

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ DE SOUZA LEAL NETO

EMPREGO DE METODOLOGIA DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA OPERAÇÃO
DA LINHA FÉRREA SINGELA CASCAVEL-GUARAPUAVA

CURITIBA

2016

JOSÉ DE SOUZA LEAL NETO

EMPREGO DE METODOLOGIA DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA OPERAÇÃO
DA LINHA FÉRREA SINGELA CASCAVEL-GUARAPUAVA

Dissertação apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Pesquisa Operacional, Departamento de Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. José Eduardo Pécora Júnior, Ph.D.

CURITIBA

2016

Leal Neto, José de Souza

Emprego de metodologia e simulação na operação da linha férrea
singela Cascavel-Guarapuava / José de Souza Leal Neto – Curitiba, 2016.
94 f.: il. (algumas color.); 29 cm

Orientador: Professor Dr. José Eduardo Pécora Júnior
Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia
da Produção, Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná.

Inclui bibliografia

1. Infraestrutura de transporte. 2. Ferrovia. 3. Capacidade de linha
férrea. 4. Simulação. I. Pécora Júnior, José Eduardo. II. Universidade
Federal do Paraná. III. Título.

CDD 625
CDU 629

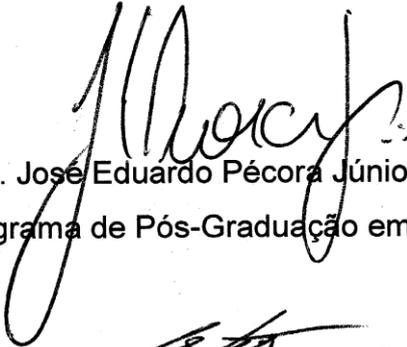
TERMO DE APROVAÇÃO

JOSÉ DE SOUZA LEAL NETO

EMPREGO DE METODOLOGIA DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA OPERAÇÃO DA LINHA FÉRREA SINGELA CASCAVEL-GUARAPUAVA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



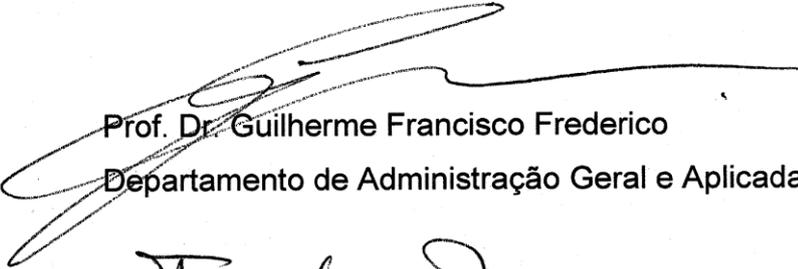
Prof. José Eduardo Pécora Júnior, Ph. D.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção



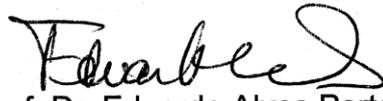
Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção



Prof. Dr. Guilherme Francisco Frederico

Departamento de Administração Geral e Aplicada



Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Curitiba, 2016

Dedico este trabalho à minha esposa Márcia e meus filhos Vanessa e Samuel para lembrá-los de que os sonhos são possíveis, quando realizados com perseverança e fé.

Agradeço a Deus por ser o amigo presente nos momentos difíceis e por sempre me estimular a perseverar nos projetos nos quais somos parceiros. Aos meus três heróis, Márcia, minha amiga, Vanessa e Samuel, minha herança, pela paciência comigo nos momentos de stress. Ao Professor José Eduardo Pécora Júnior, mais que um orientador, um amigo e irmão, por me fortalecer como aluno e como homem. Aos professores do PPGEP, por compartilharem seus conhecimentos e valorizarem a tão desconhecida meritocracia. À direção da Ferroeste por ceder os preciosos dados operacionais, os quais viabilizaram a presente pesquisa e em especial ao Sr. Paulo Francisco Franquetto por compartilhar sua experiência comigo.

RESUMO

Ampliar infraestrutura de transporte de carga requer elevados recursos financeiros. Entretanto, antes de se ampliar a infraestrutura para adequar o nível de oferta de transporte de carga à demanda, indica-se realizar simulação para verificar se a capacidade da infraestrutura está efetivamente esgotada. O uso de simulação é oportuno, dado o baixo investimento necessário e a inexistência de impacto na operação da infraestrutura. Atualmente, a matriz de transporte brasileira é desequilibrada e dependente do modal rodoviário, portanto, uma maior participação do modal ferroviário é desejável para ajustar a matriz de transporte de carga. No Estado do Paraná, um grande produtor e exportador de grãos, o modal ferroviário participa do transporte da safra de grãos para exportação. A linha férrea Cascavel-Guarapuava, concessão da Estrada de Ferro Paraná Oeste S. A. – Ferroeste – em 2013, transportou 166.332 t das 7.510.000 t de soja exportadas pelo Estado do Paraná. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho de pesquisa é investigar o cenário em que ocorre a exaustão em 2015 da capacidade do transporte de cargas, em trens/dia, da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava. Para isto, é empregado modelagem, simulação e exploração de cenários, bem como o *software* de simulação baseado em eventos SIMUL8. Os resultados obtidos na simulação indicam existência de Capacidade Disponível na linha férrea Cascavel-Guarapuava de aproximadamente de 4 a 5 trens/dia. Além disso, são apresentados os trechos ferroviários que restringem a Capacidade Prática da ferrovia.

Palavras-chave: Infraestrutura de transporte. Ferrovia. Capacidade de linha férrea. Simulação.

ABSTRACT

Expand cargo transport infrastructure requires large financial resources. However, before expanding the infrastructure to suit the cargo transport offer to meet the demand requirements, it is better to simulate to verify whether infrastructure's capacity is effectively exhausted. It's appropriate to use simulation, given the low investment required and no impact on the operation's infrastructure. Nowadays, Brazilian transport matrix is unbalanced and it is highly dependent of road transportation. Therefore, it is desirable to improve use of rail transport to balance cargo transport matrix. In Paraná State, a great producer and exporter of grains, the railways transport grains to exportation. The Railway Cascavel-Guarapuava is a concession of Estrada de Ferro Paraná Oeste S. A. - Ferroeste – and in 2013, transported 166,332 tons of the total 7.51 million t soya exported by Paraná State. In this context, the objective of this research is to investigate the scenario of exhaustion of cargo transportation's capacity – trains/day – of Railway Cascavel-Guarapuava at 2015. Modeling, simulation, scenarios experiment and use of discrete event based simulation software – SIMUL8 – will be able to reach this goal. The results of the simulation show that there is Available Capacity of approximately 4 to 5 trains/day on Railway Cascavel-Guarapuava. Further, it was identified railroad tracks bottleneck, which limit Practical Capacity of the railway.

Key words: Infrastructure of transportation. Railway. Railway capacity. Simulation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA	13
1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 SIMULAÇÃO.....	16
2.1.1 Simulação: definição, vantagens e desvantagens	16
2.1.2 Conceito de modelo.....	17
2.1.3 Metodologia para simulação de eventos discretos	18
2.2 INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE DE CARGA NO BRASIL	29
2.3 MODAL FERROVIÁRIO.....	30
2.3.1 Evolução do modal ferroviário	31
2.3.2 A Estrada de Ferro Paraná Oeste S. A. – FERROESTE.....	32
2.4 CAPACIDADE.....	35
2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO.....	37
2.5.1 Considerações sobre o levantamento bibliográfico	42
3 MATERIAL E MÉTODO	44
3.1 MÉTODO E CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO	44
3.2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO DE PESQUISA	45
3.2.1 Estudo do problema a ser simulado	46
3.2.2 Elaboração do modelo conceitual.....	49
3.2.3 Modelagem dos dados de entrada	53
3.2.4 Implementação do modelo computacional.....	68
3.2.5 Validação do modelo operacional.....	72
4 REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS E RESULTADOS	75
5 CONCLUSÃO	85
REFERÊNCIAS	88

GLOSSÁRIO	93
------------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Uma infraestrutura de transporte de carga eficiente é um elemento importante para o desenvolvimento econômico de países e regiões e está ajustada à demanda se for capaz de ofertar serviços a baixo custo e assim, preservar a competitividade de seus usuários e gerar desenvolvimento econômico e bem-estar social ao país (MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (MT), 2012). A priori, em situações em que a infraestrutura não se ajusta à demanda – presente ou futura – a ampliação da infraestrutura se torna uma opção para se ajustar o nível de oferta à demanda de transporte.

Para a Confederação Nacional do Transporte (CNT) (2013) uma matriz de transporte é ajustada se em sua composição há uma participação estratégica do modal ferroviário. Objetivamente, o MT (2009) informa que uma matriz de transporte possui uma distribuição equilibrada quando há o uso mais intensivo e adequado dos modais ferroviários e aquaviários. Em razão da atual matriz de transporte brasileira ser desequilibrada, o MT possui por meta, que a mesma se torne equilibrada com a participação de 35% do modal ferroviário, 29% do aquaviário e 30% do rodoviário.

No que diz respeito à operação do modal ferroviário, após a disseminação das rodovias, em diversos países, dados seus altos custos de implantação e manutenção, as ferrovias, muitas vezes, necessitaram de subsídios estatais para operarem. Até meados da década de 1970, a maior parte dos serviços ferroviários no mundo estava sob algum tipo de gestão pública, quer pelo controle de empresas estatais, quer pela forte regulação pública. A interferência do Estado, no Brasil e em outros países, sinalizou, a partir da década de 1970, que os altos custos e o baixo nível de eficiência, que estavam inviabilizando a existência das ferrovias, poderiam estar associadas ao modelo de operação adotado (CNT, 2013).

Entretanto, na década de 1980, o início das privatizações e concessões em diferentes países e, na década de 1990, também no Brasil – Plano Nacional de Desestatização (PND) (ANTT, 2014) – estimularam a revisão dos modelos de operação e construção de ferrovias. Houve sucesso com a desregulamentação do setor, na Alemanha, Estados Unidos e Japão, porém, no caso do Reino Unido, a experiência não gerou os resultados esperados. A redução da intervenção

governamental proporcionou, entre outros benefícios, ganhos de produtividade, eficiência e oferta de um serviço de maior qualidade para os usuários (CNT, 2013).

Por outro lado, em relativa discordância, Pouryousef, Lautala e White (2015) informam que nos Estados Unidos, mais de 90% da infraestrutura ferroviária é de propriedade e gerenciada por empresas ferroviárias privadas de transporte de carga, enquanto na Europa quase toda infraestrutura é de propriedade e gerenciada por governos ou agências públicas. Também informam que, enquanto as ferrovias estadunidenses transportam principalmente mercadorias sem um padrão estruturado de operação, as ferrovias europeias transportam mercadorias e principalmente passageiros, mas em operação estruturada, ou seja, conforme quadro-horário de partidas de trens. Segundo a ANTT (2014) dos treze trechos de malha federal concedida, existem apenas três onde são prestados os serviços de transporte de passageiros de caráter regular.

Apesar da argumentação de Pouryousef, Lautala e White (2015), a CNT (2013) destaca que a participação da iniciativa privada no setor ferroviário gerou ganhos de eficiência tanto pela melhor gestão dos recursos como pela atuação da concorrência, mas que é necessário um sistema de regulação atuante, quer seja para garantir a qualidade do serviço, quer para evitar a expansão desordenada da malha ferroviária.

Mas, inicialmente, a expansão da malha ferroviária pode ser uma solução inviável, considerando que nos Estados Unidos, a demanda crescente por transporte de cargas e de passageiros, combinado com capital limitado para expansão da infraestrutura ferroviária, cria uma pressão para um uso mais eficiente da atual capacidade da linha férrea (POURYOUSEF; LAUTALA; WHITE, 2015). O que reforça o posicionamento da CNT (2013) de que a capacidade de investir na expansão da infraestrutura da malha pela iniciativa privada é limitada, por possuir um custo de capital superior ao investidor público, dado que o Estado possui maior capacidade de endividamento.

Portanto, antes de se ampliar a infraestrutura ferroviária para adequar o nível de oferta de transporte de carga à demanda, seria recomendável avaliar a sua capacidade operacional existente e, conseqüentemente, aumentar a participação do modal ferroviário na matriz de transporte. Desta forma, a pergunta a ser respondida é se a oferta de transporte da infraestrutura existente está exaurida. Em uma outra abordagem, trata-se de verificar em que momento a infraestrutura de transporte

existente não consegue mais atender a demanda. Para verificar a hipótese de exaustão, técnicas de simulação podem ser empregadas a fim de identificar cenários de esgotamento operacional da infraestrutura ferroviária, além de gargalos existentes, afinal, “fornecer respostas já conhecidas não é a ideia da simulação, mas sim, dar visibilidade a informações ou conflitos despercebidos” (CREMONESE, 2014).

