econômica. A capacidade teórica máxima como sendo o número máximo de trens que pode circular durante um determinado intervalo de tempo, em ambos os sentidos de uma linha, em condições ideais climáticas e de visibilidade excelente; ausência de avarias ou interrupções da circulação de trens com regularidade de tráfego ótimo; utilização da linha pelo número ótimo de trens, no intervalo considerado; trens formados pelo número ótimo de locomotivas e vagões; carregamento ótimo de vagões; condução ótima dos trens em marcha e em frenagem; máxima disponibilidade da linha ao tráfego. A capacidade é definida como sendo o período de tempo em estudo dividido pelo *headway*. Ela deve ser calculada sobre o trecho de maior *headway*, que é considerado trecho crítico. A capacidade prática diferencia da teórica na consideração dos intervalos de tempo concedido para a realização de serviços de manutenção de via permanente, o tempo de licenciamento e os tempos correspondentes às irregularidades nos horários dos trens e problemas operacionais. A capacidade econômica que corresponde a melhor opção econômica para a empresa, é um determinado nível de congestionamento do tráfego para a qual o custo unitário de transporte é mínimo. Ele pode ser medido por cada um dos fatores perturbadores da circulação de trens, tais como: cruzamentos, ocupação das seções de bloqueio ou trechos de circulação, intervenção da linha para manutenção da via permanente, acidentes de trens, problemas na linha, problemas na condução dos trens, ineficiência na execução de manobras, cargas e descargas nos terminais, inspeções, abastecimento de locomotivas, indisponibilidade de equipamentos e outros eventos.

Vidal (1991) apresenta um procedimento de escolha de alternativas de investimentos para o aumento de capacidade de transporte de um sistema ferroviário em linha singela que, a partir do estudo da influência do congestionamento de trens na circulação e de critérios econômicos, que indicarão: quando investir e em que investir: se em frota (material rodante: locomotivas e vagões) e/ou em instalações fixas (via permanente, pátios e terminais) e/ou no sistema operacional (sistema de sinalização e licenciamento). Ele conceitua a capacidade de tráfego ou vazão de uma linha como sendo o número máximo de trens que pode trafegar durante um determinado intervalo de tempo, em ambos os sentidos de circulação, em determinadas condições de serviço. O conceito de capacidade deve sempre se referir às condições existentes: ambientais e físicas que determinam os parâmetros

da linha que são a engenharia civil e as características de traçado, das rampas, estruturas da via, sinalização e outros elementos. Devem ser consideradas as condições do material rodante (sistema de amortecimento, centro de gravidade, capacidade carga por eixo, etc.) e de tração (aderência, centro de gravidade, força tratora, etc.); as condições operacionais que podem ser variáveis no tempo como a velocidade, a diferença de velocidade entre tipos diferentes de trens, a segurança da operação ou a incidência de acidentes operacionais, entre outros. Outra condição é o nível de regularidade obtido com o método de exploração empregado. Vidal define a capacidade de tráfego analiticamente e a divide em capacidade teórica, prática e econômica. A capacidade teórica é calculada considerando as condições acima mencionadas em “condições ideais”, favoráveis em excelência. A probabilidade de se atingir a capacidade teórica máxima é função inversa do período de tempo considerado. Para o cálculo, deve ser considerada a seção de bloqueio de menor capacidade (trecho crítico), que corresponde a de maior *headway*, são identificadas como seção ou trecho crítico ou gargalo, e determinam a capacidade de toda a linha (máxima vazão da linha). Para o cálculo da capacidade prática, são considerados os intervalos de tempo para a realização de serviços de manutenção da via permanente, o tempo de licenciamento dos trens em cruzamento e ultrapassagens, as irregularidades nos horários dos trens, dos intervalos para manutenção da via, dos tempos de licenciamento. Estas irregularidades são representadas por um fator de rentabilidade operacional ou taxa de utilização da linha “k” que tem a variação entre 60% a 80%. A capacidade econômica é definida como sendo o número de trens por dia que origina o menor custo por tku (tonelada por quilometro útil) produzida, para uma dada configuração de operação, estruturas fixas, sinalização e licenciamento, via permanente, material rodante e outros da linha em estudo. Ela corresponde a um determinado nível de congestionamento do tráfego para o qual o custo unitário de transporte é mínimo.

Para Amaral (1991), apresenta uma forte relação entre a capacidade de tráfego, a operação e a manutenção. Seu propósito é de identificar um método que auxilie na decisão de como e quando conceder faixas de interrupção de tráfego para manutenção visando o equilíbrio entre ela e a operação minimizando o impacto na capacidade de tráfego. Para tanto ele indicou os métodos de capacidade de tráfego utilizados nos Estados Unidos pela AAR, na Itália pela FS, no Japão, no Canadá pelo Elbrond e na Espanha pela RENFE. Trata a capacidade de uma linha como capacidade técnica real, e a diferencia da teórica por adotar condições máximas reais, em substituição às condições ideais. Através do grau de utilização, que é o percentual que mede o nível de circulação real em relação à capacidade máxima, se prevê problemas futuros em função do aumento da

circulação. Considera a condição ideal de fluidez de tráfego entre 30% e 60%. Para o grau de utilização entre 60% e 75% oferece grau ótimo em termos econômicos, em função da plena utilização da linha caracterizando picos de utilização que merecem atenção a médio e longo prazo caso a demanda estiver crescente. Para o grau de utilização acima de 75%, indica saturação do sistema indicando a necessidade de medidas para aumento da capacidade, conseqüentemente diminuindo o grau de utilização. Para a análise de saturação de uma linha ele usa o conceito de trecho crítico (RIVES, 1982) que é o trecho de menor capacidade e quando ele estiver constantemente ocupado, a capacidade de tráfego é considerada ótima.

Para Nijkamp *et al.* (1993 apud ISLER, 2010), o aumento da capacidade de um sistema de transporte, seja qual for a sua natureza – rodoviário, ferroviário e/ou hidroviário – não está intrinsecamente relacionado à expansão de sua estrutura física, uma vez que as políticas de intervenção e as decisões humanas envolvidas nos processos também influenciam o seu desempenho. A solução para os problemas dessa natureza é resultado da combinação do uso eficiente da infraestrutura disponível e de métodos adequados de gerenciamento.

De acordo com Carey & Lockwood (1995), o despacho de trens está relacionado ao problema de alocar trens para linhas disponíveis em uma rede ferroviária. De modo a minimizar o seu atraso e custos decorrentes, satisfazer a demanda e garantir que todos os trens nas linhas e nas estações satisfaçam às condições de segurança atendendo ao espaçamento (*headway*) necessário entre eles.

Nos modelos de capacidade, os valores de velocidade nos arcos da rede são geralmente calculados por meio de um simulador de desempenho do trem, conhecido como *Train Performance Calculator* (TPC). É o caso do modelo computacional de análise de capacidade de Ramsey *et al.* (1986) e do modelo de avaliação de desempenho ferroviário de Smith *et al.* (1997), entre outros. O TPC exhibe a trajetória do trem no espaço e no tempo, permitindo o uso de paradas na simulação e calculando diretamente, a partir das características do trem e da geometria da via, o tempo mínimo de percurso e o consumo de combustível de um trem tipo circulando pela linha.

Homer (1999), afirma que a capacidade de uma linha férrea pode ser avaliada segundo os atrasos dos trens, sobre diferentes regras operacionais. Estes atrasos são devidos a vários eventos.

Conforme Krueger (1999), dependendo do contexto em que está inserido, o termo “capacidade” pode ser entendido de várias maneiras, uma vez que possui diferentes significados e aplicações. Para ele o termo capacidade é o máximo volume (trens diários) que pode ser movimentado em uma linha segundo um plano de operação, de horários e atividades (de tráfego e operacional) sem, no entanto, desrespeitar restrições preestabelecidas e sem exceder aos limites específicos. Na operação ferroviária, vários são os fatores que interferem na capacidade do sistema. Krueger desenvolveu um modelo paramétrico de capacidade para planejamento ferroviário capaz de preencher a lacuna existente entre as formulas empíricas e os modelos de simulação existentes. Estes parâmetros são subdivididos em parâmetros de geometria, tráfego e de operação. Ele apresenta fórmulas que quantificam os fatores que afetam a capacidade de um trecho ferroviário identificando os gargalos para aplicação de investimentos para o aumento do volume de tráfego. Por analisar a rede ferroviária como um conjunto de seções em linha singela, dotadas de trechos em linha dupla (pátios de cruzamentos e ultrapassagem de trens), o modelo não considera a relação entre os trechos interconectados entre si e a interferência dos horários dos trens que se cruzam nos pátios. A fórmula mais conhecida e citada por Krueger para cálculo de capacidade de malhas ferroviárias em linha singela deve-se a Colson, um matemático belga que dedicou seu trabalho ao estudo de ferrovias.

Para Shain (1999), as principais técnicas usadas para tratamento dos problemas de cálculo da capacidade de ferrovia estão entendidas como simulação.

Para Pereira (2000), eficiência é definida como a capacidade do sistema em utilizar racionalmente os recursos financeiros e humanos enquanto eficácia é a medida do grau de satisfação que um sistema de transporte proporciona no atendimento mediante aos objetivos estabelecidos para o sistema. Para Slack *et. al.* (2002), eficiência é quando um sistema operacional utiliza os recursos adequados para uma tarefa, enquanto a eficácia se dá quando um sistema operacional realiza o que é esperado. Já Corrêa e Corrêa (2005), definem eficiência como a medida de quão economicamente os custos da organização é utilizada quando promovem determinado nível de satisfação dos clientes e outros grupos de interesse. Sendo a eficácia à extensão segundo a qual os objetivos são atingidos, ou seja, as necessidades dos clientes e outros grupos de interesse são satisfeitas. No cálculo de capacidade de tráfego, todos os recursos e suas especificidades devem ser considerados e, dentro do possível, associado ao tempo que é o fator básico de cálculo de capacidade de tráfego.

Krueger (2000) e Ingolotti *et al.* (2008), utilizam diferentes definições para classificar os tipos de capacidade na avaliação do desempenho de um sistema ferroviário. Eles definiram três tipos de capacidade em ferrovia. Capacidade Teórica como sendo o número de trens que trafegam em uma rota, em um determinado período de tempo definido, em condições ideais, caracterizado por um cenário virtual em que os trens apresentam movimento constante com *headway* mínimo entre eles. Este parâmetro expressa o limite máximo da capacidade de tráfego, considerando que o movimento dos trens é homogêneo ao longo do dia, que estes são espaçados uniformemente e não há interrupções no sistema. Por ser um valor obtido através de fórmula empírica e não considerar os efeitos da variação do tráfego e das operações é impossível que seja praticado em condições reais. A Capacidade Prática é o limite prático do número de unidades que podem se movimentar na linha ferroviária com certo nível de confiabilidade. Pelo fato de refletir as condições de circulações de diferentes tipos de trens - cargueiros e de passageiros, com prioridades distintas, segundo o acúmulo de tráfego e outras condições do sistema, representa uma medida mais realista de capacidade. Como representa a combinação específica de infraestrutura, tráfego e operações para movimentar o volume máximo de produtos, com um nível de serviço e confiabilidade pré-determinados, é a medida mais significativa de capacidade do sistema ferroviário. Este parâmetro representa a capacidade que pode ser permanentemente fornecida sob condições normais de operação e representa aproximadamente 2/3 da capacidade teórica. Eles definem a Capacidade Utilizada como a que representa o volume de tráfego e as operações realizadas, de fato, na linha ou rede ferroviária e, em geral, é menor que o valor da Capacidade Prática por diversos motivos tais como: variação do tempo de viagem entre estações nos ramais, atrasos no despacho dos trens nos terminais e pátios, atrasos decorrentes do volume de tráfego na via ou congestionamento, atrasos devido à eficiência dos equipamentos utilizados na operação, atrasos devido às restrições decorrentes das condições climáticas e vários outros eventos não programados ou indesejáveis. Por fim, definiu-se a Capacidade Disponível que representa a diferença entre a Capacidade Prática e a Capacidade Utilizada e corresponde ao volume de tráfego adicional, que pode ser inserido na rota de circulação dos trens. Havendo disponibilidade, a inserção de novos trens é considerada capacidade excedente, caso contrário, é considerada capacidade perdida. Krueger representou graficamente a relação entre estes tipos de capacidade de tráfego ferroviário, conforme FIGURA 2.1 a seguir.

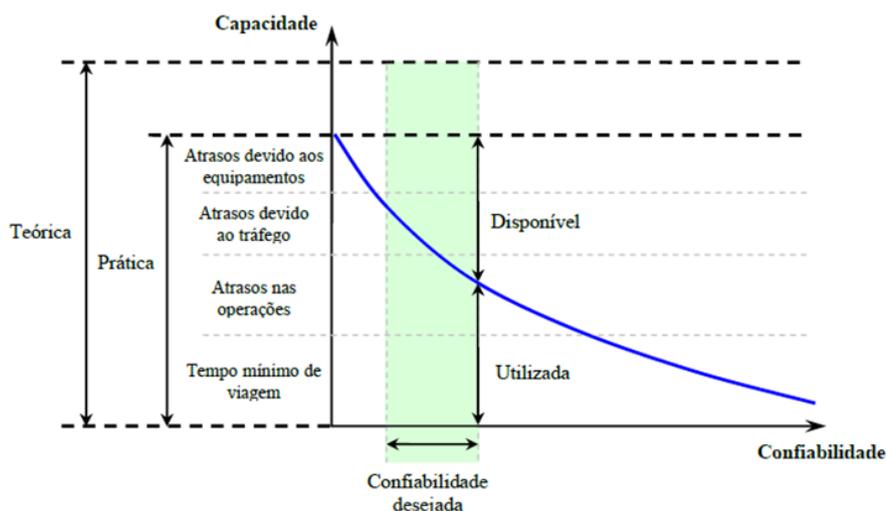


FIGURA 2.1 – Relação entre capacidade e confiabilidade. (FONTE – KRUEGER, 2000 - adaptado)

Para Banks *et al.* (2001), a simulação é uma representação de um processo do mundo real. Ela envolve a geração de um sistema artificial que pela observação deste sistema, são retiradas as conclusões a respeito das características de operação do sistema real. A ferrovia, pela sua característica e complexidade, levou a Middelkoop e Bouwman (2001), estudarem o problema de alocação de trens com o emprego de modelos de simulação, porém apresentaram-se pouco flexíveis e de aplicação a ferrovias específicas.

Caprara *et al.* (2002), apresentam um modelo de definição de tabelas de horários, a fim de que os trens respeitem a capacidade de circulação da via, e algumas restrições operacionais preestabelecidas. O problema denominado *Trains Timetabling Problem* (TTP), ou “Problema de Tabela de Horários de Trens”, considerou trecho ferroviário em linha singela, com um número de estações intermediárias, interligando duas estações principais.

Ahuja *et al.* (2002) classifica os modelos de otimização com fluxos em redes em três grupos distintos. Os problemas de caminho mínimo (*shortest path problem*) têm como objetivo básico a definição de rotas adequadas entre os nós de rede, com vistas à obtenção do menor custo financeiro, de tempo e outros. Assad (1980) afirma que os dados de entrada são basicamente as demandas previstas para os fluxos de tráfego nos arcos de rede ferroviária, para definição de uma rota em relação a uma função objetivo definida.

Leal *et al.* (2004) indica necessidade de atenção na resolução do problema de programação de trens em vias singelas, elas requerem um controle mais rigoroso considerando a possibilidade de conflito

de trens tanto no mesmo sentido de circulação quanto em sentido opostos. Um dos trens deve aguardar em uma linha secundária (desvio), enquanto o outro efetua a passagem em sentido contrário. O Brasil apresenta 96% da sua malha em linha singela. Ele sinaliza o forte peso da programação de trens em vias singelas na definição da capacidade de tráfego e de igual importância no cálculo a ser considerado o recurso de linha se dupla ou singela.

Fernández *et al.* (2004), formularam e analisaram um modelo estratégico para o sistema ferroviário de transporte de carga para uma determinada região. O modelo equilibra o fluxo e o nível de serviço de acordo com a demanda de transporte para um conjunto de diferentes produtos, levando-se em consideração a capacidade do sistema e seus componentes e características operacionais.

Conforme Guimarães (2005), a capacidade de tráfego de trens em uma malha ferroviária, muitas vezes é analisada com base na capacidade teórica, no número máximo de trens que podem percorrer um determinado trecho. E com base na capacidade prática, que se refere à habilidade de combinar o trecho a ser percorrido com o tráfego e as operações da linha, a fim de circular o maior número de trens possível. Apresenta o método da capacidade de tráfego em uma ferrovia utilizando a Rede de Filas. Exemplifica esta aplicação citando trabalhos que foram apresentados por Asadarorn e Chao (1999), Bitran e Morabito (1996) e Kim (2004).

Kozan e Burdett (2005) apresentam um método para obtenção da capacidade teórica de um corredor ferroviário em linha singela e estimativa dos custos totais ferroviários em um período. Eles afirmam que uma aproximação típica para determinar a capacidade é encontrar o número de trens que circulam em uma seção crítica (*CS – Critical Section*), em um intervalo de tempo. A partir disto, o modelo estima o número de trens em um trecho, com base no tempo de movimentação e com valor entre os cálculos nas seções que interligam as estações de cruzamento da linha. O cálculo desses termos é função da qualidade e da distribuição direcional de cada tipo de trem, e de um coeficiente denominado Tempo de Movimentação na Seção (*SRT – Section Running Time*), obtido a partir das velocidades, acelerações e desacelerações dos trens e de regras de circulação no sistema.

Schittenhelm *et al.* (2006) apresenta a utilização do método UIC 406 para cálculo da capacidade de tráfego destacando a importância da escolha certa dos trechos ferroviários de comprimentos adequadamente representativos da malha e variando a quantidade de linhas dos pátios de cruzamento. A base do estudo é de utilizar o plano de operação dos trens e não o horário conhecido

ou real. Procura identificar os horários possíveis de utilizar para a circulação de trens. Através da compressão dos horários, avalia-se a possibilidade de inserção de mais trens na linha de circulação nas janelas ou espaços de tempos criados.

Batista (2006) e Isler (2010) apresentam um modelo de capacidade ferroviária em linha singela capaz de identificar os fatores que restringem as velocidades dos trens em um determinado trecho de linha. O método adotado para determinar a capacidade para cenários operacionais alternativos é o da utilização de diagramas espaço-tempo (gráfico de horário de trens). Estes diagramas são elaborados através de um algoritmo em *MatLab* (*Matrix Maboratory*) que soluciona os conflitos nos cruzamentos e efetua a contagem de pares de trens. O desempenho dos trens é adquirido através de um modelo de simulação de desempenho de trens elaborado pela *Association of Amerian Railroads*. Como aplicação prática apresenta-se uma análise para um dos principais corredores de exportação do Estado de São Paulo. Os resultados mostram como principal fator limitante da capacidade atual a condição da superestrutura ferroviária. Uma vez eliminada esta condição crítica, a supressão de passagens de nível e relocação de estações de cruzamento, produzem ganhos expressivos.

Widmer (2006) apresenta uma ferramenta de planejamento estratégico para cálculo da capacidade de uma rede ferroviária de linha singela ramificada em forma de espinha de peixe. Com estações que permitem o cruzamento de trens que circulam em sentidos opostos, terminais de geração e recebimento de cargas e um polo de concentração para onde convergem e de onde emanam todas as composições ferroviárias da rede. O modelo tem como principal dado de entrada os comprimentos dos arcos e os tempos de viagem entre estações, estes tempos obtidos através de um simulador que considera as características geométricas e de conservação da superestrutura ferroviária e a configuração dos trens utilizados na operação do sistema (potência das locomotivas, comprimento e carga por eixo dos vagões etc.). O modelo de capacidade proposto mostra que o “*headway* crítico” de um ramal é determinado pelas velocidades dos trens entre estações no trecho crítico (tempos de viagem) e exerce influência sobre a capacidade de circulação de trens em toda a rede ferroviária considerada. O método identifica o ramal e o arco que restringe o aumento do número de trens na malha e permite ao investidor analisar os efeitos da melhora das condições da superestrutura ferroviária no trecho crítico através da construção de cenários alternativos.

Kozan e Burdett (2006) apresentam uma revisão sobre o método de obtenção da capacidade em um trecho ferroviário em linha singela exposto em Kozan e Burdett (2005). Foram incorporados ao modelo os atrasos nos cruzamentos e ultrapassagens dos trens, e com isso determinam a capacidade de processamento para cada tipo de composição que circula nas linhas. Eles elaboraram um modelo de cálculo do número de trens que trafegam entre as origens e destinos de uma rede ferroviária, com aplicação em um exemplo teórico. Devido à integração entre os corredores, à inserção de desvios nos trechos e aos atrasos nesses locais, a modelagem mostra-se mais complexa e demanda a utilização de um modelo de otimização para a resolução dos conflitos.

Para McClellan (2007), capacidade é um problema solucionado com emprego de tecnologia, com locomotivas de maior potência, vagões com melhor comportamento dinâmico, sistema de circulação e licenciamento mais rápidos e seguros, construção de linhas e pátios e principalmente na prevenção de acidentes ferroviários que são altamente impactantes na capacidade de tráfego.

Para Chrispim (2007), entre as desvantagens da simulação, ela não pode dar resultados acurados com *inputs* de má qualidade. Não importa o quanto um modelo é bem desenvolvido, se ele não possuir os dados de *input* bem trabalhados, o analista não pode esperar obter dados plausíveis. A coleta de dados é considerada a etapa mais difícil do processo de simulação. Em muitos casos, a má qualidade dos dados é o fundamento do insucesso de projetos de simulação. Ela não gera respostas simples para problemas complexos, se o sistema analisado tiver muitos componentes e interações, a melhor alternativa de operação é considerar cada elemento do sistema. É possível fazer simplificações com o propósito de desenvolver um modelo razoável num espaço de tempo razoável. Entretanto, se elementos críticos do sistema forem ignorados, os resultados obtidos não serão satisfatórios. E somente a simulação não resolve problemas, ela não resolve problemas por si só, ela fornece ao tomador de decisão, soluções potenciais para o problema. A utilização da simulação no cálculo de capacidade de tráfego não é garantia de sucesso, pela complexidade das condições que envolvem a ferrovia e caso os eventos não programados não sejam adequadamente tratados resultados diferentes da realidade serão obtidos.

A complexidade da operação ferroviária em linha singela tem motivado o desenvolvimento de vários métodos de capacidade, entre eles o de quadro de horários de trens (GHOSEIRI *et al.* 2004 e ZHONG ZHOU, 2007) e o método de otimização (CORDEAU *et al.*, 1998). Este método de capacidade e de otimização baseados no quadro de horário dos trens, buscam maximizar a produção

considerando os impactos das restrições devido às condições do layout, sistema de sinalização e licenciamento, na capacidade de utilização das linhas ferroviárias. Estas considerações podem levar a uma subestimação dos atrasos consecutivos.

Sabbadini *et al.* (*apud* KLEN, 2007), define a simulação como um método utilizado para avaliar o desempenho de um sistema através da modelagem. Baseado em fenômenos conhecidos, o modelo estrutura os componentes do sistema e permite realizar experimentos que auxiliam na compreensão do sistema real em dadas condições.

Barber *et al.* (2008), apresenta algumas ferramentas que utilizam métodos analíticos, de simulação e otimização, para análise da capacidade de trechos e redes ferroviárias, dentre eles o CAPRES, DEMIURGE, RAILCAP, CMS e MOM-DALLAS. Ele afirma que as equações e métodos de resolução dos problemas são bastante complexos e, em geral, demandam excessivo tempo de processamento computacional para obtenção de uma solução satisfatória.

Ingolotti *et al.* (2008), analisaram os principais conceitos e métodos para executar análises de capacidade, e apresentam que a capacidade é extremamente dependente de infraestrutura, tráfego e parâmetros operacionais. Estudos em ferrovias espanholas de capacidade da ferrovia, os resultados mostram como a capacidade varia de acordo com fatores como velocidade dos trens, paradas comerciais, heterogeneidade dos trens, a distância entre os sinais ferroviários, e o cumprimento da tabela de horários dos trens.

Landex (2008) coloca que a medição da capacidade de trens em uma malha ferroviária é complicada pelo fato de que as características de circulação, comprimento do trem e condições se vazio ou carregado e as locomotivas alocadas nestes trens afetam quantos trens são possíveis por hora de circular. Além disto, ela se deve também à interação entre a infraestrutura e os horários dos trens ou tabela de horário. É difícil, ou mesmo impossível, definir a capacidade ferroviária de uma forma consistente. Ele cita várias definições que ocorreram ao longo do tempo e que a seu ver dimensionam o alto nível de complexidade da definição da capacidade de tráfego ferroviário, por exemplo: • Capacidade ferroviária é a capacidade da operadora para fornecer os serviços necessários dentro dos níveis de serviço aceitáveis e custos justos, de modo a atender a demanda atual e projetada para tais serviços futuros (KAHAN, 1979); • A capacidade de uma linha férrea é a capacidade de operar os trens com uma pontualidade aceitável (SKARTSÆTERHAGEN, 1993); •

A capacidade teórica é definida como sendo o número máximo de trens, que podem ser operados por uma ferroviária (ROTHENGATTER, 1996); • A capacidade de uma infraestrutura é a capacidade de operar os trens com uma aceitável pontualidade (KAAS, 1998); • A capacidade ferroviária de tráfego é uma medida de capacidade para mover uma quantidade específica de trens através de uma linha ferroviária definida com um determinado conjunto de recursos em um plano de serviço específico (KRUEGER, 1999); • A única verdadeira medida de capacidade, portanto, é o intervalo de horários que a rede poderia apoiar, testada contra cenários de demanda futura e esperada do desempenho operacional (WOOD; ROBERTSON, 2002); • A capacidade de tráfego ferroviário pode ser definida como a capacidade da infraestrutura para garantir a realização de uma tabela de horário definido (HANSEN, 2004); • A capacidade é definida como o número máximo de trens que pode passar num determinado ponto de uma linha férrea em um determinado intervalo de tempo (LONGO, STOK, 2007); • A capacidade pode ser definida como a relação entre a janela de tempo escolhida e a soma de tempo de circulação média mínima e tempo de licenciamento médio necessário (OETTING, 2007); • O número de trens que podem ser incorporados em um horário livre de conflitos, comercialmente atraente, compatível com as exigências regulamentares e que pode ser operado com o nível esperado de atraso concordado (BARTER, 2008). Para Lander a capacidade é definida com base nos processos, fatores externos, características da infra e superestrutura, tabela de horários dos trens e as características do material rodante de locomotivas e vagões. A base da capacidade de tráfego é a característica construtiva, de manutenção da infra e superestrutura da via férrea e a tabela de horários (FIGURA 2.2).

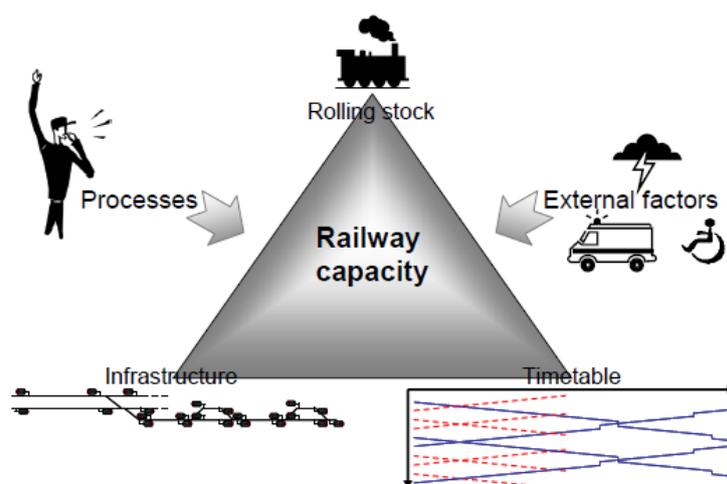


FIGURA 2.2 - Fatores que interferem diretamente na capacidade de tráfego de uma ferrovia. (FONTE-LANDEX, 2008).

Salido *et al.* (2008) define *headway* como sendo o maior tempo de percurso nos dois sentidos entre desvios de cruzamento consecutivos de comprimento maior do que o trem em circulação, podendo o *headway* variar em função do comprimento do trem. Define capacidade de tráfego teórico como sendo aquela na qual considera condições máximas ideais de tráfego, isto é, o número máximo de trens que podem trafegar em ambos os sentidos de uma linha, em um período de tempo, em condições ideais. Capacidade de tráfego real por adotar condições máximas reais, em substituição às condições ideais. Defini Grau de Utilização como sendo o percentual que mede o nível de tráfego em relação à capacidade máxima.

Pompermayer *et al.* (2008) apresentam os resultados de uma investigação da aplicação de um modelo de rede de filas aberta e um modelo de simulação computacional, utilizando o software ARENA 5.0, para estimar o tempo médio total de viagem num trecho singelo de malha ferroviária contendo certo número de pátios de cruzamento. Para entender melhor a capacidade de uma linha férrea, simularam este processo utilizando os dados históricos referentes a tempos de viagem entre pátios de um determinado trecho ferroviário. Para essas avaliações consideraram o número de viagens em um ano, número de trens na fila e o tempo de travessia total do trecho em estudo. Ambos os métodos mostraram alguns possíveis cenários e o comportamento do sistema em cada trecho inclusive no trecho de maior gargalo, ou seja, o trecho de maior tempo de atravessamento. Por meio destas avaliações, perceberam que a utilização destes métodos traz, ao analista, informações mais seguras sobre o sistema e que as informações adquiridas contribuem para importantes decisões. O que diferencia os tipos de análise é que, pelo método de decomposição paramétrica de rede de filas aberta, tem-se uma análise geral do problema e necessita-se de refinar as entradas, uma vez que estas são baseadas em tempos médios. Já o modelo de simulação computacional parte de dados, ou seja, são utilizados os dados obtidos no sistema real e a partir deles são obtidas as distribuições de probabilidade que regem cada atividade. A comparação dos resultados obtidos com as duas metodologias oferece um passo no sentido que, em trabalhos futuros, utilizar os resultados atingidos com o modelo de simulação como entradas para o modelo de decomposição paramétrica.

Abril *et al.* (2008) afirmam que, em geral, os modelos analíticos para a definição de capacidade de tráfego são bastante simples, permitem a obtenção de soluções preliminares aos problemas e podem ser tomados como parâmetro de referência ou comparação em relação às soluções obtidas através de outros métodos. Eles apresentam uma revisão sobre os métodos de obtenção da capacidade de

tráfego, tanto para linha singela quanto para em redes ferroviárias complexas. Consideram diferentes aspectos e variáveis envolvidas nos problemas de circulação de trens em sistemas ferroviários. Eles afirmam que a capacidade ferroviária é uma variável dinâmica que depende das características dos trens, das condições operacionais e da infraestrutura da malha ferroviária. Consideram para a infraestrutura os fatores de sistema de sinalização e blocos, números de vias, definição de rotas, efeitos da rede, condição da via, limites de velocidade e comprimento das seções. Em relação aos parâmetros de tráfego que interferem no número de trens que circulam no sistema tem: as novas linhas ou linhas existentes, tipos diferentes de trens, irregularidade na execução das tabelas de horários, fator de tráfego pico ou congestionamento de trens em determinado intervalo de tempo e prioridades dos trens.

Pachl (2009) define capacidade de uma ferrovia como sendo o máximo fluxo de trens por hora que a infraestrutura pode suportar em determinado nível de condição de operação. Não existe uma única medida para definir a capacidade. Ele cita o método de cálculo de capacidade de tráfego da UIC – *International Union of Railways* - código 406, que além da base da infraestrutura, existe uma interdependência entre número de trens, velocidade média, estabilidade da tabela de horário e heterogeneidade do tipo de trens. Que a capacidade de uma ferrovia é uma associação de capacidade de terminal, de linha de circulação entre os terminais e do sistema de licenciamento. A infra e superestrutura da via influenciam com o grau de inclinação das rampas; de sua extensão e sequência de ascendência e descendência; do raio, quantidade e sequência de suas curvas; da bitola (distância entre os trilhos da mesma linha); padrão construtivo da via considerando a composição e perfil dos trilhos, o tipo e espaçamentos dos dormentes, a fixação, as características dos AMV (Aparelhos de Mudança de Via); distância entre os pátios de cruzamento e do padrão de manutenção da linha. O material rodante influencia com a força tratora e da aderência das locomotivas; da capacidade por eixo, sistema de amortecimento e centro de gravidade dos vagões. O sistema de licenciamento influencia com a tecnologia utilizada. Estas são condições de projeto, previsíveis e programadas. Na construção de uma ferrovia devem ser definidas as características técnicas da infra e superestruturas, a quantidade de pátios intermediários de cruzamento, tipo de licenciamento, características do material rodante (locomotivas e vagões) e outros atributos importantes. Para o caso de ferrovia em uso, surge a necessidade de identificar se a capacidade atual é suficiente para absorver mais demanda de transporte, em caso contrário, quais ações se fazem necessárias para que ela seja devidamente capacitada. Ele coloca a diferença entre a capacidade da tabela de horário de trens planejada com a máxima capacidade de uma linha, sendo a variação do

headway. A capacidade de tráfego pode ser calculada pelo método analítico ou por simulação, que por sua vez pode ser assíncrona ou síncrona. Para ele a ideia por trás de pesquisa analítica é calcular os dados das características de infraestrutura e de uma tabela de horário para determinar e descrever a capacidade de uma linha ou de outras partes de uma malha ferroviária. Normalmente não é possível calcular toda a curva de tempo de espera, mas para se obter alguns pontos importantes nesta curva, indicando a capacidade em função da tabela de horário de trens. Ele indica o uso do método analítico para identificação da capacidade de tráfego de uma malha ferroviária de menor complexidade ou quando necessitar de mais tempo para construir e calibrar uma simulação do que para resolver o problema.

Lindner (2009) avalia a capacidade da linha ferroviária utilizando UIC - código 406. É calculada analiticamente comprimindo as escalas de tempo da tabela de horário. Na descrição de utilização do método UIC, muitos detalhes são deixados em aberto, ou melhor, não são mencionados, isto significa que diferentes cálculos de capacidade podem variar em função dos detalhes, causando resultados diferentes. Embora UIC código 406 tenha sido desenvolvido especialmente para ferrovias europeias, as avaliações de capacidade utilizando este método também pode desempenhar um papel muito importante na América do Norte, por exemplo, para compatibilizar as características de infra e superestrutura para alterações de tráfego no futuro. Reconhece que existe dificuldade de aplicação do uso direto do método UIC 406 e desvantagens desta aplicação direta da compressão da tabela de horário obtendo resultados discutíveis.

Preston *et al.* (2009) apresenta um ciclo para analisar e melhorar a utilização da capacidade de uma ferrovia baseada na tabela de horário existente. Para identificar a capacidade ele utilizou o método UIC 406 de compressão da tabela de horário utilizando os tempos ociosos para inserção de mais trens na malha e o método IUC – Índice de Utilização da Capacidade que também comprime a tabela de horário excluindo o trem de maior tempo de ocupação.