O uso de simulação é oportuno e tem sido frequentemente empregada no estudo de operações ferroviárias por permitir uma análise mais detalhada, por obter uma avaliação precisa e por almejar a garantia de que o sistema de transporte opere eficaz e eficientemente dentro do possível (PIDD, 2004; WORONIUK; MARINOV, 2013), além de demandar baixo investimento e não interferir na operação da infraestrutura, o que facilita avaliar diferentes cenários, capazes de subsidiarem políticas operacionais, ratificando-as e/ou retificando-as.

Apesar de inúmeras possibilidades de emprego de metodologia de modelagem e simulação em transporte, no presente trabalho será empregada em uma linha ferroviária singela – uma única linha férrea que permite a circulação de trens em um único sentido de cada vez – sobre a qual trafegam trens nos sentidos exportação e importação. Tal metodologia permitirá caracterizar um cenário em que ocorre a exaustão operacional da referida linha férrea.

Assim, neste primeiro capítulo é inicialmente apresentada a relevância de se estudar a melhoria da operação no modal ferroviário, e, posteriormente, são apresentados o problema estudado, a hipótese a ser avaliada, os objetivos gerais e específicos, as justificativas, as delimitações e, por fim, a estrutura do trabalho da presente pesquisa.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Antes de se ampliar a infraestrutura ferroviária para adequar o nível de oferta de transporte de carga à demanda, é recomendável avaliar se a sua capacidade operacional – oferta de transporte – existente está exaurida, ou seja, se é capaz de atender a demanda por transporte. A partir da perspectiva de se obter o pleno uso operacional, no presente trabalho acadêmico será empregada uma metodologia de modelagem e simulação capaz de caracterizar um cenário em que ocorre a exaustão

operacional no transporte de cargas em uma linha férrea singela – modal ferroviário – a partir das condições operacionais vigentes. Tal metodologia será aplicada à operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava, trecho sob concessão à Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. – Ferroeste.

A metodologia de modelagem e simulação empregará *software* de simulação baseado em eventos discretos – por possibilitar a construção de modelos de forma mais gráfica e menos textual (CHWIF; MEDINA, 2006) – além da coleta e análise de dados, modelagem, exploração de cenários, avaliação de desempenho e conclusão. Conseqüentemente, será possível identificar a quantidade máxima diária de trens que podem trafegar no sentido exportação e importação e as restrições existentes. Existem diversos *softwares* de simulação – Arena, AutoMod, GPSS/h, JaamSim, etc. – entretanto, o SIMUL8 é o utilizado neste trabalho, em razão da Universidade Federal do Paraná (UFPR) tê-lo adquirido para seu uso acadêmico.

Por fim, a metodologia empregada neste trabalho propõe solucionar o seguinte problema de pesquisa: **qual é a quantidade de trens/dia que define o limite da capacidade operacional, em 2015, da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava?**

1.2 OBJETIVOS

Para a solução do problema apresentado, definiu-se os seguintes objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Investigar o cenário em que ocorre, em 2015, o limite da capacidade operacional, em trens/dia, da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de alcançar o objetivo geral proposto, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Adequar a metodologia existente ao problema de pesquisa;
- Modelar a operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava;
- Simular, utilizando o *software* Simul8, o cenário atual da operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava; e
- Estudar cenários de operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava e identificar restrições no cenário em que ocorre a exaustão operacional da linha férrea.

1.3 JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

De certa forma, o contexto apresentado anteriormente do transporte ferroviário brasileiro e da ferrovia Cascavel-Guarapuava, já justificaria a realização da presente pesquisa, que em um horizonte mais amplo, trata do estudo do uso mais intensivo do modal ferroviário, o que permite reduzir as atuais distorções da matriz de transporte e conseqüentemente, aumentar a competitividade econômica brasileira.

Apesar da participação do modal ferroviário na atual matriz de transporte de cargas, estimada entre 20% e 25% (MT, 2009; BARAT, 2011), ser considerada insatisfatória, é possível verificar que houve aumento de quantidade de carga transportada pelo modal ferroviário para uma quilometragem de malha ferroviária relativamente estável entre 2007 e 2014 – Tabela 2. Tal fato reforça o argumento de Fioroni (2008) de que “o transporte ferroviário é uma alternativa valiosa que poderia ser aplicada em escala maior do que atualmente se faz”.

Segundo Cremonese (2014, p. 19) “a simulação de sistemas de transporte, em especial a ferrovia, é um campo em crescimento, visto que diferentemente de outras áreas, como militar e manufatura, a simulação de ferrovias está atrasada, tanto no Brasil quanto exterior”, o que pode ser compreendido em razão de que as práticas de simulação na indústria ferroviária se tornaram comuns no início da década de 1980,

por meio do desenvolvimento de modelos e técnicas, como programação dinâmica e do método *branch-and-bound* proposto por Petersen, bem como de métodos heurísticos desenvolvidos pela Welch e Gussow (POURYOUSEF; LAUTALA; WHITE, 2015).

Portanto, torna-se desafiador estudar as condições que tornem viável o uso mais eficiente da capacidade de uma linha férrea. Tal estudo pode ser realizado por meio do uso de metodologia de modelagem e simulação, a qual permite identificar um cenário onde ocorre a exaustão operacional de uma linha férrea e, assim, determinar se existe Capacidade Disponível na referida linha férrea.

No caso específico da linha férrea Cascavel-Guarapuava, a identificação do seu limite operacional torna-se importante na medida em que se percebe o potencial da demanda por transporte de mercadorias, originadas na área de influência daquela linha férrea, e que podem ser exportadas pelo Porto de Paranaguá. Além do que, em um cenário em que ocorre a valorização do dólar frente ao real, como no ano de 2015, as exportações de soja são impulsionadas (PARANÁ, 2015) e, por conseguinte outras mercadorias também o são.

Até este ponto, apresentou-se argumentos justificando a presente pesquisa a partir do foco em um problema real e de uma abordagem na gestão da infraestrutura de transporte de carga, que procura ampliar a oferta de transporte pela exaustão da sua capacidade operacional. Entretanto, pode-se apresentar algumas considerações que justifiquem a presente pesquisa a partir do foco do emprego de metodologia de simulação de eventos discretos em estudo de sistema.

A metodologia de simulação de eventos discretos existente na literatura (CHWIF, 1999; PIDD, 2004; SARGENT, 2014) é de fácil compreensão, o que permite o seu emprego como uma ferramenta confiável de análise e de avaliação, capaz de identificar gargalos operacionais de sistemas em estudo e possibilitar o planejamento de cronogramas operacionais realistas e confiáveis. Além disto, o modelo de simulação pode ser elaborado de forma a se obter suficiente flexibilidade que permita a sua adaptação e emprego em sistemas semelhantes ao estudado. No caso da presente pesquisa, o sistema em estudo é a linha férrea singela Cascavel-Guarapuava.

Por fim, o método de modelagem e de simulação adotados na presente pesquisa para aperfeiçoar o uso de uma linha férrea singela, vai ao encontro do propósito da Pesquisa Operacional, uma das áreas da Engenharia de Produção. A

Pesquisa Operacional, segundo a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO, 2016) tem por objetivo resolver problemas reais envolvendo situações de tomada de decisão, por meio de modelos matemáticos habitualmente processados computacionalmente. Além do que, usa conceitos e métodos de outras disciplinas científicas na concepção, no planejamento ou na operação de sistemas para atingir seus objetivos. Procura, assim, introduzir elementos de objetividade e racionalidade nos processos de tomada de decisão, sem descuidar dos elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa foi desenvolvida a partir da rotina operacional vigente na linha férrea Cascavel-Guarapuava – a carga/descarga de trens não foi incluída no modelo – evitando-se abordagens de questões de limitação/melhoria das características técnicas construtivas da superestrutura e da infraestrutura. Assim, elaborou-se o modelo que simula o cenário atual da operação da linha férrea e em seguida estudou-se cenários com diferentes quantidades de trens operando diariamente, com a finalidade de identificar aquele em que ocorre, em 2015, o limite da capacidade operacional, em trens/dia, da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho organiza-se em seis capítulos. No primeiro capítulo foram apresentados o problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa e a delimitação do trabalho. No segundo capítulo é realizada a revisão de literatura. No terceiro capítulo são apresentados o método e caracterização do trabalho e o desenvolvimento da pesquisa. No quarto capítulo são realizados os experimentos e apresentado os resultados. No quinto capítulo apresenta-se a conclusão e por fim, no sexto capítulo, há recomendações para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é apresentada inicialmente uma revisão bibliográfica de metodologia de modelagem e simulação de eventos discretos. Em seguida são apresentados a infraestrutura de transporte de carga, o modal ferroviário e o levantamento bibliográfico de estudos na área ferroviária com foco em modelagem e simulação em operação ferroviária.

2.1 SIMULAÇÃO

2.1.1 Simulação: definição, vantagens e desvantagens

De forma sucinta, Cremonese (2014) afirma que simulação é o processo de execução do modelo, entretanto, Chwif e Medina (2006) apresentam diversas abordagens para responder esta pergunta, entre as quais, se destaca a de que a simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização, mas uma ferramenta de análise de cenários, em razão de não ser capaz de identificar uma solução ótima.

Banks *et al.* (2004) declaram que simulação é a imitação de operações de um processo que ocorre no mundo real e que envolve a geração de uma história artificial do sistema e a sua observação, para direcionar inferências envolvendo as características do sistema real que estão sendo representadas. Os autores afirmam que simulação possui muitas vantagens, mas também algumas desvantagens e, a partir do texto de Pegden, Shannon e Sadowski (1995) apresentam algumas delas.

Entre as vantagens apresentadas estão: novas políticas, novos procedimentos, regras de decisão, fluxo de informações e outros, podem ser exploradas sem interrupção das operações do sistema real; o tempo pode ser comprimido ou expandido a fim de acelerar ou retardar o fenômeno investigado; *insights* podem ser obtidos a respeito das interações das variáveis e da importância destas no desempenho do sistema; possibilidade de identificação de gargalos, que são retardos excessivos que ocorrem no processo; e questões do tipo “O que ocorre

se” (*What if*) podem ser respondidas, o que é particularmente útil na elaboração de novos sistemas. Acrescendo a lista de vantagens acima, Pidd (2004) destaca o fato de que a velocidade de realização do experimento pode ser controlada.

Quando às desvantagens, Banks *et al.* (2004) destacam que: a construção de modelos requer experiência; os resultados de simulação podem ser de difícil interpretação; a modelagem e análise podem consumir tempo e ser dispendioso; e a simulação é usada em alguns casos nos quais, uma solução analítica é possível ou mesmo preferível.

Pode-se identificar como potencial desvantagem do emprego de simulação, o argumento de Pidd (2004) de que, não se pode especificar quanto tempo será necessário para a estruturação do problema a ser simulado, na maioria dos casos e, que, em alguns casos, pouco tempo será necessário para problemas estruturados, onde os objetivos do estudo de simulação estão bem definidos.

2.1.2 Conceito de modelo

Para Pidd (2004), modelo pode ser entendido como representação de sistema de interesse, e que é construído por cuidadosa descrição da forma na qual o sistema muda seu estado e as regras que governam seu comportamento dinâmico.

Morabito Neto e Pureza (2012) definem “modelo” como uma representação de uma realidade/situação – conforme a compreensão de uma ou mais pessoas – construída de forma a auxiliar a gestão de forma sistemática daquela realidade/situação. Além do que, o modelo deve ser suficiente detalhado de forma a possibilitar a captura dos elementos essenciais e representar a realidade, mas também, suficientemente simplificado de forma a possibilitar o uso de métodos de análise e resolução conhecidos. Com o que concorda Sargent (2014), pois para este, um modelo dever ser tão simples quanto possível e ainda alcançar seu propósito.

Modelos podem ser usados para investigar possíveis aperfeiçoamentos ou para descobrir efeitos de diferentes práticas no sistema real (PIDD, 2004), bem como “compreender melhor o ambiente em questão, identificar problemas, formular estratégias e oportunidades e apoiar e sistematizar o processo de tomada de decisão”, de acordo com Morabito Neto e Pureza (2012, p. 170), ou de uma forma mais

resumida, “modelos em geral e, em particular os de simulação, são usados para dois propósitos diferentes: pesquisa e gerenciamento” (CREMONESE, 2014).

No que concerne à modelagem, a dificuldade de sua realização em processos operacionais reais está vinculada à complexidade dos mesmos, em razão de que são afetados por diferentes fatores, tais como condições operacionais do equipamento, sua manutenção, experiência dos funcionários e outros. A partir destas considerações, Morabito Neto e Pureza (2012, p. 173) argumentam que uma desvantagem de “problemas idealizados é que o efeito do fator humano no desempenho do processo operacional em geral é negligenciado”.

Em contrapartida, destacam que a partir da análise dos problemas idealizados é possível obter conhecimento valioso a respeito dos problemas reais. Além do que, a modelagem de problemas complexos tem se tornado viável em razão da disponibilidade de *hardware* e *software* capazes de trabalhar com a complexidade das formulações necessárias para representar tais problemas (MORABITO NETO; PUREZA, 2012).

2.1.3 Metodologia para simulação de eventos discretos

Simulação, enquanto técnica de resolução de problemas, antecede em muitos anos o aparecimento de computadores digitais (CREMONESE, 2014) entretanto, o aumento da capacidade computacional e a conseqüente redução do custo de operação, além dos avanços da metodologia de simulação, permitiu que a simulação se transformasse em uma ferramenta amplamente usada e aceita em pesquisa operacional e análise de sistema (BANKS *et al.*, 2004), empregando um computador para sua realização.

Isto posto, a partir deste momento, quando se empregar a palavra ‘simulação’, se referenciará especificamente à ‘simulação computacional’, a qual pode ser classificada em três categorias básicas: simulação de Monte Carlo, simulação contínua e simulação de eventos discretos (CHWIF; MEDINA, 2006; CREMONESE, 2014).

A simulação de Monte Carlo faz uso de geradores de números aleatórios para simular sistemas físicos ou matemáticos, nos quais não se considera o tempo

explicitamente como uma variável. Por sua vez, a simulação contínua é usada para modelar sistemas que mudam de estado continuamente no tempo e emprega equações diferenciais para calcular as mudanças das variáveis de estado ao longo do tempo. Por fim, a simulação de eventos discretos é usada para modelar sistemas que mudam de estado em um momento discretos no tempo como resultado de um evento específico ocorrido e, o estado do sistema é descrito por todos os valores individuais de estado dos objetos no sistema (CHWIF; MEDINA 2006; CREMONESE, 2014). Assim, doravante, o uso da palavra 'simulação' deve ser compreendida como 'simulação computacional de eventos discretos'.

Para a elaboração de um estudo de simulação, Pidd (2004) identifica a existência de três fases: estruturação do problema, modelagem e implementação. Na estruturação o problema a ser simulado é estudado; na modelagem é desenvolvido, validado e realizado experimentações com o modelo a ser simulado; e, por fim, na implementação se busca por em prática as recomendações surgidas do estudo do problema e da análise da simulação. O autor destaca que a modelagem é um processo de aprendizagem, onde o modelo vai sendo gradualmente desenvolvido, com fases parcialmente validadas, até ser encontrado o modelo desejado.

Sargent (2014) apresenta uma metodologia objetiva e simplificada do processo de modelagem, conforme apresentado na Figura 1, onde, o problema é o sistema real/proposto, ideia, situação, política ou fenômeno a ser modelado; o modelo conceitual é a representação (simulação) matemática/lógica/gráfica do problema desenvolvido para um estudo específico; e o modelo computacional é o modelo conceitual implementado em um computador. O modelo conceitual é desenvolvido na fase de análise e modelagem, o modelo computacional é desenvolvido na fase de programação no computador e implementação, e as inferências a respeito do problema são obtidas a partir de experimentos no modelo computacional na fase de experimentação.

A partir das propostas anteriores foi elaborada a Figura 3, na qual é apresentada uma metodologia com etapas consideradas imprescindíveis à realização de modelagem e de simulação empregando software de simulação.

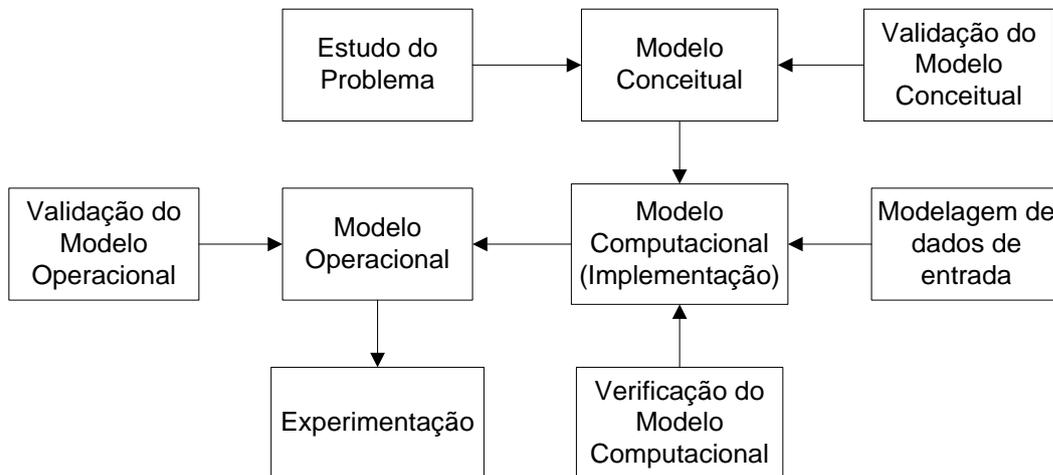


FIGURA 3 – METODOLOGIA DE MODELAGEM E DE SIMULAÇÃO
 FONTE: O autor (2016)

Pidd (2004) identifica a existência de uma fase inicial onde se busca compreender as questões relacionadas ao problema a ser simulado, obter referências capazes de serem manuseadas, além do nível de detalhamento apropriado para o uso e implementação do modelo de simulação.

De forma semelhante Chwif e Medina (2006), no início do estudo do problema a ser simulado, afirmam que se faz necessário compreender com clareza o sistema a ser simulado e os seus objetivos, discutindo-o com especialistas, bem como definir claramente o escopo do modelo, as hipóteses e o nível de detalhamento. Esta definição ocorre no início da etapa de concepção, na metodologia proposta por Chwif (1999).

Na etapa de modelagem, de acordo com Pidd (2004), ocorre a construção do modelo conceitual, que é uma atividade que possui o objetivo de capturar as características essenciais do sistema que está sendo modelado e, no caso específico de simulação de eventos discretos, identificar as principais entidades do sistema para compreender a lógica das interações destas entidades.

Chwif e Medina (2006) informam que ao final da etapa de concepção, na metodologia proposta por Chwif (1999), haverá um modelo abstrato – um modelo mental – que busca identificar o que realmente é importante no sistema e o materializa em um modelo conceitual, por meio do emprego de técnicas de representação de

modelos de simulação, a fim de que outras pessoas envolvidas no projeto possam entendê-lo. Informam ainda que nesta etapa são coletados os dados de entrada.

Na visão de Morabito Neto e Pureza (2012), a construção de um modelo de pesquisa operacional envolve dois processos de abstração. Inicialmente, do sistema real, onde há um grande número de variáveis, é abstraído um modelo conceitual, onde apenas parte das variáveis originais que definem o comportamento do sistema é considerada. Em seguida, o modelo conceitual é abstraído em um modelo experimental de simulação, o qual procura emular por meio de relações lógicas o funcionamento do sistema real. O modelo experimental tem por objetivo representar satisfatoriamente o referido sistema.

Na elaboração do modelo conceitual pode ser empregado a técnica *Activity Cycle Diagram* (ACD), a qual, segundo Pidd (2004), é uma ferramenta que possibilita mapear as principais interações e comportamento das entidades em um sistema que está sendo modelado para uma simulação discreta. Além do que, o ACD é uma forma de modelagem das interações dos objetos pertencentes a um sistema, particularmente útil em sistemas com fortes características de geração de fila (CHWIF e MEDINA, 2006; PIDD, 2004).

No ACD são empregados apenas dois símbolos para descrever um ciclo de vida das entidades/objetos do sistema: uma ‘fila’ é representada por uma circunferência e uma ‘atividade’ por um retângulo. Por regra de construção do ACD deve-se obrigatoriamente alternar atividades com filas, o que torna a modelagem mais robusta em uma necessidade de se fazer uma mudança inevitável no modelo (CHWIF e MEDINA, 2006; PIDD, 2004).

Uma entidade é qualquer componente do sistema que retém sua identidade ao longo do tempo, podendo estar em espera em uma fila ou participando de alguma atividade, na qual há cooperação de diferentes classes de entidades, com sua duração de estado ativo, determinada a priori. Já que, em um estado passivo – fila – não ocorre a cooperação entre diferentes classes de entidades, pois a entidade está aguardando algo acontecer. Por fim, um ACD completo é composto pela combinação de todos os ciclos de vida individuais de cada entidade participante e, para isto, basta identificar as atividades comuns às entidades (CHWIF; MEDINA, 2006).

O conceito de classes de entidades pode ser abordado a partir da terminologia proposta por Pidd (2004), que identifica a existência de dois tipos de elementos individuais como objetos do sistema, as entidades e os recursos. Enquanto as

entidades são os elementos que estão sendo simulados e a respeito dos quais se realiza o acompanhamento explícito de seu comportamento, os recursos são elemento tratados como itens quantificáveis, cujos comportamentos não são acompanhados e nem modelados individualmente. Além do que, se um elemento do sistema deve ser tratado como uma entidade ou como um recurso, é algo que o modelador tem que decidir. Tal decisão dependerá do propósito com que a simulação é realizada.

A modelagem de dados de entrada é uma etapa que antecede a implementação do modelo computacional, de forma que se faz necessário levantar os dados referentes ao problema em estudo, atentando para que o método de amostragem empregado seja bem desenvolvidos e documentado (PIDD, 2004).

Chwif e Medina (2006) declaram que a modelagem de dados é o processo de escolha da melhor representação de um fenômeno aleatório observado no sistema real em estudo, o qual pode ser resumido nas seguintes etapas: coleta de dado, tratamento de dados e, inferência.

Na etapa da coleta de dados busca-se obter uma amostra representativa do fenômeno. Na etapa do tratamento de dados são utilizadas técnicas para descrever os dados levantados, identificar falhas nos valores da amostra e aprofundar o conhecimento a respeito do fenômeno em estudo. Nesta etapa são obtidas as medidas de posição (média, mediana, mínimo, máximo, etc.) e de dispersão (amplitude, variância, desvio padrão, etc.). Por fim, na etapa de inferência se objetiva obter um modelo probabilístico que represente o fenômeno aleatório, o qual será incorporado ao modelo de simulação.

Na etapa do tratamento de dados, devem ser identificados e retirados, *a priori*, da amostra os *outliers*, que são valores não usuais que existem em levantamento de dados e que afetam os resultados do estudo, causando lacunas em uma distribuição, distorcendo as estimativas, os níveis de significância dos testes estatísticos e levam a conclusões equivocadas acerca do fenômeno. Considera-se um valor discrepante ou *outlier* moderado, qualquer valor que estiver abaixo de $Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1)$ ou acima de $Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1)$, onde Q_1 e Q_3 são os valores do primeiro e terceiro quartis, respectivamente. Os quartis são obtidos a partir da ordenação crescente dos valores observados, onde o primeiro quartil (Q_1) é um valor que deixa 25% dos valores observados abaixo e 75% acima dele, e o terceiro quartil (Q_3) é o valor que deixa 75%

dos valores observados abaixo e 25% acima dele (BUSSAB e MORETTIN, 1987; CHWIF e MEDINA, 2006; LARSON e FABER, 2010).

Após a retirada dos *outliers* da amostra, Chwif e Medina (2006) recomendam verificar se a amostra representa uma sequência de valores independentes e identicamente distribuídos, ou seja, verificar se não há correlações entre as observações da amostra. Os autores propõem um teste simples para verificar a hipótese de independência, que consiste em desenhar um gráfico de dispersão com as observações $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n$, na ordem de seus registros. Cada ponto do gráfico é formado, sucessivamente, pelos pares $(x_1, x_2); (x_2, x_3); \dots (x_{n-1}, x_n)$. Assim, quando os dados não apresentam correlação, tendem a se dispersar de modo aleatório no gráfico, caso contrário, tendem a se distribuir ao longo de linhas com inclinação positiva ou negativa.

Prosseguindo, Chwif e Medina (2016) registram que após o tratamento dos dados da amostra, na etapa de inferência, deve-se identificar, se possível uma distribuição de probabilidades que represente o fenômeno observado no sistema. Inicialmente, a fim de identificar a consistência dos dados, deve-se construir um histograma da amostra, com uma divisão de classes adequada e, por fim realizar testes de aderência, tais como o do qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov, entre outros. Quanto ao número de classes a ser utilizada no histograma, há diversos critérios, tais como: a raiz quadrada do número de observações, a regra de Sturges ($K = 1 + 3,3 \log_{10} n$; com K = número de classes e n = número de observações da amostra), uso de 5 a 15 classes (BUSSAB; MORETTIN, 1987) e uso de 5 a 20 classes (LARSON; FABER, 2010).

Nesta etapa, o modelo conceitual é convertido num modelo computacional empregando um software de simulação (PIDD, 2004). O modelo computacional deve ser comparado ao modelo conceitual a fim de verificar se a sua operação atende os requisitos propostos na etapa de concepção. Consequentemente, resultados obtidos a partir do modelo computacional devem ser validados, ou seja, confrontados com dados reais a fim verificar a fidelidade (aderência) do modelo à realidade representada (CHWIF; MEDINA, 2006).