Landex (2009) descreve que capacidade ferroviária pode ser calculada utilizando o método de cálculo de capacidade UIC 406. O consumo de capacidade pode ser medido através da compressão dos gráficos de horários de trens enquanto a utilização da capacidade pode ser medido através da análise do número de trens, a velocidade média, heterogeneidade e estabilidade. Ao comprimir o gráfico de horário de trens para medir o consumo de capacidade, deve estar ciente de que esta sendo medida a capacidade máxima. Muitas restrições de capacidade podem reduzir esta capacidade

máxima . Portanto, não é possível ter uma capacidade de consumo, sem a inserção de fatores que impactarão de fato a capacidade. É difícil indicar o consumo de capacidade exatamente de uma maneira simples. Para ter um conhecimento profundo sobre a capacidade de transporte ferroviário, é importante saber tanto o consumo da capacidade e como a capacidade é utilizada. No entanto, não é possível visualizar as duas condições ao mesmo tempo. As características da estrutura ferroviária varia ao longo dos anos, elas vão requerendo mais manutenções e gerando mais intervenções programadas ou não programadas. Portanto deve ser considerado os vários efeitos da malha do sistema ferroviário em conta. Isto resulta em dificuldades para identificar a capacidade ociosa / utilizável. Ao lança mais trens na malha incompatível com sua capacidade, leva a comprometer a pontualidade.

Dingler *et al.* (2010) apresentam estudo indicando a heterogeneidade dos trens como fator de grande influencia na capacidade de tráfego de uma ferrovia. A composição dos trens leva a ter velocidades diferentes tanto de percurso quanto para as arrancadas e paradas. A prioridade para diferentes tipos de trem e a inserção na malha de trens do tipo passageiro concorrendo com o trem tipo cargueiro. Estas diferentes condições devem ser compreendidas e consideradas na definição da capacidade de tráfego.

Ricci e Kontaxi (2010) definem capacidade ferroviária como sendo a capacidade de receber trens em uma estação sem provocar atrasos. Ela depende da estrutura da tabela de horário, ou melhor, sobre a frequência das chegadas, que regulam o mínimo do avanço em linhas, a topologia do sistema, que determina a incompatibilidade e as características do sistema de bloqueio. Definem os tipos de capacidade, como capacidade teórica que é o número de trens que poderia ser executado em um determinado trecho da linha de referência de tempo definido, em caso de operação não perturbada, correspondente ao progresso para todas as classes de trens e planejamento operacional. A capacidade comercial que representa a parcela da capacidade real calculada tendo em conta o real funcionamento da ferrovia e sua interação com a rede. A capacidade utilizada é a capacidade real realizada por um sistema ferroviário em particular sob determinadas condições de funcionamento, que é absorvida por uma tabela de horário. A capacidade residual é a parte da capacidade ainda disponível para atender às novas demandas em uma tabela de horário e/ou em determinada perturbação operação. Variabilidade e parâmetros relevantes da capacidade de carga são dinâmicos e intimamente ligados aos elementos que compõem o sistema ferroviário. Eles têm uma variabilidade intrínseca, que se traduz em uma variação da mesma capacidade para as diferentes

tipologias de trem e performances e tempo alocado, o estado das infraestruturas e meios de operação. Procuraram considerar os principais parâmetros que afetam a determinação da capacidade: parâmetros de infraestrutura, os parâmetros operacionais e os efeitos do tráfego.

Zhang *et al.* (2011), apresentam a capacidade de uma ferrovia como sendo uma combinação da capacidade planejada com a capacidade utilizada. A utilização da capacidade da ferrovia pode ser dividida em quatro elementos principais: o número de trens, a velocidade média, a heterogeneidade da operação, bem como a estabilidade. Eles indicam a medição analítica para medições de como a capacidade planejada em uma ferrovia é utilizada, considerando que a capacidade de trens não utilizada não é sempre igual à capacidade de operar mais trens sem comprometer a pontualidade.

Isto é devido a fatores intrínsecos a operação da rede ferroviária. O cálculo prático da capacidade ferroviária é a de dirigir a operação do trem para fazer melhor uso da infra e superestrutura. Baseado no plano de operação e não na tabela de horário. Para melhor definir a capacidade, eles indicam uma correlação completa do sistema, envolvendo o sistema de sinalização, sistema de abastecimento de energia e o desempenho do trem. Não deve existir uma diferença muito significativa entre a capacidade de tráfego calculada e a capacidade de avaliação da capacidade aplicada. Embora a avaliação da capacidade aplicada tenha incertezas e será mais próximo da realidade operacional, considerando a existência de fatores dinâmicos. Eles enfatizam a importância de acompanhar o desenvolvimento da capacidade prática diariamente o que significa que o monitoramento do número de trens, a velocidade média, a heterogeneidade e a instabilidade devem ser registrados tão detalhados quanto possível durante o funcionamento prático. É teoria decorre de prática.

2.3 Considerações sobre as informações relevantes presentes na literatura dos conceitos e métodos de cálculo de capacidade de tráfego em ferrovias

Em linhas gerais os mais renomados estudiosos citados, conceituam capacidade de tráfego como sendo a quantidade de trens que podem circular no trecho crítico de uma linha, por um período de tempo, da origem ao destino em determinadas condições. Conceituam a capacidade de tráfego teórica, que tem todas as variáveis em condições ideais, em capacidade prática que na capacidade teórica é inserida condições e algumas das variáveis da realidade operacional da ferrovia. Indicam que o cálculo é baseado em parâmetros ferroviários e são relativos à estrutura da via permanente,

das características do material rodante, do tipo de sistema de licenciamento e circulação dos trens, do tempo de arrancada, circulação e parada dos trens.

Alguns métodos indicam a influencia da heterogeneidade de tipos de trens na malha e da tabela de horário dos trens na capacidade de tráfego. A compressão desta tabela de horário dos trens leva a geração de janelas ou disponibilidade de horários podendo assim ocorrer a inserção de novos trens na malha.

A maioria dos métodos de cálculo de capacidade de tráfego recomenda sua aplicação no trecho crítico, que é o trecho de maior distancia ou tempo de percurso entre pátios de cruzamento, também denominado gargalo operacional. E que as resistências que se opõem a movimentação do trem na linha estão apresentadas normalmente nos métodos de cálculo de capacidade de tráfego no tempo de circulação e geram significativo impacto em seu resultado.

Os estudiosos de ferrovia apontam o alto grau de complexidade de definição da capacidade de tráfego ferroviário indiferente à metodologia, se analítica, simulação ou otimização, e sem as considerações das interferências devidamente identificadas, qualificadas e quantificadas, os resultados serão imprecisos.

A pesquisa na literatura indica que os eventos não programados não são devidamente explorados nos métodos. Apesar de alguns reconhecerem sua interferência no cálculo de capacidade de tráfego.

Os métodos analíticos, que são os amplamente utilizados, tem em sua constituição considerações diferentes dos parâmetros ferroviários e eles ainda não foram avaliados comparativamente. Indicando um tema inédito, inovador e muito relevante.

3 METODOLOGIA

Almeida Júnior (1998) descreve que pesquisar, num sentido amplo, é procurar uma informação que não se sabe e que se precisa saber. Mas uma pesquisa científica precisa ir mais além, pois, de acordo com Lakatos e Marconi (2006), a finalidade da pesquisa científica não é apenas a de fazer um relatório ou descrição dos dados pesquisados empiricamente, mas relatar o desenvolvimento de um caráter interpretativo no que se refere aos dados obtidos. Para eles, é interessante considerar diferentes conceitos e características para a pesquisa qualitativa. A pesquisa qualitativa é mais adequada quando se busca uma interpretação e não uma mera quantificação dos dados levantados na pesquisa.

Para a realização desta pesquisa, a abordagem qualitativa foi a metodologia de escolha, por permitir um enfoque mais individualizado, específico e compreensivo da realidade investigada. Por essa razão, esse é o método que mais se adequou ao objetivo fundamental deste trabalho, possibilitando a realização da pesquisa teórica que envolveu os países onde o modo ferroviário tem participação significativa na matriz de transporte.

Primeiramente será realizado um levantamento detalhado na literatura dos métodos analíticos de capacidade de tráfego utilizados por importantes organizações nacionais e internacionais na área do transporte ferroviário. Em seguida os parâmetros que compõem estes métodos serão categorizados, possibilitando uma análise qualitativa dos métodos de forma criteriosa. O resultado da presente pesquisa será apresentado no capítulo de Resultado e Discussões.

3.1 Fluxo do processo metodológico

Para alcançar os objetivos da pesquisa, será adotado o esquema metodológico apresentado na FIGURA 3.1.

Fluxo do procedimento metodológico

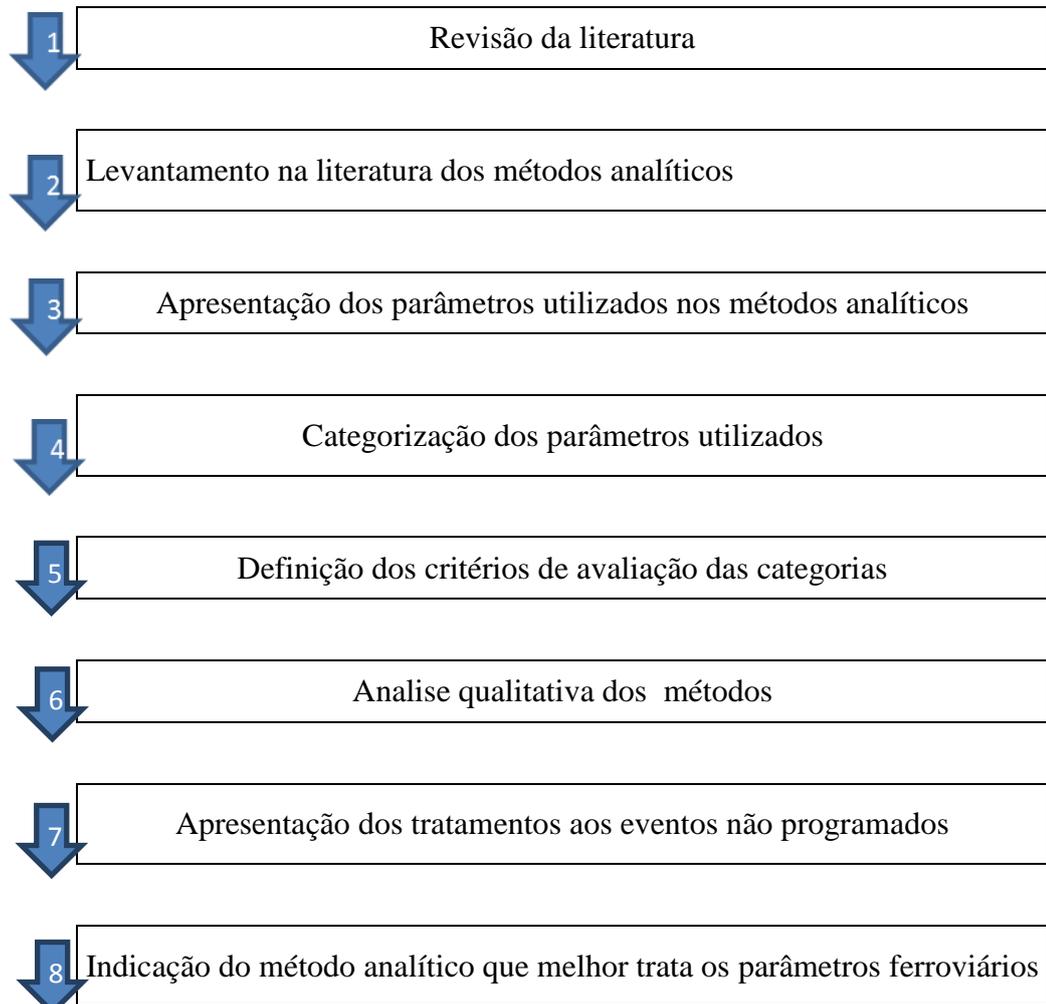


FIGURA 3.1 – Fluxograma de apresentação dos procedimentos metodológicos.

3.2 Categorização dos parâmetros dos métodos

Para a análise de conteúdo aplicada aos dados, possibilitando a indicação dos tratamentos aos eventos não programados e a identificação do método analítico existente mais adequado, foram estabelecidas seis categorias.

As categorias são constituídas pelos parâmetros ferroviários que foram relacionados ao tempo, caracterizando desempenho no cálculo da capacidade de tráfego, são elas:

Categoria 1 – Tempo decorrente de deslocamento dos trens;

Categoria 2 – Tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens;

Categoria 3 – Tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção;

Categoria 4 – Tempo decorrente de interrupção da circulação de trens não programada.

Categoria 5 – Tempo decorrente de gestão operacional;

Categoria 6 – Tempo decorrente de recurso de via.

O referencial teórico que embasou cada definição destas categorias está citado na revisão da literatura, capítulo 2 e na conceituação das categorias, seção 3.4 - conceituando as categorias.

3.3 Definição dos critérios de avaliação das categorias dos métodos

Para identificar o nível de tratamento dado aos eventos não programados, categorias 4, nos métodos pesquisados, foram adotados três conceitos com respectivos pesos, sendo: “atende” de pesos “6, 5, 4”, “atende parcialmente” de pesos “3, 2, 1” e “não atende” de peso “0”. O mesmo será feito para a identificação do método analítico de cálculo da capacidade de tráfego mais adequado, avaliando cada uma de suas categorias.

O método ou os métodos de maior valor obtido na definição do peso da categoria 4 irá indicar o método ou métodos que melhor trata a questão dos eventos não programados. O maior valor recebido na somatória de todas as categorias irá indicar o método analítico de cálculo que melhor trata atualmente os fatores interferentes na capacidade de tráfego. Resultando numa resposta de cálculo mais assertiva.

Para a categoria do método obter o maior peso “6” de tratamento, ele deve atender a todos os fundamentos ferroviários desta categoria de forma criteriosa, ampla e tecnicamente embasada, com mais refinamento de detalhes que o “5”. Do “5” mais que o “4”. Para o peso “3” de tratamento a categoria do método deve considerar parcialmente os parâmetros desta categoria mais que o “2” e que o “1”. O peso “0” é dado à categoria do método quando seus parâmetros não são considerados.

3.4 Conceituando as categorias

3.4.1 Categoria 1 - Tempo decorrente de deslocamento dos trens

O tempo de deslocamento corresponde ao período de tempo gasto por um trem da partida de um determinado ponto da linha, origem, a sua chegada em outro ponto, destino. Predominantemente a via permanente e o material rodante, locomotiva e vagões, definem este tempo gasto com o deslocamento através da velocidade admissível deste conjunto (RIVES, 1983).

Conforme Isler (2010), a velocidade de um trem é calculada basicamente pelo equilíbrio – igualdade – entre as forças de resistência total imposta aos veículos e a força de propulsão disponibilizada pelas locomotivas.

Em seguida serão apresentados os parâmetros que compõem esta categoria e interferem no tempo de deslocamento.

3.4.1.1 Via Permanente

A via permanente é dimensionada, entre outros fatores, em função da velocidade dos trens que irá circular por ela. Velocidade maior implica em elementos geométricos e estruturais devidamente adequados e qualificados, compatíveis com os esforços gerados.

As resistências ao deslocamento do trem, a via permanente contribui com a resistência das curvas e das rampas. As características planialtimétricas, geometria em planta e em perfil, da via permanente exercem forte influência no tempo de deslocamento dos trens. Estas características são definidas na fase de projeto e tem elevado custo quando passam por reformulação para adequação a um aumento de sua capacidade.

O grau ou percentual de rampa ascendente provoca perda de velocidade na composição pela resistência da gravidade, exigindo às vezes até um reforço na quantidade de locomotivas ou de força tratora. A rampa descendente facilita o deslocamento do trem. Em alguns casos de longos trechos em aclave, são utilizadas as rampas de compensação, que são rampas construídas em sentido oposto a rampa existente com o propósito de “aliviar” o esforço de arrasto gerado pelas locomotivas, possibilitando pequeno ganho de velocidade ou até evitar a parada do trem.

As curvas provocam perda de velocidade pela resistência do atrito. Quanto menor este raio, maior é a retenção ou oposição ao deslocamento do trem provocado pela curva. Este feito se deve a

associação do contato da roda dos vagões com os trilhos. Em contra partida quanto maior o raio de curva menor sua oposição à passagem do trem. A melhor condição é o raio infinito, que de fato é uma reta. A sequência de curvas eleva a retenção, estando o trem disposto com seus vagões sobre elas.

Os elementos de via possibilitam aos trens velocidades diferentes em função de suas características técnicas, a exemplo: trilhos, fixação, dormentes, lastro e AMV-Aparelhos de Mudança de Via.

O AMV – Aparelho de Mudança de Via, apresentado na FIGURA 3.2, é utilizado para a mudança de trajeto ou passagem do trem de uma linha para a outra. É um ponto crítico já que ele provoca no trem uma mudança rápida de trajeto. Existem vários tipos de AMV, e a velocidade sobre eles são definidas em função da rapidez que provocam esta mudança de curso. Quanto mais rápida a mudança de curso, menor é a velocidade admissível.



FIGURA 3.2 - AMV Aparelho de Mudança de Via (FONTE – AAR, 2012)

O AMV é composto pela agulha, coração ou jacaré e contra trilhos, apresentados na FIGURA 3.3.

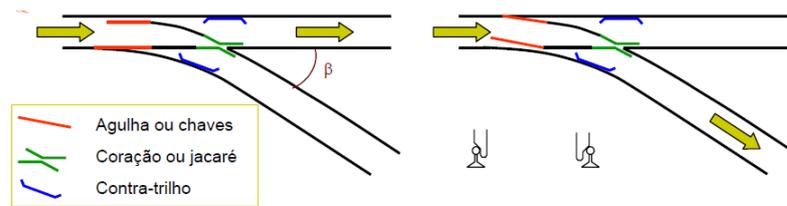


FIGURA 3.3 – Componentes do Aparelho de Mudança de Via (FONTE – AAR, 2010 - adaptado)

Os componentes da superestrutura suportam e direcionamos os trens, transferindo à infraestrutura os esforços produzidos pela passagem do trem. O conjunto é apresentado na FIGURA 3.4.



FIGURA 3.4 – Componentes da estrutura da grade ferroviária (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)

Os trilhos funcionam como vigas e são especificados pelo peso que apresentam por metro linear. Conhecido também por perfil *vignole* composto por boleto, alma e patim. Interferem na velocidade em função de suas características e massa.

A fixação garante a estabilidade dos trilhos junto aos dormentes e transfere para eles os esforços longitudinais e transversais gerados pelos trens. Existem dois tipos de fixação: a rígida e a elástica. Na fixação rígida é utilizado o prego de linha ou tirefond, afixando a chapa e o trilho no dormente.

Afixação elástica possibilita velocidade mais elevada do trem e tem vida útil maior, mantendo suas características mesmo com as passagens dos trens e ao longo do tempo não perdem sua pressão inicial.

As Placas de Apoio distribuem as tensões dos trilhos nos dormentes. Nas fixações elásticas retêm os grampos afixando o conjunto trilho e dormentes. Os grampos existem em diversos modelos conhecidos por *Pandrol*, *Mckay* e *Vossloh*.

Os Dormentes têm as principais funções de distribuir a carga no lastro, manter a bitola (distância entre os trilhos), dar suporte adequado e seguro ao trilho, garantir a estabilidade vertical - horizontal

e longitudinal da via e amortecer parcialmente as vibrações. Sua aplicação de espaçamento entre eles é definida principalmente pela velocidade ou pela classe da ferrovia. Os dormentes podem ser de madeira, concreto, *nylon*, fibrocimento e aço.

Os dormentes de madeira podem ser de madeira de lei do tipo aroeira, ipê, angico ou de madeira mole do tipo eucalipto e pinho. A vida útil deste tipo de dormente varia de 15 a 20 anos quando de madeira de lei e de 2 a 5 anos quando de madeira mole. Tem um custo de aquisição e de aplicação menor devido ser mais leve, porem seu ciclo de vida é o menor.

Os dormentes de concreto podem ser protendido monobloco ou bi-bloco. A vida útil é de 40 anos. Seu custo de aquisição e assentamento é maior, porém sua vida útil é equiparada ao do aço, ambos de maior vida útil (FIGURA 3.5).



FIGURA 3.5 - Tipos de dormentes existentes. (FONTE – AAR, 2010)

A definição de qual dormente utilizar vai depender de vários fatores, entre os principais é o de maior vida útil (menos substituição), facilidade no manuseio (rapidez nas substituições), estabilidade com maior velocidade (exige menos correções geométricas na via). Condições que provocam menos intervenções na via permanente para manutenção, minimizando o uso de precaução (restrição de velocidade), de interrupção do tráfego ferroviário e conseqüente com menor impacto em sua capacidade de tráfego.

A seguir, a TABELA 3.1 apresenta um resumo comparativo das características dos principais tipos de dormente:

TABELA 3.1 - Tipos de dormentes e aplicação.

Tipo de dormente que melhor se aplica:	
vida útil	concreto
manuseio	madeira e aço
estabilidade	concreto
isolamento	madeira e concreto

FONTE – AAR, 2010

O Lastro, FIGURA 3.6, tem a finalidade de distribuir os esforços chegados pelos dormentes, drenar o conjunto conduzindo a água para o sistema de drenagem evitando o comprometimento da estabilidade da via por laqueado (ponto de afundamento da base por acúmulo de água), resistir a esforços transversais como o empuxo passivo. Quanto maior a velocidade, maior são as solicitações ou esforços realizados na via permanente.

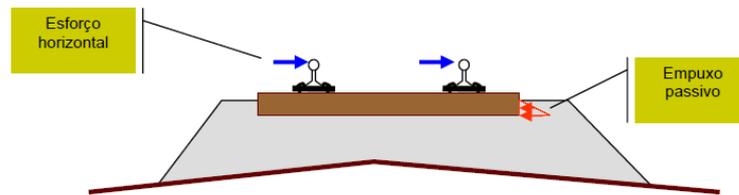


FIGURA 3.6 – Esforços transversais no lastro ferroviário. (FONTE – AAR, 2010 - adaptado)

O Sub-leito, é o solo que recebe a estrutura da via férrea. Deve ser preparado adequadamente com resistência e estabilidade. Em sua formação as parte de movimentação de preparação do local é de corte e aterro, drenagem e trincheiras (FIGURA 3.7). O grau de instabilidade implica em restrição a velocidade, alterando a VMA - velocidade máxima autorizada.

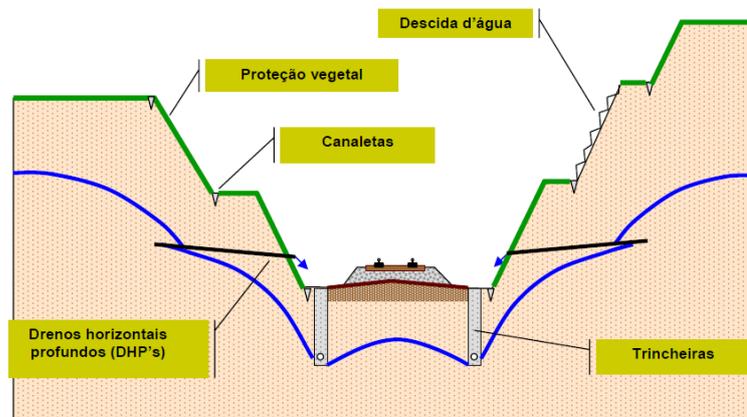


FIGURA 3.7 – Constituição do subleito, corte, aterros e drenagem. (FONTE – AAR, 2010 - adaptado)

3.4.1.2 Material Rodante (MR)

O Material Rodante é composto por vagões e locomotivas e suas características tem substancial contribuição na velocidade e no tempo de deslocamento. Os vagões são veículos ferroviários rebocados destinados ao carregamento de carga e quando são destinados ao transporte de passageiro são denominados carros. Vários são os tipos de vagões e são dimensionados para diferentes cargas.

A carga admissível do vagão interfere na velocidade de deslocamento contribuindo inversamente, ela é definida e classificada pela manga de eixo que vai de 3¼" x 7" a 7" x 12", variando de 30 ton. a 143 ton. de capacidade. A TABELA 3.2 mostra a relação de manga de eixo mais utilizada com sua capacidade de carga bruta.

TABELA 3.2- Relação de manga de eixo com peso bruto.

Manga do eixo	Peso bruto (kg)
3 ¼" x 7"	30.000
4 ¼" x 8"	47.000
5" x 9"	64.000
5 ½" x 10"	80.000
6" x 11"	100.000
6 ½" x 12"	119.000
7" x 12"	143.000

FONTE – AAR, 2011

Várias são as resistências ou forças que interferem na velocidade dos trens provocadas pelos veículos ferroviários, são elas: resistência normal que é a composta pela resistência do ar e dos contatos das partes móveis. Estas forças são de difíceis tratamentos já que são inerentes à ferrovia. Esta resistência depende da configuração do truque, distancia entre eixos, da bitola da via e do raio da curva. Estas forças são tratadas com investimento em infraestrutura, definição de perfis menos agressivos com rampas mais suáveis. Resistência de inércia é o esforço gerado pelas locomotivas para alterar aceleração do trem. E as já citadas no item anterior, 3.4.1. - Via Permanente: resistência de rampa que se opõe ao deslocamento do trem em condição oposta às forças tratoras das locomotivas e a resistência das curvas que representa a dificuldade de circunscrição do vagão nas curvas.

As características construtivas do vagão têm impacto em sua dinâmica em relação à via permanente que reflete em seu nível de estabilidade e resistência ao deslocamento e associado ao centro de gravidade define sua velocidade máxima admissível.

Ela é dividida em superestrutura e infraestrutura. A superestrutura é a parte superior do vagão, formada pelo caixão e estrado. O caixão se divide em cabeceira e laterais e o estrado em testeiras, viga ou longarina e assoalho. A infraestrutura é a parte inferior do vagão, formado pelo truque, aparelho de choque tração e sistema de freios. O truque é composto em laterais, travessa central, suspensão, mancais, rodeiros, timoneria de freio do truque e sapatas. Ela é o contato da estrutura superior do vagão com a via permanente. O truque é fundamental para a estabilidade do vagão e por sua vez a velocidade que pode se deslocar com segurança. A FIGURA 3.8 apresenta o truque e seus componentes.

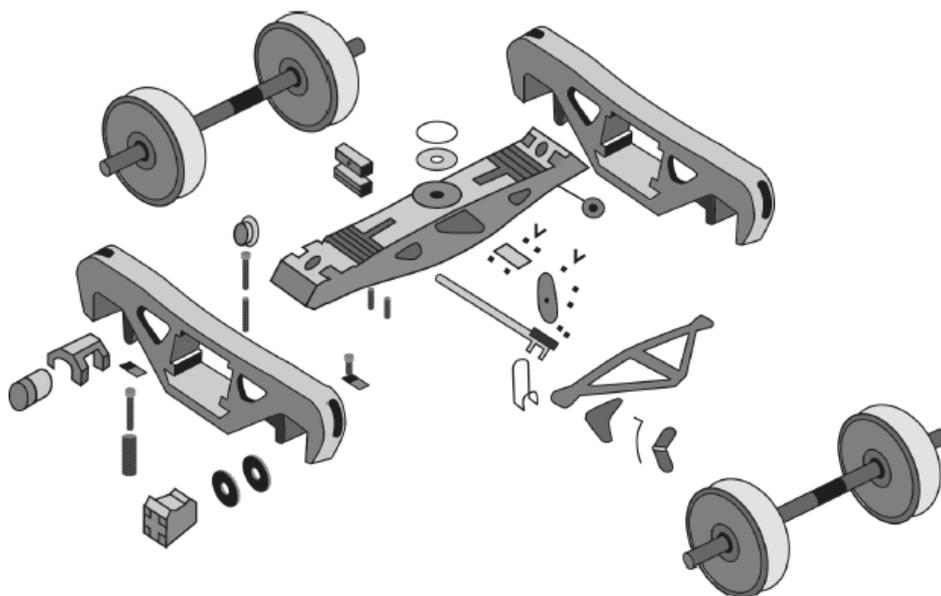


FIGURA 3.8 – Componentes de truque. (FONTE – AAR, 2010)

Existem alguns tipos de truques e sua eficiência pode provocar maior resistência à circulação em curva e sua instabilidade associado à velocidade pode contribuir na geração de acidente ferroviário. A TABELA 3.3 abaixo apresenta os tipos de truque mais utilizados nas ferrovias.

TABELA 3.3 - Tipos de truque e suas características.

Tipos	Características
<i>Ride control</i>	<ul style="list-style-type: none"> • As cunhas de fricção são sustentadas por uma mola apoiada na travessa • A travessa central é sustentada por 10 molas de cada lado, sendo, 3 internas e 7 externas
<i>Barber</i>	<ul style="list-style-type: none"> • As cunhas de fricção são pressionadas junto à travessa • A travessa central é sustentada por 10 molas de cada lado, sendo 5 internas e 5 externas
<i>Double truss</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Não possui cunha de fricção • A travessa central é sustentada por 5 molas de cada lado

FONTE – AAR, 2010

O aparelho de choque tração é responsável pela conexão de um vagão ao outro que por sua vez a locomotiva. A FIGURA 3.9 apresenta este conjunto em corte sua parte interna no vagão e a mandíbula externa que conecta uma a outra de vagões diferentes.

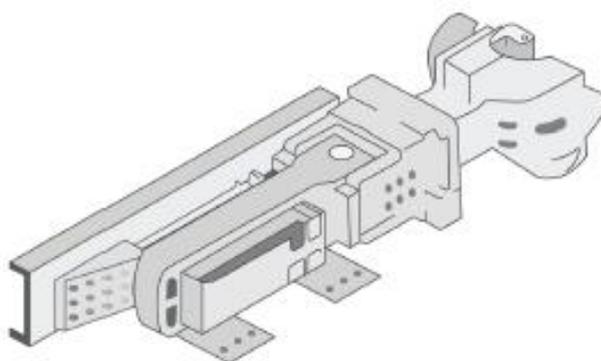


FIGURA 3.9 – Conjunto choque tração de vagão. (FONTE – AAR, 2010)

A velocidade de deslocamento do trem esta associada à capacidade de arrasto da tração ou locomotiva (FIGURA 3.10). A quantidade de locomotivas de um trem é dimensionada conforme o peso da composição de vagões e o perfil altimétrico da via férrea.



FIGURA 3.10 – Locomotiva diesel-elétrica. (FONTE - AAR, 2012)

Esforço trator, a relação de esforço gerado pelas locomotivas, é inversamente proporcional à velocidade. Nas locomotivas as velocidades são controladas através de pontos de aceleração. A velocidade representada pelo trecho crítico indica a necessidade de maior torque ou esforço das locomotivas. O GRÁFICO 3.1 apresenta as curvas da relação esforço de tração com a velocidade, indicando que à medida que a velocidade aumenta a força exigida da tração é reduzida e o período mais crítico é na arrancada quando sai da velocidade zero com o sistema propulsor em alta potência.

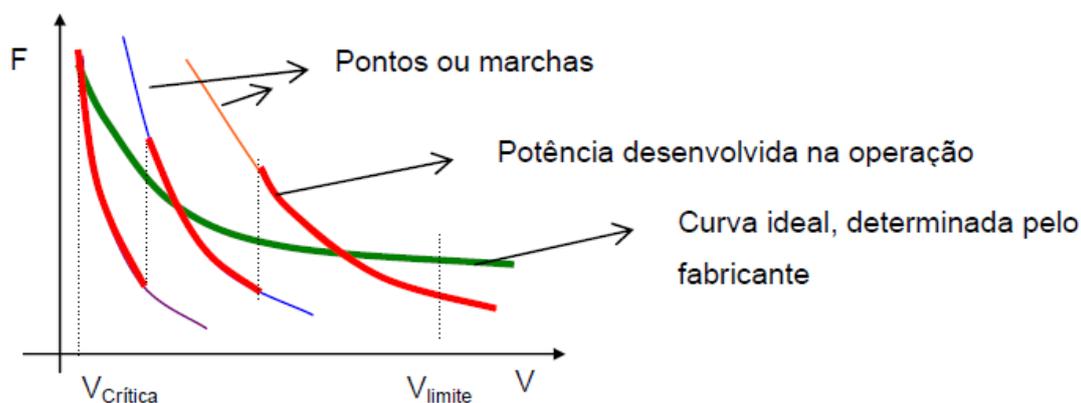


GRÁFICO 3.1 - Curvas de esforço trator e velocidade. (FONTE – AAR, 2011 - adaptado)

O GRÁFICO 3.2 apresenta o esforço trator (kgf) em relação à velocidade (km/h) de uma locomotiva C 26.7; peso nominal de 180 toneladas; relação de engrenagem 74/18; alternador GTA 24-6; motores de tração GE 752AF15; rodas de 40 polegadas de diâmetro; potência de 2.600 HP.

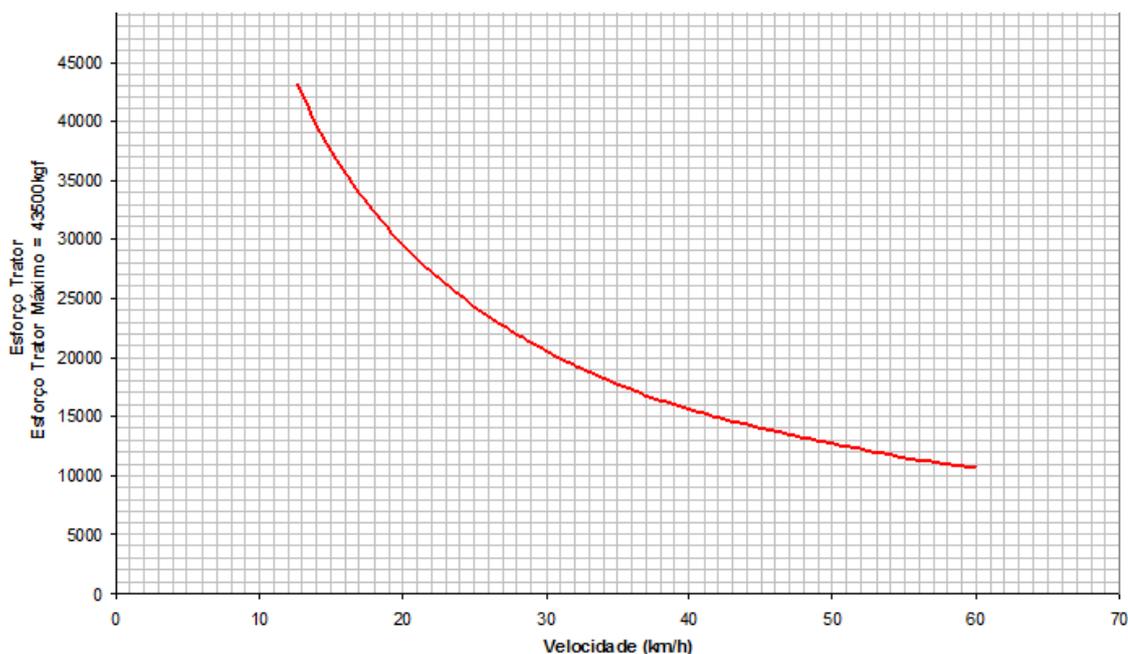


GRÁFICO 3.2 – Esforço trator de uma locomotiva em tração. (FONTE - AAR, 2011 - adaptado)

3.4.2 Categoria 2 - Tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens

Tempo de licenciamento depende da tecnologia utilizada neste processo. A FIGURA 3.11 mostra licenciamento da estação A para estação B. Ele tem importante influência na definição da capacidade de tráfego. Este processo de emitir, receber ou cancelar a licença, de identificação do trem no trecho e controle do trem sucessor em mesmo sentido de circulação ou em cruzamento. O tempo com este processo pode gastar de milésimos de segundos, em processo automático a processos manuais que levam até 10 minutos ou mais. Multiplicando este tempo pela quantidade de trens que circulam, tem-se o nível de impacto do licenciamento e controle na capacidade de tráfego. Este tempo tende a interferir no *headway* aumentando o intervalo de tempo de um trem do seu sucessor. França (1991) indica a forte dependência que tem a capacidade de tráfego com o sistema de licenciamento e controle.