Entretanto, Chwif e Medina (2006) informam que em modelos de simulação é comum se considerar que no momento do início da simulação o sistema está vazio e livre. Assim, a coleta de dados estatísticos, seja para a validação ou seja para a

realização de experimentos, deverá ocorrer após o ‘período de aquecimento’ (*warm-up*) quando o sistema está completamente ‘carregado’ e em equilíbrio (*steady state*).

Para a definição do período de aquecimento, Concannon (2007) recomenda os seguintes passos: 1) escolher um indicador de desempenho para o sistema modelado – por exemplo: trabalho realizado / hora; 2) rodar o modelo por um curto período de tempo – por exemplo: 60 minutos – e registrar o valor do indicador de desempenho escolhido. O curto período de tempo é relativo, pois depende do sistema modelado; 3) rodar o modelo pelo período de tempo escolhido acrescido de um incremento – por exemplo: 120 minutos – e fazer o registro do valor do indicador escolhido produzido apenas no segundo período de tempo – no exemplo: a quantidade obtida apenas nos 60 minutos finais. Repetir o passo, de forma incremental, até ser possível identificar em um gráfico um equilíbrio nos valores do indicador de desempenho escolhido.

De forma simplificada, Marinov e Viegas (2010) informam que a ‘verificação’ e a ‘validação’, importantes partes do processo de modelagem, podem ser realizadas pela comparação dos resultados obtidos na simulação do modelo com os dados coletados no sistema real.

Entretanto, para Chwif e Medina (2006), ‘validação’ e ‘verificação’ são conceitos completamente distintos entre si, pois enquanto a validação está relacionada com o que será modelado, a verificação está relacionada com o modo como o modelo computacional está sendo implementado (ou modelo implementado em algum simulador – *software* de simulação).

Para tais conceitos, o Departamento de Defesa estadunidense define oficialmente que ‘validação’ é o processo de determinar o grau em que um modelo e seus dados associados fornecem uma representação precisa do mundo real a partir da perspectiva das utilizações previstas do modelo e, que ‘verificação’ como o processo de determinar que um modelo implementado e seus dados associados representam fielmente a descrição e as especificações conceituais do responsável pela modelagem (USA, 2011).

De forma semelhante Sargent (2014) define que ‘validação’ é a comprovação de que a precisão do modelo computacional, no seu domínio de aplicação, está dentro de seu intervalo aceitável de precisão, que é a precisão requerida do modelo para sua aplicação pretendida e, que ‘verificação’ é a garantia de que o programa de computador do modelo computacional e sua implementação estão corretas. O autor

esclarece, mais adiante, que se a proposta do modelo é responder uma variedade de questões, a sua validação necessita ser determinada em função destas questões, além do que, as variáveis usadas para responderem tais questões, devem ser identificadas e seus intervalos aceitáveis de precisão, especificados.

Os conceitos de 'validação' e de 'verificação' são melhor compreendidos quando Chwif e Medina (2006) os apresentam no seguinte contexto: inicialmente, ocorre o processo de 'validação', que confronta o modelo conceitual com o sistema do mundo real; posteriormente, ocorre a implementação do modelo conceitual por meio de linguagem de simulação ou de simulador – *software*; em seguida, ocorre a 'verificação' do modelo, quando se examina se o modelo se comporta de acordo com o modelo conceitual. Por fim, ocorre a 'validação operacional', quando se confere se os resultados obtidos nos experimentos são compatíveis com o sistema real simulado.

Embora com termos ligeiramente diferentes de Chwif e Medina, mas em um contexto similar, além da relação entre as atividades de desenvolvimento, Sargent (2014) sucintamente ilustra na Figura 1 as atividades de verificação e validação, conforme apresentado a seguir:

- Validação do modelo conceitual: definida após se assegurar que as teorias e pressupostos básicos do modelo conceitual estão corretas; que o modelo representando o problema, a estrutura do modelo, a lógica e as relações causais e matemáticas são "razoáveis" para a finalidade proposta do modelo.

Em consequência, as teorias e pressupostos básicos inerentes ao modelo devem ser testados usando análise matemática (linearidade, independência de dados e outros) e métodos estatísticos (determinação de distribuição de probabilidade, parâmetros estatísticos e outros) dos dados do problema (sistema a ser simulado), bem como revisar todas as teorias utilizadas a fim de garantir que foram aplicadas corretamente;

- Verificação do modelo computacional: definida como a garantia de que a programação no computador e a implementação do modelo conceitual estão corretas.

Nesta verificação, Sargent (2014) apresenta recomendações para o uso de linguagens de programação de alto nível e de simulação, entretanto, nada esclarece a respeito do uso de *softwares* de simulação, os quais não permitem acesso aos códigos fonte do programa.

- Validação operacional: definida após se confirmar que o comportamento dos dados de saída do modelo possui a precisão requerida que atende o propósito do modelo, no domínio de aplicabilidade pretendido para o mesmo.

Uma vez que o modelo de simulação é utilizado na validação operacional, quaisquer deficiências detectadas podem estar originadas no que foi desenvolvido nas etapas anteriores de elaboração do modelo, incluindo o desenvolvimento de teorias do sistema, ou que os dados sejam inválidos.

O autor apresenta a classificação de técnicas de validação usadas na validação operacional, conforme Quadro 1:

Decisão	Sistema Observável	Sistema Não-observável
Abordagem Subjetiva	Comparação usando apresentação gráfica; Explorar o comportamento do modelo.	Explorar o comportamento do modelo; Comparação com outros modelos.
Abordagem Objetiva	Comparação usando testes estatísticos e procedimentos.	Comparação com outros modelos usando testes estatísticos.

QUADRO 1 – CLASSIFICAÇÃO DE VALIDAÇÃO OPERACIONAL
 FONTE: SARGENT (2014), adaptado

Segundo Sargent (2014), o sistema é considerado observável se permitir coletar dados de sua operação, caso contrário, o sistema é não-observável. O comportamento de saída do modelo de simulação pode usar gráficos para avaliar tendências, valores e precisão, ou seja, explorar os dados de saída qualitativa e quantitativamente. Na comparação dos dados de saída do modelo de simulação com os dados do sistema ou dados de outro modelo podem ser usados gráficos, intervalos de confiança e teste de hipóteses. O autor recomenda o uso preferencial de intervalos de confiança e de teste de hipóteses por permitirem decisões objetivas, pois os gráficos permitem apenas decisão subjetiva.

- Dados válidos: é definida como a garantia de que os dados necessários para a construção, avaliação, testes e realização de experimentos modelo, para resolver o problema, são adequados e corretos.

Quanto à validação do modelo computacional, Pidd (2004) esclarece que o modelo conceitual pode não existir separadamente da sua modelagem no simulador – *software* de simulação – pois o modelo e a sua modelagem podem ter sido

desenvolvidos de forma gradual ao longo do tempo. Em tais casos, a distinção entre a verificação e a validação é artificial e pode ser abandonado.

Ainda explorando a questão de validação e verificação, Sargent (2014) informa que, testes e avaliações são conduzidas até que seja obtido um nível de confiança para o qual, um modelo possa ser considerado válido para a sua aplicação pretendida, bem como, para se obter a validade absoluta de um modelo, muito tempo e recurso financeiro deverá ser empenhado. Visão semelhante é compartilhada por Chwif e Medina (2006, p. 104), pois consideram que “não é possível validar o modelo em 100% ou garantir que seja 100% válido”, bem como “não há como garantir que um modelo seja totalmente livre de *bugs*”.

Chwif e Medina (2006) recomendam a geração de alguns resultados para a validação do modelo computacional, bem como observar se o modelo é uma representação precisa da realidade, conforme objetivo do estudo.

Para Pidd (2004), experimentação se refere ao uso do modelo, pois argumenta que a razão de se construir um modelo de simulação é a realização de experimentos com o mesmo.

Após a validação do modelo computacional será possível realizar experimentos, dando origem ao “modelo experimental” ou “modelo operacional”. Assim, serão efetuadas um elevado número de “rodadas” do modelo e os resultados obtidos nos relatórios da simulação serão analisados e documentados. Registra-se que a precisão dos resultados pode ser avaliada por suas variâncias, de modo que quanto menor a variância, mais precisa será a estimativa. Por fim, conclusões e recomendações serão efetuadas a partir dos resultados obtidos. Se for necessário o modelo poderá ser modificado e o ciclo reiniciado caso o resultado da simulação não for satisfatório, conforme metodologia adotada por Chwif (CHWIF; MEDINA, 2006).

Por fim, destaca-se que o estudo de simulação é geralmente conduzido porque algum benefício é visado. Tal benefício pode ser materializado em um produto tangível como resultado do referido estudo, tal como um documento, onde se registram recomendações de ações que deveriam ou não deveriam ser implementadas (PIDD, 2004).

2.2 INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE DE CARGA NO BRASIL

A eficiência e competitividade de um país e o seu desenvolvimento econômico depende da disponibilidade da infraestrutura de transporte, cuja oferta deve estar disponível a custo razoável, permitindo atender à crescente demanda, a qual é estimulada pelo próprio desenvolvimento econômico (MT, 2012). Assim, uma estrutura de transporte eficiente possibilita um país ser competitivo globalmente, entretanto, para um país como o Brasil, que depende de exportação de matérias-primas, as quais são sensíveis ao valor do frete, um transporte ineficiente reduz o seu potencial de crescimento econômico (CNT, 2013).

No presente momento, em 2016, a competitividade global do Brasil é inibida pela oferta inadequada de infraestrutura de transporte, que é o fator mais problemático para a realização de negócios, à frente de outros entraves, tais como, a questão tarifária, a ineficiência burocrática e as leis trabalhistas. A baixa competitividade se origina em deficiências no planejamento integrado, no desenvolvimento de projetos, no investimento de recursos em infraestrutura e na capacidade de executar projetos e cronogramas; bem como em questões de priorização de investimentos governamentais, regulação, fiscalização e custo de capital. Pode-se identificar que a infraestrutura de transporte brasileira é inadequada em razão de sua matriz de transporte ser distorcida, no presente momento, com elevada dependência do modal rodoviário, o que gera baixos índices produtividade, baixa eficiência energética e altos níveis de poluição ambiental (CNT, 2014; WANKE, 2010).

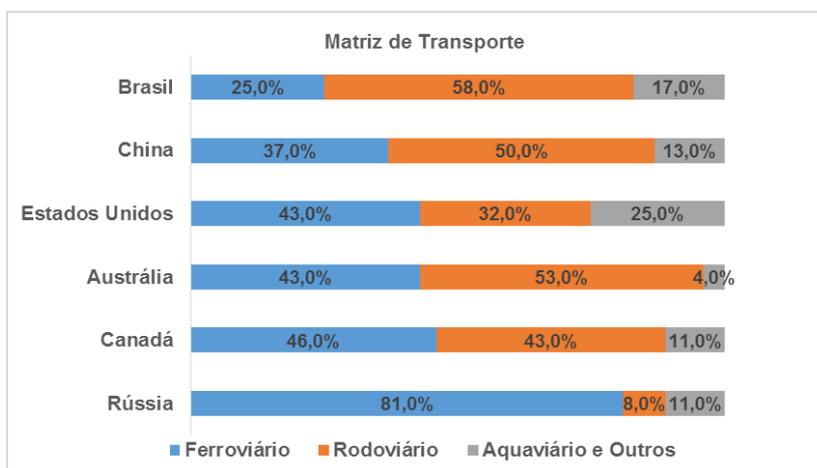


GRÁFICO 1 – MATRIZ DE TRANSPORTE
 FONTE: MT (2011)

A respeito da matriz de transporte brasileira, Barat (2011, p. 226) declara que “infelizmente, as cadeias logísticas do país são dependentes de uma matriz de transporte de carga bastante distorcida”, o que pode ser ratificado pelos dados apresentados na Tabela 1 (MT, 2011), quando se compara a matriz de transporte do Brasil com a existente em países de dimensões territoriais similares à brasileira.

Portanto, pode-se argumentar que a eficiência de uma infraestrutura de transporte depende da existência de uma matriz de transporte equilibrada, na qual há maior participação de modais não rodoviários, os quais, implicitamente, geram menores custos logísticos e menores emissões de gases de efeito estufa (MT, 2012), especificamente, quando há uso mais intensivo e adequado das modalidades ferroviárias e aquaviárias (MT, 2009).

Contrapondo-se a este cenário e a fim “de formalizar e perenizar instrumentos de análise para dar suporte ao planejamento de intervenções públicas e privadas na infraestrutura e na organização dos transportes” (MT, 2009, p. 5; MT, 2012, p. i, 2), o MT lançou em 2007 o Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), revisado em 2009 e 2012. Destaca-se entre seus objetivos, a obtenção de melhor equilíbrio da matriz de transportes de cargas, com uso mais intensivo e adequado dos modais ferroviário e aquaviário, além de melhor integração multimodal com o modal rodoviário (MT, 2009), responsável por aproximadamente 60% do transporte de cargas no Brasil (ANTT, 2006; MT, 2009; BARAT, 2011; CNT, 2014). Assim, o MT (2009) na busca por obter uma matriz de transporte de carga equilibrada, a idealiza com uma participação do modal ferroviário em 35%, do aquaviário em 29% e do rodoviário em 30%.

2.3 MODAL FERROVIÁRIO

Em uma matriz de transporte equilibrada, o modal ferroviário, em função de suas características que lhe proporcionam grande eficiência, possui um importante papel estratégico na composição da matriz de transporte (CNT, 2013). Entre outras características do modal ferroviário, está a sua eficiência energética e produtividade no deslocamento de fluxos de maior densidade e distância de transporte (MT, 2009), além de redução do impacto ambiental quando comparado às rodovias devido à menor emissão de CO₂ e poluição do ar (WORONIUK; MARINOV, 2013).

Apesar das características promissoras do modal ferroviário, é recomendável realizar estudos que contribuam para o máximo aproveitamento da infraestrutura existente do modal ferroviário, dado que, entre outras restrições, o modal apresenta alto custo de material rodante (locomotivas e vagões), alto custo de manutenção de infraestrutura e de material rodante, limitações de capilaridade, baixa flexibilidade de tráfego dos trens sobre a malha ferroviária, etc. (FIORONI, 2008).

Tais estudos se tornam ainda mais necessários quando se atenta para a realidade da malha ferroviária brasileira, pois Barat (2011, p. 226) esclarece que, excluindo o transporte de minério de ferro, as ferrovias apresentam “baixas velocidades médias, graves deficiências de traçado ou saturação da capacidade física de transporte, tanto em termos de via permanente, como de sistemas de apoio de comunicação, de material rodante e de tração”. Quanto às velocidades médias na malha ferroviária brasileira concedida – inclusive o transporte de minério de ferro – a ANTT (2014) informa que a velocidade média anual de percurso foi de 23,43 km/h e a velocidade média anual comercial foi de 15,95 km/h.

Portanto, para verificar se é possível obter o uso mais intensivo do modal ferroviário da infraestrutura existente, empregar-se-á simulação e, assim, verificar se é possível expandir a oferta de transporte sem a ampliação física da infraestrutura. Tal proposta objetiva solucionar o problema a ser apresentado mais à frente.

2.3.1 Evolução do modal ferroviário

A partir dos dados disponibilizados pela Agência de Nacional Transporte Terrestre (ANTT, 2008, 2014, 2015) foi possível elaborar a Tabela 1, abaixo:

TABELA 1 – MODAL FERROVIÁRIO

	2007	2014	2007-14 (Evolução %)
Malha Ferroviária Concedida (km)	28.314	28.364	0,18%
Carga Transportada (milhões de tu)	414,93	465,21	12,12%
Locomotivas (und)	2.332	3.711	59,13%
Vagões (und)	82.575	96.086	16,36%

Fonte: O autor (2016)

NOTA: tu: tonelada útil.

Da Tabela 1 é possível verificar que no período de 7 anos a quilometragem de malha concedida ficou relativamente estável, porém houve um incremento de 12,12% no volume de carga transportada, ou seja, para uma mesma malha ferroviária em uso, houve ganho de produtividade em carga transportada pelo modal. Este fato estimula a realização de simulação a fim de se poder avaliar até quanto é possível ampliar o uso da malha ferroviária existente.

2.3.2 A Estrada de Ferro Paraná Oeste S. A. – FERROESTE

Após apresentado que a matriz de transporte brasileira está desequilibrada, que o uso mais intensivo do modal ferroviário contribuirá para obter uma matriz mais equilibrada e que há possibilidade de ampliar uso da malha ferroviária, será estudada a operação de uma linha férrea singela brasileira, especificamente, a ferrovia sob concessão da Estrada de Ferro Paraná Oeste S. A. – Ferroeste – empregando metodologia de modelagem e simulação.

A Ferroeste é uma sociedade de economia mista, sob controle do Estado do Paraná, criada em 15 de março de 1988 (FERROESTE, 2015). Em outubro de 1988 foi publicado o Decreto nº 96.913 (BRASIL, 1988) que outorgou à Ferroeste a concessão para construção, uso e gozo de uma estrada de ferro de Guarapuava (PR) até Cascavel (PR), de um ramal ferroviário de Cascavel (PR) até Dourados (MS) e de ramais necessários à viabilidade da ferrovia.

A empresa foi criada com o objetivo de atender os produtores do Oeste e extremo Oeste paranaense, o Mato Grosso do Sul, Paraguai e norte da Argentina com o objetivo de transportar grãos agrícolas e insumos para plantio. Possui como referência básica operacional reduzir os custos logísticos do escoamento da produção, ou seja, ofertar tarifas atrativas para aqueles produtores – grandes, médios e pequenos (FERROESTE, 2015).

A Ferroeste, teve sua construção iniciada em 15 de março de 1991, sendo o primeiro trecho implantado de Guarapuava a Cascavel, com 248,6 km, conforme apresentado na Figura 4. Após um período pré-operacional, a Ferroeste recebeu a autorização do Ministério dos Transportes em 12 de dezembro de 1996 para a abertura definitiva ao tráfego (FERROESTE, 2015).



FIGURA 4 – TRAÇADO DA FERROVIA CASCAVEL-GUARAPUAVA
 FONTE: ANTT (2015)

A Ferroeste transporta soja, trigo, milho, óleo vegetal e contêiner frigorificado no sentido exportação e combustível, fertilizantes, adubos, cimento, contêiner vazio e calcário no sentido importação. O trem-tipo empregado no transporte possui 495 m de comprimento e é composto por 3 locomotivas e 40 vagões (ANTT, 2015).

Os dados mais recentes disponibilizados pela ANTT do volume de cargas transportadas pela Ferroeste, em tonelada útil (tu), são apresentados na Tabela 2. A agência informa que em 2014, a Ferroeste transportou o total de 506.698 toneladas úteis em mercadorias (ANTT, 2015), sem discriminá-las, o que deverá ocorrer com a divulgação do Acompanhamento das Concessões Ferroviárias: relatório anual 2014.

TABELA 2 – CARGA TRANSPORTADA EM 2012 E 2013

Mercadorias	2012		2013	
	tu	%	tu	%
Máquinas, Motores, Peças e Acessórios	-	-	49	0,02%
Contêiner Cheio de 40 Pés	-	-	76.616	26,87%
Grãos - Milho	82.882	27,06%	37.416	13,12%
Grãos - Trigo	20.180	6,59%	287	0,10%
Óleo vegetal	843	0,28%	3.438	1,21%
Farelo de soja	-	-	1.003	0,35%
Soja	202.234	66,02%	166.332	58,33%
Outras - Carga Geral Não Containerizada	205	0,07%	-	-
Total	306.344	100,00%	285.141	100,00%

Fonte: ANTT (2013 e 2014), adaptado

A partir dos dados apresentados na Tabela 2 se verifica que a ferrovia tem cumprido sua vocação de transportar grãos, com destaque para a soja – cultura de maior importância econômica do Estado do Paraná – e para o milho, plantado no mesmo período que a soja (PARANÁ, 2015). Segundo o Departamento de Economia Rural (DERAL), da Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB) do Estado do Paraná, o Núcleo Regional de Cascavel é a segunda maior área produtora de soja do estado e o Estado do Paraná é o segundo produtor nacional desta cultura, exportando em 2013, 7.510.000 t do grão (PARANÁ, 2015).

Dado a importância econômica da região do entorno de Cascavel, onde inicia o trânsito de trens no sentido exportação na ferrovia sob concessão da Ferroeste, selecionou-se aleatoriamente 20 municípios em sua proximidade – Cascavel – com o objetivo de avaliar de forma sumária, potenciais demandas por transporte de mercadorias com características similares às transportadas pela ferrovia para exportação em 2012 e 2013. Informa-se que a demanda de transporte ferroviário não é avaliada de forma detalhada por não ser objeto do presente trabalho de pesquisa.

Assim, para a realização de tal avaliação, efetuou-se consultas no Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior, denominado AliceWeb, da Secretaria de Comércio Exterior – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – das mercadorias exportadas pelos portos de Paranaguá-PR e São Francisco do Sul-SC – Quadro 2 – no período de 2012 a 2015, tendo como origem os seguintes municípios selecionados na região de Cascavel: Anahy, Assis Chateaubriand, Braganey, Cafelândia, Capitão Leônidas Marques, Cascavel, Catanduva, Corbélia, Diamante D'Oeste, Entre Rios do Oeste, Lindoeste, Marechal Cândido Rondon, Maripá, Matelândia, Nova Aurora, Ouro Verde do Oeste, Toledo, Três Barras do Paraná, Tupãssi e Vera Cruz do Oeste.

NCM	Mercadoria	2012		2013		2014		2015	
		Paranaguá	S. F. do Sul						
02	Carnes e miudezas comestíveis	190.270,74	2.423,71	202.220,00	7.978,46	253.687,00	7.084,44	332.239,35	4.950,04
10.05	Milho	88.482,17	77.514,04	40.798,64	71.570,00	35.134,18	18.506,01	29.096,00	118.079,76
12.01	Soja, mesmo triturada	107.408,60	39.847,07	57.950,21	78.058,84	48.165,93	4.762,93	100.836,82	46.363,03

QUADRO 2 – PRODUTOS EXPORTADOS EM TONELADAS, COM ORIGEM EM CASCAVEL E MUNICÍPIOS VIZINHOS.

FONTE: O autor (2016)

NOTA: Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM)

Ao se comparar os dados da Tabela 2 com os do Quadro 2, que considera apenas Cascavel e 19 municípios próximos, se verifica que se empregou modal não-ferroviário para o transporte do volume exportado de carnes e miudezas comestíveis e de milho pelo Porto de Paranaguá. Entretanto, no caso da soja, o volume exportado pelo Porto de Paranaguá, provavelmente foi realizado pelo modal ferroviário.

Por fim, pode-se concluir que, considerando apenas Cascavel e 19 municípios próximos, há potencial demanda por transporte pela ferrovia sob concessão da Ferroeste e que tal demanda pode ser incrementada se parcela das mercadorias exportadas pelo Porto de São Francisco do Sul, tiver como novo destino, o Porto de Paranaguá.

2.4 CAPACIDADE

Slack *et al.* (2009) informam que o uso mais comum do termo ‘capacidade’ é no sentido estático, que define um valor específico para descrever a escala da operação. Entretanto, tal abordagem não reflete a capacidade de processamento por não considerar a dimensão tempo, adequada ao uso dos ativos existentes em uma organização. Por conseguinte, definem a capacidade de uma operação como o máximo nível de atividade de valor adicionado em determinado período de tempo, que o processo pode realizar sob condições normais de operação (SLACK *et al.*, 2009, p. 254).

Prosseguindo, Slack *et al.* (2009) observam que é comum as organizações possuírem algumas partes de sua operação funcionando abaixo de sua capacidade e outras partes, em sua ‘máxima’ capacidade. Estas últimas determinam as restrições de capacidade de toda a operação, ou seja, são os gargalos operacionais.

Delimitando o conceito de capacidade, Slack *et al.* (2009) esclarecem que a ‘capacidade teórica’ de uma operação é a capacidade idealizada em projeto, a qual nem sempre é atingida na prática, dado a existência de diversos fatores que reduzem o tempo de produção, tais como a realização de manutenção, quebras de máquinas, etc. Consequentemente, a capacidade real que resta após a redução do tempo de operação, é chamada de ‘capacidade efetiva’ da operação.

Os conceitos de capacidade tratados por Slack *et al.*(2009) são empregados de forma semelhante por Krueger (1999) ao se referir às operações ferroviárias e informar que há diferentes tipos de medidas de capacidade – Figura 5 – os quais são apresentados a seguir.

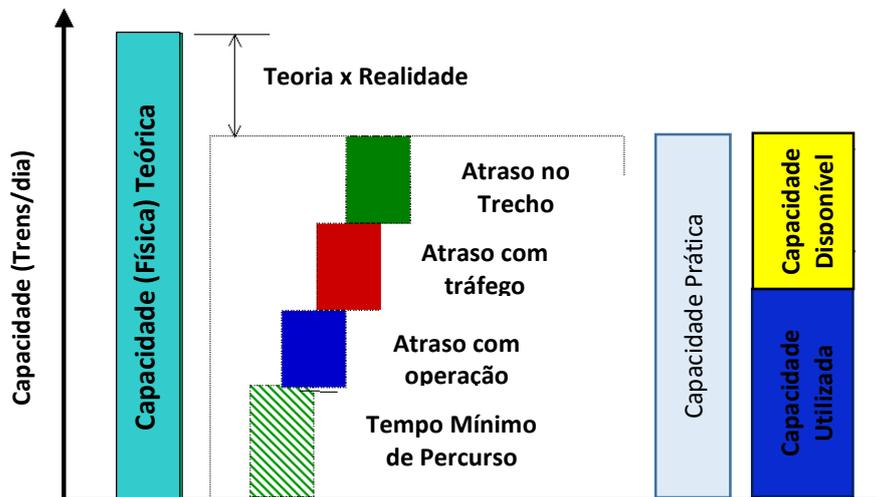


FIGURA 5 – TIPOS DE MEDIDAS DE CAPACIDADE
 FONTE: KRUEGER (1999), adaptado.