Desde o início da primeira ferrovia a ser operada, o grande desafio é o deslocamento seguro dos trens ao longo de um trecho da origem ao destino.

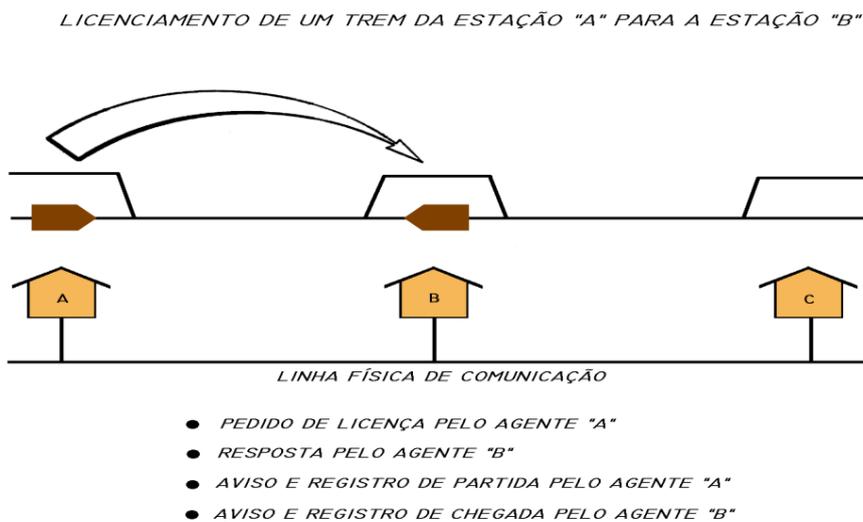


FIGURA 3.11 – Exemplo de processo de licenciamento. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)

Vários são os métodos desenvolvidos de licenciamento e controle dos trens na via, porém o princípio se manteve igual. Ou seja, o deslocamento ou circulação de trens deve ser feita de maneira rápida e segura. Deve ser garantido que tanto os trens no mesmo sentido ou em sentidos contrários não estarão licenciados ou terão permissão de ocuparem o mesmo espaço ou trecho de via ao mesmo tempo.

Para garantir que trens diferentes não fossem autorizados a deslocarem em sentidos opostos ou no mesmo sentido para a mesma seção de linha, foi instituído a comunicação entre as estações que ficavam nos extremos das seções. Elas faziam o controle e a comunicação com os trens. O primeiro meio de comunicação utilizado foi o telegrafo. Ele foi desenvolvido pelo exército a partir da primeira guerra mundial e sua utilização foi incorporada pela ferrovia simultaneamente.

Em seguida foi desenvolvido pelos americanos e amplamente utilizado o *STAFF*, que é um equipamento elétrico, conectado a outros dois, um em cada estação ou pátio de cruzamento e sentido de circulação. Seu funcionamento é exemplificado na FIGURA 3.12.

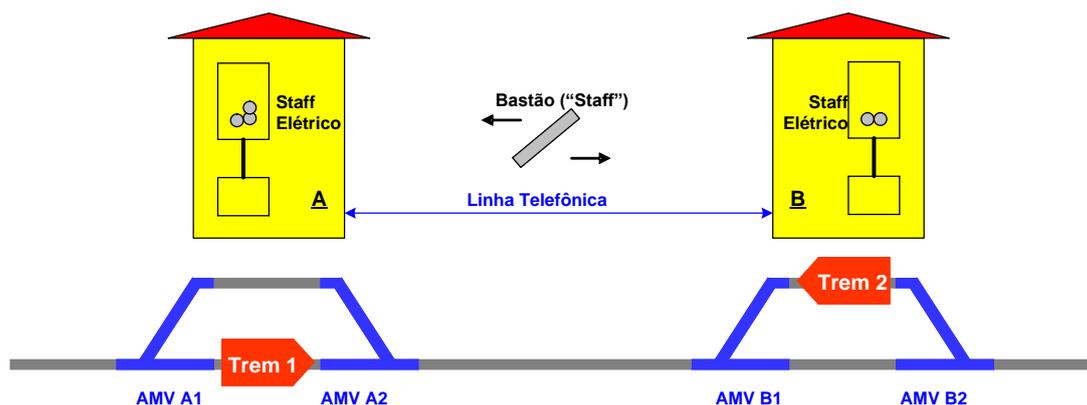


FIGURA 3.12 – Licenciamento por *Staff*. (FONTE – AAR, 2009 - adaptado)

Seu princípio de funcionamento é de quando um dos bastões é retirado do equipamento em qualquer um dos sentidos, ou seja, de A para B ou de B para A, o outro bastão não é retirado, o sistema elétrico impede sua retirada. O bloqueio do trecho em uso por um trem se dá pela condição do único bastão que poderá ser utilizado e estar nas mãos do maquinista é o que foi liberado pelo equipamento, o outro estará inevitavelmente no equipamento em uma das duas estações. Observa-se o grande tempo necessário para operacionalizar este licenciamento.

Um dos sistemas de licenciamento e controle mais utilizado atualmente é o CCO – Centro de Controle Centralizado, seu princípio de funcionamento são de linhas energizadas indicativas de ocupação ou livre e seu processo de licenciamento é automático sendo previamente pré-programado. Vários são os atuais recursos tecnológicos disponíveis e utilizados pela maioria das operadoras ferroviárias: painel sinóptico com layout e estado de ocupação da via; consoles operacionais micro processadas que interagem com o sistema de sinalização e licenciamento; consoles de informação micro processadas que interagem com os sistemas corporativos de gestão da informação operacional; consoles de comunicação que integram com os diversos recursos de comunicação: canal de rádio central-trem, canal de rádio trem-manutenção mecânica de locomotivas e outros recursos, A FIGURA 3.13 mostra um centro de controle operacional.



FIGURA 3.13 – Centro de controle operacional – CCO. (FONTE - AAR, 2010)

A Sinalização Ferroviária e Controle Centralizado oferecem vários ganhos: aumento da velocidade comercial, devido ao melhor desempenho trem x hora; aumento considerável da segurança operacional com a eliminação de falha humana e possibilidade de detecção prévia de descarrilamento, trilhos quebrados, rolamentos grimpados; centralização da operação ferroviária; redução do consumo de combustível e outros.

Para diminuir o tempo de licenciamento, avanços tecnológicos são permanentemente incorporados a ele, tais como a transmissão de sinais de comando da central de controle para os AMV (Aparelho de Mudança de Via) telecomandados remotamente e sinais de circulação para o operador de trem, são feitos por satélites ou cabo coaxial. O sistema está cada vez mais automatizado, a exemplo do ATC (*Automatic Train Control*) e o ATS (*Automatic Train Stopping*). São sistemas que monitoram a circulação e a velocidade dos trens.

Todo esforço traduz em licenciamentos mais rápidos com segurança. Diminuindo o tempo de espera da autorização de circulação, aumentando a capacidade de tráfego.

3.4.3 Categoria 3 - Tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção

Conforme Ratton Neto (1985), a eficiência do transporte ferroviário está intrinsecamente ligado ao estado da via. E a política de manutenção determina o tipo e o volume de serviços a serem realizados, indicando sua localização, a sua duração e o nível de precisão que será atingido.

Brina (1988), a interrupção na circulação de trens nos tempos destinados à manutenção programada de via permanente, sua incidência depende principalmente do volume transportado.

A velocidade dos trens determina o padrão de qualidade da manutenção. Maior velocidade dos trens, menor serão as tolerâncias admissíveis, maior será a incidência de intervenções e mais qualificadas.

Conforme conceituação da NBR 5462 (1994), manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

A manutenção dos equipamentos e componentes da infraestrutura e superestrutura ferroviária tem como objetivo manter a disponibilidade da ferrovia, diminuindo as interdições e restrições de velocidade.

As tarefas de manutenção podem ser distinguidas, em razão de suas naturezas e finalidades específicas, nas macro atividades a seguir (NBR 5462, 1994):

Manutenção de Corretiva (MC): É a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida;

Manutenção Preventiva – (MP): Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item;

Manutenção Condicional – (PC): Manutenção preventiva, também conhecida como "manutenção condicional", baseada no conhecimento por comparação do estado de um item através de medição periódica ou contínua de um ou mais parâmetros significativos;

Manutenção Preditiva – (PM): Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão

centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.

As manutenções da via permanente são em seus componentes ou elementos e correção geométrica. A FIGURA 3.14 mostra a atividade de retirada da fixação da grade da via. A FIGURA 3.15 mostra troca de dormentes mecanizada e a FIGURA 3.16 mostra desguarnecimento manual de lastro em região de AMV.



FIGURA 3.14 - Retirada mecanizada de fixação. (FONTE- ANTF, 2010)



FIGURA 3.15 – Troca mecanizada de dormentes. (FONTE-ANTF, 2010)



FIGURA 3.16 –Desguarnecimento manual de lastro em região de AMV. (FONTE-ANTF, 2010)

A FIGURA 3.17 mostra desguarnecimento de lastro mecanicamente. Tem o objetivo de preservar as características de drenagem e transferência de esforços de forma adequada.



FIGURA 3.17 – Desguarnecimento mecanizado de lastro. (FONTE-ANTF, 2010)

3.4.4 Categoria 4 - Tempos decorrentes de interrupção da circulação de trens não programada

Conforme LASTRAN – Laboratório de Sistema de Transporte (2010), de 20% a 40% das manutenções da via permanente são não programadas. São componentes ou elementos de via que são danificados e são consertados. Impactando nos desempenhos da circulação dos trens e na capacidade de tráfego.

Pela complexidade dos processos que envolvem uma ferrovia, vários são os fatores ou eventos que levam a uma interrupção não programada da circulação de trens. Podem ocorrer isoladamente ou simultaneamente na via permanente e no sistema de licenciamento e circulação, potencializando a dificuldade de identificação e correção dos problemas. Dos fatores externos, a variação climática é de grande interferência, levando a ocorrência de interrupção por deslocamento e obstrução de taludes a quebras de trilhos por grande variação de temperaturas.

Todos os componentes da via permanente estão sujeita à manutenção corretiva ou não programada. Os trilhos apresentam defeitos superficiais, internos com perda da resistência e trincas interrompendo a circulação dos trens. Os dormentes, tanto de concreto quanto de aço ou de madeira tem a estrutura comprometida passando por torção, rompimento e perda do fibramento, levando a abertura de bitola e desnivelamentos transversais e longitudinais. O lastro passa por um processo de perda da elasticidade por contaminação. Os vazios são preenchidos e passa a perder sua capacidade de drenagem e de distribuição de carga, vindo a comprometer a grade com aceleração de seu desgaste e provocando junto com o subleito o surgimento de laqueados que levam a perda do alinhamento vertical. Não ocorrendo a intervenção, estas situações levam a imposição de precaução que é a redução da velocidade do trem para garantir a segurança. Impactando na capacidade de tráfego da ferrovia.

No entorno da ferrovia, tanto a montante quanto a jusante, existem condições de instabilidade da infraestrutura que levam a interferir na circulação de trens, a exemplo de assoreamento de cortes e aterros e obstruções de drenagem, que levam a imposição de reduções de velocidades até a à vezes interrupção. Nestas condições existe uma redução na velocidade do trem, aumento no tempo de percurso e perda na capacidade de tráfego. As FIGURA 3.18 e FIGURA 3.24, exemplificam os casos de intervenções não programadas na via permanente.



FIGURA 3.18 - Defeitos superficiais. (FONTE – AAR, 2010).



FIGURA 3.19 - Fratura de trilho. (FONTE – AAR, 2010).

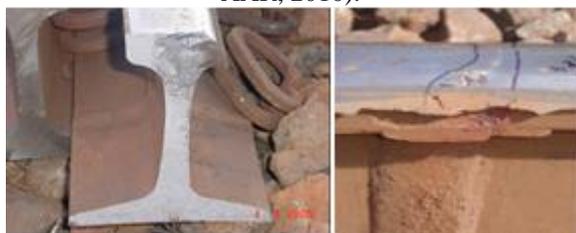


FIGURA 3.20 - Defeitos internos. (FONTE – AAR, 2010).



FIGURA 3.21 - Empeno das placas de apoio. (FONTE – AAR, 2010).



FIGURA 3.22 - Dormentes de aço fraturados. (FONTE – AAR, 2010).



FIGURA 3.23 - Dormentes monobloco com o rompimento do perfil de junção. (FONTE – AAR, 2010).



FIGURA 3.24 - Grade da via comprometida. (FONTE – AAR, 2010).

Os desvios geométricos na linha provocam instabilidade durante a passagem de locomotivas e vagões, quando associados a velocidade mais elevada, levam a acidentes ferroviários, em sua maioria com danos significativos. A FIGURA 3.25 mostra defeitos de geometria.

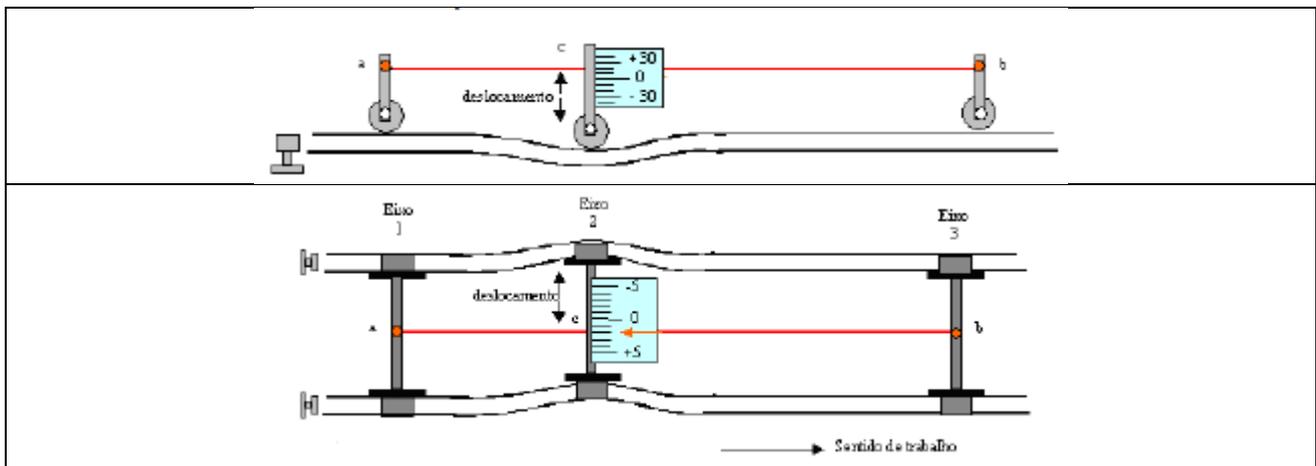


FIGURA 3.25 – Indicação de desvios no nivelamento e alinhamento. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)

A instabilidade em taludes, cortes e aterros podem interromper a circulação de trens temporariamente. A FIGURA 3.26 mostra uma situação típica.



FIGURA 3.26 – Exemplo de instabilidade de taludes (FONTE - ANTF, 2009).

As pontes, viadutos e túneis ou obras de arte especiais requerem atenção permanente, em vários casos leva a grandes interrupções no tráfego. A FIGURA 3.27 mostra pontes em condições de acesso para manutenção com dificuldade, normalmente realizada com interrupção do tráfego.



FIGURA 3.27 –Intervenção em obra de arte especial. (FONTE - ANTF, 2009).

Varias intervenções corretivas, apesar de não serem no gabarito da via ferrea, requerem a paralização temporária do trafego. A FIGURA 3.28 exemplifica este caso, são estruturas de concreto armado que durante seu processo de recuperação não pode ocorrer fibrações. Durante este período a circulação de trens fica interrompda.



FIGURA 3.28 - Intervenção em obra de arte especial. (FONTE - ANTF, 2009).

No sistema de licenciamento e circulação de trens, mesmo nos sistemas mais modernos e eficientes como bloqueio automático, vários são os fatores que provocam perturbação na circulação de trens, comprometendo a capacidade de tráfego, a exemplo:

Falha no circuito de via do sistema de licenciamento de circulação de trens. O sistema pode gerar ocupação indevida ou ocupação falsa. Ela pode ser por circuito de via aberto ou circuito de via em curto-circuito ou baixa isolamento. A FIGURA 3.29 mostra o circuito de via em condição normal sem falha e desocupado, sem trem circulando neste trecho.

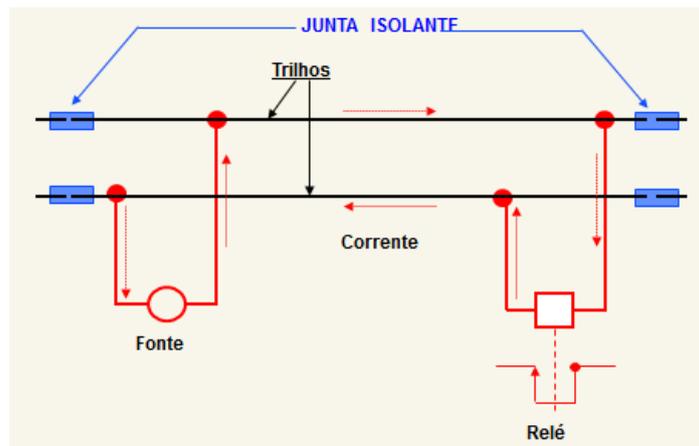


FIGURA 3.29 – Circuito de via em condição normal de uso. (FONTE - AAR, 2009 - adaptado).

Através da análise de falhas pode-se identificar circuito de via aberto em função de trilho quebrado e/ou fio ou cordoalha quebrada e/ou equipamento defeituoso. A FIGURA 3.30 mostra circuito rompido com falsa ocupação.

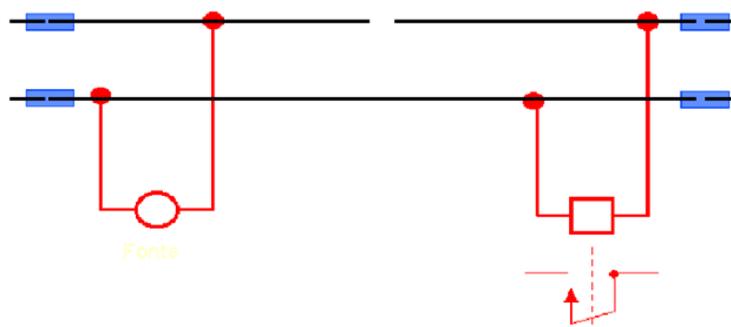


FIGURA 3.30 – Circuito de via com defeito, sinal de ocupação indevido. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado).

A FIGURA 3.31 mostra um dos pontos de interrupção no sistema devido ao rompimento de trilho.



FIGURA 3.31 –Trilho quebrado abrindo o circuito de via. (FONTE - ANTF, 2010)

A FIGURA 3.32 mostra uma máquina de chave elétrica comandada remotamente, pela exposição às entemperes, agressividade do local instalado e mesmo pelo descaste, ela pode em um dos seus componentes apresentar defeito e provocar interrupção na circulação, exigindo um bom tempo para a identificação e correção do problema.

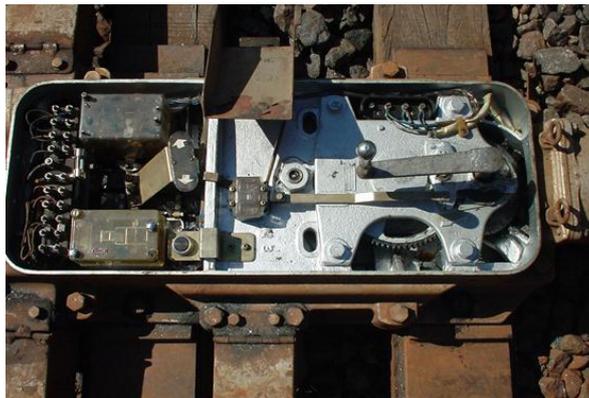


FIGURA 3.32 – Máquina de chave de AMV elétrico. (FONTE - AAR, 2010 - adaptado)

Maior incidência de interrupção na circulação de trens por problema no sistema de licenciamento, ocorre no períodos de chuva, a umidade baixa o nível de isolamento do sistema elétrico provocando sinais intermitentes de falsa ocupação.

Exemplificando com uma ferrovia brasileira ao longo de um mês de operação, ocorreram eventos que impactaram em sua capacidade de tráfego, dos não programados foram relacionados em seu controle: defeito no sistema de licenciamento de campo, defeito no equipamento de bordo de locomotiva em trem circulando, falta de energia elétrica fornecida pela concessionária, falta de maquinista, defeito de vagões em trem circulando, defeito eletromecânico de locomotivas em trem

circulando, trilho quebrado em linha singela, manutenção de via permanente não programada em AMV (Aparelho de Mudança de Via), cliente não recebe trem, acidente ferroviário com descarrilamento em linha singela, vandalismo de trem, aguardando outra ferrovia receber trem, pátio congestionado, entre outros.

3.4.5 Categoria 5 - Tempo decorrente da Gestão Operacional

Para Nijkamp (1993 apud ISLER, 2010), o gerenciamento operacional adequado e o uso dos recursos com eficiência implicam em aumento da capacidade de uma ferrovia, mais que a expansão das estruturas físicas.

Salido e Ingolotti (2007) identificaram a heterogeneidade de tipos de trens e a tabela de horário como fatores relevantes na determinação de capacidade de tráfego provocando variações significativas.

Esta categoria é formada por dois parâmetros com base na gestão operacional, denominados de Heterogeneidade dos trens e de Tabela de Horário dos trens, que refletem na capacidade de tráfego.

3.4.5.1 Heterogeneidade dos trens

A heterogeneidade consiste em tipos diferentes de formação dos trens no que diz respeito à quantidade e características dos vagões, das locomotivas e de preferências ou prioridade de circulação, a exemplo de trens de passageiro, de carga, de serviço. A variação da formação do tipo de trens leva a comportamentos operacionais diferentes ao longo da via, são tempos diferentes no mesmo trecho ferroviário para trens diferentes. Esta condição reflete no desempenho de toda malha. A FIGURA 3.33 mostra o posicionamento ao longo da linha de trem com 334 vagões, dividido em três blocos com as locomotivas distribuídas e operadas remotamente. Este trem tem tempo de arrancada, de deslocamento e de parada diferentes de um trem com uma quantidade menor de vagões. A decisão de operacionalizar trens de tipologia diferentes provoca um desequilíbrio na gestão e planejamento da malha, com congestionamento de trens em alguns trechos e ociosidade em outros.



FIGURA 3.33 – Trem com 334 vagões em operação na Africa do Sul. (FONTE - AAR, 2010)

3.4.5.2 Tabela de horário dos trens

Para Caprara *et al.* (2002), o cumprimento da tabela de horário é de relevante importância para a gestão operacional ferroviária impactando em sua capacidade de tráfego.

A tabela de horário leva ao planejamento e regularidade da malha, minimizando os conflitos de cruzamento e ultrapassagens provocando equilíbrio na malha ferroviária, pulverizando os trens, eliminando os congestionamento e filas, interferindo na capacidade. Os recursos físicos são utilizados de forma eficiente e eficaz. A FIGURA 3.34 mostra um gráfico de trens onde nele é feito o planejamento e monitoramento da tabela de horários dos trens.

possibilidade de cruzamento de trens em sentidos opostos e da passagem de trens uns pelos outros em mesmo sentido de deslocamento. A proximidade das estações ou dos pátios de cruzamento possibilita menor tempo de deslocamento, liberando mais rapidamente o trecho para a circulação de outros trens no mesmo sentido ou de menor tempo de espera de cruzamento de trens em sentidos opostos.

Quantidade de linhas de desvios nas estações ou nos pátios de cruzamento possibilita o recebimento de mais trens simultaneamente. Os trens de classes diferentes, de prioridades ou de preferências de circulação, interferem menos entre si, aumentando a capacidade de tráfego da ferrovia.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Levantamento dos métodos de cálculo analíticos existentes

Os resultados do levantamento do método utilizado no Brasil e em países onde o modo ferroviário é relevante na matriz de transporte, são apresentados com seus parâmetros. Estes países foram contextualizados possibilitando um melhor conhecimento de suas características geográficas, social, econômica e de transporte.

4.1.1 Japão

4.1.1.1 Contextualizando o país - Japão

O Japão é um país insular que se estende ao longo da costa leste da Ásia. O país tem 70% do seu território coberto por florestas e de relevo montanhoso, com uma cordilheira no centro das ilhas principais, de forma que as pequenas planícies costeiras se tornam as áreas mais povoadas do país.

É considerado hoje a 3^a economia mundial. Seu maior parceiro comercial é a China. Sua extensão territorial é de 378 mil km², aproximadamente o tamanho do estado de São Paulo. Tem uma população de 127 milhões de habitantes, com uma densidade de 337 habitantes / km².

O índice de alfabetização é de 99% da população, o que representa a 19^a colocação no ranque mundial. Suas escolas estão passando por reestruturação deixando uma cultura da disciplina e respeito a tradição para uma de liberdade e criatividade. A expectativa de vida de sua população é a maior do planeta de 82,6 anos.

O país tem 23 mil quilômetros de malha ferroviária que atende ao transporte de carga e de passageiros. Quase a mesma quantidade que o Brasil tem efetivamente em uso. A bitola (distâncias entres os trilhos da via férrea) predominante é a de 1.067mm, em seguida e em quantidade irrisória vem a de 1.372mm e por fim a 914mm. As principais cidades são conectadas por trens de alta velocidade. São 250 trens que circulam permanentemente entre elas de forma eficiente e satisfatória para o usuário, eles são conhecidos pela pontualidade. São aproximadamente 760 linhas de trens em todo Japão. No que se refere exclusivamente a passageiros, são 663 milhões de usuários por km

diariamente. As ferrovias tanto de carga, passageiros e passageiros de alta velocidade são operadas por um grupo de 8 empresas denominadas de *Japan Railways*, também conhecida pela sigla JR. Este grupo é subsidiado pelo Estado Japonês que controla as operações e os ativos (Locomotivas, Vagões, Via Permanente) pela Empresa Nacional de Caminhos de Ferro do Japão desde 1987.

A ferrovia é o principal modo de transporte, tanto de carga quanto de passageiros, apesar do custo baixo de aquisição e manutenção dos automóveis.

A FIGURA 4.1 apresenta a principal malha ferroviária principal e locais existentes no Japão.



FIGURA 4.1 - Malha Ferroviária Japonesa. (FONTE - UIC, 2010)

4.1.1.2 Método analítico e seus parâmetros - Japão

No Japão, os cálculos de capacidade de circulação ou tráfego das ferrovias tem uma grande importância, como consequência da necessidade de introdução de medidas de otimização da rede de transporte uma vez que 85% de suas linhas são singelas. As estações intermediárias são construídas a uma distancia de 4 a 5 km de distancia entre si e operam, em geral, com duas ou três linhas.

O cálculo da capacidade de tráfego baseia-se no gráfico de circulação de trens vigente, que tem relacionado três indicadores:

- tempo de marcha dos trens por trecho
- duração das paradas de serviço
- intervalos entre os grupos de trens.

A capacidade de tráfego teórica por trecho é calculada através do planejamento do gráfico de circulação de trens. Previamente os trens são agrupados conforme o tempo de circulação gasto no trecho crítico. Para o cálculo da capacidade prática ou aproveitamento máximo da capacidade teórica, utiliza-se um coeficiente máximo de utilização “k”, apresentado na EQUAÇÃO 4.4.

No caso de cálculo de capacidade teórica utiliza-se a equação geral de Yamaguisi (1962 *apud* Rives, 1977), que não leva em conta o tempo gasto com manutenção da via permanente e outras eventualidades, apresentada na EQUAÇÃO 4.1.

$$C_t = \frac{1.440}{km (t_{M_{max}} + \tau + 0,5 \cdot t_{M_{cr}}) + \sum (t_{ad} + t_{cr}) k_i} \quad (4.1)$$

onde:

k_m = quantidade de trens de grupos inferiores, tais como trem de manutenção ou coletores, em relação a totalidade de trens no gráfico de circulação de trens;

$t_{M_{max}}$ = tempo de circulação máximo dos trens sem preferência ou de grupo inferior pelo trecho crítico, minutos;

τ = intervalo de tempo médio, em minutos na estação - licenciamento;

$t_{M_{cr}}$ = tempo de paralização complementar médio para cruzamento de dois trens de grupo inferior em sentidos opostos, em minutos;

t_{ad} = tempo de paralisação complementar mínima de trem de grupo inferior por ultrapassagem, com outro trem de grupo mais elevado, em minutos;

t_{cr} = tempo de paralisação complementar mínima de trem de grupo inferior por cruzamento, com outro trem de grupo mais elevado, em minutos;

k_i = porcentagem sobre o dimensionamento total da circulação considerando todos os grupos de trens, excluindo os trens de manutenção.

No Japão existem quatro grupos de trens, as quais são consideradas para o cálculo de capacidade de tráfego. Cada grupo tem um tempo de circulação distinto que é considerado em relação ao trecho crítico para o cálculo de capacidade:

- I = trens rápidos de passageiros
- II = trens de passageiros
- III = trens de carga
- IV = trens de manutenção (trens de menor preferência de circulação)

Para aplicação desta equação para cada direção em vias férreas duplas, ela se simplifica, apresentada na EQUAÇÃO 4.2:

$$C_t = \frac{1.440}{(t_{M_{max}} + \tau)km + \sum t_{ad} \cdot K_i} \quad (4.2)$$

As paralisações complementares referentes a adiantamento com parada do trem de menor prioridade esta considerada na EQUAÇÃO 4.2. Neste caso os cruzamentos são realizados sem parada dos trens.

O valor de “K”, que é o coeficiente máximo de aproveitamento da capacidade teórica de tráfego, é determinado pela EQUAÇÃO 4.3:

$$k = 1 - \frac{k_1(T_1 - r_1) + k_2(T_2 + r_2) + k_3(T_3 + r_1 + r_2) + k_4(T_4 + r_1)}{1.440} \quad (4.3)$$

Onde:

k_1, k_2, k_3, k_4 = percentual de cada grupo de trens em relação à dimensão total de trens para circular;
 T_1, T_2, T_3, T_4 = tempo de duração de períodos ao longo do dia inaplicáveis para a circulação de trens correspondente a determinados grupos de trens, em minutos;

r_1 e r_2 = tempo destinado a manutenção da via e outros eventualidades, sendo que para r_1 normalmente utiliza-se 5% do período de circulação do dia ($r_1= 72$ minutos dia) para eventualidades e r_2 para manutenção da via permanente noventa minutos ($r_2=90$ minutos dia).

Para a definição da capacidade real ou efetiva, multiplica-se a capacidade teórica pelo coeficiente máximo de aproveitamento, EQUAÇÃO 4.4.

$$C_r = k C_t \quad (4.4)$$

4.1.2 Alemanha

4.1.2.1 Contextualização do país - Alemanha

A Alemanha é um país localizado na Europa central. É limitada ao norte pelo Mar do Norte, Dinamarca e pelo Mar Báltico, a leste pela Polônia e República Checa, ao sul pela Áustria e Suíça e a oeste pela França, Luxemburgo, Bélgica e Países Baixos. O território da Alemanha abrange 357 mil quilômetros quadrados e é influenciado por um clima temperado sazonal. Conforme senso de janeiro de 2010, sua população está em 82 milhões de habitantes, o país tem a maior população entre os Estados membros da União Europeia e é o terceiro maior país em população de migrantes internacionais em todo o mundo. Sua densidade populacional é de 229 hab./km².

Seu PIB é de 3,6 trilhões de dólares e o per capita é de USD 44,56. O setor de serviços contribui com 70% do PIB, a indústria 29,1% e a agricultura 0,9%. A expectativa de vida é de 80 anos. O índice de alfabetização é de 99%.

A Alemanha é a maior economia da Europa, a terceira maior quando é considerado o PIB nominal e a quinta maior quando é considerada a paridade do poder de compra.

Com a reunificação alemã em 1990, os padrões de vida e renda per capita permanecem significativamente mais elevados nos estados da antiga Alemanha Ocidental do que nos da Alemanha Oriental. A modernização e integração da economia da Alemanha Oriental continuam sendo um processo em longo prazo programado para durar até o ano de 2020, com transferências anuais de aproximadamente US\$ 80 bilhões.

A exportação de bens produzidos na Alemanha é um dos principais fatores da riqueza alemã que é muito favorecida pela sua malha ferroviária. É um dos países mais exportadores do mundo e o primeiro da Europa.

Apesar de a Alemanha ser o terceiro país em maior quantidade de estradas rodoviárias do mundo, seu transporte é predominantemente feito por ferrovias.

A ferrovia alemã dispõe de 42 mil km, 50% maior que a brasileira que tem uma área territorial 22 vezes maior, sendo que a metade, 20 mil km, é eletrificada. A bitola (distancias entres os trilhos da via férrea) é de 1.435mm. A ferrovia é controlada por 150 empresas que operam 24 mil vagões. Nos últimos anos as ferrovias Alemãs transportaram 120 milhões de passageiros em trens de longa distância (a uma distância média de 288 km), e 2.1 bilhões de passageiros em trens de curta distância (21 km em média). A média em carga geral (mercadorias) foi de 415,4 milhões de toneladas a uma distância média de 309 km.

A FIGURA 4.2 apresenta a densa malha ferroviária alemã, seu principal meio de transporte.



FIGURA 4.2 - Malha Ferroviária Alemã. (FONTE - UIC, 2010)

4.1.2.2 Método analítico e seus parâmetros – Alemanha

Em 1945, logo após a segunda guerra, as ferrovias alemãs começaram a estudar com mais profundidade a capacidade de tráfego ferroviário.

A Federação Alemã de Ferrovias, *Deutsche Bundesbahn* – DB (1975) desenvolveu estudos que consideraram a capacidade real diária, a capacidade mínima, a capacidade por hora com margem de qualidade, a capacidade por hora sem margem de qualidade e o intervalo de tempo mínimo para realização de circulação sucessiva de trens.

A capacidade real diária é o número de trens que pode circular na linha em 24 horas em função dos distintos tipos de sucessão de trens, de sua composição, de sua prioridade, de seus atrasos característicos e critérios de qualidade de serviço.

Capacidade mínima é definida como a capacidade de uma linha em suas condições mais desfavoráveis de forma que os atrasos destes trens sejam totalmente aleatórios à sua chegada ao trecho crítico.

Capacidade horária com margem de qualidade é o número máximo de trens que podem circular pela linha em uma hora, com as mesmas condições da capacidade real diária.

Capacidade horária sem margem de qualidade é a capacidade horária que se possui, em casos excepcionais, de curta duração e forte acúmulo de tráfego.

Intervalos de tempo mínimo são necessários para a circulação sucessiva dos trens que pertencem ao mesmo ou diferente tipo de trem. A determinação deste tempo deve ser estabelecida para garantir a segurança na circulação e devem ser consideradas as diferentes características para esta determinação, de comportamento dos trens, do sistema de licenciamento e controle.

Os intervalos de tempo podem ser de linha dupla ou de linha singela. Os de linha dupla se referem ao tempo mínimo de sucessão de trens que circulam no mesmo sentido na linha. Os de linha singela se referem ao tempo mínimo de circulação de trens sucessivos de mesmo sentido ou de sentidos diferentes para todos os casos possíveis de tipos de trens e seus sentidos de circulação.