- **Capacidade (Física) Teórica:** é o limite superior teórico máximo de capacidade. Considera que todos os trens possuem a mesma composição, igual prioridade e são uniformemente espaçados ao longo do dia, sem interrupções. Ignoram-se os efeitos das variações no tráfego e nas operações que ocorrem na realidade. Esta capacidade é função do trecho ferroviário mais restritivo.
- **Capacidade Prática:** o limite prático do volume de tráfego ‘representativo’ – conjunto usual de trens em operação – que pode ser movimentado em uma linha férrea enquanto alcança um limite de desempenho, o qual é definido como o limite superior de tempo de deslocamento aceitável para o tráfego prioritário. Atualmente é determinada por simulações de eventos discretos de incremento de níveis de tráfego ou simplesmente aproximada, como 2/3 da Capacidade Teórica.
- **Capacidade Utilizada:** é o volume de tráfego real. Reflete a variação real no tráfego e nas operações que ocorrem na linha férrea.
- **Capacidade Disponível:** é a diferença entre a Capacidade Prática e a Capacidade Utilizada. É uma indicação do volume de tráfego adicional que pode ser gerenciado, preservando o limite de desempenho determinado.

Krueger (1999) conclui que a Capacidade Prática é a mais significativa medida de capacidade da linha férrea, uma vez que relaciona a competência de uma combinação específica de linha, tráfego e operações para movimentar o maior volume dentro de um nível de serviço esperado.

2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Nesta seção é apresentado o levantamento bibliográfico realizado sobre modelagem e simulação em rede ferroviária, preferindo-se publicações que abordaram aplicação de técnicas de simulação de eventos discretos em estudo da capacidade de malhas ou linhas ferroviárias empregando *software* de simulação. Ao final da seção posiciona-se esta pesquisa em relação aos estudos apresentados.

No levantamento bibliográfico identificou-se que os estudos realizados possuem diferentes abordagens face as peculiaridades da rede ferroviária e os objetivos propostos pelos autores, entretanto, suas metodologias, aplicadas no desenvolvimento dos modelos, podem ser empregadas em outras ferrovias com perfil operacional semelhante, conforme apresenta-se a seguir.

- Krueger (1999) – *Parametric modeling in rail capacity planning*. O artigo descreve o desenvolvimento e a aplicação de um Modelo Paramétrico na Ferrovia Canadian National (CN) para uso no planejamento da capacidade ferroviária. O Modelo de Capacidade Paramétrica é um programa em ambiente Windows 95, que modela a capacidade prevista de uma ferrovia, em uma curva de capacidade tensão-deformação de um trecho por meio de relações paramétricas de parâmetros chave de projeto geométrico, tráfego e operação. Tem por objetivo ser uma ferramenta prática capaz de fornecer uma medição comum da Capacidade Prática de trechos de uma malha ferroviária sob condições específicas e dentro de limites específicos, além de rapidamente destacar a capacidade dos gargalos no sistema. Na modelagem considerou-se a relação/influência entre a capacidade e diversos parâmetros existentes no projeto da linha férrea, no tráfego e nas operações da linha, os quais foram quantificados a partir de requisitos específicos a cada um deles. As relações de capacidade foram desenvolvidas a partir do uso de modelos de simulação baseados

em eventos. Os resultados de simulações descrevem como os parâmetros definem a capacidade dos trechos. O modelo será utilizado no planejamento de capacidade da malha, para monitorar a capacidade de trechos do sistema e apoiar planejamento de curto e de longo prazo.

- Marinov e Viegas (2010) – *A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network*. Este artigo apresenta o desenvolvimento de metodologia de modelagem de simulação mesoscópica – nível tático – para análise e avaliação de operações de trens de carga em uma malha ferroviária com 3 pátios de manobra, 5 terminais de carga, 7 ferrovias de linha dupla – duas linhas singelas paralelas – e 8 estações de passageiros, usando o *software* de simulação baseado em evento SIMUL 8. Na metodologia foi considerado que os trens – com saídas agendada e com saídas improvisadas – foram gerados em diferentes locais na malha ferroviária, e que os diversos componentes da malha ferroviária possuem diferentes características e funções, além de suas interações influenciarem a operação dos trens. A metodologia foi aplicada na ‘Linha do Norte’ – malha ferroviária – em Portugal e as principais conclusões são: quanto mais estruturada e agendada é a operação com os trens de carga, menores se tornam as filas de espera na malha ferroviária; e quanto mais caótica e desorganizada se torna a operação com os trens de carga, cresce o tamanho das filas de espera na malha ferroviária.

- Camargo e Cunha (2012) – Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de granéis em ciclo fechado. O artigo propõe um modelo híbrido simulação-otimização como ferramenta para a análise de políticas operacionais para o transporte ferroviário de grãos em um sistema fechado que possibilitem aumentar a sua capacidade global. O sistema ferroviário é composto de duas ferrovias distintas (Ferrovia Centro-Atlântica e Estrada de Ferro Vitória a Minas), múltiplas origens e múltiplos produtos destinados ao Porto de Tubarão. O modelo proposto é um sistema de simulação discreta por eventos desenvolvido em linguagem “Visual Basic for Applications” (VBA), o qual possibilita analisar regras mais flexíveis para decisões quanto ao tratamento de filas nas diversas etapas do percurso dos grãos, desde as regiões produtoras até o embarque nos navios. Também é proposta uma heurística baseada no algoritmo de Hooke & Jeeves

para determinar o melhor subconjunto de regras de priorização. A partir dos resultados obtidos concluem que as regras de priorização se mostraram substitutas adequadas às regras comumente utilizadas em modelos de simulação estocástica e baseadas em sorteios aleatórios, por proporcionarem maior capacidade global ao sistema. Concluíram também que a abordagem híbrida otimização-simulação possibilitou representar o sistema real de maneira mais realista.

- Woroniuk e Marinov (2013) – *Simulation modelling to analyse the current level of utilization of sections along a rail route*. O artigo tem por objetivo desenvolver um modelo de simulação que permita obter o nível de utilização das seções da ferrovia, majoritariamente em linha férrea dupla, de Silla para Castellbisbal, na Espanha. A metodologia de simulação foi implementada por meio do software de simulação Arena e, para replicar a rota ferroviária, foi necessário decompô-la em linha férrea, estações de carga ferroviária e estações de passageiros. Para alcançar o propósito do estudo, foi realizada coleta e análise de dados, modelagem – inclusive calibração e validação – exploração de cenários, métricas de performance e conclusão. Os autores concluem que há capacidade ociosa na ferrovia e que é possível operar 16 serviços de carga direta por dia na ferrovia, indicando um incremento de 177% em relação à situação corrente de 9 serviços de carga direta por dia.

- Batista (2006) – Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil. O objetivo da dissertação é propor um método para analisar a capacidade de processamento de quantidade de trens em uma linha singela, sujeita à restrições físicas e operacionais da via permanente e o objetivo secundário é aplicar o método a um corredor de transporte ferroviário de elevado volume de tráfego. Para alcançar tal objetivo, desenvolveu-se um modelo capaz de identificar as características da via que restringem as velocidades e o *headway* das composições ferroviárias. O modelo proposto permite, por meio de análise de desempenho dos trens (simulador *da Association of American Railroad*) em cada um dos arcos (trecho entre pátios de manobra) de um trecho de linha ferroviária obter uma medida de desempenho global no trecho e identificar gargalos. O método adotado para determinar a capacidade do trecho para cenários operacionais alternativos é o da utilização de diagramas espaço-tempo, desenvolvidos como algoritmo em MatLab. Ao se aplicar o modelo em um trecho em linha singela da

Brasil Ferrovias S. A. entre as cidades de Santa Fé do Sul e Araraquara, no Estado de São Paulo, identificou-se que a capacidade máxima atual é de seis pares trens/dia, que o gargalo está localizado entre as estações de Engenheiro Balduino e São José do Rio Preto, e que o principal fator limitante da velocidade média no espaço dos trens é a atual condição da superestrutura ferroviária e que, uma vez eliminada esta restrição, a supressão de passagens de nível e a relocação de estações de cruzamento, produzem ganhos expressivos.

- Cremonese (2014) – Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro. O objetivo da dissertação é desenvolver uma metodologia de criação do modelo e análise para um sistema integrado envolvendo a estocagem de produtos de minério de ferro na mineração em Corumbá-MS, o transporte ferroviário e operações portuárias no Porto de Santos. A linha férrea é composta por 85 estações em linha singela (aproximadamente 1.500 km) e por 53 estações em linha dupla (aproximadamente 200 km). A metodologia proposta, possibilita a construção de modelos complexos de forma rápida e precisa, abrangendo todas as etapas de estudo desde a formulação do problema a ser analisado, incluindo análise de dados de entrada, modelagem, validação, verificação e testes, até a implementação dos resultados. Apresenta informações e premissas a serem adotadas para criação do modelo – simulado no *software* Arena – os dados a serem obtidos da simulação e a metodologia de análise dos mesmos. Os valores usados e obtidos da simulação são omitidos por serem oriundos de projeto com acordo de confidencialidade. Conclui que o uso de conceitos e metodologia de simulação para construção e análise de modelos são eficientes para realização de estudos, fornecendo resultados operacionais, o que permite estimar a eficiência e analisar o comportamento de recursos e equipamentos. Os resultados obtidos mostraram a importância da análise integrada do sistema como um todo, face a simulação permitir avaliar e dar visibilidade a informações despercebidas, que resultavam em conflitos não intuitivos.

- Fioroni (2008) – Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições. A tese tem por objetivo desenvolver algoritmos e avaliar técnicas que permitam

modelar detalhadamente a operação nas malhas ferroviárias de trens em ciclo fechado, e validar estes modelos de simulação de forma adequada. A tese foi elaborada pela carência de estudos sobre validação de simulações aplicadas a sistemas ferroviários sujeitas a diversas interferências, tais como, circulação de outros trens, filas em terminais de carga e descarga, o que altera a programação planejada. Para alcançar o objetivo proposto, empregou simulação de eventos discretos – *software* Arena – juntamente com ferramentas computacionais de simulação e otimização – Optquest e GAMS – além de validar o modelo por otimização. A aplicação dos algoritmos em um modelo de malha ferroviária brasileira permitiu: encontrar o melhor tamanho da composição dos trens de ciclo; dimensionar e ajustar o tamanho das frotas de trens de ciclo para o melhor aproveitamento da capacidade da malha; avaliar o impacto que uma nova grade de trens trará para o sistema; estudar o impacto de investimento em melhorias de terminais de carga ou descarga, e investimento em capacidade de circulação da malha (linhas ou pátios); e, avaliar o impacto de novas políticas de manutenção preventiva que reduzam o percentual de contingências de via ou pátio no sistema.

- Simulation Modelling Services Pty Ltd (SMS) (2008) – *Computer Simulation Modelling of Rio Tinto's Pilbara Rail Network*. A empresa The Pilbara Infrastructure Pty Ltd (TPI) contratou a SMS para realizar um estudo de modelagem e simulação com o objetivo de identificar a máxima capacidade de 11 segmentos da malha ferroviária Rio (Rio Tinto Ltd), que possui linha singela e dupla, e o impacto da duplicação do trecho Western Creek Junction a Cape Lambert. Para a modelagem foram consideradas diversas lógicas operacionais, tais como a de que somente um trem pode ocupar qualquer trecho a qualquer momento, que trens carregados têm prioridade sobre trens vazios, que há sempre trens carregados/vazios prontos para fazer uso da ferrovia, partida regular (programada) de trens, etc. A carga e descarga de trens não foram modelados. O modelo simulado no *software* Arena considerou o layout da ferrovia, o tempo de deslocamento dos trens entre os diversos trechos, a quantidade de minério transportada, as interrupções de trechos e interrupções da operação por ação de ciclones. Os cenários foram simulados em um período de 3 anos. Quanto ao objetivo de avaliar a máxima capacidade da infraestrutura existente, concluiu-se que há capacidade ociosa nos diversos trechos da ferrovia – de 30% a 95% – e, no caso de

haver duplicação do trecho Western Creek Junction a Cape Lambert, a sua capacidade ociosa passa de 64% para 84%.