Os intervalos de tempo entre trens em linha dupla são calculados pela EQUAÇÃO 4.5 e apresentado na FIGURA 4.3. O valor mais elevado de Z_{ijk} é o intervalo de tempo mínimo de sucessão dos trens dos tipos “i” e “j” no trecho A-B.

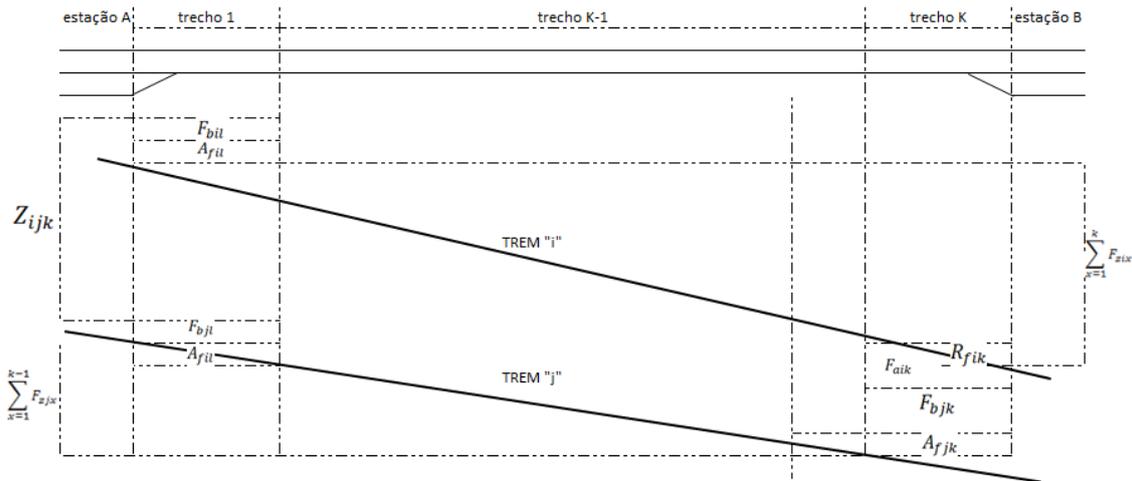


FIGURA 4.3 – Intervalo de tempo de supressão Z_{ijk} . (FONTE – RIVES, 1983)

$$Z_{ijk} = F_{bil} + A_{fil} + \sum_{x=1}^k F_{zix} - R_{fik} + F_{aik} + F_{bjk} + A_{fjk} - \sum_{x=1}^{k-1} F_{zjx} - F_{bjl} - A_{fil} \quad (4.5)$$

Z_{ijk} = Diferença entre os tempos dos diagramas de marcha dos trens de tipo diferentes “i” e “j” no trecho “k”;

F_{bil} = Tempo de deslocamento do trem “i” no trecho “1”;

A_{fil} = tempo de deslocamento no trecho de aproximação da estação “A” pelo trem “i”, sem o trem partir da estação, $A_{fil} = 0$;

$\sum_{x=1}^k F_{zix}$ = tempo de deslocamento do trem “i” no trecho entre a estação “A” até o final do trecho “k”;

R_{fik} = tempo de liberação do trem “i” no trecho “k”;

F_{aik} = tempo de encerramento do licenciamento do trem “i” no trecho “k”;

F_{bjk} = tempo de licenciamento do trem “j” no trecho “k”;

A_{fjk} = tempo de deslocamento do trecho próximo da estação “B” pelo trem “j”

$\sum_{x=1}^{k-1} F_{zjx}$ = tempo de deslocamento do trem “j” da estação “A” até o trecho “k-1”;

F_{bjl} = tempo de licenciamento do trem “j” no primeiro trecho;

A_{fil} = tempo de deslocamento no trecho de aproximação da estação “A” pelo trem “j”

Nos casos de linha singela, com circulação nos dois sentidos, a EQUAÇÃO 4.6 deve ser aplicada. O valor positivo mais elevado de Z_{ijk} constitui o intervalo de tempo mínimo de intervalo de tempo no trecho definido das estações A-B. Quando no caso de cruzamento de trens, o valor de $k=1$.

$$Z_{ijk} = F_{bil} + A_{fjl}b \sum_{x=1}^k F_{zjx} + R_{fjk} + F_{ajk} + R_{fil} + F_{ail} + F_{zil} - b \sum_{x=1}^k F_{zix} - R_{fik} - F_{aik} \quad (4.6)$$

Z_{ijk} = Diferença entre os tempos dos diagramas de marcha dos trens de tipo diferentes “i” e “j” no trecho “k”;

F_{bil} = Tempo de deslocamento do trem “i” no trecho “1”;

A_{fil} = tempo de deslocamento no trecho de aproximação da estação “A” pelo trem “i”, sem o trem partir da estação, $A_{fil} = 0$;

b = fator de correção de valor 1,5 nos casos de sucessão com ultrapassagem em que a estação tenha apenas uma via de desvio e para os casos e que não haja cruzamento ou ultrapassagem ou exista várias linhas de desvio, o valor de $b = 1$;

$\sum_{x=1}^k F_{zjk}$ = tempo de deslocamento do trem “j” no trecho entre a estação “A” até o final do trecho “k”;

R_{fjk} = tempo de liberação do trem “j” no trecho “k”;

F_{ajk} = tempo de encerramento do licenciamento do trem “j” no trecho “k”;

R_{fil} = tempo de licenciamento do trem “i” no trecho “1”;

F_{ail} = tempo de encerramento do licenciamento do trem “i” no trecho “1”;

F_{zil} = tempo de deslocamento do trem “i” no primeiro trecho;

Intervalo mínimo médio, EQUAÇÃO 4.7, é definido como a média ponderada dos intervalos de tempos Z_{ij} considerando os tipos de trens “i” e “j” representados, respectivamente, na equação por $n_i n_j$.

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i,j=1}^m n_i n_j Z_{ij}}{\sum_{i,j=1}^m n_i n_j} \quad (4.7)$$

Intervalo de qualidade é definido como sendo os tempos que se deve somar aos intervalos mínimos para anular os efeitos dos atrasos que possam ocorrer em sua chegada ao trecho em estudo. Esta margem obedece à lei de distribuição de Poisson, cujo valor médio é apresentado na EQUAÇÃO 4.8. Nesta equação o tempo do dia “T” corresponde a 1.440 minutos, o tempo no trecho crítico é representado por “B” e a quantidade de trens que circulam por dia é “N”.

$$\bar{r} = \frac{T - B}{N} \quad (4.8)$$

Já determinados os critérios que determinam a qualidade dos serviços ou margem de qualidade que se deseja na linha, deve-se definir o número máximo de atrasos admissíveis no trecho crítico, neste caso a margem de qualidade se chama margem necessária. Seu cálculo é complexo e pode ser refinado com a inserção no tempo no trecho crítico de outros fatores que podem vir a influenciar, tais como: o intervalo mínimo médio de sucessão, da probabilidade de aparecerem sucessivos trens de mesmo tipo, de atrasos anteriores médios de chegada ao trecho crítico e do grau de fluidez de trens no trecho crítico.

Com base nas definições de intervalos mínimos de sucessão de trens e da margem de qualidade, através das equações a seguir se determina a capacidade real, capacidade mínima, capacidade horária sem e com margem de qualidade.

Para a capacidade real diária considera-se a quantidade de trens que podem circular em um período de tempo por dia para suas 24 horas ou 1.440 minutos, considerando os distintos tipos de sucessões de trens, as categorias, as prioridades e os critérios de qualidade de serviço, apresentada na EQUAÇÃO 4.9:

$$C = \frac{1.440}{(\bar{Z} + r)} \quad (4.9)$$

Onde:

C = capacidade de trens por dia;

Z = média ponderada dos intervalos de tempo entre trens;

r = margem de qualidade ou de precisão ou pontualidade programada.

Para a opção mínima, se define como capacidade de uma linha, as condições mais desfavoráveis, de forma que se potencializa a aleatoriedade dos tempos de percurso, apresentada na EQUAÇÃO 4.10:

$$C_{min} = \frac{1.440}{(\bar{Z} + r_{min})} \quad (4.10)$$

Onde:

C_{min} = capacidade de tráfego mínimo nas condições mais desfavoráveis

\bar{Z} = média ponderada dos intervalos de tempos entre trens

r_{min} = mínima margem da qualidade ou de precisão ou pontualidade

Capacidade horária com margem de qualidade é a capacidade máxima de trens que podem circular por hora, com as mesmas condições da capacidade real diária, EQUAÇÃO 4.11.

$$C_{ch} = \frac{1.440}{(\bar{Z} + r)} \quad (4.11)$$

Onde

C_{ch} = capacidade de trens por hora

Z = média ponderada dos intervalos de tempos entre trens

r = margem de qualidade ou de precisão ou pontualidade programada

Capacidade horária sem margem de qualidade é a capacidade horária em casos excepcionais de curta duração e forte acúmulo de tráfego, EQUAÇÃO 4.12.

$$C_h = \frac{60}{\bar{Z}} \quad (4.12)$$

Onde:

C_h = capacidade de trens por hora;

\bar{Z} = média ponderada dos intervalos de tempos entre trens.

4.1.3 UIC – União Internacional de Caminho de Ferro

4.1.3.1 Contextualizando a UIC

Logo após a 1ª Guerra Mundial e do Tratado de Versalhes, quando ocorreu uma grande mudança nas fronteiras dos países, se fez necessário padronizar as práticas industriais já que as ferrovias nas colônias eram de responsabilidade do país colonizador. Neste ambiente, em 20 de outubro de 1922, foi fundada a UIC - União Internacional de Caminhos de Ferro, sediada em Paris, hoje com mais de 171 associados (companhias ferroviárias, operadores das linhas de caminho-de-ferro, gestores de infraestruturas, fornecedores de serviços ferroviários, companhias de transportes públicos, etc.) dos mais diferentes países dos cinco continentes. A UIC procurou definir os parâmetros das características construtivas dos materiais rodante, locomotivas e vagões, e de via permanente. A partir da década de 1990 começou a trabalhar o sistema de telecomunicação de rádio e de licenciamento através de sistema telecomandado.

Seus principais objetivos são de facilitar o compartilhamento das melhores práticas entre os membros (*benchmarking*). Ajudar seus membros a desenvolver novos negócios e novas áreas de atuação. Propor novas formas de melhorar o desempenho técnico e ambiental. Promover a interoperabilidade, criar padrões mundiais para as ferrovias, inclusive normas comuns com outros modos de transporte. Desenvolver centros de competência para tecnologias de alta velocidade, segurança, *E-Business* e outros.

A FIGURA 4.4 apresenta os países membros ativos, associados e filiados da UIC.

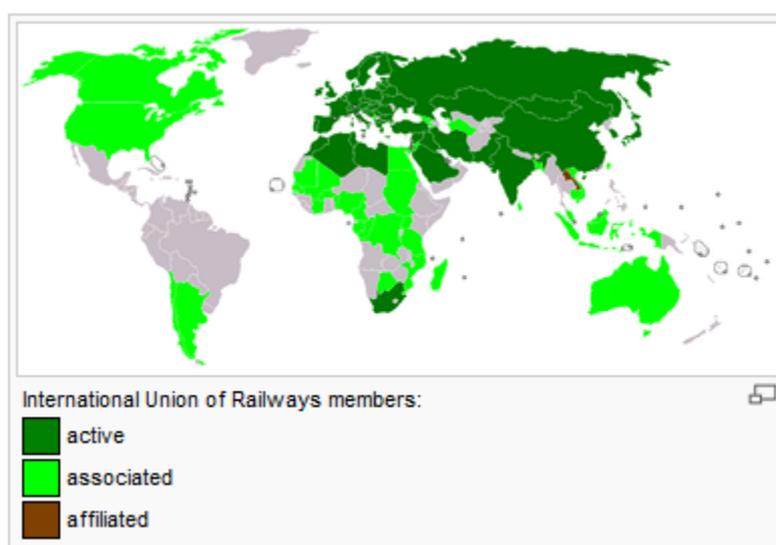


FIGURA 4.4 - Mapa dos Países Membros do UIC (FONTE – UIC, 2012).

4.1.3.2 Método analítico e seus parâmetros - UIC

A UIC (1983) desenvolveu um estudo considerando as características das linhas das ferrovias internacionais e os respectivos cálculos e procurou desenvolver uma metodologia que fosse aplicada a qualquer ferrovia. Este método foi denominado UIC 405.

O método desenvolvido pela UIC teve como premissas:

- Poder ser aplicado em qualquer rede, não precisando de instalações eletrônicas de dados;
- Sua aplicação é simples e não requer gastos elevados;
- São considerados os parâmetros de todos os trens que circulam na linha estudada, assim como a proporção relativa dos trens das diferentes grupos;
- Consideram em sua composição os tipos de instalações de regulação de tráfego existente na linha.

Foi desenvolvida a equação geral de capacidade de tráfego em uma linha férrea em um período de referencia, EQUAÇÃO 4.13:

$$L = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \quad (4.13)$$

Onde:

L = capacidade de tráfego em número de circulações em um trecho;

T = período de tempo de referencia;

t_{fm} = intervalo de tempo mínimo médio de sucessão de trens;

t_r = margem de regularidade, recomenda-se que seja 0,67 de t_{fm} para cálculo de capacidade diária e para cálculo de capacidade horária recomenda-se 0,33 de t_{fm} ;

t_{zu} = tempo suplementares;

O t_{zu} é definido seu calculo por meio da expressão “ $t_{zu} = 0,25 a$ ”, onde “a” é o número de seções da linha.

O período de referencia T se toma considerando ás 24 horas do dia que corresponde a 1.440 minutos, obtendo a capacidade diária de tráfego. Para cálculo da capacidade por hora, se considera 60 minutos.

O intervalo mínimo médio de sucessão de trens (t_{fm}) pode ser calculado por dois procedimentos diferentes, denominados dependente e independente de horário.

Para o procedimento de intervalo mínimo médio de sucessão que dependente de horário, o valor para via de linha dupla é calculado pela EQUAÇÃO 4.14:

$$t_{fm} = \frac{\sum(n_{ij} t_{fij})}{\sum n_{ij}} \quad (4.14)$$

Onde:

n_{ij} = número de casos possíveis de sucessão de trens;

t_{fij} = intervalo de tempo de sucessão mínima entre dois trens consecutivos.

Para o caso de linha singela, a equação de intervalo mínimo de sucessão será EQUAÇÃO 4.15:

$$t_{fm} = \frac{\sum n_{ij(aa)} t_{ij(aa)} + \sum n_{ij(ab)} t_{ij(ab)} + \sum n_{ij(bb)} t_{ij(bb)} + \sum n_{ij(ba)} t_{ij(ba)}}{\sum n_{ij}} \quad (4.15)$$

Onde:

$n_{ij(aa)}$ = número de sucessão de trens no sentido AB

$n_{ij(ab)}$ = número de sucessão de trens no sentido AB por outro trem no sentido BA

$n_{ij(bb)}$ = número de sucessão de trens no sentido BA

$n_{ij(ba)}$ = número de sucessão de trens no sentido BA por outro trem no sentido AB

$t_{ij(aa)}$ = intervalo de tempo mínimo de sucessão de dois trens em sentido AB

$t_{ij(ab)}$ = intervalo de tempo mínimo de sucessão de dois trens em sentido AB e BA

$t_{ij(bb)}$ = intervalo de tempo mínimo de sucessão de dois trens em sentido BA

$t_{ij(ba)}$ = intervalo de tempo mínimo de sucessão de dois trens em sentido BA e AB

Para o cálculo de intervalo mínimo médio de sucessão independente do horário, o cálculo será em relação ao número de trens agrupados por velocidades, a EQUAÇÃO 4.16 mostra.

$$t_{fm} = \frac{\sum n_{ij} t_{fij}}{\sum n_i n_j} \quad (4.16)$$

Onde:

$n_i n_j$ = número de trens agrupados por intervalo de velocidade

4.1.4 Inglaterra

4.1.4.1 Contextualização do país - Inglaterra

Seu território é composto pela ilha da Grã-Bretanha, a parte nordeste da Irlanda, mais quatorze ultramarinos, todos remanescentes do Império Britânico. São 245 mil km² de área sendo que a metade, 130 mil km², corresponde à Inglaterra, a ilha britânica. Seu relevo é constituído de planícies e a noroeste de cadeias de montanhas. A Escócia corresponde a um terço com 79 mil km², seu relevo é constituído das planícies das terras altas e das planícies das terras baixas, que são separadas pela Falha da *Highland*, falha geológica que tem distancia entre si variando de poucos metros a vários quilômetros. O País de Gales tem um décimo com 21 mil km², seu relevo é construído de montanhas, ao norte com maior concentração e ao sul um pouco menos.

O clima de modo geral é temperado com grande volume de chuvas o ano todo. Com exceção da Irlanda do Norte, ela é cercada pelos oceanos Atlântico, Mar do Norte, Canal da Mancha e o Mar da Irlanda. Sua conexão com a Europa é pela França pelo Eurotúnel.

O império Britânico, em seu período de maior poder, possuía mais de um quarto da superfície terrestre, o que fez dele o maior império da história. Sua influência pode ser vista na língua, cultura, sistema judiciário de suas ex-colônias como os Estados Unidos, Canadá, Austrália, Índia e em muitos outros países que tiveram sua influencia multiplicada por estes países.

O aparecimento da ferrovia teve início na Inglaterra, no início do século XIX, com a aplicação do princípio das máquinas a vapor às locomotivas. A bitola da primeira via férrea comercial interurbana do mundo, inaugurada em 15 de Setembro de 1830, com a locomotiva *Rocket*, de fabricação de George Stephenson, não foi o resultado de uma investigação científica, nem de estudos de engenharia, ou de economia dos transportes. Simplesmente foi adotada, para os trilhos, a

distância mais comum encontrada entre as rodas das carruagens, diligências e carroções ingleses: 1,435m. Essa distância entre os trilhos veio a ser a bitola mais empregada, ou veio a ser a bitola predominante, muito embora outras bitolas aparecessem logo após a inauguração. Na Inglaterra, foram empregadas outras bitolas. As de maior interesse comercial foram a bitola extra larga, com 7' 1/4" (2,14 m) desenvolvida pelos engenheiros Isambard Kingdon e o técnico Daniel Gooch e utilizada na ferrovia *Great Western*. Outra bitola desenvolvida e atualmente utilizada em algumas ferrovias no Brasil é a larga de 1,60m, conhecida na época como "bitola irlandesa".

A primeira linha ferroviária comercial em operação no mundo, chamada *Liverpool and Manchester Railway (L&MR)*, entrou em operação em 1825. Seu grande sucesso comercial levou à criação de inúmeras outras linhas no país, todas privadas. Em 1850 a maior parte das cidades possuía pelo menos uma estação e linha de trem em seu território.

O desenvolvimento foi tão intenso que tal período foi chamado de *Railway Mania* e suas consequências benéficas são vistas até hoje. As principais estações de trem presentes hoje em Londres – e responsáveis pelo desenvolvimento dos subúrbios da cidade – foram criadas por companhias ferroviárias concorrentes durante esse período. O total construído na *Railway Mania*, durante aquele curtíssimo período de tempo, foi de 10 mil km. Para fins de comparação a malha total do Reino Unido hoje é de quase 17 mil km.

E apesar de tal crescimento sem precedentes, ele poderia ter sido mais rápido ainda. O fato de não existir qualquer tipo de regulação na construção e operação das linhas certamente aumentou o dinamismo e concorrência, porém era necessário obter uma autorização, um "*royal charter*", antes de iniciar a construção. Tal burocracia, como o esperado, atrasou o desenvolvimento ferroviário. Como exemplo, a já citada L&MR foi iniciada em 1825, porém só obteve sua autorização definitiva alguns anos depois, após longas discussões e idas e vindas burocráticas.

Um fato inusitado é que não havia qualquer lei obrigando a cooperação no setor, como direito de passagem nos trilhos, bitola ou interligação. O sistema foi auto-regulado por decisões privadas, com a formação de acordos de cooperação e junção entre as linhas. E quanto tal acordo não era possível ocorria a pura e simples livre-concorrência, com linhas correndo em paralelo e várias estações na mesma cidade.

O Reino Unido possui 16.500 km de estradas de ferro, que são a maneira mais rápida de locomoção entre Londres e as cidades importantes do país. O sistema tem preços razoáveis e são caracterizadas pela pontualidade e organização.

O trem atualmente que mais chama a atenção é o que faz a ligação da Europa com a Inglaterra, passando pelo Canal da Mancha, conhecido como *Eurotunnel*. Mesmo nome da empresa responsável pela construção das duas vias do túnel ferroviário submarino, que passam sob o Canal da Mancha, ligando a Grã-Bretanha e a França em *Folkestone, Kent*, e *Coquelles*, no *Nord Pas-de-Calais*. O *Eurotunnel* tem serviço de transporte próprio entre *Folkestone* e Calais para passageiros e veículos e também serve a outros operadores de transporte ferroviário, como a empresa ferroviária *Eurostar*. O *Eurotunnel* opera uma frota de 25 trens para o transporte de carros, ônibus e caminhões, além de seus motoristas e passageiros. Os trens funcionam 24 horas por dia, 7 dias por semana. Há dois trens por hora entre 06h00 e 00h00 e um por hora entre 00h00 e 06h00. Este transporte já está em funcionamento há mais de 12 anos e, desde os seus primeiros serviços comerciais, 177 milhões de pessoas viajaram pelo túnel do Canal - três vezes a população da França e da Inglaterra.

A FIGURA 4.5 apresenta a malha ferroviária no Reino Unido, incluindo a ligação com o continente europeu através do *Eurotunnel*.



FIGURA 4.5 - Malha Ferroviária do Reino Unido. (FONTE - UIC, 2010)

4.1.4.2 Método analítico e seus parâmetros – Inglaterra

As ferrovias Britânicas são em sua maioria em linha dupla onde é utilizada a tecnologia da sinalização no sistema de licenciamento e controle dos trens.

A BR desenvolveu uma equação de cálculo de capacidade para estas características, ou seja, de linha dupla, com bloqueio automático ou elétrico-manual, apresentada na EQUAÇÃO 4.17.

No método Inglês, o valor de intervalo de sucessão médio de trens no tempo “*H*” (*headway*) é:

$$H = \frac{T}{V} (\rho + p + x + d + s) \quad (4.17)$$

Onde:

V = velocidade dos trens no trajeto de estudo;

ρ = comprimento do trem;

p = distância de deslizamento admissível (*overlap*);

x = distância entre postos de bloqueio contínuos;

d = distância de frenagem;

s = distância de visualização dos sinais semafóricos.

Logo a capacidade de tráfego nesse caso de bloqueio entre estações será conforme EQUAÇÃO 4.18:

$$C_1 = \frac{3.600 V}{(\rho + p + x + d + s)} \quad (4.18)$$

Fazendo $x = d$ (distância entre postos de bloqueio contínuos iguais à distância de frenagem), tem-se que a capacidade de tráfego para bloqueio automático de três indicadores, conforme EQUAÇÃO 4.19:

$$C_2 = \frac{3.600 V}{(\rho + p + s + 2d)} \quad (4.19)$$

Se a distancia de frenagem é em função da velocidade na relação de $d = K V^2$, demonstra que existe um valor máximo da velocidade admissível, EQUAÇÃO 4.20:

$$V = \sqrt{\frac{(\rho + p + s)}{2k}} \quad (4.20)$$

Deve-se considerar a velocidade limite para a definição da capacidade. Para uma capacidade desejável C_2 a determinação das distancias entre sinais “y” é conforme a EQUAÇÃO 4.21:

$$C'_2 = \frac{3.600 V}{(\rho + p + s + 2y)} \quad (4.21)$$

O bloqueio de quatro sinais surgiu na Grã Bretanha como necessidade em função do aumento da demanda e um gráfico heterogêneo de trens em seu tipo e densidade. A separação dos trens consecutivos para este tipo de bloqueio levou a distância $x = d/2$. Conforme a EQUAÇÃO 4.22.

$$H = \frac{1}{V} \left(\rho + p + s + \frac{3d}{2} \right) \quad (4.22)$$

Analogamente, para uma capacidade necessária C'_3 a separação (distância) entre os sinais z é determinada pela EQUAÇÃO 4.23:

$$C'_3 = \frac{3.600 V}{(\rho + p + s + 3z)} \quad (4.23)$$

4.1.5 Espanha

4.1.5.1 Contextualização do país - Espanha

A Espanha tem seu território principal limitado ao sul e a leste pelo Mar Mediterrâneo, com exceção a uma pequena fronteira com o território britânico ultramarino de Gibraltar; ao norte pela França, Andorra e pelo Golfo da Biscaia e ao noroeste e oeste pelo Oceano Atlântico e por Portugal. O território espanhol inclui ainda as Ilhas Baleares, no Mediterrâneo, as Ilhas Canárias, no Oceano Atlântico, próximas da costa Africana e duas cidades autônomas no norte de África, Ceuta e Melilla, que fazem fronteira com o Marrocos.

Com uma área de 504 mil km², a Espanha é, depois da França, o segundo maior país da Europa Ocidental e da União Europeia. Sua densidade populacional é de 90 hab./km². É um país desenvolvido com o nono PIB nominal mais elevado do mundo com 1,536 trilhões de dólares e o PIB per capita de US\$ 30,64 e elevado padrão de vida, a Espanha possui o 23º melhor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do mundo. A expectativa de vida é de 80,9 anos, ocupando a 6ª colocação mundial. Seu índice de alfabetização é de 97,9%, que a deixa na 49ª colocação mundial.

A Espanha trabalha fortemente com fontes alternativas de energia um fator estratégico para o país. Em 2010, os espanhóis superaram os Estados Unidos como líderes mundiais em energia solar, com uma planta de grande potência na estação chamada La Florida, perto de Alvarado, Badajoz. Nos

4.1.5.2 Método analítico e seus parâmetros - Espanha

O método mais utilizado na Espanha, desenvolvido pela RENFE, consiste na integração de todos os tempos de ocupação do trecho crítico pelos distintos tipos de trens que circulam por uma ferrovia, de forma que não se supera o valor global de um determinado período.

Partindo de N_1 trens “ímpares” na EQUAÇÃO 4.24, onde n_i é o número de trens ímpares que ocuparam o trecho crítico.

$$\sum_{i=1}^n n_i = N_1 \quad (4.24)$$

E em sentido oposto “par” igualmente existirá n'_i trens que ocuparam o trecho crítico t'_i EQUAÇÃO 4.25:

$$\sum_{i=1}^n n'_i = N_2 \quad (4.25)$$

Somando $N_1 + N_2 = NT$, temos o número total de trens em circulação na linha no trecho crítico.

Para a condição de que não se sobreponha o período de tempo definido, tem-se a EQUAÇÃO 4.26:

$$\sum_{i=1}^n n_i t_i + \sum_{i=1}^m n'_i t'_i + \sum_{i=1}^n n_i \tau_i + \sum_{i=1}^m n'_i \tau'_i \leq T \quad (4.26)$$

Na equação se indica os intervalos de tempo (licenciamento) referente à estação para os trens i , com os valores τ_i e τ'_i (trens ímpar e par) e o tempo T global de período definido.

Outra forma de apresentar é pela EQUAÇÃO 4.27:

$$N_T < \sum_{i=1}^n (t_i + \tau_i) \frac{n_i}{N_T} + \sum_{i=1}^m (t'_i + \tau'_i) \frac{n'_i}{N_T} \leq T \quad (4.27)$$

Considerando constantes as relações, EQUAÇÃO 4.28:

$$\frac{n_i}{N_t} = P_i \text{ e } \frac{n'_i}{N_t} = P'_i \quad (4.28)$$

onde P_i é a relação entre número total de trens ímpares com o número total de trens e P'_i para pares. t_i tempo para trens ímpares e t'_i para trens pares.

Logo a expressão de número máximo de trens possível de circular será a EQUAÇÃO 4.29 aplicada no trecho crítico.

$$NT \leq \frac{T}{\sum_{i=1}^n (t_i + \tau_i) P_i + \sum_{i=1}^m (t'_i + \tau'_i) P'_i} \quad (4.29)$$

4.1.6 Brasil

4.1.6.1 Contextualizando o país - Brasil

Para se compreender a evolução histórica das ferrovias brasileiras, é necessário analisar o Brasil e seu contexto econômico, bem como o nível de tecnologia existente. As ferrovias surgiram no Brasil durante o ciclo do café, que predominou da segunda metade do século 19 até meados de 1930. Na época, a economia do país era primordialmente agrícola e agroexportadora. Dada a baixa atratividade dos empreendimentos para a construção das ferroviárias, o governo imperial brasileiro instituiu em 1852 a lei de garantia de juros (decreto numero 641), que autorizava a concessão da construção e exploração de ferrovias pelo prazo máximo de 90 anos (SILVEIRA, 2003).

A lei estabelecia uma série de benefícios. A medida mais importante era a garantia de uma taxa de retorno de até 5% sobre o capital empregado na construção da ferrovia. Para isso, o governo imperial pagaria, com recursos públicos, ao investidor a atratividade do empreendimento. Como havia escassez de bens de capital no país e praticamente não existiam indústrias, a lei isentava do

imposto de importação a compra de trilhos, outros equipamentos ferroviários e o carvão de pedra consumido nas locomotivas durante a construção da estrada de ferro.

A lei proibia a construção de outra ferrovia num raio de 5 léguas (33 km), o que conferia ao administrador privado o monopólio do transporte ferroviário dentro da região. Isso era importante para garantir uma escala mínima de tonelage para ser transportada para garantir o retorno do empreendimento. Com todas essas medidas, houve crescente interesse da iniciativa privada na construção e exploração das ferrovias. Contudo, embora tenha sido estimulado o investimento privado, não foi criado um órgão regulador. Houve crescimento desordenado e sem planejamento de diferentes tipos de bitolas nos diversos trechos, o que inviabilizava sua integração.

Além disso, os mecanismos criados pela Lei de Garantia de Juros passaram a ser insustentáveis para o Tesouro Nacional. Os desembolsos com recursos públicos para garantir o retorno de 5% e a renúncia fiscal de arrecadação dos materiais importados representaram crescentes déficits orçamentários ao governo imperial. Como resultado, os benefícios da lei foram reduzidos, o que afastou a iniciativa privada desses empreendimentos. Para compensar a saída do capital privado, o governo imperial passou a construir novos trechos e a participar como acionista das ferrovias privadas. Ao final do Império, em 1889, a malha ferroviária do país somava 9,5 mil km, sendo que o governo era proprietário de um terço desse total.

No começo do século 20, já na República, a economia brasileira passava por um período de transição. A mão de obra assalariada crescia, e um processo de industrialização se iniciava. A agricultura, antes voltada ao mercado externo, passou a ser também direcionada ao crescente mercado interno (FURTADO, 2006).

Nesse processo de modernização econômica e social, as ferrovias desempenharam um importante papel. A partir da década de 1920, a construção de rodovias pavimentadas foi ampliada, passando a competir com as ferrovias por recursos públicos e pelo transporte de cargas e passageiros. Isso representou perda de receita para o modo ferroviário e menos investimentos em infraestrutura para o setor. Além disso, a fragmentação da malha e as dificuldades de gestão comprometiam cada vez mais o transporte por ferrovias. Apesar dessas dificuldades, durante os 30 anos que se seguiram, desde 1920 até 1950, a Malha ferroviária nacional se expandiu em mais de 8.000 quilômetros. Contribuiu para esse processo não apenas as vantagens naturais das ferrovias no transporte terrestre,

mas também pelo desenvolvimento, ao longo do tempo, de novas tecnologias que permitiram a substituição de trens movidos a vapor por veículos de tração elétrica e, posteriormente, por motores a diesel. Em 1957, foi criada a RFFSA (Rede Ferroviária Federal S.A.), com o objetivo de integrar, sob uma mesma administração, a rede ferroviária pertencente à União.

A criação da empresa trouxe avanços para o setor, como o crescimento da tonelagem transportada e o aumento da produtividade do trabalho. De 1900 até 1960, a malha ferroviária nacional cresceu 139%, passando de 15,3 mil km para 38,3 mil km (CASTRO, 2000).

As décadas que se seguiram trouxeram grandes obstáculos para as ferrovias. Na década 1980, com a crise fiscal do estado brasileiro o modelo vigente de gestão das ferrovias se tornou insustentável. As receitas da RFFSA não eram suficientes para arcar com a dívida contraída. No final desse período, iniciaram-se os estudos para a retomada da participação do capital privado no setor. Na década de 1990, a malha da RFFSA foi concedida.

A FIGURA 4.7, apresenta a malha ferroviária em 1870, eram 1.357 km de ferrovia nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro, Bahia, Ceará e Pernambuco.

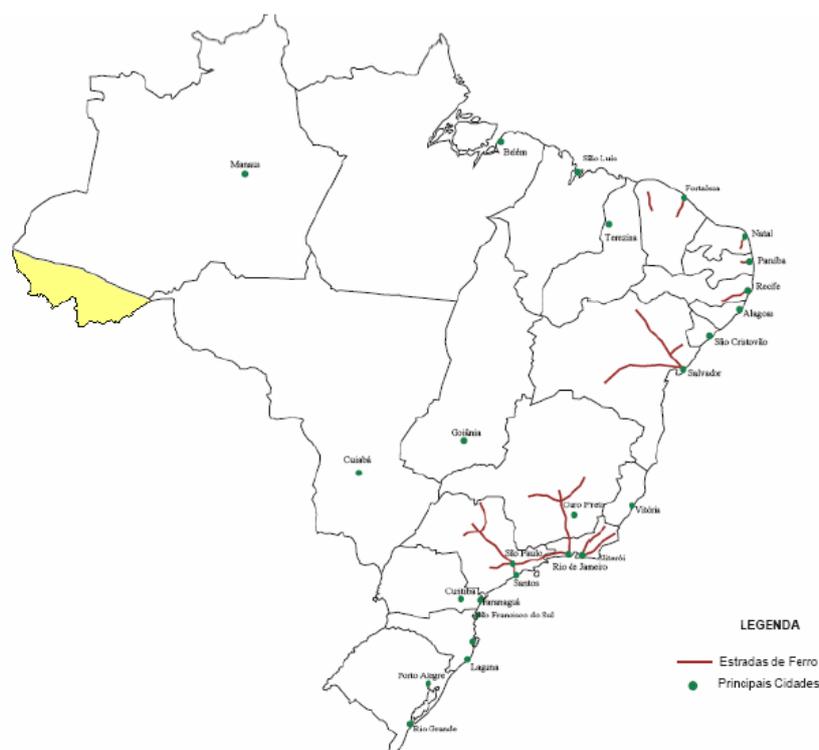


FIGURA 4.7 - Densidade das ferrovia no Brasil na década de 1870. (FONTE – SILVEIRA, 2003).

A FIGURA 4.8 mostra a distribuição no território nacional do pico da extensão da malha ferroviária de 38,3 mil km.

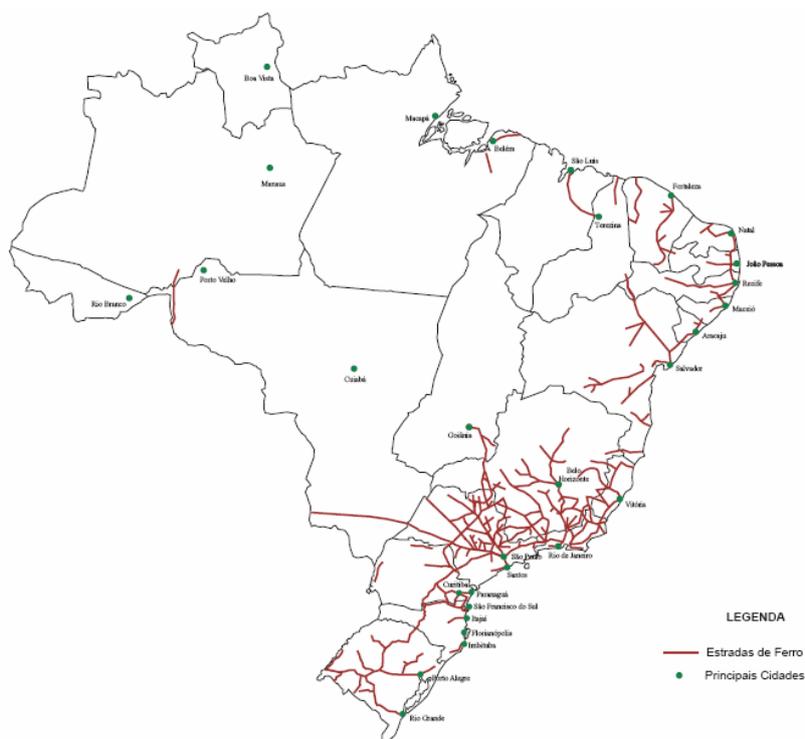


FIGURA 4.8 - Ferrovias Brasileiras na década de 1930. (FONTE – SILVEIRA, 2003)

Os pontos positivos hoje verificados do Sistema Ferroviário Nacional são resultados dos avanços que as concessões à iniciativa privada trouxeram para o setor. As concessionárias se tornaram responsáveis pelos investimentos na manutenção da malha concedida. A tonelagem transportada aumentou consideravelmente, bem como o nível de segurança, atestado pelo declínio no índice de acidentes.

A malha ferroviária brasileira alcançou, em 2012, 30.129 km de extensão, incluindo trens urbanos de passageiros (ANTT, 2012). O valor é inferior ao pico observado no início da década de 1960, quando a quilometragem total das ferrovias chegou a 38.287 km, mas é superior ao existente na década de 1980, quando a malha existente alcançou pouco mais de 28.942km (IBGE, 1990).

Atualmente, a densidade da malha ferroviária brasileira é de pouco mais de 3,3 km de linhas férreas por mil km² de território. Comparativamente a outros países, o Brasil é de menor proporcionalidade, mesmo quando a quilometragem total da malha é acrescida dos trens metropolitanos.

A redução na malha ferroviária foi uma tentativa de se eliminar vias férreas deficitárias e ramais ou trechos ferroviários antieconômicos. Aproximadamente 8 mil km de linhas ferroviárias foram desativados desde a década de 1960. O GRÁFICO 4.1 mostra a evolução da extensão da malha ferroviária brasileira desde sua criação até os dias atuais.



GRÁFICO 4.1 - Ferrovias brasileiras evolução de 1854 a 2012. (FONTE – CNT, 2013)

O fim na retração da extensão da malha também ocorreu em função dos resultados obtidos com a inclusão da RFFSA no PND (Plano Nacional de Desestatização) em 1992, quando se iniciou o repasse do controle operacional à iniciativa privada. A concessão abrangeu 12 trechos de linha distintos que totalizavam mais de 28,6 mil km, ou 94% da malha existente. O restante da malha compreende linhas locais, trens urbanos e turísticos e soma 1,4 mil km. A TABELA 4.1 resume a configuração da atual malha ferroviário nacional de acordo com a operadora e a bitola.

TABELA 4.1- Ferrovias Brasileiras e suas respectivas bitolas e extensão de sua malha.

Ferrovias	Bitola			
	Larga (1,6 m)	Métrica (1,0 m)	Mista	Total
América Latina Logística Malha Oeste S.A. - ALLMO ⁽¹⁾	-	1.945	-	1.945
Ferrovias Centro-Atlântica S.A. - FCA	-	7.910	156	8.066
MRS Logística S.A. - MRS	1.632	-	42	1.674
Ferrovias Tereza Cristina S.A. - FTC	-	164	-	164
América Latina Logística Malha Sul S.A. - ALLMS	-	7.254	11	7.265
Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. - FERROESTE	-	248	-	248
Estrada de Ferro Vitória a Minas - EFVM	-	905	-	905
Estrada de Ferro Carajás - EFC	892	-	-	892
Transnordestina Logística S.A. - TLSA	-	4.189	18	4.207
América Latina Logística Malha Paulista S.A. - ALLMP	1.463	243	283	1.989
América Latina Logística Malha Norte S.A. - ALLMN	617	-	-	617
Ferrovias Norte-Sul - FNS - VALEC/Subconcessão:	720	-	-	720
SubTotal	5.324	22.858	510	28.692
Metros: São Paulo ⁽²⁾ , Rio de Janeiro, Porto Alegre, Recife, Belo Horizonte, Distrito Federal, Teresina	216,5	71,7	-	305,6
VLTs: Cariri e Maceió	0,0	45,7	-	45,7
Trens urbanos: CPTM, SuperVia, Central ⁽³⁾ , João Pessoa, Maceió, Natal, Fortaleza, Trem suburbano de Salvador	474,1	180,4	-	671,5
Trens Turísticos e Culturais: Campos do Jordão / Corcovado / Outros ⁽⁴⁾	0,0	117,4	-	117,4
Trombetas / Amapá ⁽⁵⁾ / Jarí	68,0	35,0	-	297,0
SubTotal - Outras operadoras	759	450	-	1.437
TOTAL	6.083	23.308	510	30.129

FONTE – ANTT, 2012

As concessões ferroviárias trouxeram diversos ganhos para a estrutura logística e econômica nacional. Os mais imediatos decorreram do recolhimento de mais de R\$ 1,76 bilhão pela União com os leilões na década de 1990, seguido pela desoneração dos cofres públicos dos déficits que o setor apresentava. Após o período inicial de transição, a maior parte das ferrovias observou um resultado positivo do patrimônio líquido, após décadas de fechamentos negativos da RFFSA.

Os ganhos de eficiência foram expressivos. A redução no índice de acidentes desde 1997 até 2011 foi de 82%, apresentado no GRÁFICO 4.2.

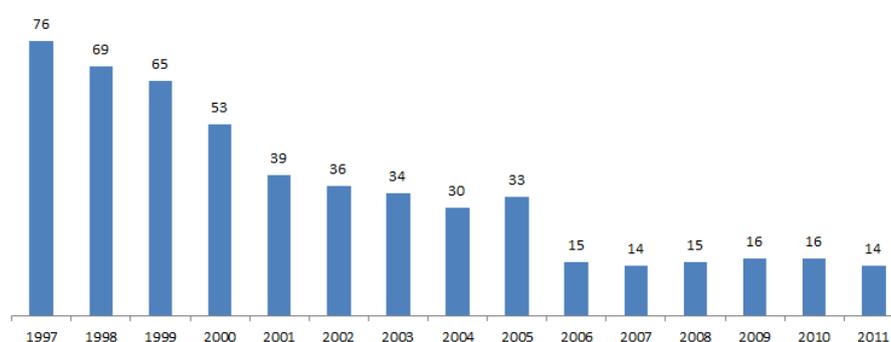


GRÁFICO 4.2 - Índice de acidentes ferroviários de 1997 a 2011. (FONTE - ANTT, 2012)

O índice de eficiência energética, que representa o consumo de diesel por mil tku (tonelada por quilômetro útil), em 1990, eram necessários 5,31 litros de diesel para o transporte de mil tku. Em 2011, o consumo baixou para 4,15 litros de diesel por tku, que é equivalente a uma redução de 22%, deixando de consumir 337 milhões de litros de diesel para realizar o serviço de 290,48 bilhões de tku em 2011. Situação apresentada no GRÁFICO 4.3.

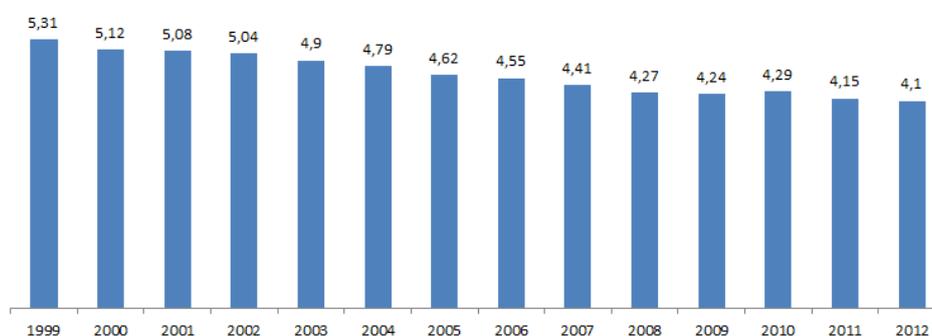


GRÁFICO 4.3 - Coeficiente energético de 1997 a 2011. (FONTE - ANTT, 2012)

A produção ferroviária total aumentou passando de 253 milhões de toneladas em 1997 para 522 milhões de toneladas em 2012, o que corresponde a um aumento de 106% neste período. Situação apresentada no GRÁFICO 4.4.



GRÁFICO 4.4 - Movimentação de carga em milhões de toneladas. (FONTE – ANTF, 2012)

Quando se mede em tonelada transportada em relação ao quilometro útil percorrido, o aumento foi de 120%, passando de 137 bilhões de TKU, em 1997, para 301 bilhões de TKU, em 2012, apresentado no GRÁFICO 4.5.

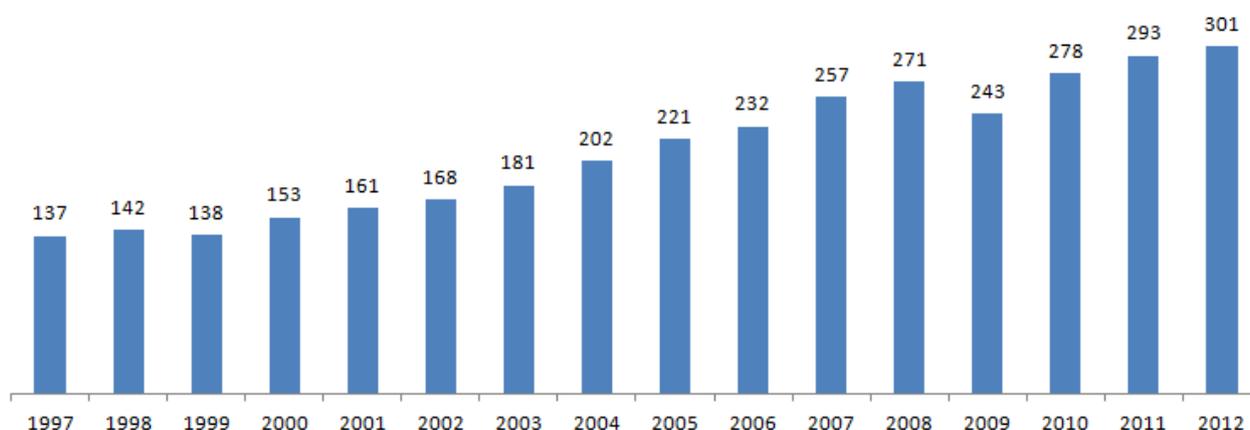


GRÁFICO 4.5 - Movimentação de carga em milhões de toneladas por km útil. (FONTE – ANTF, 2012)

Os produtos mais transportados em 2010, 2011 e 2012, estão relacionados na TABELA 4.2.

TABELA 4.2 – Produtos mais transportados por ferrovia de 2010 a 2012 (em mil ton.).

Subgrupo / Mercadoria	2010	2011	2012	Part. Média (%)
Minério de Ferro	204.312	218.014	222.880	73,94%
Soja	13.649	16.382	15.173	5,18%
Milho	10.119	7.743	15.370	3,79%
Indústria Siderúrgica	8.802	8.510	8.249	2,94%
Farelo de Soja	6.934	6.950	5.647	2,25%
Graneis Minerais	6.186	6.712	5.759	2,14%
Combustíveis, Derivados do Petróleo e Alcool	5.742	6.142	6.496	2,11%
Açúcar	5.266	6.415	5.833	2,01%
Adubos e Fertilizantes	3.977	4.246	4.098	1,41%
Carvão/Coque	4.052	3.564	3.622	1,29%
Cimento	2.073	1.945	1.724	0,66%
Container	1.799	1.641	1.769	0,60%
Extração Vegetal e Celulose	1.655	1.721	1.712	0,58%
Indústria Cimenteira e Construção Civil	1.562	1.586	1.551	0,54%
Produção Agrícola (menos açúcar e milho)	1.646	1.523	1.374	0,52%
Carga Geral – Não Containerizada	155	127	146	0,05%
Total geral	277.928	293.220	301.402	100,00%

FONTE – ANTF, 2013

Estas melhorias se traduziram em significativos estímulos à indústria ferroviária nacional, que passou de uma produção de 6 vagões anuais em 1991 para 5.616 em 2011 (ABIFER, 2012).

As concessionárias ferroviárias geraram um crescimento de 164% em empregos diretos e indiretos, ao se comparar o ano de 1997 com o de 2011, sem contar a geração de empregos na Indústria Ferroviária Nacional. O GRÁFICO 4.6 mostra esta evolução muito significativa.

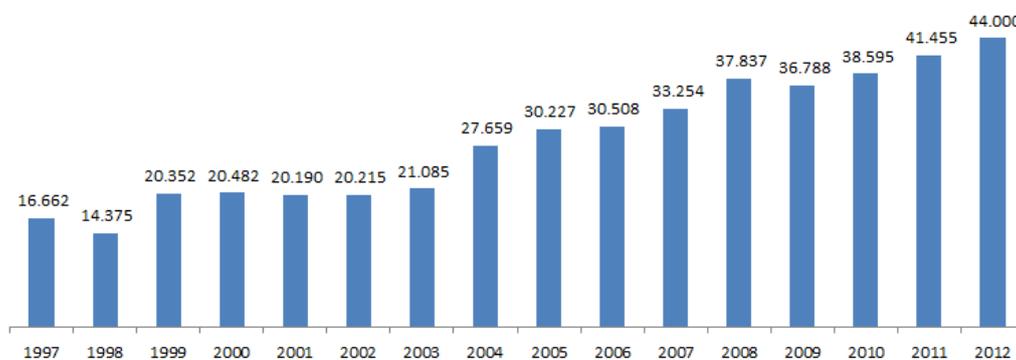


GRÁFICO 4.6 - Empregos diretos e indiretos na malha ferroviária. (FONTE – ANTT- 2012)

As melhorias obtidas foram em função do expressivo volume de investimentos das concessionárias, fundamentais para impedir uma escalada mais acelerada na retração da malha ferroviária. De 1997 até 2012, os investimentos privados somaram R\$ 33,9 bilhões, apresentando um crescimento médio de 79% ao ano, e os investimentos públicos somaram R\$ 9,99 bilhões, apresentados no GRÁFICO 4.7.

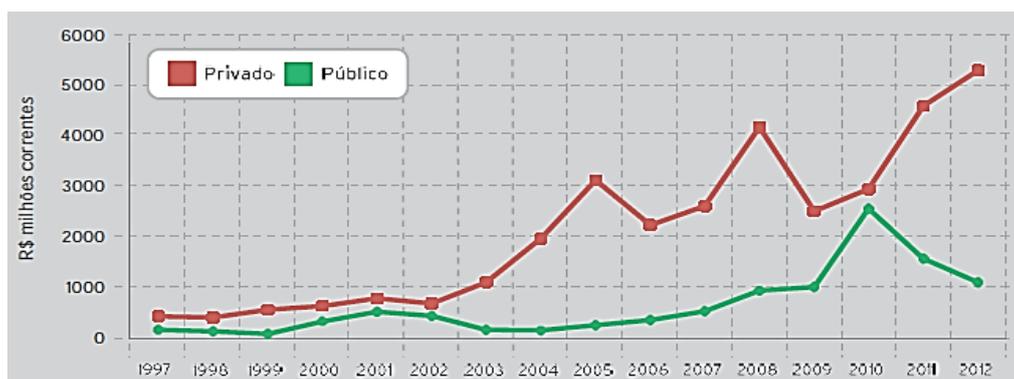


GRÁFICO 4.7 - Investimentos realizados pela iniciativa privada e pública de 1997 a 2012 (FONTE - CNT, 2013).

Inicialmente os investimentos se concentraram na recuperação da malha ferroviária e material rodante (locomotivas e vagões). De 2000 até 2007, o foco foi pelo aumento da capacidade e melhoria dos serviços operacionais. Atualmente, observa-se um movimento para a superação dos gargalos logísticos e expansão da malha. De 1997 a 2011, as concessionárias investiram principalmente em material rodante (locomotivas, vagões, etc.). Esse tipo de investimento recebeu R\$ 11,5 bilhões ao longo de todo o período, representando 40% do total.

Em segundo lugar, vêm os investimentos em via permanentes, que respondem por 31% dos recursos aplicados (R\$ 8,7 bilhões). Em relação ao investimento público, a União investiu R\$ 9,9 bilhões na malha ferroviária nacional entre 1997 e 2012 (CNT, 2013). Isso representa 23% do investimento total (público e privado) do período. O principal empreendimento público foi a Ferrovia Norte-Sul que recebeu R\$ 7,1 bilhões entre 2000 e 2012. Os demais investimentos feitos pela União foram: - R\$ 1,4 bilhão na construção da Ferrovia de Integração Oeste-Leste, nos trechos Ilhéus/Caetité/Barreiras; - na Bahia de R\$ 453 milhões entre 2010 e 2012; - na construção do sistema de trens urbanos de Fortaleza de R\$ 306 milhões entre 2000 e 2003; - na implementação do sistema de metrô em Belo Horizonte de R\$ 201 milhões entre 2000 e 2004; - na construção da ponte Rodoferroviária na BR-158 sobre o rio Paraná na divisa entre Mato Grosso do Sul e São Paulo de R\$ 185 milhões entre 1997 e 1998; - na implementação do metrô de Salvador de R\$ 181 milhões

entre 2000 e 2003 e na implementação do metrô de Recife foram investidos R\$ 119 milhões entre 2001 e 2002. Os recursos destes investimentos representaram 86% do investimento público total entre 1997 e 2012. O restante dos recursos públicos foi aplicado em outros projetos, como programas de segurança e sistemas de metrôs urbanos.

Estão previstos, pelo PPA (Plano Plurianual), investimentos na ordem R\$ 39,6 bilhões para infraestrutura ferroviária entre 2013 e 2015. Entre as metas apresentadas pelo PPA estão: expansão da malha ferroviária, a construção de acessos a portos, a adequação de trechos ferroviários, a manutenção permanente de trechos e a implantação de um novo modelo de concessão ferroviária.

O PIL do governo federal é um avanço para o setor de transporte, principalmente o ferroviário. As ações do programa têm por finalidade a expansão da capacidade da malha ferroviária via participação da iniciativa privada na construção, manutenção e operação da malha via PPP (Parceria Pública Privada). Estão previstas intervenções em 10 mil quilômetros de ferrovias com investimento estimado em R\$ 91 bilhões dos quais R\$ 56 bilhões devem ser aplicados nos primeiros cinco anos de contrato e mais 35 bilhões em 25 anos, mostrado no FIGURA 4.9.

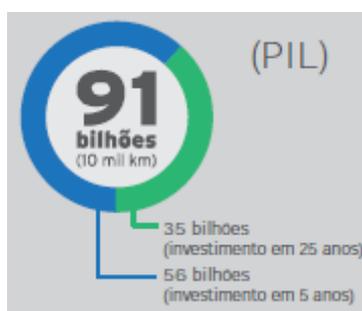


FIGURA 4.9 - Valores previstos pelo PIL para investimento em ferrovia. (FONTE – CNT, 2013)

Na FIGURA 4.10 é possível visualizar a malha ferroviária existente e identificar os trechos que serão integradas à malha ferroviária brasileira pelo PIL.

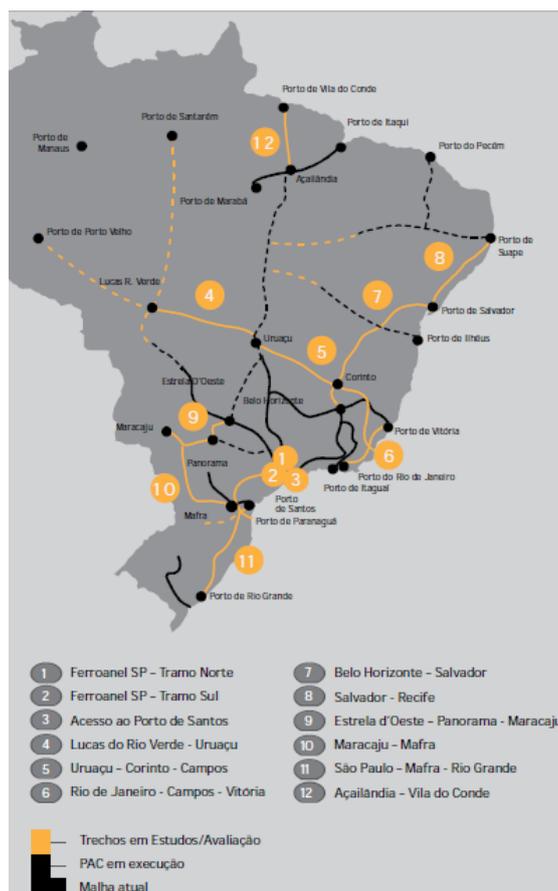


FIGURA 4.10 – Malha ferroviária brasileira atual e a que será integrada pelo PIL. (PONTE - CNT, 2013)

Dentre os projetos integrantes do PIL, existem trechos que, apesar de existentes, serão remodelados no âmbito do programa. Das obras apresentadas, seis não constam no PAC (Programa de Aceleração do Crescimento), mas, com exceção do acesso ferroviário aos portos de Santos e de Salvador, as obras já eram previstas pelo PNLNT. Contudo, intervenções importantes para o desenvolvimento do país, como a construção de contornos ferroviários e recuperação de ferrovias, não foram contempladas pelo programa.

Conforme a CNT (2013), para as ferrovias existem noventa obras prioritárias, sendo que trinta e seis são fundamentais para a solução dos gargalos logísticos e operacionais atuais. Dessas, poucas foram incorporadas ao PIL. Assim, apesar dos avanços, o programa precisa ser ampliado para solucionar todos os entraves existentes na logística nacional. A TABELA 4.3 apresenta as obras que não foram contempladas pelo programa governamental, que na visão da Confederação Nacional de Transporte, são fundamentais.

TABELA 4.3 – Obras não contempladas pelo governo que na visão da CNT são fundamentais.

Título	Dimensão (km)	Investimento Mínimo (R\$ Milhões)
Construção de variante ferroviária de Camaçari-Aratu	22	114,29
Recuperação do ramal ferroviário no perímetro urbano de Barra Mansa	5	12,28
Construção de contorno ferroviário de Tutoia	27	140,27
Construção do contorno ferroviário de Joinville	20	103,9
Construção da variante ferroviária de Guarapuava	130	675,37
Construção de tramo ferroviário entre Uberlândia e Diamantino	1.094	5.683,46
Construção da variante ferroviária de Cascavel-Foz do Iguaçu	130	675,37
Construção do contorno ferroviário de Curitiba	50	259,76
Construção do contorno ferroviário de Jaraguá do Sul	30	155,85
Duplicação do tramo ferroviário entre Curitiba e Paranaguá	110	794,73
Construção da variante ferroviária Patrocínio-Sete Lagoas	450	2.337,80
Retificação do traçado de ferrovia: trecho Juazeiro-Aratu	523	1.284,05
Construção do contorno ferroviário de Tubarão	24	124,68
Duplicação do tramo ferroviário na Região Metropolitana de São Paulo	90	650,24
Solução de interferências no trecho Barra Mansa - Rio de Janeiro	8	31,12
Construção do contorno ferroviário de Juiz de Fora	34	176,63
Construção do contorno ferroviário de Santos Dumont	10	51,95
Recuperação de ferrovia: trecho Crateús-São Luís	645	1.583,58
Recuperação de ferrovia: trecho Cedro-Cabedelo	520	1.276,68
Recuperação de ferrovia: trecho Sabará-Vitória	568	1.394,53
Reativação de ramal ferroviário: trecho Três Corações-Cruzeiro	133	326,54
Recuperação da ferrovia Transnordestina: trecho Missão Velha-Pecém	528	1.296,32
Recuperação de ferrovia: trecho Itabaiana-Recife	119	292,16
Recuperação de ferrovia: trecho Crateús-Fortaleza	411	1.009,07
Construção de ferrovia: trecho Arcoverde-Ipojuca	261	1.355,93
Duplicação de tramo ferroviário entre Carajás e São Luís	546	3.944,76
Construção do contorno ferroviário de Itaúna	11	57,15
Construção do contorno ferroviário de Divinópolis	24	124,68
Construção do contorno ferroviário de Santo Antônio do Monte	5	25,98
TOTAL	8.034	25.959,13

FONTE – CNT, 2013

Para a realização dessas obras e solução dos gargalos, são necessários R\$ 25,9 bilhões em investimento. Estas obras atuarão sobre os gargalos atuais e sobre gargalos previstos com a expansão e otimização da malha. A deficiência no planejamento de infraestrutura de transporte é apontada pelo Tribunal de Contas da União como um dos grandes obstáculos ao desenvolvimento do país. Ele afirma que o planejamento de investimentos em infraestrutura de transporte é de grande importância para que se tenha um sistema logístico eficiente e dinâmico. Para complexidade das obras e volumes de recursos demandados, é preciso que os gargalos logísticos sejam previstos com antecedência de anos para que possam ser concluídos antes de se tornarem entraves ao desenvolvimento econômico (CNT, 2012).

O momento é oportuno para o planejamento do setor ferroviário no país. O novo modelo de participação da iniciativa privada no provimento de infraestrutura permite que o país se beneficie da *expertise* do setor privado na execução de obras e gerenciamento de ativos. Assim, é possível viabilizar tanto a aceleração da execução das obras quanto a adequada manutenção da infraestrutura. Vale ressaltar que apesar do volume dos investimentos públicos no setor, a malha ainda não está integrada, por causa de atrasos nas fases de licitações, execução e construção. Considerando a situação atual e uma demanda de longo prazo, este volume é muito abaixo do necessário. Estas medidas corretivas são insuficientes para a adequação da matriz de transporte brasileira e para o incentivo à produção nacional (CNT, 2012).

4.1.6.2 Método analítico e seus parâmetros - Brasil.

No Brasil é utilizada pela maioria das ferrovias a metodologia conhecida como “Fórmula de Colson” para a definição da capacidade de tráfego. Ela trabalha com o tempo disponível para o tráfego por dia de 24 horas ou 1440 minutos, o regime de licenciamento com intervalos de espaço onde um trem não pode sair de uma estação antes que seu precedente tenha atingido a estação ou sinal de bloqueio seguinte. Assim, considerando que a linha será percorrida por trens com a mesma velocidade “V”, o intervalo entre os trens será o tempo necessário para percorrer a distância máxima entre duas estações sucessivas.

Chamando de “d” a distância, o tempo em horas será conforme a EQUAÇÃO 4.30.

$$t = \frac{d}{v} \quad (4.30)$$

Sendo:

d em km;

v em km/h.

Neste caso teórico onde a velocidade dos trens é a mesma, a capacidade de tráfego será conforme a EQUAÇÃO 4.31:

$$C_t = \frac{24}{t} = \frac{24}{\frac{d}{v}} = \frac{24v}{d} \quad (4.31)$$

Sendo C_t o número de trens que poderão circular em 24 horas, V a velocidade em km/h e d a distância máxima entre duas estações em km .

Adotando o tempo de percurso em minutos, o que é mais comum, tem-se a EQUAÇÃO 4.32:

$$C_t = 24 \times \frac{60}{t} = \frac{1.440}{t} \quad (4.32)$$

Considerando que em uma via férrea a circulação ou movimentação de trens acontece nos dois sentidos, tem-se a EQUAÇÃO 4.33:

$$C_t = 2 \times \frac{1.440}{(t_i + t_p)} \quad (4.33)$$

Na prática é o tempo de trens circulando em um sentido mais trens circulando no outro. Os trens que percorrem uma linha têm velocidades diferentes, os intervalos de percurso serão diferentes e a capacidade de tráfego será obtida considerando que outras condições interferem no processo. Logo, deve ser inserido na fórmula o tempo de licenciamento que varia de ordem escrita até o sistema informatizado.

Deve-se completar o cálculo considerando o tempo de licenciamento e outras perdas que neste caso denomina-se de fator redutor, ficando a EQUAÇÃO 4.34 indicando a capacidade prática:

$$C_p = k \frac{2.880 - t_m}{(t_i + t_p + \theta)} \quad (4.34)$$

Onde:

t_i = tempo de percurso máximo em minutos entre duas estações num sentido;

t_p = tempo de percurso máximo em minutos entre duas estações num sentido oposto;

θ = tempo de licenciamento considerando as características no sistema adotado de licenciamento e controle;

t_m = tempo destinado a manutenção com interrupção da circulação;

K = coeficiente ou fator redutor, que varia conforme a eficiência de cada ferrovia. É sugerido considerá-lo de 60% a 80% conforme “eficiência” de cada ferrovia.

Brina (1988), recomenda que estes cálculos são aproximados e que caso tenha trens de passageiro circulando na mesma malha que outros trens de carga, deve-se utilizar o gráfico de horários de trens, grafar os trens de passageiros e encaixar entre eles os outros trens em maior número possível, desta forma obtém-se com maior exatidão a capacidade da malha ferroviária. A medida que se diminui as distancias entre as estações, ou instalando-se o sistema de bloqueio intermediário, subdividindo o trecho, a capacidade de tráfego aumenta, neste caso será o dobro. Em geral, se o número de seções que for dividido o trecho for “n”, a capacidade será “n” vezes maior.

4.1.7 Itália

4.1.7.1 Contextualizando o país - Itália

Itália é uma república parlamentar localizada no centro-sul da Europa (Europa meridional). Ao norte, faz fronteira com França, Suíça, Áustria e Eslovênia ao longo dos Alpes. Ao sul, que consiste na totalidade da península Itálica, Sicília, Sardenha, as duas maiores ilhas no Mar Mediterrâneo, e muitas outras ilhas menores ficam no entorno do território italiano.

O território do país abrange cerca de 300 mil km² e é influenciado por um clima temperado sazonal. Com 60,6 milhões de habitantes, é o quinto país mais populoso da Europa e o 23^a do mundo.

Após a Segunda Guerra Mundial, a Itália foi rapidamente transformada de uma economia baseada na agricultura para um dos países mais industrializados do mundo e um país líder em comércio mundial e exportações. É um país desenvolvido, com a oitava melhor qualidade de vida do mundo e o 23^o melhor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH). O país é bem conhecido por seu setor de negócio influente e inovador, um setor trabalhista e agrícola competitivo (a Itália é o maior produtor mundial de vinho) e por seus automóveis, indústrias, eletrodomésticos e design de moda de alta qualidade.

A Itália tem um número menor de empresas multinacionais globais quando comparada a outras economias de tamanho similar, mas há um grande número de pequenas e médias empresas, agrupadas em vários distritos industriais, que são a espinha dorsal da indústria italiana. Isso produziu um setor industrial focado principalmente na exportação de produtos de luxo. Por um lado é menos capaz de competir em quantidade, entretanto, do outro é mais capaz de enfrentar a concorrência da China e de outras economias emergentes da Ásia com base em custos mais baixos e com produtos de menor qualidade.

Em 2009, o país era o sétimo maior exportador do mundo. Existem fortes laços comerciais da Itália com outros países da União Europeia, com quem realiza 59% de seu comércio total. Seus maiores parceiros comerciais da EU são a Alemanha (12,9%), França (11,4%) e Espanha (7,4%). O turismo é um dos setores de maior crescimento e rentabilidade da economia nacional. Com 43,6 milhões de chegadas de turistas internacionais e receitas totais estimadas em US\$ 38,8 bilhões em 2010, a Itália é ao mesmo tempo o quinto país mais visitado e que mais lucra com o turismo no mundo.

Existem 654.676 km de rodovias utilizáveis na Itália, incluindo os 6.957 km de autoestradas. São de 133 aeroportos e 27 grandes portos, sendo o maior em Gênova, que também é o segundo maior do mar Mediterrâneo, depois de Marselha. São 2.400 km de hidrovias que passam pela Itália.

As linhas férreas na Itália totalizam 16.627 km, a 17ª maior do mundo, e são operadas pela *Ferrovie dello Stato*. Parte destas linhas é destinada a trens de alta velocidade, sendo que alguns deles viajam a 300 km/h, FIGURA 4.11.

Criada em 1991, a *Treno Alta Velocità* - SPA é pertencente à RFI (controlada pela *Ferrovie dello Stato*) e tem o propósito de planejamento e construção de linhas para trem de alta velocidade ao longo das linhas mais importantes e saturadas da Itália. O objetivo da construção do TAV é de melhorar a viagem ao longo das linhas ferroviárias mais saturadas da Itália e adicionar novos trilhos a estas linhas, notadamente Milão-Nápoles e Turim-Milão-Veneza. Uma dos focos do projeto é tornar a rede ferroviária da Itália um sistema ferroviário de passageiros moderno e de alta tecnologia, de acordo com os atuais padrões ferroviários. Um propósito secundário é de introduzir os trens de alta velocidade no país e em seus corredores principais. Quando a demanda das linhas regulares for reduzida com a abertura de linhas de alta velocidade dedicadas, as linhas regulares serão utilizadas prioritariamente para trens regionais de baixa velocidade e trens de carga. Com

estas ideias concretizadas, a rede ferroviária italiana poderá ser integrada a outras redes ferroviárias europeias, particularmente o TGV francês, o ICE alemão e o espanhol - AVE.



FIGURA 4.11 – Malha ferroviária Italiana. (FONTE – UIC, 2010)

4.1.7.2 Método analítico e seus parâmetros - Itália

O método utilizado na Itália pela RFI – Rede Ferroviária Italiana, calcula a capacidade de tráfego teórica conforme a EQUAÇÃO 4.35, que é baseada no tempo necessário para percorrer o trecho mais desfavorável ou trecho crítico entre dois pátios de cruzamento:

$$C_t = N_t + \frac{T - t - n_p(t_p + i) - n_c(t_c + i)}{t_c + i} \quad (4.35)$$

Onde:

C_t = capacidade teórica em número de trens em 24 horas;

N_t = número total de trens regulares, de passageiros e carga existentes ou programados;

T = número de minutos do dia;

t = tempo médio necessário para trabalhos de manutenção na via;

n_p = número de trens regulares diário de passageiro;

t_p = tempo de circulação médio dos trens de passageiros;

i = perda de tempo médio em minutos devido a bloqueios para cruzamentos (licenciamento);

n_c = número diário de trens regulares de trens de carga;

t_c = tempo de circulação médio dos trens de carga.

Esta EQUAÇÃO 4.35 apresenta a capacidade teórica de uma linha que nunca poderá ser alcançada por motivo de irregularidade de horário de trens, tempos de circulação diferentes de trens, eventos não programados e outros.

A capacidade real ou efetiva de tráfego será obtida com a inserção do coeficiente de correção ou fator redutor, ficando assim na EQUAÇÃO 4.36:

$$C_r = k \times C_t \quad (4.36)$$

Onde C_r = capacidade de tráfego real.