2.5.1 Considerações sobre o levantamento bibliográfico

Título	Autor	Ano	Linha singela	Origem/Destino único	Trens direto	Partidas agendadas	Ferrovia (somente)		Flexível: uso em outras ferrovias	Software de simulação
							Transporte de carga	Operação na linha férrea		
<i>Parametric modeling in rail capacity planning</i>	Krueger	1999							X	
<i>A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network</i>	Marinov e Viegas	2010			X	X		X	X	X
Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de granéis em ciclo fechado	Camargo e Cunha	2012	X				X			
<i>Simulation modelling to analyse the current level of utilization of sections along a rail route</i>	Woroniuk e Marinov	2013			X	X		X	X	X
Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil	Batista	2006	X	X						
Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro	Cremonese	2014		X			X		X	X
Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições	Fioroni	2007						X	X	X
<i>Computer Simulation Modelling of Rio Tinto's Pilbara Rail Network</i>	SMS	2008				X	X	X	X	X

QUADRO 3 – COMPARATIVO COM O ESTUDO DE SIMULAÇÃO

FONTE: O autor (2016)

NOTA: (X) Atende () Não atende

O Quadro 3 foi elaborado a fim de identificar nos trabalhos levantados bibliograficamente semelhanças com o presente trabalho de pesquisa a partir da existência de características referentes à ferrovia em estudo (linha singela, origem/destino único, ferrovia operando apenas com transporte de carga e trens direto) e da metodologia empregada (partidas agendadas de trens, escopo na operação

da linha, flexibilidade para aplicação em outras ferrovias e emprego de software de simulação).

Verificou-se que o objetivo da simulação do presente trabalho se assemelha aos existentes nos estudos desenvolvido pela Simulation Modelling Services Pty Ltd (2008) e por Woroniuk e Marinov (2013), os quais procuram identificar a capacidade ou o nível de utilização de uma ferrovia, entretanto, enquanto neste trabalho se utiliza o *software* de simulação SIMUL8, a linha férrea é singela e dedicada somente ao transporte de carga, além da origem e destino serem únicos, naqueles estudos se utiliza o *software* de simulação ARENA, além do que, a linha férrea possui trechos de linha dupla (SMS, 2008) ou majoritariamente dupla (WORONIK; MARINOV, 2013), é usada para transporte de passageiros (WORONIUK; MARINOV, 2013) e não possui origem e destino únicos.

3 MATERIAL E MÉTODO

O presente trabalho de pesquisa possui como diferencial o emprego das diversas etapas propostas nos referenciais metodológicos apresentados na moldura conceitual, as quais balizaram o desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de solucionar o seguinte problema de pesquisa: **qual é a quantidade de trens/dia que define o limite da capacidade operacional, em 2015, da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava?**

O emprego da metodologia para solucionar o problema se tornou factível em razão de se dispor dos dados operacionais – série histórica – da referida linha férrea. Portanto, o modelo foi desenvolvido a partir do perfil operacional da linha férrea em estudo, para encontrar resposta para o problema, em outras palavras, o problema não foi adequado/simplificado em função de um modelo pré-definido. A partir desta abordagem, neste capítulo, a presente pesquisa é caracterizada em relação à sua natureza, abordagem, objetivo e estratégia, e o seu desenvolvimento descrito.

3.1 MÉTODO E CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente pesquisa pode ser classificada como sendo de natureza aplicada, de abordagem quantitativa e, quanto aos seus objetivos é descritiva na elaboração do modelo conceitual e explicativa quanto aos resultados obtidos do modelo computacional (experimental), e empregando modelagem/simulação como método.

Silva e Menezes (2005, p. 20) definem pesquisa de natureza aplicada como as que possuem o objetivo de “gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos”. Nesta pesquisa, se objetiva conhecer a quantidade diária de trens trafegando na linha férrea singela Cascavel-Guarapuava que exaure a sua capacidade operacional da linha férrea e subsidiariamente, conhecer as restrições operacionais – gargalos – que determinam a exaustão.

Quanto à abordagem quantitativa, Silva e Menezes (2005) consideram que como tudo pode ser quantificável, ou seja, é possível a tradução em números de opiniões e informações a fim de classificá-las e analisá-las. Para isto, faz-se

necessário o uso de recursos e de técnicas estatísticas. Por sua vez, Martins (2012, p.50) esclarece que na abordagem quantitativa, “o pesquisador pode manipular diretamente as variáveis independentes e observar o comportamento da variável dependente”, cujo relacionamento de causa e efeito é expresso na hipótese.

Em relação ao objetivo, Gil (1991, p.46) define as pesquisas descritivas como sendo aquelas que têm com preocupação principal “a descrição das características de determinada população ou fenômeno, ou então o estabelecimento de relações entre variáveis”. Ao contextualizarem para a Engenharia de Produção, Morabito Neto e Pureza (2012, p. 181-182) esclarecem que a “pesquisa baseada em modelos quantitativos é denominada *empírica*, sendo primariamente dirigida por descobertas e medidas empíricas” e que se busca assegurar a existência de uma adesão entre as observações e ações na realidade e o modelo que a representa. Prosseguindo, informam que a pesquisa empírica descritiva possui interesse em “criar um modelo que *descreva* de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, o que leva a compreensão dos processos reais”. Assim, a partir do estudo e análise dos dados referentes à operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava foi possível elaborar um modelo conceitual para a referida linha férrea.

No que diz respeito à pesquisa explicativa, Gil (1991) esclarece que esta visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos, bem como aprofunda o conhecimento da realidade ao explicar a razão, o “porquê” das coisas.

Por fim, Martins (2012, p.50) informa que entre os métodos de pesquisa mais apropriados para conduzir uma pesquisa quantitativa está a modelagem/simulação, na qual “o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, mas não na realidade”, o que é feito no modelo de pesquisa – modelo experimental – conforme descrito nas próximas seções.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO DE PESQUISA

A presente pesquisa foi desenvolvida a partir da metodologia para simulação de eventos discretos apresentada na moldura conceitual, em especial as propostas

por Sargent (2014) e por Chwif (1999), as quais permitiram elaborar modelo fidedigno ao sistema em estudo, o que será apresentado a seguir.

3.2.1 Estudo do problema a ser simulado

O sistema em estudo a ser simulado é a linha férrea singela Cascavel-Guarapuava, especificamente, a simulação de sua operação. A referida linha férrea possui extensão de 248,6 km construídos em bitola métrica – distância entre trilhos de 1000mm – rampa máxima de 1,5% no sentido exportação e de 1,8% no sentido importação, carga máxima de 20 ton/eixo, velocidade de projeto (máxima) de 50 km/h (ANTT, 2015; FERROESTE, 2015), velocidade média anual comercial de 22,1 km/h e velocidade média anual de percurso de 26,2 km/h (ANTT, 2013).

A partir de Guarapuava a operação dos vagões é realizada pela empresa Rumo – América Latina Logística (Rumo ALL) até o porto de Paranaguá. Os vagões retornam à linha férrea Cascavel-Guarapuava, vindos do porto de Paranaguá, percorrendo o mesmo trajeto – sentido exportação – e obedecendo a mesma sequência de etapas de deslocamento, só que na ordem inversa – sentido importação. Entretanto, as locomotivas permanecem operando exclusivamente na linha férrea Cascavel-Guarapuava.

Neste contexto, os trens que operam na linha férrea Cascavel-Guarapuava podem ser considerados como do tipo ‘trens direto’, os quais, conforme explica Fioroni (2008), são trens de carga com origem-destino, que após formados em um terminal (pátio) de origem, parte para a linha em um horário pré-determinado e segue um caminho fixo pela malha até chegar ao terminal de destino, onde são desmembrados, além de levarem diversos tipos de carga.

Por ser uma linha férrea singela – apenas uma via de trilhos – o cruzamento de trens trafegando em sentido opostos ocorre nos pátios de manobra. Os pátios de manobra ou pátios de cruzamento, segundo Fioroni (2008), são trechos da malha com duas ou mais linhas de tamanho fixo, que em linhas singelas, possibilitam trens com comprimento menor que o do pátio, estacionarem em uma dessas linhas, liberando a passagem para trens que estão circulando em sentido oposto.

Conforme consta na Declaração de Rede da Ferroeste (ANTT, 2015), a ferrovia possui 15 pátios de manobra, entretanto, fisicamente os pátios de Passo Liso e Catanduvas não existem e, o pátio de Agrária, localizado entre os pátios de Campo Real e Guarapuava, é um terminal sediado no pátio de Guarapuava. Portanto, a ferrovia em estudo possui 11 trechos e 12 pátios de manobra, designados por prefixos, conforme apresentado no Quadro 4.

Prefixo	Pátio	Prefixo	Pátio
SGP	Guarapuava	SLS	Laranjeiras do Sul
SCR	Campo Real	SHE	Herveira
SLI	Limoeiro	SGU	Guaraniaçu
SAR	Araras	SIB	Ibema
SGO	Goioxim	SCB	Campo Bonito
SCG	Cantagalo	SCA	Cascavel

QUADRO 4 – PREFIXO DE PÁTIOS DE MANOBRA
 FONTE: O autor (2016)

As informações apresentadas no Quadro 5 constam na Declaração de Rede 2015 da Ferroeste. As linhas numeradas do referido quadro indicam a localização e o comprimento da linha principal no pátio de manobra. As linhas não numeradas apresentam características técnicas de cada trecho ferroviário entre os pátios de manobra – o raio mínimo de curva, a capacidade em número de trens por dia e a extensão. Por fim, a capacidade instalada indica o número de trens possível de serem operados diariamente e, a capacidade vinculada, é o número efetivo de trens operando diariamente.

	(Prefixo) Pátio	Km (Localização)	Comprimento Útil (km)	Extensão do Trecho entre Pátios (km)	Raio Mínimo de Curva (m)	Capacidade (nº de Trens por Dia)			
						Instalada		Vinculada	
						↑	↓	↑	↓
1.	(LGP) Guarapuava	0,000	n/d	7,500	312	17,3	17,3	3,0	3,0
2.	(S01) Agrária	7,500	1,716	20,190	312	8,6	8,6	3,0	3,0
3.	(SCR) Campo Real	27,690	1,202	13,063	312	9,2	9,2	3,0	3,0
4.	(SLI) Limoeiro	40,753	1,319	16,343	312	8,2	8,2	3,0	3,0
5.	(SAR) Araras	57,096	1,352	25,922	312	5,2	5,2	3,0	3,0
6.	(SGO) Goioxim	83,018	1,550	21,000	312	6,8	6,8	3,0	3,0
7.	(SCG) Cantagalo	104,018	1,464	1,088	0	7,4	7,4	0,0	0,0
8.	(SPL) Passo Liso	105,106	n/d	19,553	312	7,4	7,4	3,0	3,0
9.	(SLS) Laranjeiras do Sul	124,659	1,380	23,304	250	6,9	6,9	3,0	3,0
10.	(SHE) Herveira	147,963	1,340	26,825	270	6,2	6,2	3,0	3,0
11.	(SGU) Guaraniacu	174,788	1,264	25,358	312	6,8	6,8	3,0	3,0
12.	(SIB) Ibema	200,146	1,346	23,041	312	7,6	7,6	3,0	3,0
13.	(SCB) Campo Bonito	223,187	1,380	2,813	0	7,1	7,1	0,0	0,0
14.	(SCT) Catanduvas	226,000	n/d	22,100	312	7,1	7,1	3,0	3,0
15.	(SCA) Cascavel	248,100	1,993						

QUADRO 5 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS ENTRE PÁTIOS DE MANOBRA
 FONTE: ANTT (2015), adaptado

No Quadro 5 foram apresentadas capacidades – instalada e vinculada – de forma objetiva, entretanto, considera-se necessário ampliar a compreensão a respeito do conceito de capacidade, em razão de ser o parâmetro a ser estudado para se obter a resposta do problema apresentado. Pouryousef, Lautala e White (2015) informam que a definição usada para capacidade ferroviária na literatura, varia em função das técnicas e objetivos do estudo específico.

No presente trabalho de pesquisa, adotar-se-á a abordagem de Krueger (1999) que considera a natureza dinâmica da capacidade, face a existência de fatores que a influenciam, tais como, as mudanças no projeto geométrico da linha férrea, no tráfego e nas condições de operação, bem como no nível de serviço esperado. Conseqüentemente, define capacidade como sendo, o maior volume (trens/dia) que pode ser movido em um trecho de linha férrea, sob um cronograma específico e um plano de operações – tráfego e operações – enquanto não exceder determinado limite – tempo de deslocamento.

A partir das definições apresentadas por Krueger (1999) pode-se concluir que a Capacidade Instalada considerada pela Ferroeste é a Capacidade Prática e a Capacidade Vinculada é a Capacidade Utilizada. Entretanto, de certa forma, tais valores serão confrontados com os resultados obtidos na simulação da operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava.

No que tange à simulação, deve-se considerar que apesar dos dados utilizados referirem-se somente à operação dos trens de carga, já estão implicitamente inclusos nos mesmos, os diversos tipos de atraso, bem como o perfil atual de operação – tempo de percurso – em cada trecho da linha férrea.

A partir das características técnicas e, principalmente, dos dados operacionais da linha férrea em estudo, buscar-se-á identificar em simulação se existe Capacidade Disponível na operação atual. Havendo Capacidade Disponível, verificar-se-á a possibilidade de se operar diariamente pela linha férrea, 7 trens no sentido exportação e 7 trens no sentido importação e, se for o caso, identificar em que cenário ocorre a exaustão operacional da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava em 2015.