O fator redutor “K” aparece nesta fórmula como coeficiente de correção para inserir os tempos necessários para o acontecimento de situações eventuais como a interrupção de via e outros, que poderão se manifestar de forma diferente interferindo na capacidade. Este coeficiente nunca poderá ser maior que 1 ou 100%, e dependerá das condições de tráfego e das instalações.

4.1.8 Rússia

4.1.8.1 Contextualizando o país - Rússia

Em 2006, a Rússia tinha 933.000 km de rodovias, dos quais 755.000 eram pavimentadas. Algumas destes compõem o sistema de autoestradas federais russas. Com uma grande área de terra a densidade de estradas é a menor de todos os países do G8 e do BRIC.

Na Rússia existem 102.000 km das vias navegáveis, na maior parte, por rios ou lagos naturais. Na parte europeia do país, a rede de canais faz ligação com as bacias dos principais rios. Sua capital, Moscou, é conhecida por "o porto dos cinco mares", devido à sua ligação com a hidrovia para o Mar Báltico, Branco, Cáspio, Negro e Azov.

Pelo comprimento total de gasodutos, a Rússia possui a segunda maior rede do planeta, atrás apenas dos Estados Unidos. Atualmente, muitos projetos de novos gasodutos estão sendo realizados, incluindo os gasodutos *Nord Stream* e *South Stream*, que levarão gás natural à Europa, e o oleoduto ESPO, para o Extremo Oriente Russo e China.

A Rússia tem 1.216 aeroportos, sendo o mais movimentado *Sheremetyevo*, *Domodedovo* e *Vnukovo*, em Moscou, e *Pulkovo*, em São Petersburgo. O comprimento total das linhas aéreas na Rússia ultrapassa os 600.000 km.

Normalmente, as grandes cidades russas têm sistemas bem desenvolvidos e diversificados de transportes públicos, eles utilizam os ônibus, trólebus e bondes. As principais cidades russas são atendidas por sistema de metrô: Moscou, São Petersburgo, *Nizhny Novgorod*, *Novosibirsk*, *Samara*, *Ecaterimburgo* e *Cazã e Volgogrado*. O comprimento total de metrôs na Rússia é de 465,4 quilômetros.

O Metrô de Moscou e São Petersburgo são os mais antigos da Rússia, inaugurados em 1935 e 1955, respectivamente. Esses dois estão entre os sistemas de metrô mais rápido e mais movimentado do mundo e são famosos pela rica e única decoração de suas estações, que é uma tradição comum em metrôs e ferrovias russas.

A empresa Ferrovia Russa (RZD) é uma das maiores companhias ferroviárias do mundo, com 1,2 milhões de funcionários e um monopólio dentro da Rússia. A extensão total de sua malha ferroviária é de 85.500 quilômetros, uma das maiores do mundo, perdendo apenas para os Estados Unidos, FIGURA 4.12. Ela é responsável por 3,6% do PIB russo, e detém o controle de 80% do transporte de passageiros e 82% do transporte de cargas no país. Por ano, aproximadamente 1,3 bilhão de passageiros e 1,3 bilhão de toneladas de cargas viajam via RZD. A empresa possui em torno de 20.000 locomotivas, 25.000 vagões de passageiros e 650.000 vagões de cargas. Há mais de 44.000 km de linhas eletrificadas, a maior rede do mundo e, adicionalmente, existem mais de 30.000 km de linhas de carga especial. As ferrovias da Rússia, ao contrário da maioria do mundo, usam de bitola larga de 1,520mm, com exceção de 957 km na ilha Sacalina, que tem bitola estreita de 1.067mm. A estrada de ferro mais famosa da Rússia é a Transiberiana (Transsib), abrangendo um recorde de 7 fusos horários, sendo o terceiro mais longo serviço contínuo do mundo, depois dos

serviços das linhas de Moscou-*Vladivostok* (9.259 km), Moscou-*Pyongyang* (10.267 km) e *Kiev-Vladivostok* (11.085 km).



FIGURA 4.12 – Malha Ferroviária Russa. (FONTE – Wikipedia, 2013)

4.1.8.2 Método analítico e seus parâmetros – Rússia

O método utilizado na Rússia, denominado Método Integral, está baseado no planejamento da malha ferroviária, através do gráfico de trens, dos trens de carga e de manutenção onde trafegam trens de passageiros com prioridades e características diferentes.

Os trens que tem preferência geram nos trens cargueiros impactos em seu tempo de circulação denominado “tempo de supressão de trens de carga”.

Estes tempos dependem da relação de velocidades de circulação entre os trens, do número e disposição dos trens especiais ou de passageiros no planejamento do tráfego.

Para compreender melhor este método, a FIGURA 4.13 exemplifica em uma parte do gráfico de planejamento de circulação, trens de mercadoria intercalados por três trens de passageiros: trem 1, 3 e 5.

O trem de passageiro 1 cria no trecho crítico uma zona de sombra ou de supressão de trens de carga, representado por t_c . A dimensão desta sombra depende das velocidades destes trens, carga e do de trem de passageiros.

Havendo linha de desvio para os trens de carga no trecho crítico “B/C”, estes trens de carga poderão circular até lá, desviar e aguardar a ultrapassagem dos trens de passageiros, este período de tempo correspondente a ultrapassagem e é denominado de T_{ad} .

I_m = intervalo de tempo de sucessão de trens cargueiros.

T_{ad} = tempo de ultrapassagem ou zona de ultrapassagem do trem de carga pelo de passageiro

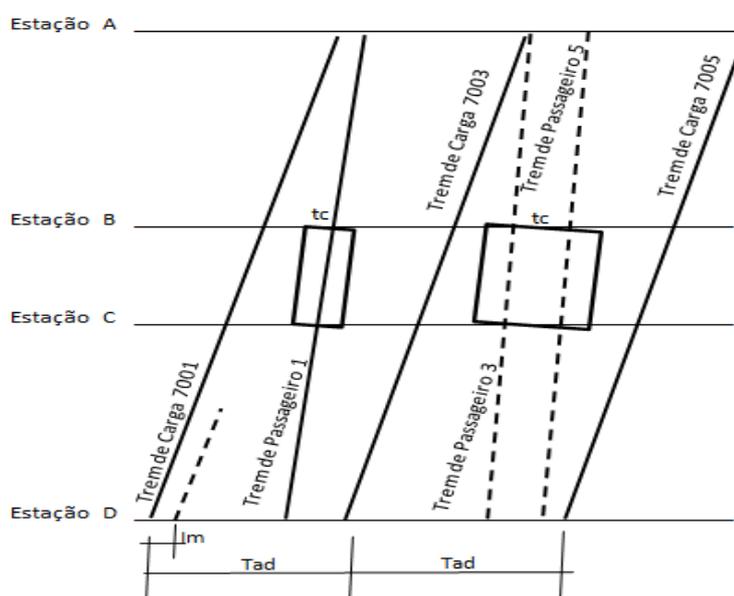


FIGURA 4.13 - Efeito de supressão dos trens de carga pelos trens de passageiros (FONTE-RIVES, 1983)

A EQUAÇÃO 4.37 indica a quantidade de trens de carga que poderão circular considerando: o intervalo de tempo correspondente à zona de adiantamento ou ultrapassagem, menos o tempo de supressão ou espaço de tempo que não pode circular cargueiro em um determinado trecho, em função do trem de passageiro, dividido pelo intervalo de tempo de sucessão dos trens de carga.

$$N_m = \frac{T_{ad} - t_c}{I_m} \quad (4.37)$$

Onde:

N_m = número de trens cargueiros

t_c = tempo ou zona de supressão de trem cargueiro

I_m = intervalo de tempo de sucessão de trens cargueiros.

T_{ad} = tempo de ultrapassagem ou zona de ultrapassagem do trem de carga pelo de passageiro

Caso não haja em determinado trecho linha para desvio, a zona de supressão de trens cargueiros provoca uma impossibilidade de circulação destes trens até que seja possível a circulação do trem de passageiro. Isto provoca uma onda de impacto na circulação de trens de carga.

Deve ser considerada a relação de trens de passageiro entre si. A zona de supressão criada por eles se somam, provocando um impacto maior a outros trens de carga.

O tempo de supressão pode ser aumentado considerando não apenas o tempo correspondente a zona de circulação do trem de passageiro como também pela soma de tempos correspondentes a necessidade de fazer o desvio do trem de carga em um trecho onde haja uma linha de desvio. Isto também gera um impacto significativo na circulação de trens de carga e, por conseguinte, em sua quantidade possível de circulação.

A capacidade de tráfego diária é expressa pela relação de tempo do dia em minutos (1.440 minutos), menos tempo de supressão multiplicado pelo número de pares de trens de passageiro em determinada direção, dividido pelo período de tempo diário de circulação de trens planejada, EQUAÇÃO 4.38.

$$N_m = \frac{1.440 - t_c N_v}{T_{PER}} \quad (4.38)$$

Onde:

N_m = número de trens cargueiros;

N_v = número de pares de trens de passageiros de direção definida;

T_{PER} = período de tempo de circulação planejada;

t_c = tempo ou zona de supressão de trem cargueiro.

A razão entre o tempo de supressão de trens cargueiros pelo período de circulação definido no planejamento obtém-se “ E_n ” que é o coeficiente de supressão de trens cargueiros pelos trens de passageiros, EQUAÇÃO 4.39.

$$E_n = \frac{t_c}{T_{PER}} \quad (4.39)$$

O número de trens cargueiros máximos possíveis em um dia, é igual ao tempo em minutos do dia disponível para circulação (1.440 minutos) dividido pelo tempo de intervalo ou de sucessão entre os trens de carga, representado na EQUAÇÃO 4.40.

$$N = \frac{1.440}{I_m} \quad (4.40)$$

Onde:

N = número máximo de trens cargueiros em um dia

I_m = intervalo de tempo de sucessão de trens de carga

Outra maneira de escrever a EQUAÇÃO 4.38 é conforme a EQUAÇÃO 4.41, ela indica a quantidade de trens cargueiros por dia considerando a quantidade máxima de trens cargueiros por dia menos a quantidade suprimida em função dos trens de passageiros.

$$N_m = N - (E_n \cdot N_v) \quad (4.41)$$

A capacidade de tráfego obtida pelo método Russo, determina o número de trens de carga que podem circular em uma linha conforme suas características de deslocamento, fixando os tipos de trens por velocidade e do número de trens de passageiros já programados previamente e com prioridade absoluta.

As condições que impactam a supressão dos trens de carga são definidas através de dois coeficientes, ou seja, o coeficiente de supressão de trens de carga " E_n " pode ser dividido em duas partes denominadas: "coeficiente básico" que é o correspondente aos trens de passageiro e o "coeficiente complementar" que corresponde à desigualdade entre o trecho crítico e a média de todos os trechos da via férrea, somente aplicado para linha singela.

Coefficiente Básico ϵ_o correlaciona os tempos de circulação no trecho e a direção dos trens de passageiros e de carga, o intervalo de tempo em cada estação (licenciamento) e os tempos de arrancada e aceleração dos trens de carga.

Para a linha singela a EQUAÇÃO 4.42 apresenta o cálculo.

$$\epsilon_o = \frac{t'_v + t''_v + 2\tau_a}{t'_m + t''_m + 2\tau_b + t_{p3}} \quad (4.42)$$

Onde:

t_v e t_m = tempo de circulação no trecho, na direção definida dos trens de passageiros e de carga, respectivamente;

τ = Intervalo de tempo de cada estação (licenciamento);

t_{p3} = Tempo de arrancada e aceleração do trem cargueiro.

Para a linha dupla, o coeficiente de supressão para direção de circulação indicada, a EQUAÇÃO 4.43 apresenta o cálculo.

$$\epsilon_o = \frac{t_v + I_m}{t_m + I_m} \quad (4.43)$$

Onde:

t_v e t_m = tempo de circulação no trecho, na direção definida dos trens de passageiros e de carga, respectivamente;

I_m = intervalo de sucessão entre trens cargueiros

Em vias de linha singela com bloqueio automático, a ultrapassagem dos trens de carga pelos trens de passageiro acontece de acordo com o sinal de licenciamento e bloqueio. Por outro lado por ocorrer a ocupação do trecho por um par de trens de passageiros, tendo o trem de carga maior tempo de aguardo. Com isto o coeficiente de supressão básica é igual ao tempo do par de trens passageiro no trecho dividido pelo tempo do dia ou 1440 minutos. Detalhando, é igual ao somatório do tempo mínimo transcorrido entre a chegada do trem de carga e do trem de passageiro na estação mais o tempo mínimo entre a saída do trem de passageiro e do trem de carga mais o tempo de circulação do par de trens de passageiro em todo trecho nos dois sentidos, incluído os tempos de

licenciamento. Dividido pelo período de tempo disponível no dia de 1440 minutos. O resultado é multiplicado pelo número de trens de passageiro. Apresentado pela EQUAÇÃO 4.44.

$$\epsilon_o = \frac{T_v}{T_{PER}} = \frac{(I_{NP} + I_{OT} + M^v_{PER}) N_v}{2 \times 1.440} \quad (4.44)$$

Onde:

I_{NP} = tempo mínimo transcorrido entre a chegada do trem cargueiro e do trem de passageiro na estação;

I_{OT} = tempo mínimo entre a saída do trem de passageiro e o trem de carga na estação;

M^v_{PER} = $t'_v + t''_v + \tau_a + \tau_b$, módulo de trem de passageiro que é a soma de todos os tempos do trem de passageiro no trecho.

t'_v = tempo de circulação do trem de passageiro em um sentido

t''_v = tempo de circulação do trem de passageiro em outro sentido

τ_a = tempo de licenciamento de um trem de passageiro em um sentido

τ_b = tempo de licenciamento de um trem de passageiro em outro sentido

N_v = quantidade de trens de passageiros

T_v = tempo médio de ocupação do trecho pelo trem de passageiro multiplicado pela quantidade de trens de passageiros.

O resultado para linha singela com bloqueio automático fica em torno de 0,7 a 0,9. O coeficiente de supressão do tempo dos trens de carga pode alcançar valores compreendidos entre 0 e 1.

Coeficiente de supressão complementar ϵ_k , EQUAÇÃO 4.45, do tempo dos trens de carga é aplicado apenas para linha singela e trata do coeficiente de desigualdade dos trechos, tempo correspondente ao trecho crítico e a média de todos os trechos e o numero de pares de trens de passageiros, obtendo valores entre 0,2 e 0,5.

$$\epsilon_k = 0,7j - 0,025 N_v - 0,1 \quad (4.45)$$

Onde:

$j = \frac{T_p^{cp}}{T_{nep}^m}$ = coeficiente de desigualdade dos trechos;

T_p^{cp} e T_{nep}^m = tempo correspondente ao trecho crítico e ao tempo médio de todos os trechos, respectivamente;

N_v =número de pares de trens de passageiros.

Os trens de passageiro de alta velocidade circulando em linhas duplas com bloqueio automático provocam importante efeito supressor nos trens de carga. O coeficiente é calculado conforma EQUAÇÃO 4.46.

$$\epsilon_o = \frac{t_v}{T_{PER}} = \frac{t_v}{I_m} \quad (4.46)$$

Onde:

t_v = tempo de ocupação do trecho por trem de passageiro

T_{PER} = periodo de tempo de trens de carga circulando nos dois sentidos

I_m = intervalo de sucessão de trens de carga circulando no mesmo sentido

Quando o trem de passageiro circula em bloco, por exemplo, dois trens simultaneamente no mesmo sentido, mesmo assim ele gera supressão de menor impacto considerando que as zonas de supressão se sobrepõem. Apresentada na EQUAÇÃO 4.47.

$$\epsilon_o = \frac{\epsilon_p I_m + (K_v - 1)I_v}{K_v I_m} \quad (4.47)$$

Onde:

ϵ_p = coeficiente referente aos atrasos dos trens de passageiro, extraído do gráfico de controle da circulação;

I_v = intervalo entre trens de passageiro viajando em bloco;

K_v = número de trens de passageiro em bloco.

4.1.9 Estados Unidos - USA

4.1.9.1 Contextualizando o país - USA

Os Estados Unidos com 9,37 milhões de km² de área e com 310 milhões de habitantes, ele é o quarto maior país em área total e o terceiro em população. O país é uma das nações mais multicultural e etnicamente diversificada do mundo. A economia dos Estados Unidos é a maior economia do mundo, com um produto interno bruto de 15 trilhões de dólares, o que equivale a um quarto do valor do PIB nominal mundial.

A maior parte do país situa-se na região central da América do Norte, formada por 48 estados e Washington, D.C., o distrito federal da capital. Localiza-se entre os oceanos Pacífico e Atlântico, fazendo fronteira com o Canadá ao norte e com o México ao sul. O estado do Alasca está no noroeste do continente, a leste faz fronteira com o Canadá, a oeste com a Rússia através do estreito de Bering. O estado do Havaí é um arquipélago no Pacífico Central. Ele possui vários outros territórios no Caribe e no Pacífico.

O índice de alfabetização é de 99% da população, o que representa a 19^a colocação mundial. A expectativa de vida de sua população é de 78,2 anos.

Os Estados Unidos tem 230 mil quilômetros de malha ferroviária que atende ao transporte de carga e de passageiros, o que equivale a nove vezes a malha ferroviária Brasileira. As ferrovias Americanas são divididas em 3 classes que correspondem a grupos de receita anuais: classe I para ferrovias de carga com receita operacional anual superior a 346,8 milhões de dólares; classe II com receita entre 27,8 milhões e 346,7 milhões de dólares; classe III para receitas inferiores a 27,8 milhões de dólares anuais.

A FIGURA 4.14 apresenta a malha ferroviária americana total, com as três classes de ferrovia. A FIGURA 4.15 apresenta a malha ferroviária americana classe I, de maior extensão e representatividade, as empresas operadoras ferroviárias estão indicadas.

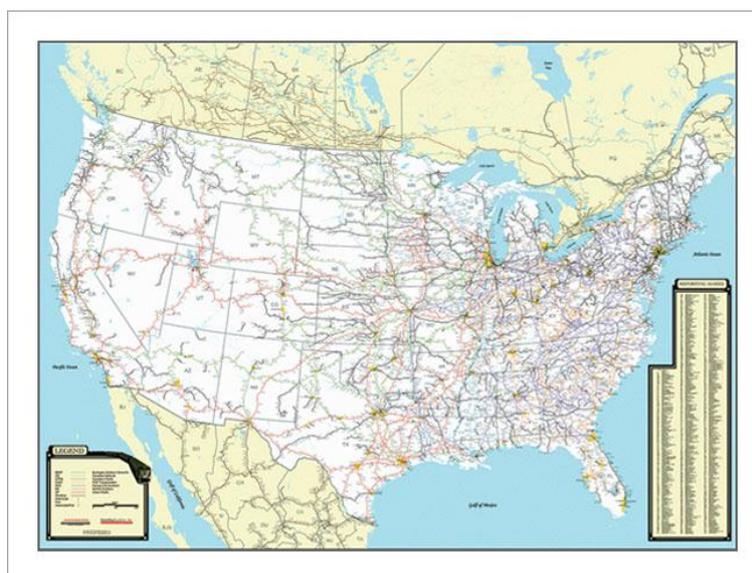


FIGURA 4.14 - Malha Ferroviária Americana Total com as Três Classes de Ferrovia (FONTE- AAR, 2011)



FIGURA 4.15 - Malha Ferroviária Americana Classe I e as Operadoras (FONTE- AAR, 2011)

As empresas ferroviárias de passageiros utilizam ferrovias de empresas de carga. Existe uma facilidade muito grande de intercâmbio de vagões e locomotivas entre as empresas ferroviárias, principalmente pelo uso do padrão único de bitola (distâncias entre os trilhos da via férrea) que é de 1.435mm.

Vagões de carga podem chegar à capacidade de 130ton. No transporte de contêiner é muito utilizado o *double stack* de 40 pés (12,2m) em vagões plataformas. Parte significativa dos clientes da ferrovia utiliza o serviço de agendamento informatizado de frete. Esta facilidade otimizou e

revitalizou o volume de carga ferroviária. Neste sistema o cliente tem como monitorar e se programar quanto a sua carga por todo processo ferroviário.

Conforme a *Association of American Railroads - AAR* (2012), as ferrovias americanas no ano de 2011, empregam mais de 1 milhões de empregos indiretos e 175.000 empregos diretos, com um salário médio anual de 73.000 dólares mais 30.000 dólares de benefícios, perfazendo um total de 103 mil dólares. Comparada ao salário médio nacional americano em 2011, de trabalhos de tempo integral que foi de 66.000 dólares, já considerando os benefícios, representa 64% menor em relação aos da Ferrovia. Para a economia americana para cada emprego existente na ferrovia existem 4,5 empregos em outras partes dos seguimentos.

A ferrovia americana tem possibilitado nível extraordinário de competitividade graças à acessibilidade e a sua produtividade. Elas por mais de 180 anos tem desenvolvido papel crucial atendendo a quase todos os setores industriais de atacado e varejo.

A ferrovia americana tem forte interação entre as operadoras ferroviárias, com intercâmbios de locomotivas e vagões em toda sua malha (bitola única de 1.435mm). Associado a um sistema de gerenciamento de carga eficiente e *online*, possibilitam o transporte de quase todos os produtos movimentados no país, alguns até imagináveis na atual situação da ferrovia no Brasil, a exemplo:

- Produtos Agrícolas e Alimentares: milho, trigo, soja, ração animal, cerveja, alpiste, xarope de milho, farinha, batata, frangos congelados, açúcar, vinho, etc. São mais de 4 milhões de vagões/ano.
- Químicos: quase todos os tipos de produtos químicos são transportados por ferrovia e seu volume chega a 2 milhões de vagões ano.
- Minerais: Boa parte de sua energia elétrica é gerada por usinas termoeletricas com a utilização de carvão. Este carvão, 70% são transportados pela ferrovia. Quase a totalidade das matérias primas para as indústrias: minérios metálicos, tais como bauxita, minério de ferro, brita e cascalho, entre outros. No processo reverso a ferrovia é muito utilizada voltando para reprocessamento do ferro velho, escória para as cimenteiras, etc.
- Veículos e caminhões: é muito utilizado o transporte de caminhões carregados com cargas que percorrem as longas distancias por trem e nos pontos, saindo do fornecedor e chegando no cliente, pelos próprios caminhões. Os veículos produzidos são transportados diretamente nos vagões ou em caminhões cegonheiros embarcados nos vagões.

- Madeira e Celulose: São mais de 1 milhão de vagões por ano transportando madeira que serão utilizadas na construção de casas e indústrias de celulose. Mais de 100 mil vagões transportam anualmente papel e papelões que serão reciclados.
- *Contêineres*: A utilização de *contêineres* viabiliza o transporte de produtos tipo roupas, eletrodomésticos, eletroeletrônicos, móveis e vários outros bens de consumo. São milhões de *contêineres* transportados anualmente.

Os valores de seus fretes são os mais competitivos do mundo, houve uma redução nos valores dos fretes de 45% em 2011 em relação ao ano de 1981.

Além do menor custo, a ferrovia tem pelo americanos uma conotação forte de respeito ao meio ambiente, com redução em 75% de gases do efeito estufa. Redução dos engarrafamentos nas estradas que provocam perda de produtividade, atrasos de carga, consumo adicional de combustível, forte redução de manutenção destas estradas rodoviárias. Neste contexto, estima-se uma economia de 101 bilhões de dólares anuais.

4.1.9.2 Método analítico e seus parâmetros - USA

O método analítico utilizado é o da AAR – *American Association of Railroads*, a capacidade teórica ou máxima em via singela será o número máximo de trens característicos que circulam por ela nos dois sentidos. Em linha dupla será o número de trens que circulam por ela em uma só direção, são expressas pela EQUAÇÃO 4.48:

$$C_t = \frac{(a \times T)}{T_T} \quad (4.48)$$

Sendo:

a = constante de valor 1 para uma direção do trecho de via dupla e 2 para via única;

T = período de tempo para estudo da capacidade;

T_T = é a soma dos tempos de percurso nos dois sentidos de um trajeto parcial quando linha singela e em uma só direção quando linha dupla. Estes tempos são influenciados pelo tipo de trem, pelo tempo referente a entrada e saída destes trens nos trecho, pelo sistema de licenciamento e controle, pela distância e perfil entre as estações e pátios de cruzamento, EQUAÇÃO 4.49.

$$T_T = T_c + T_m \quad (4.49)$$

T_c = tempo de circulação nos dois sentidos da linha de um trem protótipo;

T_m = somatório dos tempos de licenciamento nas estações.

A capacidade real ou efetiva C_r é igual à capacidade teórica multiplicada pelo fator de correção f que é definido em 0,9 para linhas com sistema de licenciamento automático “CTC” e 0,8 para linhas sem este sistema de licenciamento. Apresentado na EQUAÇÃO 4.50. O fator de correção f representa a margem de tolerância referente aos tempos mortos em relação à manutenção das infra e superestrutura.

$$C_r = f \times C_t \quad (4.50)$$

Em caso de trecho de via dupla, para obter a capacidade total basta somar as capacidades de cada sentido.

4.1.10 Canadá

4.1.10.1 Contextualizando o país - Canadá

O Canadá é um país que ocupa grande parte da América do Norte. É o segundo maior país do mundo em extensão territorial, superado apenas pela Rússia. Faz fronteira com os Estados Unidos ao sul e ao noroeste, é a mais longa fronteira do mundo. A leste faz fronteira com o Oceano Atlântico, a oeste com Oceano Pacífico e ao norte pelo Oceano Ártico. Trabalha fortemente seus recursos naturais que são abundantes e tem uma forte relação comercial com os Estados Unidos, país com que o Canadá tem um relacionamento longo e complexo.

O Canadá é uma das nações mais ricas do mundo, com um elevado rendimento per capita. É uma das dez maiores nações comerciais do mundo. O Canadá é uma economia mista, sendo classificado acima dos Estados Unidos no índice da *Heritage Foundation* de liberdade econômica e mais acima da maioria das nações da Europa ocidental.

O Canadá é um dos poucos países desenvolvidos que são exportadores de energia. A costa atlântica do Canadá e a província de Alberta têm grandes jazidas de gás natural e petróleo em alto-mar. Possui imensa reserva de areias betuminosas em Athabasca que dá ao Canadá a segunda maior reserva de petróleo do mundo, a seguir à da Arábia Saudita.

O Canadá é um dos maiores fornecedores mundiais de produtos agrícolas de trigo, canola e outros cereais. É o maior produtor mundial de zinco e urânio e outros recursos naturais, como ouro, níquel, alumínio e chumbo. Muitas cidades no norte do Canadá, onde a agricultura é difícil, são sustentáveis por causa das minas ou pelas suas fontes de madeira. O Canadá também tem um setor industrial bastante grande centrado no sul de Ontário e de Quebec, com os setores de automóvel e de aeronáutica representando indústrias particularmente importantes.

Sua força de trabalho está distribuída por ocupação sendo na agricultura 2%, indústria 13%, construção civil 6%, serviços 76%. Sua taxa de desemprego em 2012 é de 7,3%. Sua exportação em 2012 foi de 481,7 bilhões de dólares e seus principais produtos exportados são: automóveis e peças, máquinas industriais, aviões, equipamentos de telecomunicações, produtos químicos, plásticos, fertilizantes, celulose, madeira, petróleo bruto, gás natural, eletricidade e alumínio. Seus principais parceiros de exportação são Estados Unidos 74%, Reino Unido 4% (2011). De importação seus principais parceiros são Estados Unidos 50%, República Popular da China 11%, México 6%. Em 2012 foi um total de 480,9 bilhões.

O Canadá possui várias condições geográficas que são grandes obstáculos ao transporte, como: montanhas, grandes corpos d'água e grandes florestas. Mesmo assim, o país possui um dos melhores sistemas de transporte do mundo.

A malha ferroviária do Canadá possui mais de 80 mil quilômetros de extensão. É a terceira maior malha ferroviária do mundo, perdendo apenas para a dos Estados Unidos e a da Rússia. As duas principais ferrovias do país são a *Canadian National Railway* e a *Canadian Pacific Railway*, esta última sendo a primeira ferrovia transcontinental do mundo, tendo sido inaugurada em 1884. Ambas as ferrovias são controladas por empresas privadas. Montreal é o maior polo ferroviário do país, seguido por Calgary e Toronto. Estas cidades possuem modernos sistemas de metrô. O serviço ferroviário interurbano de passageiros é realizado pela *VIA Rail*, é um serviço administrado pelo governo canadense.

VIA Rail Canada (popularmente chamada de *VIA Rail* ou VIA) é uma corporação pública controlada pelo governo e é responsável por administrar a maior parte do transporte ferroviário interurbano de passageiros no país. Ela opera trens em oito províncias canadenses - todas com exceção da Terra Nova e Labrador e a Ilha do Príncipe Eduardo numa rede que compreende 12.500km de trilhos. Anualmente são transportados 4,1 milhões de passageiros, a maioria dos quais no corredor Quebec City – Windsor.

Existem duas operadoras de transporte ferroviário de carga no país: a Canadian National Railway, privatizada em novembro de 1995, e a Canadian Pacific Railway. O Canadá possui ferrovias que ligam o país com os Estados Unidos da América. Sua bitola padrão de 1.435 milímetros, a mesma utilizada nos Estados Unidos.

A *Canadian National Railway* - CNR é uma companhia ferroviária operada pela *Canadian National Railway Company*. É a maior companhia ferroviária do Canadá, tanto quanto pela extensão total de sua malha ferroviária quanto em lucro anual. É também atualmente a única companhia ferroviária transcontinental do Canadá, com uma malha ferroviária que se estende desde a Nova Escócia até a Colúmbia Britânica. Ela possui uma grande malha ferroviária na região central dos Estados Unidos, ao longo do vale do Rio Mississippi, desde os Grandes Lagos até o Golfo do México. Sua sede está localizada em Montreal, Quebec.

A *Canadian Pacific Railway*- CPR é uma companhia ferroviária do Canadá que administra uma malha ferroviária que se estende de Vancouver a Montreal, e também atende grandes cidades nos Estados Unidos, como Minneapolis, Chicago e Nova Iorque. Ela é operada pela *Canadian Pacific Railway Limited*. A companhia está sediada em Calgary, província de Alberta. Ela foi originalmente construída entre o leste do Canadá e a Colúmbia Britânica, entre 1881 e 1885, atendendo a uma promessa feita à Colúmbia Britânica, em sua entrada como a sexta província do Canadá, em 1871, quando a Colúmbia Britânica exigiu a construção de uma ferrovia conectando a região com o resto do país. Quando inaugurada, em 1885, tornou-se a primeira ferrovia transcontinental do Canadá. Atualmente, a ferrovia atende apenas trens cargueiros. Porém, por várias décadas desde a sua inauguração, a ferrovia era o único meio prático de transporte de longa distância em várias regiões do país.

A ferrovia desempenhou um papel indispensável na colonização do oeste do Canadá, bem como o desenvolvimento econômico. Em 1978, seus serviços de passageiros foram eliminados, que passaram à responsabilidade da *VIA Rail*, criada no mesmo ano. A logomarca da companhia é um castor dourado, símbolo do Canadá, e que representa a dedicado ao trabalho da companhia. Ela foi a causa de orgulho e de problemas por mais de 120 anos, e é considerada indiscutivelmente um ícone do nacionalismo canadense.

Cerca da metade do movimento de cargas da *Canadian Pacific Railway* é carvão, grãos e transporte intermodal e outras mercadorias, tais como: peça automobilística, enxofre, fertilizante, outros produtos químicos, madeira e derivados. O trecho mais movimentado é entre Calgary e Vancouver.

Desde 1970, o carvão tornou-se um produto de importância primária para a *Canadian Pacific Rail*. Ele é transportado em vagões de carga desde as montanhas (mais notavelmente, *Sparwood*, na Colúmbia Britânica) aos terminais portuários em Roberts Bank e North Vancouver, ambas na Colúmbia Britânica, onde ele é destinado ao Japão. São cerca de 34 milhões de toneladas de carvão todo ano. Ela transporta grãos do interior do Canadá até Thunder Bay, em Ontário e Vancouver, onde então são exportados.

Em 1952, a *Canadian Pacific Railway* tornou-se a primeira companhia ferroviária a introduzir o transporte intermodal de carga, onde caminhões são transportados, juntos com seu motorista e sua carga, em vagões abertos. Em 1999, ela introduziu uma linha intermodal entre Montreal e Detroit, chamada de *Expressway* (Via Expressa).

A FIGURA 4.16 apresenta a malha ferroviária canadense e sua forte conexão com a malha Americana.



FIGURA 4.16 - Malha Ferroviária Canadense interligada a Ferrovia Americana (FONTE – AAR, 2011)

4.1.10.2 Método analítico e seus parâmetros – Canadá

O método utilizado foi desenvolvido por Elbrond (1978), mais conhecido por método Elbrond, baseia-se na teoria das filas. A capacidade final de um trecho em números de trens é definida como a menor capacidade dos trechos calculados em função de um coeficiente médio de fila.

Define-se:

$$C_t = \text{MIN}_{j=i,\dots,n} (C_p(j)) \quad (4.51)$$

onde:

$$C_p(j) = \text{coef}(j) \times \frac{(T - T_n)}{\text{Den}(j)} \quad (4.52)$$

$$j = i, \dots, n$$

$$\text{Den}(j) = T_s(j) + \frac{(\text{coef}(j) + T_l)}{2} \quad (4.53)$$

$$j = i, \dots, n$$

$$\text{Coef}(j) = -1 + \sqrt{4 \times L_q(j)^2 + 8 \times L_q(j)} \quad (4.54)$$

$$j = i, \dots, n$$

Com:

C_t = Capacidade física do trecho;

$C_p(j)$ = capacidade de cada sub-trecho (j);

n = número de sub-trechos;

$\text{coef}(j)$ = coeficiente de utilização do sub-trecho “ j ” em função de um coeficiente médio de fila;

T_n = tempo médio de manutenção da linha;

T = período de análise da capacidade;

$\text{Den}(j)$ = fator de análise da distribuição das estações;

T_s = tempo médio de serviço;

T_l = tempo médio de licenciamento;

L_q = coeficiente médio de fila.

Para a ferrovia, atribui-se um valor médio de chegada de trens num determinado período do dia ou das 24 horas. O tempo entre chegadas de dois trens consecutivos poderá ser descrito por uma função densidade de probabilidade do tipo exponencial. O processo de atendimento pode ser compreendido como sendo o tempo de percurso ou *transit time*. O número de servidores no caso da ferrovia corresponde ao número de linhas disponíveis para circulação. Para linha singela, será de uma linha ou de um servidor. Disciplina da fila define qual o próximo trem a ser atendido, ou de maneira mais ampla utiliza-se a regra do FIFO (*first in first out*), LIFO (*last in, first out*), serviço por ordem de prioridade, depende caso haja trens diferentes da preferência de cada um.

Tamanho da fila é uma condição que é mais considerada em ferrovia devido ao grande desdobramento causado. Tamanho máximo da fila esta condicionada a necessidade de demanda que por sua vez provoca crescimento ou ampliação do sistema.

Tempo médio de espera na fila no caso ferroviário será o *transit time* da singela multiplicado pelo tamanho da fila. Será o tempo de atendimento do cliente da frente. Isto ocorrerá pela aleatoriedade do processo ferroviário.

A abordagem matemática da teoria das filas exige que exista estabilidade no fluxo de chegada e no processo de atendimento. Postulados básicos dos sistemas estáveis é que o fluxo que entra é igual ao fluxo que sai. O fluxo de entrada se mantém nas diversas seções do sistema desde que não haja junção ou desdobramento. A junção de fluxos equivale às suas somas aritméticas e o desdobramento percentual de um fluxo é igual ao desdobramento aritmético do mesmo fluxo.

4.2 Considerações sobre as condições observadas nos países onde o método de cálculo da capacidade de tráfego ferroviário foi pesquisado

Os países pesquisados, com exceção do Brasil, tem no modo de transporte ferroviário forte participação na matriz de transporte e sua economia tem importante influência dessa situação. O modo de transporte ferroviário viabilizou e alavancou o desenvolvimento em vários setores: agropecuário, matéria prima, industrial, atacado e varejo. A ferrovia promoveu a integração nacional garantindo a distribuição mais equilibrada dos recursos e densidade demográfica. A visão de longo prazo garantiu fortes investimentos em implantação de uma malha ferroviária bem distribuída de densidade adequada e é utilizada tanto para o transporte de cargas quanto de passageiros. A busca de novas tecnologias em segurança e em eficiência é permanente. Estão evidenciados para estes países os ganhos mensuráveis e imensuráveis obtidos com o uso em grande escala do modo ferroviário de transporte. Destaca-se a qualidade de vida, com ganho em menos congestionamentos tanto no perímetro urbano quanto nas estradas, menos acidentes, ganho de tempo nos deslocamentos, custos operacionais menores, ganhos energéticos e outros percebidos tanto pelos empresários quanto pelos usuários comuns que utilizam o transporte coletivo para seu deslocamento.

No Brasil, quando comparado com estes países, identifica-se claramente a grande lacuna originada pela matriz de transporte atual incompatível com sua extensão territorial, demanda de carga e de passageiros. Na relação entre área territorial e extensão da malha ferroviária, a do Brasil é a de menor valor, TABELA 4.4, situação agravada pela condição de concentrada em regiões bem delineadas.

TABELA 4.4 - Países e a relação entre área territorial e extensão da ferrovia.

Pais	Extensão Territorial 000 km ² (A)	Extensão Ferrovia - 000 km (B)	B / A
Inglaterra	130	17	131
Alemanha	357	42	118
Japão	378	23	61
Itália	301	17	56
Espanha	504	16	32
USA	9.370	230	25
Canadá	9.984	80	8
Rússia	17.075	86	5
Brasil	8.511	29	3

FONTE- ANTF, 2011

4.3 Análise qualitativa dos métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego baseada na categorização dos seus parâmetros

Os métodos serão analisados qualitativamente obedecendo à análise de conteúdo da categorização dos seus parâmetros.

4.3.1 Método - Japão

Neste método a base de cálculo de capacidade é através da distribuição na malha dos trens de maior prioridade. Isto é realizado planejando estes trens no gráfico de circulação. Para isto, é trabalhada muito bem a heterogeneidade de trens agrupados em quatro tipos. Os trens do tipo passageiro são divididos em trens rápidos e em trens locais, que têm menor velocidade que os rápidos. Os demais trens são divididos em trens de carga e trens de manutenção. A aplicação da equação para definição da capacidade é feita para identificar a quantidade de trens de menor prioridade que vão poder circular. Ela considera os tempos de circulação, licenciamento e de espera destes trens em cruzamento ou ultrapassagem por trens de mesma ou maior prioridade. Os tempos destinados para manutenção programada da via permanente, outras instalações operacionais e aos eventos não programados ou indesejáveis são fixos, sem uma definição técnica, podendo gerar um desequilíbrio significativo no resultado do cálculo de capacidade de tráfego. O método é aplicável em malha de linha singela e de linha dupla. Este método é mais recomendado para aplicação em uma ferrovia com bom planejamento e com um padrão de manutenção preditiva e preventiva com bons recursos de manutenção, considerando que trabalha com tempo fixo para este fim. A principal pergunta que ele responde é quantos trens com prioridade menor podem circular em uma malha depois que for planejada ou definida a circulação de trens de maior prioridade. Ele é equiparável ao método Russo que trata os trens de passageiro com prioridade total e o tempo disponível na malha é destinado para a circulação dos trens de carga. O método Japonês tem entre os trens prioritários de passageiro o de maior prioridade que são os trens de passageiro rápido, o que não tem no método Russo esta distinção, TABELA 4.5.

TABELA 4.5 – Resultado da avaliação do método - Japão

Avaliação - Método Japão			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de:		Análise	6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	considera o tempo máximo de circulação dos trens sem preferência ou de grupos inferiores - não considera o sentido de circulação - trabalha com o trecho crítico				x			
2	licenciamento e controle dos trens	considera o tempo de cruzamento e ultrapassagem entre dois trens de grupos inferiores e entre trens de grupos de prioridades diferentes - inferior com superior - o tempo gasto com o licenciamento é considerado valor médio		x					
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	considera valor fixo de 5% do dia -72 minutos, sem indicação de racional técnico da definição deste valor					x		
4	interrupção da circulação de trens não programada	considera valor fixo de 90 minutos, sem indicação de racional técnico da definição deste valor					x		
5	gestão operacional	trabalha a heterogeneidade, classificando 4 grupos diferentes de trens e considera a quantidade de cada um - o cálculo de capacidade é feito para os trens de menor prioridade, já que os prioritários são lançados no gráfico de trens - não considera atrasos de trens			x				
6	recurso de via	tem tratamento diferenciado para linha singela e para linha dupla - o cálculo é direcionado para trens de grupos de menor prioridade		x					
Avaliação		21		10	4	3	4		

4.3.2 Método - Alemanha

O método Alemão trabalha bem as categorias de tempo de deslocamento dos trens, licenciamento dos trens, gestão operacional e recursos de via. Entretanto não faz nenhuma referencia aos tempos de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção e interrupção da circulação de trens não programada. Este método oferece a possibilidade de cálculo de capacidade com variação em relação ao nível de qualidade, que se refere ao tempo adicional aos intervalos mínimos para anular os efeitos dos atrasos que podem ocorrer no período de tempo diário ou por hora. É o único método que trabalha a capacidade mínima, considerando condições mais desfavoráveis de chegada dos trens ao trecho crítico. O método é aplicável em malha de linha singela e de linha dupla. O método trabalha o trecho crítico que representa o limitador da malha. Em seu cálculo usa-se a média ponderada dos tempos de seus parâmetros, o que leva seus valores para situações mais próximas da realidade. Ao mesmo tempo pode esconder grandes variações de valores dos tempos. Recomenda a aplicação deste método para ferrovia onde já tenha uma base histórica e um controle mais criterioso dos tempos operacionais, dando ao cálculo uma boa base histórica de elementos de aplicação. Vale observar, que tanto para a ferrovia em operação, quanto para o projeto de uma nova ferrovia, a aplicação deste método ocorrerá, possivelmente, uma diferença entre o resultado calculado e o real praticado. Considerando que para este resultado não

estão computados os significativos tempos referentes à manutenção preventiva, preditiva, corretiva e os tempos de interrupção inerentes aos eventos não programados ou indesejáveis, TABELA 4.6.

TABELA 4.6 - Resultado da avaliação do método - Alemanha

Avaliação - Método Alemanha		Critério						
		Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente	Análise	6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	considera os tempos de circulação de forma diferenciada para dois tipos de trens - o trecho entre dois pátios é dividido em sub-trechos e para cada um é trabalhado com um tempo específico - não considera variação de velocidade de percurso na alteração de sentido de circulação - trabalha com o trecho crítico						
2	licenciamento e controle dos trens	trabalha os tempos de licenciamento conforme o sistema definido, considera os tempos de liberação e encerramento do licenciamento e nos diferentes sub-trecho e tipos de trens - não trata ultrapassagem de trens em linha dupla						
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	não considera em seu método o tempo destinado a manutenção						
4	interrupção da circulação de trens não programada	não considera em seu método o tempo decorrente de eventos não programados						
5	gestão operacional	trabalha a heterogeneidade considerando dois tipos de trens - não trata a tabela de horários, porém trabalha a possibilidade de variação no cálculo da capacidade em função de atrasos dos trens em relação ao trecho crítico, para esta compensação considera a "margem de qualidade" que é um adicional de tempo somado a média ponderada dos intervalos de tempo entre os trens						
6	recurso de via	tem tratamento diferenciado para linha singela e para linha dupla - não diferencia os recursos de tipos de controle para linha singela e linha dupla						
Avaliação		20						

4.3.3 Método - UIC

Este método, UIC-405, trabalha bem a categoria dos tempos de licenciamento e controle dos trens na linha de circulação, considerando os tempos para conceder e receber a ordem de licenciamento, tempo de geração e cancelamento da rota de itinerário, de cruzamento e ultrapassagem dos trens. Nenhum outro método trata neste nível de detalhe o licenciamento. Na categoria de deslocamento dos trens, trata o tempo de circulação nos dois sentidos. A categoria do tempo de recurso de via, no cálculo de intervalo mínimo de sucessão, ele trabalha com equações específicas para linha singela e para linha dupla. Este método dá a opção de se trabalhar com dependência de horário, que considera o tempo mínimo de sucessão, e sem a dependência de horário, que não depende do tempo mínimo de sucessão, mas sim do intervalo de velocidade entre os trens ou entre grupos de trens. Esta última é uma abordagem exclusiva deste método. Ele trata às categorias de tempo de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção e de tempo de interrupção da

circulação de trens não programadas sem embasamento técnico preciso. São chamados de tempos suplementares, são tratados de forma única e definidos como sendo o numero de trechos de linha férrea multiplicado por 0,25. Este método pode ser aplicado em uma ferrovia em operação ou em fase de projeto de nova ferrovia. Entretanto, vale ressaltar que o resultado obtido pode ter diferença significativa com a realidade, em função da falta de tratamento adequado aos tempos de manutenção preventiva, preditiva, corretiva e aos eventos não programados ou indesejáveis. Ocorrerá com a aplicação deste método um resultado melhor que a aplicação do método que simplesmente não os considera, TABELA 4.7.

TABELA 4.7 - Resultado da avaliação do método - UIC

Avaliação - Método UIC			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente		Não Atende	
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise		6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	considera os tempos de circulação e intervalos de sucessão entre dois trens e seu sentido de circulação - não diferencia velocidades por tipo de trens			x				
2	licenciamento e controle dos trens	considera os tempos de licenciamento no intervalo mínimo de sucessão de trens por sentido de circulação ou por velocidade dos trens - trabalha cruzamento em linha singela - não trabalha com ultrapassagem dos trens		x					
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	considera o mesmo tempo suplementar para a categoria 3 e para a categoria 4, que é a quantidade de seções de trecho multiplicado por 0,25						x	
4	interrupção da circulação de trens não programada							x	
5	gestão operacional	não trabalha a heterogeneidade dos trens - trabalha com e sem dependência de horário			x				
6	recurso de via	trabalha linha singela e linha dupla - não diferencia os recursos de tipos de controle automático, semiautomático ou manual para linha singela ou dupla		x					
Avaliação				10	8			2	

4.3.4 Método - Inglaterra

Este método é indicado para sistema ferroviário de trens de passageiros de metro ou trens metropolitanos rápidos com arrancadas e paradas sucessivas. Pode ser utilizada para ferrovia em operação ou para projeto de uma nova ferrovia. Tem restrição de aplicação, considerando que trata de somente linha dupla e sistema automatizado ou eletro-manual de licenciamento. As categorias de tempo de deslocamento, licenciamento e controle, gestão operacional e recursos de via são tratadas em função da velocidade dos trens, do comprimento dos trens, da distância de deslizamento admissível, da distância entre as estações ou pontos de bloqueios, da distância de frenagem dos trens e da distância de visualização dos sinais semafóricos. O tempo das incertezas não é

considerado. Este método não considera os tempos destinados à manutenção preventiva, preditiva e corretiva. Seu direcionamento é para a capacidade de tráfego considerando a não interrupção. Tem indicação de cálculo para aumento de capacidade através de inclusão de seções de bloqueio subdividindo o trecho em segmentos. Possibilita através da definição da capacidade necessária a definição da quantidade de seções do trecho. As equações do método tratam de trechos dividido em três e quatro seções, vinculadas a distancia entre os bloqueios, que é igual a distancia de frenagem. Indica qual a velocidade máxima admissível para possibilitar estas divisões de trecho e com isto aumentando a capacidade de tráfego, TABELA 4.8.

TABELA 4.8 - Resultado da avaliação do método - Inglaterra

Avaliação - Método Inglaterra			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de	Análise		6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	considera o tempo de deslocamento que é definido pela velocidade dos trens no trecho em estudo - não considera sentido de circulação - possibilita identificar a velocidade máxima admissível no trecho		x					
2	licenciamento e controle dos trens	o sistema de licenciamento e controle é considerado e esta incluído no intervalo de tempo entre os trens ou headway que depende do sistema automático ou elétrico-manual		x					
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	não considera em seu método as interrupções da linha para manutenção							x
4	interrupção da circulação de trens não programada	não trabalha os eventos não programados ou intencionais em seu método de cálculo							x
5	gestão operacional	não trabalha com tipo diferentes de trens - trabalha as condições dos trens através da média de: velocidade, comprimento, distancia de frenagem e deslizamento dos trens			x				
6	recurso de via	este método trabalha exclusivamente com linha dupla, que é a realidade da maioria da malha ferroviária da Inglaterra - considera parâmetro de distancia entre os pontos de bloqueio e de visualização dos sinais semafóricos			x				
Avaliação				10	8				

4.3.5 Método - Espanha

Este método trabalha bem a categoria de deslocamento dos trens nos sentidos de circulação impar e par, através da integração de todos os tempos de ocupação do trecho crítico e confronta estes tempos com o tempo disponível do dia. A desconsideração da categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção e da categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação de trens não programada, gera uma fragilidade neste método que deve ser considerada em sua aplicação. Para uma ferrovia em operação, a degradação da estrutura da via é natural e requer manutenção preventiva, preditiva e corretiva o que não é

considerado como também a interrupções por eventos não programados, levando a um resultado que possivelmente terá um descompasso com a realidade. Este método pode ser aplicado em projeto de uma nova ferrovia, cabendo atenção em relação à diferença do resultado com a realidade em função da desconsideração das categorias 3 e 4, TABELA 4.9. Vale ressaltar que neste caso o conflito ocorrerá e se agravará a partir de determinado tempo, já que no início de operação, por se tratar de ferrovia nova, as intervenções serão menos necessárias.

TABELA 4.9 - Resultado da avaliação do método - Espanha

Avaliação - Método Espanha			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise		6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	considera os tempos de circulação de forma diferenciada para os sentidos dos trens impar e par, fazendo a integração destes tempos com a quantidade de trens - trabalha com o trecho crítico		x					
2	licenciamento e controle dos trens	considera o tempo de forma integrada e para cada sentido de circulação dos trens impar e par - não considera de forma detalha os tempos de licenciamento - não trata cruzamento e ultrapassagens de trens			x				
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	não considera diretamente em seu método, quando referencia o tempo em estudo dele pode ser excluído o tempo de manutenção, entretanto isto não é definido							x
4	interrupção da circulação de trens não programada	não considera							x
5	gestão operacional	não trata especificamente os tipos distintos de trens, estão inclusos na integração dos tempos - não trabalha com atrasos dos trens				x			
6	recurso de via	sua aplicação não faz distinção para linha singela ou para linha dupla				x			
Avaliação				5	4	6			

4.3.6 Método - Itália

Este método atendeu a maioria das categorias. Como os demais métodos, foi insuficiente quanto aos tempos decorrentes de interrupção da circulação de trens não programada, trabalhando esta categoria através de um fator de correção sem definição criteriosa deste parâmetro. Na categoria de tempo de deslocamento dos trens, desconsiderou a possibilidade de tempos diferentes em função do sentido de circulação. Normalmente ocorre no mesmo trecho tempos diferentes de circulação de trens na existência de rampas que são ascendente ou descendente em função do sentido de circulação dos trens. Na categoria de tempo de licenciamento e controle dos trens faltou considerar o tempo de ultrapassagem, comum em linha singela. O que na via de linha dupla, não necessariamente tem que ocorrer a parada do trem que esta sendo ultrapassado. A categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de

manutenção, ele trabalha com o tempo estimado que é uma possibilidade razoável de consideração, podendo ser fundamentado em dados históricos quando for ferrovia em operação. Em fase de projeto de uma nova ferrovia este tempo pode ser definido com base estatística da relação das características dos elementos de via com o TKB projetado. A categoria tempo decorrente de gestão operacional foi trabalhada dois tipos de trens, não sendo considerada a regularidade ou irregularidade dos horários dos trens. A categoria de tempo decorrente de recurso de via, que é de linha singela ou de linha dupla, não foi diferenciada neste método o tratamento. Este método tem uma particularidade, na equação ele considera um parâmetro que representa os trens regulares existentes ou que existirão. Direcionando o resultado para a definição de quantos trens a mais podem ser acrescentados na malha além destes ou, com um planejamento definido de trens prioritários, quantos trens a mais podem ser inseridos. Caso eles não existam, será atribuído o valor zero a este parâmetro. Outros métodos tratam esta condição através do gráfico de trens. Este método é indicado para uma ferrovia em operação e para a fase de projeto de nova ferrovia. Deve ser considerada na aplicação deste método a possibilidade de diferença de capacidade entre o resultado calculado e o real, em função da categoria 4 não estar bem definida tecnicamente sua aplicação, TABELA 4.10.

TABELA 4.10 - Resultado da avaliação do método - Itália

Avaliação - Método Itália			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise		6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	considera os tempos de circulação de forma diferenciada para dois tipos de trens, passageiro e carga, não considera o sentido de circulação - trabalha com o trecho crítico			x				
2	licenciamento e controle dos trens	trabalha o tempo gasto com licenciamento e nele esta incluso os tempos de cruzamento - não considera ultrapassagem			x				
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	considera através de previsão estimada ou dados históricos		x					
4	interrupção da circulação de trens não programada	considera através de um fator de correção sem orientação clara de utilização				x			
5	gestão operacional	considera dois tipos de trens, passageiro e carga - não trabalha com tabela de horários ou atrasos de trens			x				
6	recurso de via	não diferencia recurso de via de linha singela ou linha dupla				x			
Avaliação		23		5	12	6			

4.3.7 Método Brasil

Este método trabalha a categoria de tempo decorrente de deslocamento considerando o sentido de circulação. A categoria de tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens é considerado o

tempo de licenciamento em função da tecnologia utilizada e desconsiderados os tempos de cruzamento e ultrapassagem. A categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção é definido com base em dados históricos ou estimativa e é deduzido do tempo total do dia de 1.440 min. A categoria de tempo decorrente de gestão operacional trabalha com um tipo de trem o que dificilmente acontece nas malhas ferroviárias, não considera os atrasos dos trens. A categoria de tempo decorrente de recurso de via é trabalhado a condição de linha singela. Este método pode ser aplicado em ferrovias em operação ou em fase de projeto de nova ferrovia, atenção deve ser dada a condição de homogeneidade do tipo de trem e a definição do fator de correção que podem gerar distorção no resultado, TABELA 4.11.

TABELA 4.11 - Resultado da avaliação do método - Brasil

Avaliação - Método Brasil			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise	6	5	4	3	2	1	0	
1	deslocamento dos trens	trabalha com dois sentidos de circulação - trabalha com um tipo de trem - trabalha com o trecho crítico			x				
2	licenciamento e controle dos trens	o tempo de licenciamento é considerado o maior tempo gasto conforme sistema de licenciamento adotado - não trabalha com cruzamento e ultrapassagens de trens			x				
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	considera através de previsão estimada ou dados históricos e é deduzido do tempo total do dia de 1.440 min		x					
4	interrupção da circulação de trens não programada	esta associado a eficiência da ferrovia com seu valor variando entre 60% a 80% - não esta claro quando o valor deve ser o menor de referencia (60%), valores intermediários ou valor máximo recomendado (80%)			x				
5	gestão operacional	trabalha com apenas um tipo de trem - não trabalha tabela de horário ou atrasos dos trens				x			
6	recurso de via	este método esta direcionado para linha singela				x			
Avaliação		23		5	12	6			

4.3.8 Método - Estados Unidos

Este método tem boa praticidade. Trabalha a categoria de tempo decorrente de deslocamento com a somatória de todos os tempos de percurso nos dois sentidos, não evidencia em sua equação o sentido de circulação. A categoria de tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens esta incluso no tempo total de percurso do trem no trecho. Não referencia o tempo decorrente de cruzamento ou ultrapassagem. A categoria de tempo decorrente de gestão operacional, não trabalha os tipos de trem, trabalha com trem protótipo. Não faz menção a tabela de horários ou irregularidade dos horários dos trens. A categoria de tempo decorrente de recurso de via, o cálculo de linha singela aplica-se a equação diretamente. Para linha dupla o cálculo é feito para um sentido

de circulação, utilizando a mesma equação de linha singela, em seguida multiplica-se por dois os resultados. O tratamento deste método às categorias 3 e 4, tempo decorrente interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção e tempo decorrente de interrupção da circulação de trens não programada, são tratadas juntas em um único fator de correção. Não tem indicação de valor a ser utilizado com justificativa técnica, ao menos considera a degradação da estrutura física das instalações em função do tempo e do uso. Conseqüentemente o resultado do cálculo fica passivo de defasagem em relação à realidade. Pode ser utilizado para uma ferrovia em operação ou em fase de projeto, devendo ser levado em consideração a observação citada acima, TABELA 4.12.

TABELA 4.12 - Resultado da avaliação do método dos Estados Unidos

Avaliação - Método USA			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente		Não Atende	
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise		6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	em um único parâmetro trata das velocidades nos dois sentidos de circulação - não diferencia os tipos de trens - trabalha com o trecho crítico			x				
2	licenciamento e controle dos trens	o tempo de licenciamento esta incluso no tempo total de percurso dos trens no trecho - não trata do cruzamento e ultrapassagem dos trens				x			
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	trabalha com um fator de correção de 0,9 para sistema de licenciamento e controle tipo CTC e de 0,8 para outro sistema de licenciamento					x		
4	interrupção da circulação de trens não programada						x		
5	gestão operacional	considera apenas um tipo de trem (protótipo)				x			
6	recurso de via	trabalha com linha dupla e linha singela - sendo o cálculo para linha dupla a soma do resultado de cada sentido da linha singela		x					
Avaliação				5	4	6	4		

4.3.9 Método - Rússia

Este método tem como base o dimensionamento dos trens prioritários, predominantemente trens de passageiros, que é feito no gráfico de trens. O cálculo dos demais trens é feito utilizando as equações, sempre em relação aos trens de passageiros. Trabalha bem as categorias de tempo de deslocamento dos trens, considera os tempos de forma diferenciada para os trens de passageiro, carga e de serviço. A categoria de tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens é trabalhada considerando todos os tempos através do cálculo do tempo de supressão de trens de carga. Ele é definido em função de dois coeficientes, o básico que se refere ao trem de passageiro e o complementar que se refere às condições físicas de desigualdade entre o trecho crítico e os demais

trechos de via. Estes coeficientes de supressão funcionam a partir da prioridade absoluta do trem de passageiros. A categoria de tempo decorrente de recurso de via, linha singela e linha dupla, são trabalhadas no coeficiente de supressão básico e no coeficiente complementar. A categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção e a categoria de tempo não programada, não são tratadas neste método. Gerando ponto de atenção no resultado do cálculo, quanto maior o tempo de operação desta ferrovia e dependendo do nível de manutenção, as interrupções da circulação de trens terão valores mais significativos, impactando mais fortemente na diferença do resultado calculado com o real. Este método é aplicável em ferrovia em operação, para o conhecendo da capacidade atual e oportunidades de inserção de novos fluxos. Também é aplicável na fase de projeto de uma nova ferrovia. Em ambos os casos sua aplicação tem como base a existência de diferentes tipos e prioridades de trens, sendo que um destes tipos tem prioridade absoluta sobre os demais, TABELA 4.13.

TABELA 4.13 - Resultado da avaliação do método da Rússia

Avaliação - Método Rússia			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise	6	5	4	3	2	1	0	
1	deslocamento dos trens	considera os tempos de circulação de forma diferenciada para os tipos de trens, separados em trens passageiros, carga e coletor ou trens de manutenção - trabalha o sentido de circulação - trabalha o trecho crítico		x					
2	licenciamento e controle dos trens	considera o tempo de cruzamento e ultrapassagem entre dois trens do mesmo tipo chamando de circulação em bloco e de forma separa para trens de tipos diferentes; não trabalha diretamente na equação de cálculo de capacidade, entra como um coeficiente de supressão		x					
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	não trata as manutenções programadas em seu método de cálculo							x
4	interrupção da circulação de trens não programada	não trata os eventos não programados ou intencionais em seu método de cálculo							x
5	gestão operacional	trabalha a heterogeneidade com dois tipos de trens - trabalha com coeficiente de atraso do trem de passageiro extraído do gráfico de trens, que gerara impacto no trem de carga (apenas quando trens de passageiros circulando em bloco)		x					
6	recurso de via	método aplicado para linha singela e para linha dupla, trata de forma diferenciada cada um dos recursos; a diferença entre os trechos em relação ao trecho crítico é tratado através de um coeficiente complementar, não diretamente na equação de cálculo de capacidade de tráfego e só vale para linha singela		x					
Avaliação		20		20					

4.3.10 Método Canadá

Este método baseia-se na teoria das filas, a capacidade final de uma linha em número de trens é definida pelo trecho de menor capacidade calculada em função de um coeficiente médio de filas. A

categoria de tempo decorrente de deslocamento dos trens é trabalhada como tempo médio de serviço, não é considerado o sentido de circulação dos trens no trecho crítico que, dependendo do perfil da via, gera diferença significativa nas velocidades. Na categoria de tempo decorrente de licenciamento e controle é trabalhado o tempo médio de licenciamento, não está explícita a consideração neste tempo, dos tempos decorrentes de cruzamentos e ultrapassagens de trens. Estes parâmetros podem ser inseridos no coeficiente médio de fila, que é o tempo de deslocamento dos trens ou *transit time* na linha singela multiplicado pelo tamanho da fila. Possibilidade não abordada neste método. A categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação para intervenção programada de manutenção é trabalhada como o tempo médio de manutenção da linha e é deduzido do tempo total em estudo. É uma maneira razoável de definição, os dados históricos sevem como referencia de projeção. O ponto de atenção é que à medida que a malha ferroviária é utilizada a tendência é de aumentar a incidência de intervenção para manutenção e isto deve ser considerado. Na categoria de tempo decorrente de gestão operacional, este método trabalha os tipos de trens através do tempo médio de serviço. Neste caso recomenda-se atenção, considerando que esta média pode gerar uma alteração no resultado caso seja modificado a quantidade de determinado tipo de trem de velocidade significativamente maior ou menor, quando este parâmetro é trabalhado estratificado, possibilita um resultado e análise mais refinada e precisa. A categoria de tempo decorrente de recurso de via, que é associado à quantidade de linha de circulação, para este método a linha singela pode ser considerada como sendo um servidor e para linha dupla dois servidores. Especificamente neste método trabalha-se com linha singela. A categoria de tempo decorrente de interrupção da circulação de trens não programada, não é trabalhada. Devendo atenção e considerar que o resultado pode estar defasado em relação à realidade, que dependendo do volume de transporte e do tempo de uso da ferrovia pode exigir incidência de manutenção bem significativa. Este método é aplicável em ferrovia em operação ou em fase de projeto de uma nova ferrovia, com atenção às observações feitas acima, TABELA 4.14.

TABELA 4.14 - Resultado da avaliação do método do Canadá

Avaliação - Método Canadá			Critério						
			Atende			Atende Parcialmente			Não Atende
Categoria - Tempo decorrente de:	Análise		6	5	4	3	2	1	0
1	deslocamento dos trens	trabalha o tempo médio de serviço que é o tempo de deslocamento no trecho, não trabalha o sentido de circulação - trabalha com o trecho crítico			x				
2	licenciamento e controle dos trens	o tempo de licenciamento e controle é tratado como tempo médio de licenciamento - não trabalha o cruzamento e ultrapassagem de trens			x				
3	interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção	considera o tempo médio de manutenção da linha		x					
4	interrupção da circulação de trens não programada	não considera em seu método os tempos decorrente a eventos não programados ou intencionais							x
5	gestão operacional	a heterogeneidade dos trens esta incluído no tempo médio de serviço - não trabalha possíveis atrasos dos trens (tabela de horário)				x			
6	recurso de via	trabalha com linha singela - número de servidores				x			
Avaliação				5	8	6			

4.4 Apresentação da tratativa dos métodos analíticos pesquisados aos eventos não programados ou indesejáveis

Os métodos utilizados para cálculo da capacidade de tráfego da Alemanha, Inglaterra, Espanha, Rússia e Canadá, não consideram os eventos não programados. Os eventos não programados inerentes ao processo ferroviário não são previstos ou considerados. É como se em suas linhas não ocorrerá seguramente manutenção corretiva de via permanente, de material rodante (locomotivas e vagões) em linha de circulação, do sistema de licenciamento e controle, provenientes de acidentes ferroviários. Não ocorreram atrasos na devolução dos vagões, vazios ou carregados pelos clientes, falta de operador de trens e outros vários eventos não programáveis ou indesejáveis. Isto é irreal. Seguramente, conforme experiência do autor, não existe processo operacional ferroviário que esteja imune a eventos não programados.

Nos métodos utilizados pelo Japão, União Internacional de Caminhos de Ferro, Estados Unidos, Itália e Brasil, não são sistematicamente e criteriosamente definidas as incertezas operacionais inerentes à operação ferroviária. Em linhas gerais utilizam um “fator redutor ou de correção” que varia de 0% a 40% dependendo da ferrovia. Mas em que condição utiliza-se o percentual de 0%? E quando é recomendado utilizar 40% ou valores intermediários? Não está claro, nem detalhado quais são as bases para esta definição. Quais são os princípios que indicam o valor mais adequado?

O QUADRO 4.1 apresenta os tratamentos aos eventos não programados ou indesejáveis pelos métodos de cálculo da capacidade de tráfego por país pesquisado.

QUADRO 4.1 – Tratamento aos eventos não programados ou indesejáveis pelos métodos

Método - País	Tratamento aos eventos não programados ou indesejáveis dos métodos analíticos pesquisados
Alemanha	desconsidera
Inglaterra	desconsidera
Espanha	desconsidera
Rússia	desconsidera
Canadá	desconsidera
Japão	valores fixos de 90 minutos por dia para manutenção programada e 70 minutos por dia para eventos não programados, valores considerados na composição do fator de correção que multiplica o resultado da capacidade teórica definindo a capacidade real
UIC	compõe o método como tempo suplementar em minutos - é definido multiplicando-se a quantidades de seções ou trechos de linha existentes em estudo por 0,25 - não tem definição clara da composição deste critério
Itália	compõe o método como fator de correção que multiplica o resultado da equação de capacidade teórica, definindo a capacidade real - varia 0% a 100%, sem critério claro de definição do valor a ser utilizado
Brasil	compõe o método como fator de correção, multiplicando o resultado da equação de capacidade teórica obtendo-se a capacidade real - varia de 60% a 80%, conforme eficiência da ferrovia, sem critério claro de definição do valor a ser utilizado
Estados Unidos	compõe o método como fator de correção, multiplicando o resultado da equação de capacidade teórica obtendo a capacidade real, tem valor de 80% para licenciamento não automático e 90% para automático, sem sustentação técnica desta definição

Em linhas gerais, os métodos pesquisados não tratam os eventos não programados de forma clara e tecnicamente sustentável. Possivelmente parte do motivo se deve à complexidade da construção deste parâmetro, considerando que várias são as condições que concorrem à circulação de trens, indiferente ao sistema operacional e à modernidade tecnológica da instalação. Vale destacar que para a obtenção de um resultado mais próximo da realidade, a consideração deste parâmetro é muito importante. O entendimento da existência no sistema operacional ferroviário dos eventos não programados ou indesejáveis e a sua consideração no método, mesmo que de forma empírica, já provoca um diferencial no resultado que leva aos gestores ferroviários ou aos órgãos governamentais elementos para tomada de decisões mais precisas.

4.5 Identificação do método analítico que melhor trata os parâmetros ferroviários.

A maior pontuação no critério de avaliação dos métodos foi obtida pelos métodos utilizados na Itália e no Brasil, identificados como o que melhor trataram os parâmetros ferroviários para o

cálculo de capacidade de tráfego, pela abrangência e qualidade do contendo dos seus parâmetros categorizados. Suas aplicações são direcionadas para linha singela com pátios de cruzamento. Têm como base de estudo para cálculo o trecho mais desfavorável ou trecho crítico. Podem ser utilizados para conhecimento da capacidade de tráfego atual, adequação para aumento de demanda e em fase de projeto de uma nova ferrovia. Vale ressaltar que existe equilíbrio de tratamentos na maioria das categorias (categoria 1, 2, 5 e 6) pelos métodos, o diferencial foi nas categorias 3 e 4, conforme apresentado e comentado a seguir.

O QUADRO 4.2 e o GRÁFICO 4.8 apresentam os métodos - países e o desempenho em relação à categorização e o resultado.

QUADRO 4.2 - Relação dos métodos com o desempenho categorizado e resultados

<i>Método/País</i>	<i>Categoria 1</i>	<i>Categoria 2</i>	<i>Categoria 3</i>	<i>Categoria 4</i>	<i>Categoria 5</i>	<i>Categoria 6</i>	<i>Resultado</i>
Itália	4	4	5	3	4	3	23
Brasil	4	4	5	4	3	3	23
Japão	3	5	2	2	4	5	21
UIC	4	5	1	1	4	5	20
Rússia	5	5	0	0	5	5	20
Alemanha	5	5	0	0	5	5	20
USA	4	3	2	2	3	5	19
Canadá	4	4	5	0	3	3	19
Inglaterra	5	5	0	0	4	4	18
Espanha	5	4	0	0	3	3	15

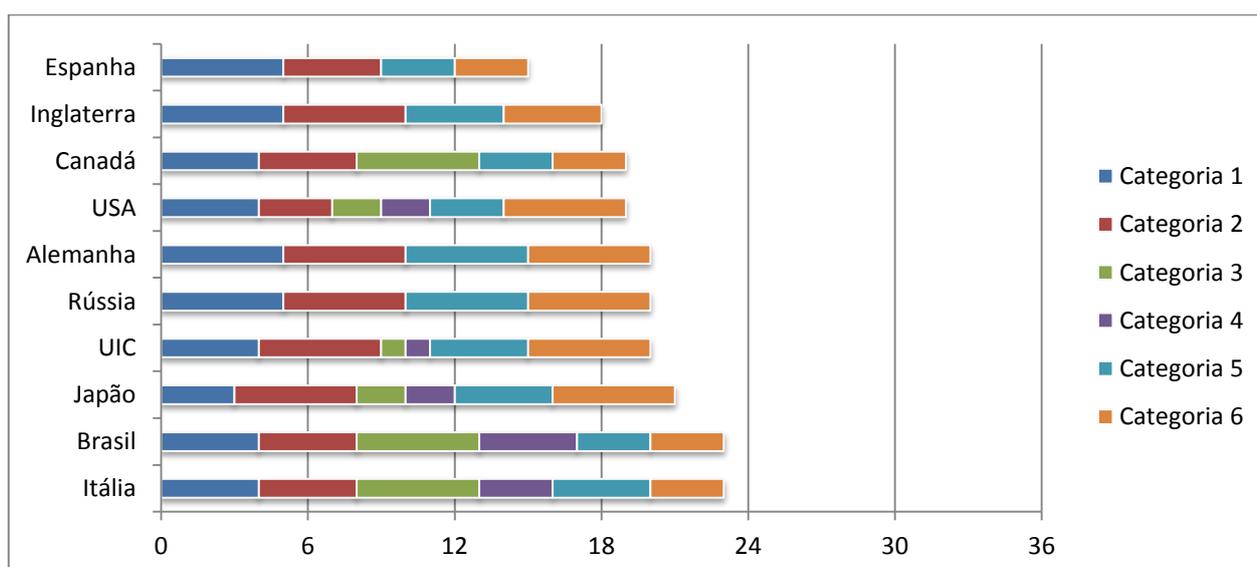


GRÁFICO 4.8 - Desempenho dos métodos categorizados, apresentados de forma gráfica.

A categoria 1 - tempo decorrente de deslocamento dos trens - teve bom atendimento pelos métodos da Rússia, Alemanha, Inglaterra e Espanha. Eles consideram a influencia do sentido de circulação e tipos diferentes de trens, que tem significativa influencia na velocidade e no tempo de ocupação do trecho estudado. O GRÁFICO 4.9 apresenta o desempenho dos métodos na categoria 1.

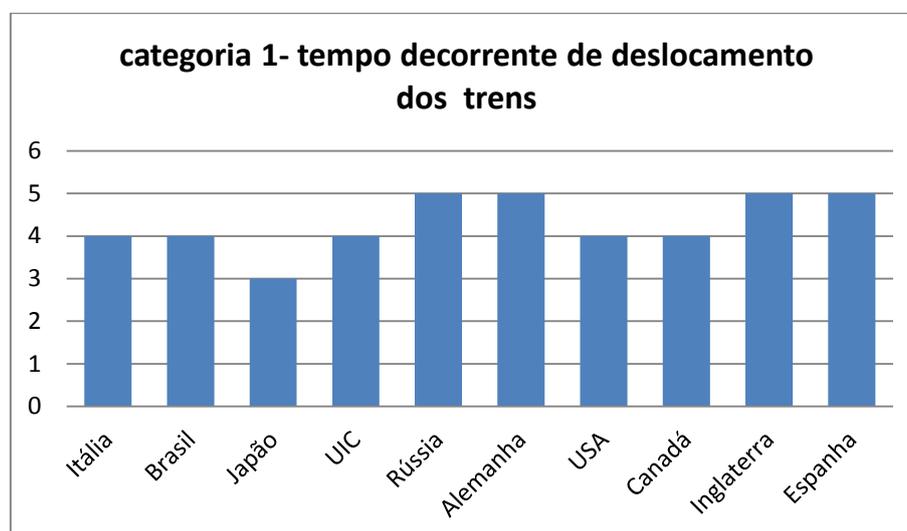


GRÁFICO 4.9 – Desempenho dos métodos na categoria 1.

A categoria 2 – tempo decorrente de licenciamento e controle dos trens teve boa abordagem pelos métodos do Japão, UIC, Rússia, Alemanha e Inglaterra. Trabalharam com os tempos de licenciamento, tempo de cruzamento e ultrapassagem. O GRÁFICO 4.10 apresenta o desempenho dos métodos na categoria 2.

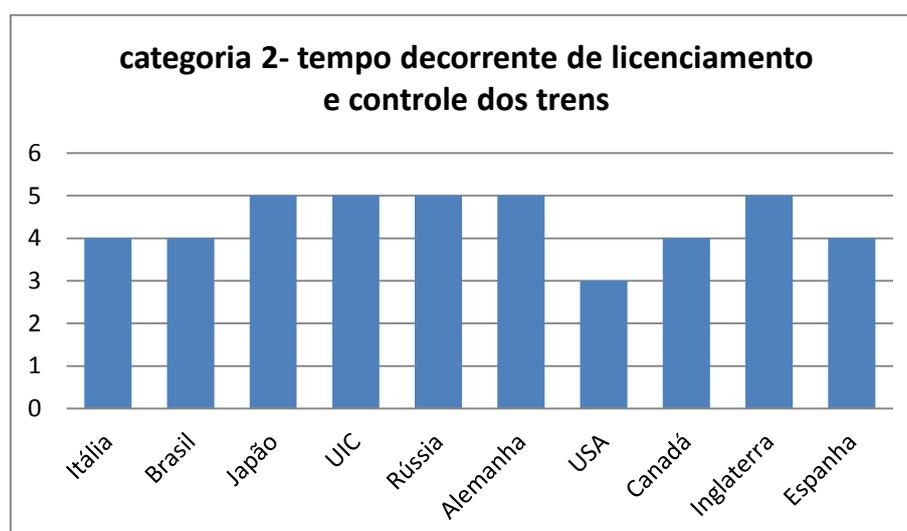


GRÁFICO 4.10 – Desempenho dos métodos na categoria 2.

A categoria 3 – tempo decorrente de interrupção da circulação de trens para intervenção programada de manutenção, foi um diferencial significativo no desempenho dos métodos. Os métodos que melhor trataram esta categoria foi o da Itália, Brasil, e Canadá. Indicaram a utilização do tempo médio de manutenção, que pode ser definido através de dados históricos ou por estimativa, considerando a projeção de tku que trafegará na ferrovia em função do tempo definido. De forma tímida o Japão e USA definiram valores fixos de tempo, sem referência de aplicação. O método UIC definiu um valor proporcional à quantidade de trecho, sem embasamento técnico. Não consideraram esta categoria em seu método a Rússia, Alemanha, Inglaterra e Espanha. O GRÁFICO 4.11 apresenta o desempenho dos métodos na categoria 3.

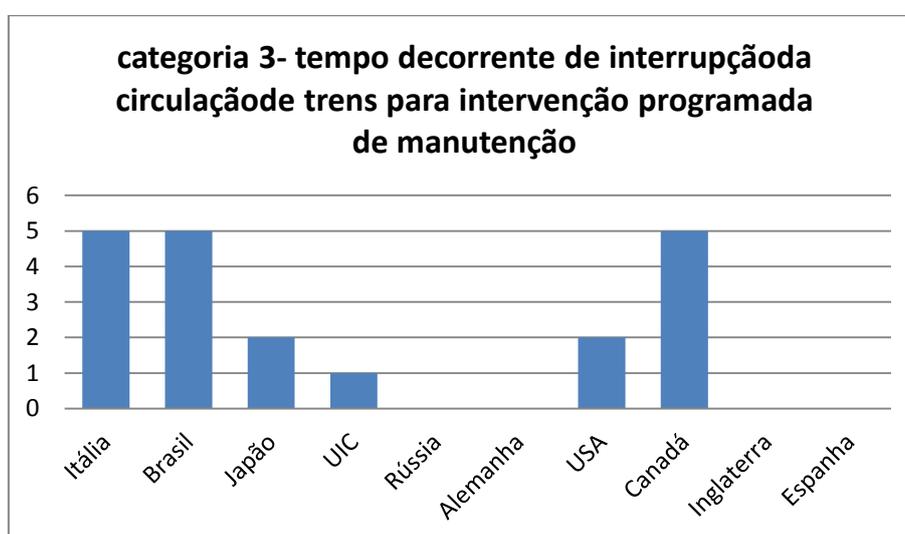


GRÁFICO 4.11 – Desempenho dos métodos na categoria 3.

A categoria 4 – tempo decorrente de interrupção da circulação de trens não programada é a categoria de menor dedicação de tratamento pelos métodos. O Brasil obteve a melhor avaliação, ele incluiu nesta categoria uma calha de valores de limite superior e inferior a ser adotado, sem definição de como utilizar precisamente os valores. Em segundo lugar vem a Itália. O Japão definiu valor fixo, sem referência de aplicação. O USA trabalhou esta categoria em conjunto com a categoria 3, vinculando-as ao sistema de licenciamento. O método UIC também trabalhou esta categoria junto com a categoria 3, sem referência e embasamento técnico. O GRÁFICO 4.12 apresenta o desempenho dos métodos na categoria 4.

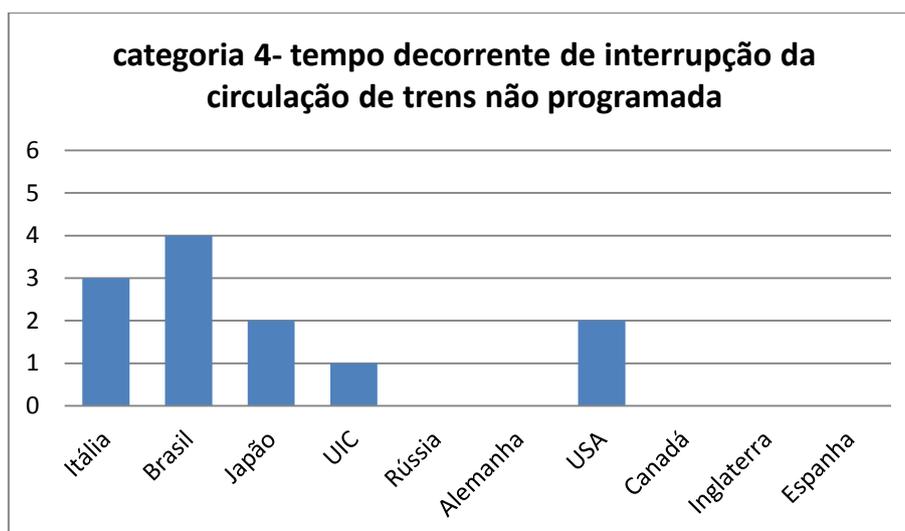


GRÁFICO 4.12 – Desempenho dos métodos na categoria 4.

A categoria 5 – tempo decorrente de gestão operacional, os métodos que consideram os tipos ou heterogeneidade dos trens e a regularidade ou irregularidade de horário dos trens foram a Rússia e Alemanha. O Japão e UIC trabalham com possibilidade de atrasos. O método Italiano trabalha com dos tipos de trens, passageiro e carga. A Inglaterra trabalha com valores médios dos trens de velocidade, comprimento, distancia de frenagem e de deslizamento. Os demais não fazem distinção dos tipos de trens. O GRÁFICO 4.13 apresenta o desempenho dos métodos na categoria 5.

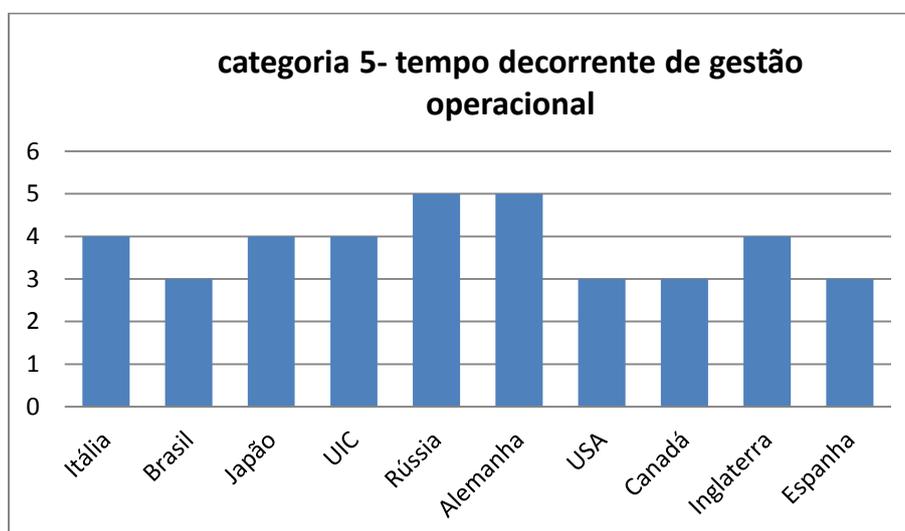


GRÁFICO 4.13 – Desempenho dos métodos na categoria 5.

A categoria 6 – tempo decorrente de recurso de via, os métodos do Japão, UIC, Rússia, Alemanha e USA são aplicáveis para linha singela e linha dupla os demais são direcionados para linha singela. O GRÁFICO 4.14 apresenta o desempenho dos métodos na categoria 6.

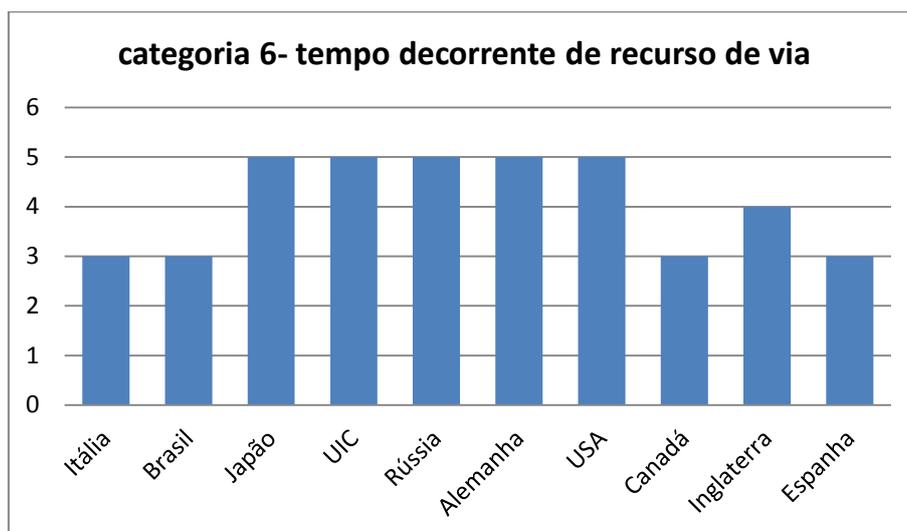


GRÁFICO 4.14 – Desempenho dos métodos na categoria 6.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como resultado principal a indicação do método analítico de capacidade de tráfego que melhor trata os parâmetros ferroviários e o tratamento dado aos eventos não programados ou indesejáveis pelos principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego das ferrovias nacionais e internacionais. A relevância da pesquisa se deve ao fato que o transporte tem forte impacto social e econômico, estando previstos para os próximos anos grandes investimentos neste modo de transporte no Brasil. Decisões são tomadas baseadas no conhecimento da capacidade de tráfego atual, identificando a necessidade e em que investir para aumento da capacidade. Da mesma forma para a construção de uma nova ferrovia, a base de toda definição de projeto passa, inevitavelmente, pelo cálculo da capacidade de tráfego. A precisão das informações que subsidiam as tomadas destas decisões pode e deve ser mais refinada, a partir do momento que se tenha mais parâmetros que impactam no desempenho operacional, identificados e mensurados corretamente. A definição inadequada da capacidade de tráfego pode levar a decisões equivocadas, considerando que não se terá de fato o conhecimento real da sua capacidade de tráfego e conseqüentemente definições de investimentos serão tomadas com baixo nível de precisão. Além disto, com o novo marco regulatório da ferrovia, a capacidade de tráfego ociosa deve ser disponibilizada a possíveis operadores interessados através da ANTT. A ferrovia fica exposta à perda de receita, com o mau aproveitamento dos recursos instalados, concomitantemente impactando no desenvolvimento econômico e social do país. Além disto, há penalidades quando seu cálculo de capacidade de tráfego oficializado junto a ANTT, não condiz com a capacidade real monitorada por este órgão na ferrovia.

Para a identificação do método analítico de cálculo de capacidade de tráfego mais adequado e o tratamento dado pelos métodos aos eventos não programados, foram pesquisados os principais métodos utilizados no Brasil e nos principais países onde este modo de transporte tem significativa participação na matriz de transporte. Foram pesquisados os métodos utilizados no Japão, Alemanha, União Internacional de Caminhos de Ferro, Inglaterra, Espanha, Itália, Estados Unidos e no Canadá. Pelo grande número de elementos que estão envolvidos e se correlacionam, este tema é complexo e é um grande desafio para modo de transporte ferroviário. Para melhor entender o tratamento e a composição dos métodos, foram definidas seis categorias abrangendo todos os parâmetros inerentes

ao sistema ferroviário, vinculando-os ao fator "tempo", que é a base de todos os métodos de cálculo de capacidade de tráfego.

Os métodos analíticos utilizados na Itália e no Brasil foram eleitos como os que em sua constituição melhor tratam os parâmetros ferroviários para o cálculo da capacidade de tráfego ferroviário. Eles podem ser aplicados para uma ferrovia em operação quanto para uma ferrovia em fase de projeto. Para uma ferrovia em operação, suas aplicações identificam a capacidade atual, trabalhando os recursos físicos estruturais de via permanente, sistema de licenciamento e controle, material rodante e processos operacionais, de forma simples e com boa assertividade. Além disto, possibilitam a identificação dos parâmetros ferroviários de melhor potencialização para atendimento a uma nova demanda planejada através da relação custo benefício que pode ser econômico ou social. Para projeto de uma nova ferrovia, possibilitam definir os melhores desempenhos dos parâmetros ferroviários, de forma equilibrada e eficiente. Atenção deve ser dada aos eventos não programados ou indesejáveis, eles devem ser identificados e quantificados criteriosamente e considerados no fator de correção. Nenhum dos dez métodos analisados trabalhou este assunto adequadamente, estes dois métodos ficaram entre os que obtiveram a melhor avaliação neste assunto.

A utilização dos critérios de avaliação, baseada na categorização dos parâmetros ferroviários, foi pertinente uma vez que possibilitou a análise qualitativa dos métodos selecionados, de elementos ferroviários complexos que se correlacionam conforme a construção, às vezes particularizadas dos métodos. Pôde identificar uma condição de fragilidade comum aos métodos, da desatenção aos eventos não programados, ao nível que lhe é devido pelo forte impacto que pode gerar no resultado da capacidade de tráfego. Cinco dos dez métodos ao menos considerou este parâmetro, e da outra metade, três métodos, inclusive o Italiano e o Brasileiro, desenvolveram um pouco melhor este parâmetro, indicando sua inserção no fator de correção.

Diante do exposto, conclui-se que a metodologia de avaliação dos métodos desenvolvida foi capaz de avaliar qualitativamente os métodos de cálculo de capacidade de tráfego, identificando o método mais adequado e o tratamento aos eventos não programados ou indesejáveis dos métodos. Além disso, através do critério de avaliação dos métodos, foram identificados os pontos fortes e fracos de cada método, possibilitando a oportunidade de direcionar os esforços de melhoria dos métodos para

os parâmetros ferroviários que oferecem deficiência e quais os métodos que podem ser referenciados nestes parâmetros.

Devido à complexidade do assunto e da oportunidade de novos trabalhos provocados pelo presente estudo, recomendamos:

- Desenvolver uma definição sustentável e tecnicamente criteriosa para tratamento do parâmetro referente aos eventos não programados ou indesejáveis para os métodos analíticos de capacidade de tráfego.
- Desenvolver um método analítico de cálculo de capacidade de tráfego, que busque agregar o maior número das melhores práticas dos dez métodos analíticos trabalhados nesta dissertação.
- Aplicar o método analítico de capacidade de tráfego utilizado na Itália em ferrovia predominantemente de trens de carga, em ferrovia predominantemente de trens de passageiro, em ferrovia predominantemente de trens metropolitanos e em ferrovia heterogênea de trens de carga e de trens de passageiro, analisando os resultados obtidos com o método e a aderência em relação a realidade constatada.
- Aplicar cada um dos dez métodos em uma base de dados real extraída de mesma ferrovia, avaliando os desvios dos resultados.
- Avaliar junto às operadoras ferroviárias brasileiras, o resultado obtido com o cálculo de capacidade de tráfego e o confronto dele com a monitoria feita pela ANTT.

6 REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS – ANTF. Disponível em <<<http://www.antf.org.br>>>. Acesso em fevereiro de 2013.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA FERROVIÁRIA – ABIFER. Disponível em <<<http://www.abifer.org.br>>>. Acesso em junho de 2012
- 3 ABRIL, M.; BARBER, F. **An assessment of railway capacity**. Transportation Research Part E, Vol. 44, nº 5, 2008.
- 4 AHUJA, R. K.; LIU, J.; ORLON, J. B.; SHARMA, D.; SHUGHART, L. A. **Solving real-life locomotive scheduling problems**. Transportation Science, v. 32, p. 358-369, 2002.
- 5 ALMEIDA JÚNIOR, O. F. **Mediação da informação: ampliando o conceito de disseminação**. In: Marta Valentim. (Org.). Gestão da Informação e do Conhecimento. São Paulo: Editora Polis, Vol. 1, p. 41-54, 2008.
- 6 AMARAL, A. **Um método para decisão de concessão de faixas de trabalho em ferrovias de linha singela**, 218 p. Dissertação (mestrado) – Departamento de Ciências em Sistemas e Computação, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1991.
- 7 ÂNGELO, C. F. **O problema dos transportes rodoviários e ferroviários de carga no Brasil**. Estudos econômicos, v.17, n.1, p.89-104, jan.-abr. 1987.
- 8 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS – ANTF. Disponível em <<<http://www.antf.org.br>>>. Acesso em fevereiro de 2013.
- 9 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS – ANTP. Disponível em <<<http://www.antp.org.br>>>. Acesso em outubro de 2012.

10 AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT -.Disponível em <<<http://www.antt.org.br>>>. Acesso em setembro de 2012.

11 ARMSTRONG, J.; HOOD, I.; PRESTON, J. **Automating the Production of Train Graphs and the Calculation of CUI Values**. 3rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. Zurich, Switzerland, 2009.

12 ASSAD, A. A. **Modeling of rail networks: Toward a routing/makeup model**. Transportation Research, v. 14B, p. 101-114, 1980.

13 BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. New Jersey: Pearson Education International, 2001.

14 BATISTA, C. **Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil**. 2006. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

15 BATISTA, C. N. O.; WIDMER, J. A. **Contribuição à Análise da Capacidade de Processamento de Trens Cargueiros em Linhas Ferroviárias Singelas no Brasil**. XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). Brasília, DF, 2006.

16 BRINA, H. L. **Estradas de ferro 2**. Belo Horizonte: Editora UFMG, Segunda edição. 215p. 1988.

17 BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 1983.

18 BURDETT R. L.; KOZAN, E. **Techniques for Absolute Capacity Determination in Railways**. Transportation Research Part B, 40 B, p. 616–632, 2006.

19 CAPRARA, A.; FISCHETTI, M.; TOTH, P. **Modeling and Solving the Train Timetabling Problem**. Operations Research, Vol. 50, No. 5, p. 851–861, 2002.

- 20 CAREY, M; LOCKWOOD, D. **A model, algorithms and strategy for train pathing.** Journal of the Operational Research Society, Vol. 46, p 988-1005, 1995.
- 21 CASTRO, N. **Estrutura, Desempenho e Perspectivas do Transporte Ferroviário de Carga. Pesquisa e Planejamento Econômico.** Vol. 32, N^o. 2, Ago 2002.
- 22 CASTRO, N.; LAMY, P. **A reforma e a modernização do setor de transporte ferroviário de carga.** Rio de Janeiro: Ipea, 1994. 61p. (Textos para discussão, 339)
- 23 CHRISPIM, E. M. **Análise da operação ferroviária do Porto do Rio de Janeiro utilizando simulação de eventos discretos.** Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2007.
- 24 CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. Disponível em: <<<http://www.cnt.org.br>>> Acesso em fevereiro de 2013.
- 25 CORDEAU, J.F.; TOTH, P.; VIGO, D. **A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling.** Transportation Science (4), p. 380-404, 1998.
- 26 CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração da produção e de operações: manufatura e serviços – uma abordagem estratégica.** 8. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005.
- 27 COSTA, E. V. **Da colônia à senzala.** São Paulo: Difel, 1966.
- 28 DINGLER, M. **Understanding the Impact of Operations and New Technologies on Railroad Capacity, in Civil Engineering.** University of Illinois at Urbana- Champaign: Urbana-Champaign, USA, 2010.
- 29 DREYFUS, S. E.; LAW, A. M. **The Art and Theory of Dynamic Programming.** USA. 1977.
- 30 DUNCAN, J. S. **Public and private operation of railways in Brazil.** New York: Columbia University Press, 1932.

- 31 ELBROND, J. **A comparison of theoretical and actual traffic schedules on the MT.** Newman Railroad – Heavy Haul Railways Conference, 1978.
- 32 FAIR , M. L.; WILLIAMS JR., E. W. **Economics of transportation.** New York: Harper & Brother Publishers, 1959.
- 33 FARIA, A.C. & COSTA, M.F.G. **Gestão de Custos Logísticos.** São Paulo: Editora Atlas, 2005.
- 34 FERNÁNDEZ L. J. E.; GIESEN E, R. **A strategic model of freight operations for rail transportation systems.** Transportation Planning and Technology. v 27. nº 4. P 231-260, 2004.
- 35 FLEURY, P. F. **Gestão Estratégica de Transportes.** Centro de Estudo de Logística da COPPEAD, 2000. Disponível em: << www.centrodelogistica.com.br >> Acesso em maio/2012.
- 36 FOGEL, R. W. **Railroads and american economic growth: essays in econometric history.** Baltimore: The Johns Hopkins Press, 1964. cap 6.
- 37 FRANK, O. **Two-way traffic on a single line of railway.** Operations Research. Suécia, 1965.
- 38 FREITAS, A. S.; MIRANDA, D. S.; MARQUES, J. C. C.; RODRIGUES, N.; SANTOS, R. G. **Operador de Transporte Multimodal.** Seminário da disciplina Modais de Transporte do curso Logística com ênfase em Transportes. Faculdade de Tecnologia da Baixada Santista, Santos, São Paulo. Julho, 72 p. 2004. Disponível em: <<<http://www.logisticabs.com.br> >> Acesso em fevereiro de 2012.
- 39 GHOSEIRI, K.; SZIDAROVSKY, F.; ASGHARPOUR, M. J. **A multi-objective train scheduling model and solution.** Transportation Research Part B, Vol. 38, no. 10, pp. 927-952, 2004.
- 40 GUIMARÃES, I.F.G. **Modelo de Rede de Filas para Avaliação de Desempenho em Trechos Singelos de Malhas Ferroviárias.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

- 41 HAY, W.W. **Railrod Engineering**. 2nd edtion. New York: John Wiley, 784p, 1982.
- 42 HOMER, J. B.; KEANE, T. E.; Lukiantseva, N. O. **Evaluating Strategies to Improve Railroad Performance – A System Dynamics Approach**. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, p. 1186–1193, 1999.
- 43 INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em <<<http://www.ibge.gov.br>>>. Acesso em junho de 2012
- 44 INGOLOTTI, L.; SALIDO, M. A.; TORMOS, P.; LOVA, A.; BARBER, F.; ABRIL, M.; **An assessment of railway capacity**. Transportation Research, [S.I.], part E 44, p.774-806. 2008.
- 45 ISLER, C. **Proposta de um modelo de capacidade de processamento de trens cargueiros em redes ferroviárias de linha singela**. 2010. 182 p. Dissertação (Mestrado – Pós Graduação em Engenharia de Transporte e Área de Concentração em Planejamento e Operação de Sistema de Transporte) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- 46 JANIC, M. **Single track line capacity model**. Transportation Planning and Technology. 1984.
- 47 KONTAXI, E.; RICCI, S. **Survey of automated systems for railway management**. Universidad Politécnica de Railway Capacity Analysis: Methodological Framework And Harmonization Perspectives. 12th WCTR, Lisbon, Portugal, 2010.
- 48 KOZAN, E.; BURDETT, R. L. **A Railway Capacity Determination Model and Rail Access Charging Methodologies**. Transportation Planning and Technology, 28(1), 27-45, 2005.
- 49 KRUEGER, H. et al. **Simulation within the railroad environment**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Orlando. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2000. p. 1191- 1200, 2000.
- 50 KRUEGER, H. **Parametric modeling in rail capacity planing**. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. [S.I.], p.1194-1200. 1999.

- 51 LACERDA, S. M. **O transporte ferroviário de cargas.** In: BNDES. BNDES 50 anos: Histórias Setoriais. São Paulo: DBA Artes Gráficas, 2002.
- 52 LANDEX, A. **Evaluation of railway networks with single track operation.** Networks and Spatial Economics, 2009.
- 53 LANDEX, A., KAAS, A. H., SCHITTENHELM, B.; SCHNEIDER-TILLI, J. **Practical use of the UIC 406 capacity leaflet by including timetable tools in the investigations.** Proc. of the 10th International conference on Computers in Railways, eds. J. Allan, C.A. Brebbia, A.F. Rumsey, G. Sciutto, S. Sone & C.J. Goodman, 2006.
- 54 LANDEX, A.; KASS, A. H.; SCHITTENHELM, B.; SCHNEIDER-TILLI, J. **Evaluation of Railway Capacity,** Proceedings of Traffickedays, Aalborg, Denmark, 2006.
- 55 LANDEX, A.; SCHITTENHELM, B.; KAAS, A. H.; SCHNEIDER-TILLI, J. **Capacity Measurement with the UIC 406 Capacity Method,** Proceedings of 11th International conference on Computers in Railways, eds. J. Allan, E. Arias, C.A. Brebbia, C. Goodman, A.F. Rumsey, G. Sciutto & N. Tomii, 2008.
- 56 LANG, A.E. **As Ferrovias no Brasil e Avaliação Econômica de Projetos: Uma Aplicação em Projetos Ferroviários.** Dissertação de Mestrado. Distrito Federal. Universidade de Brasília, 2007.
- 57 LARDNER, D. **Railway economy: a treatise on the new art of transport.** New York: August M. Kelley Publishers, 1968.
- 58 LABORATÓRIO DE SISTEMA DE TRANSPORTES DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES – LASTRAN. Disponível em <<<http://www.producao.ufrgs.br>>>. Acesso em outubro de 2012.
- 59 LEAL, J. E.; SOARES, A. C.; NUNES, L. S. N. **Uma Abordagem Heurística para o Problema de programa de Trens em Linhas Singelas.** Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Florianópolis, v.2, p.945–956, 2004.

- 60** LINDNER, T.; PACHL, J. **Recommendations for Enhancing UIC Code 406 Method to Evaluate Railroad Infrastructure Capacity.** in 89th Transportation Research Board annual meeting. Washington, USA, 2010.
- 61** LOCKLIN, D. P. **Economics of transportation.** Homewood: Richard D. Irwin Inc., 1954.
- 62** MARQUES, S. **Privatização do sistema ferroviário brasileiro.** Texto para discussão n. 343. IPEA: Brasília, DF, 1996.
- 63** MARTINS, R. S.; CAIXETA-FILHO, J. V. **Desenvolvimento dos sistemas de transporte: auge, abandono e reativação recente de ferrovias.** In: CAIXETA-FILHO, J. V.; GAMEIRO, A. H. Transporte e logística em sistemas agroindustriais. São Paulo: Atlas, 2001.
- 64** MCCLELLAN, J. **Railroad Capacity Issues.** Vol. 3: Research to Enhance, 2007.
- 65** METZER, J. **Railroads development and market integration: the case of TsaristRussia.** Journal of Economic History, v.34, n.3, p.529-50, Sep. 1974.
- 66** MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Disponível em <<<http://www.transportes.gov.br>>>. Acesso em junho de 2012.
- 67** MINISTÉRIO DAS CIDADES. Disponível em <<<http://www.cidades.gov.br>>>. Acesso em setembro de 2012.
- 68** MORISUGI, H.; HAYASHIYAMA, Y. **Post-evaluation of the Japanese railway network 1875-1940.** In: QUINET, E.; VICKEMAN, R. **The Econometrics of Major Transport Infrastructure.** Eds., Macmillan Press, 185-201, 1997.
- 69** MORLOK, E. K. **Introduction to Transportation Engineering and Planning.** 1st ed., New York: McGraw-Hill, 767 p, 1978.
- 70** PACHL, J. **Railway Operation and Control.** 2nd ed., Mountlake Terrace, 2009.

71 PACHL, J. **Timetable Design Principles in Railway Timetable & Traffic**, eds. I.A. Hansen & J. 2008.

72 PEREIRA FILHO, G.; HAMACHER, S. **Uso da Teoria das Opções Reais no Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos**. Memorando Técnico No. 02/2000, Departamento de Engenharia Industrial, PUC-RIO, 2000.

73 PETERSEN, E. R.; TAYLOR , A. J. **A Structured Model for Rail Line Simulation and Optimization**. Transportation Science, Vol. 16, No 2: 192-206, 1982.

74 POMPERMAYER, F. M.; GUIMARÃES, I. F. G.; SOUZA, M. C.; RODRIGUES, L. F. **Comparação entre o modelo de rede de filas e o modelo de simulação computacional para análise de capacidade de malhas ferroviárias em trechos singelos**. In: Seminário de Logística, 26 p. 2007. Vitória, ES. Anais... São Paulo: ABM, 2007.

75 RAMSEY, G. R. S.; HUTCHINSON B.G.; ASCE; M.; RILETT, L. R. **Simplified Railroad Capacity Analysis Model**. Journal of Transportation Engineering. Vol. 112, n. 4, p. 358-368, 1986.

76 RATTON NETO, X. H. **Padrões para manutenção da via permanente**. 1985. 177 p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Transporte) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1985.

77 RIVES, F. O.; PITA, A. L.; PUENTE, M. M.. **Tratado de Ferrocarriles**. Madrid: Editora Rueda, 1977.

78 RODRIGUES, J. A. C. **Crescimento do Transporte Ferroviário de Cargas no Brasil e seu Reflexo na Indústria**. Artigo apresentado no XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais e V Seminário de Fundição – Amsted Maxion Fundição e Equipamentos Ferroviários S.A., ocorrido entre 17 e 19/05/04, em Salvador, BA, 2004.

79 ROSTOW, W. W. **Etapas do desenvolvimento econômico – um manifesto não comunista (1960)**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1961.

80 SALIDO, M. A.; INGOLOTTI, L.; BARBER, F.; ABRIL, M.; TORMOS, P., LOVA, A. **An assessment of railway capacity**. Transportation Research, [S.I.], part E 44, p.774-806. 2008.

81 SAVAGE, C. **An economic history of transport**. London: Hutchinson, 1959.

82 SHAIN, I. **Railway Traffic Control and Scheduling Based on Inter-train Conflict Management**. Transportation Research Part B, 39, 511-534, 1999.

83 SHEFFI, Y.; SMITH, M.E. **Locomotive scheduling under uncertain demand**. Transportation Research Record (1251), p. 45-53, 1988.

84 INTERNATIONAL UNION OF RAILROADS – UIC. Disponível em <<[http:// www.uic.org](http://www.uic.org)>>. Acesso em julho de 2012.

85 VIDAL, J. S. **Aumento da capacidade de transporte de uma ferrovia em linha singela**. 1991. Dissertação (Mestrado em Ciência em Sistema e Computação) – Instituto Militar de Engenharia, São Paulo, 1991.

86 VILLAÇA, R. **Cresce importância da ferrovia no País**. Jornal do Comércio, 2012. Disponível em: <<www.antf.org.br>>. Acesso em julho/2013.

87 WIDMER, J. A.; BATISTA, C. N. O. **Contribuição à Análise da Capacidade de Processamento de Trens Cargueiros em Linhas Ferroviárias Singelas no Brasil**. XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET). Brasília, DF, 2006.

88 WIKIPEDIA. Disponível em <<<http://pt.wikipedia.org>>>. Acesso em fevereiro de 2013.

89 ZHANG, J.; HAN, B.; NIE, L. **Research on Capacity Calculation and Assessment Framework for Chinese High Speed Railway Based on UIC406**. Journal of System and Management Sciences. Vol.1, n.1, 2011.

90 ZHOU, X.; ZHONG, M. **Single-track train timetabling with guaranteed optimality: Branch-and bound algorithms with enhanced lower bounds.** Transportation Research Part B, Vol. 41, no. 3, pp. 320-341, 2007.