Faz-se necessário ressaltar que ao se realizar simulações com diferentes níveis de utilização da linha férrea, em trens/dias, deve-se identificar no cenário de exaustão operacional a Capacidade Teórica, conforme condições operacionais apresentadas em sua definição. A partir da Capacidade Teórica será possível definir a Capacidade Prática em função da definição de um limite de desempenho.

Por fim, antes de prosseguir para a próxima fase metodológica, deve-se trazer novamente à tona que, essencialmente, a operação da linha férrea consiste no uso de pátios e de trechos ferroviários entre pátios de manobra, o que foi considerado na elaboração do modelo conceitual, conforme descrito a seguir.

3.2.2 Elaboração do modelo conceitual

Do estudo da operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava, baseado em informações cedidas pela Ferroeste, foi possível consolidar um modelo abstrato, a partir do qual foi elaborado o modelo conceitual, que se refere somente à operação na referida linha férrea. Na elaboração do modelo conceitual foi empregada a técnica ACD e considerado os seguintes referenciais:

a. Na montagem dos trens (sentido exportação) procura-se sempre que possível agrupar os vagões por mercadoria, cliente e destino. Essa operação é feita utilizando-se da locomotiva de manobra do pátio;

b. Após a montagem, os trens (sentido exportação) são deslocados para o pátio de manobra de Cascavel (SCA), conforme disponibilidade de ramais ferroviários naquele pátio. Havendo no pátio de manobra de Campo Bonito (SCB) disponibilidade de ramais, e do trecho ferroviário entre SCA e SCB, o trem pode iniciar seu deslocamento. De forma idêntica, a disponibilidade e do trecho ferroviário subsequente entre pátios de manobra, possibilita o deslocamento progressivo do trem até o pátio de manobra de Guarapuava (SGP), conforme esquematizado na Figura 6;

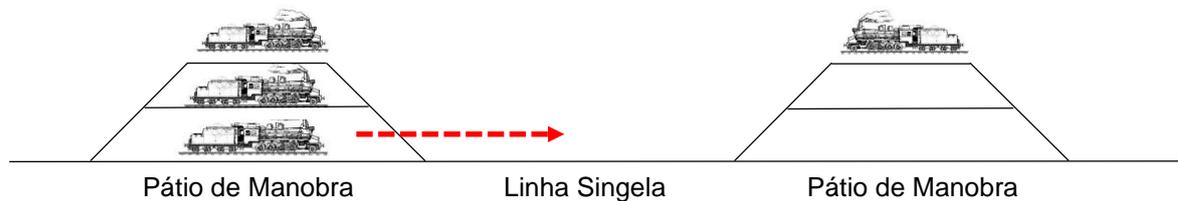


FIGURA 6 – DESLOCAMENTO DE TREM
FONTE: O autor (2016)

c. Após SGP, os vagões de carga passam a ser controlados pela empresa RUMO ALL e saem do sistema – linha férrea Cascavel-Guarapuava. As locomotivas continuam sob controle da Ferroeste; e

d. Os vagões partindo de SGP para SCA são encaminhados pela RUMO ALL para o pátio de manobra SGP e, de forma análoga à sistemática do sentido exportação, os trens se deslocam de Guarapuava até Cascavel.

Assim, empregando o ACD na elaboração do modelo conceitual da operação da linha férrea Cascavel-Guarapuava, foi definido pelo autor que os 'trens' são entidades, cujo comportamento operacional é o objeto do estudo, e definido que a 'linha' – decomposta em trechos entre pátios de manobra – e os 'pátio de manobra' são recursos. O recurso 'linha' é disposto em 11 trechos e o recurso 'pátio de manobra' possui em regra a linha principal e no mínimo 2 ramais.

O modelo conceitual foi elaborado em faixas horizontais com o propósito de facilitar a identificação das atividades necessárias para viabilizar o fluxo de trens no sentido exportação/importação. A faixa superior representa o fluxo no sentido

exportação e a inferior, representa o fluxo no sentido importação. Na faixa intermediária estão as atividades necessárias para o uso dos recursos utilizados na operação da linha férrea.

A Figura 7, parte do modelo conceitual, apresenta o início do fluxo no sentido exportação e o final do fluxo no sentido importação. A atividade 'Usa Pátio' ocorre quando há ramais disponíveis para uso no pátio de manobra e a atividade 'Usa Trecho' ocorre quando o trecho de ferrovia entre pátios de manobra está disponível. A atividade 'entrada' ocorre no pátio de Cascavel (SCA), bem como a operação de 'saída' do sistema. O "trecho 1" é o trecho de ferrovia entre os pátios de Cascavel (SCA) e o pátio de Campo Bonito (SCB). As setas indicam a rotina de emprego nas atividades de operação seguida pelos trens (traço preto contínuo), pátios (traço azul contínuo) e trechos de linha férrea (traço intermitente vermelho).

A sistemática de deslocamento dos trens obedece às atividades descritas na letra b, acima. Em regra, o trem somente se desloca de um pátio de manobra para outro pátio de manobra, se houver disponibilidade de ramal no pátio de manobra seguinte e do trecho de linha férrea entre pátios de manobra. Para que o deslocamento seja possível, no modelo conceitual, a linha principal dos pátios de manobra é empregada apenas para trânsito de trens.

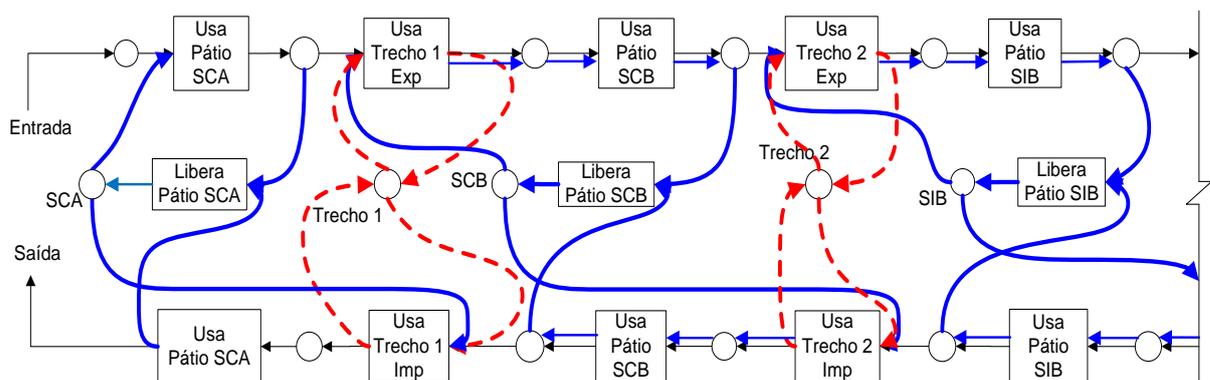


FIGURA 7 – MODELO CONCEITUAL – INÍCIO DO FLUXO DE EXPORTAÇÃO
FONTE: O autor (2016)

As atividades ocorrem de forma sistemática ao longo da linha férrea, conforme pode ser observado nas figuras 7 e 8. A Figura 8, parte do modelo conceitual, apresenta o início do fluxo no sentido importação e o final do fluxo no sentido exportação. As atividades 'entrada' e 'saída' ocorre no pátio de Guarapuava (SCA) e

o “trecho 11” é o trecho entre os pátios de Guarapuava (SCG) e o pátio de Campo Real (SCR).

No modelo conceitual, de forma simplificadora, é considerado que os pátios de manobra de Cascavel e de Guarapuava são disponibilizados imediatamente logo após a chegada de trens no sentido importação e no sentido exportação, respectivamente.

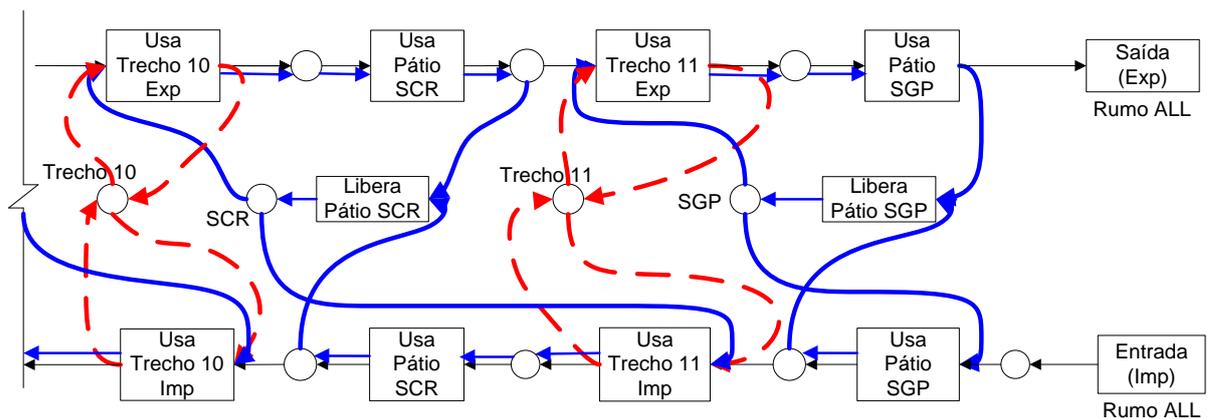


FIGURA 8 – MODELO CONCEITUAL – INÍCIO DO FLUXO DE IMPORTAÇÃO
 FONTE: O autor (2016)

O modelo conceitual foi considerado validado, em razão de que:

- A operação da ferrovia Cascavel-Guarapuava – problema – possui rotinas definidas e conhecidas, o que possibilitou a elaboração de um modelo conceitual capaz de replicar fidedignamente a lógica de emprego dos recursos – linha férrea e pátios de manobra – na realização do deslocamento dos trens;
- O modelo conceitual foi elaborado a partir das orientações dadas por experiente funcionário, da Ferroeste, em operação ferroviária e, foi aperfeiçoado na medida em que as dúvidas da operação foram esclarecidas pelo referido funcionário;
- A estruturação do modelo conceitual em diversos trechos entre pátios de manobra foi possível em razão de haver dados reais da operação de trens de forma detalhada, conforme pode ser observado no Quadro 6; e
- A amostra dos dados reais foi tratada estatisticamente – Quadro 7 – e, quando possível, determinada a distribuição de probabilidade adequada, além de verificado que não há correlação entre as observações da amostra. Tais informações

referentes aos dados da amostra podem ser verificadas de forma mais detalhada na próxima seção.

3.2.3 Modelagem dos dados de entrada

A Ferroeste disponibilizou dados operacionais reais – série histórica – referentes à operação da linha férrea. Empregou-se os dados do período de junho de 2013 a maio de 2015 para a operação do modelo computacional e para realizar a verificação do referido modelo computacional.

Os dados da amostra são referentes aos trens de carga que transitaram mensalmente no sentido exportação (Cascavel-Guarapuava) e no sentido importação (Guarapuava-Cascavel), conseqüentemente, tem-se duas entradas de trens para uso da linha férrea, conforme pode ser observado no modelo conceitual.

TREM	DATA FORMACAO	ORIGEM	DESTINO	DATA PARTIDA	DATA CHEGADA	TOTAL PARADA	TOTAL MARCHA	VEL MEDIA	TOTAL TRANSITO
J02	04/07/2013 23:20	SCA	SGP	05/07/2013 01:50	05/07/2013 11:30	0.0	9.7	25.1	9.7
		1	SCA	05/07/2013 01:50	05/07/2013 01:50	0.0	0.0		
		2	SCB	05/07/2013 02:45	05/07/2013 02:45	0.0	0.9	28.9	
		3	SIB	05/07/2013 03:30	05/07/2013 03:30	0.0	0.8	30.6	
		4	SGU	05/07/2013 04:40	05/07/2013 04:40	0.0	1.2	21.7	
		5	SHE	05/07/2013 05:40	05/07/2013 05:40	0.0	1.0	27.0	
		6	SLS	05/07/2013 06:50	05/07/2013 06:51	0.0	1.2	20.0	
		7	SCG	05/07/2013 07:40	05/07/2013 07:40	0.0	0.8	23.2	
		8	SGO	05/07/2013 08:30	05/07/2013 08:30	0.0	0.8	26.9	
		9	SAR	05/07/2013 09:25	05/07/2013 09:25	0.0	0.9	28.9	
		10	SLI	05/07/2013 10:10	05/07/2013 10:10	0.0	0.8	21.3	
		11	SCR	05/07/2013 10:35	05/07/2013 10:35	0.0	0.4	32.4	
		12	SGP	05/07/2013 11:30	05/07/2013 11:30	0.0	0.9	23.3	

QUADRO 6 – EXEMPLO DE REGISTRO OPERACIONAL DE TREM NO SENTIDO EXPORTAÇÃO
FONTE: FERROESTE (2015)

A Ferroeste encaminhou os registros operacionais – dados – para o autor no formato apresentado no Quadro 6 – planilhas Excel – contendo as seguintes informações:

- Trem: Jx, onde: “J” indica ser o trem de carga; “x”: “par”, indica o sentido exportação, e “ímpar” o sentido importação;
- Data de formação: data-hora de montagem do trem;

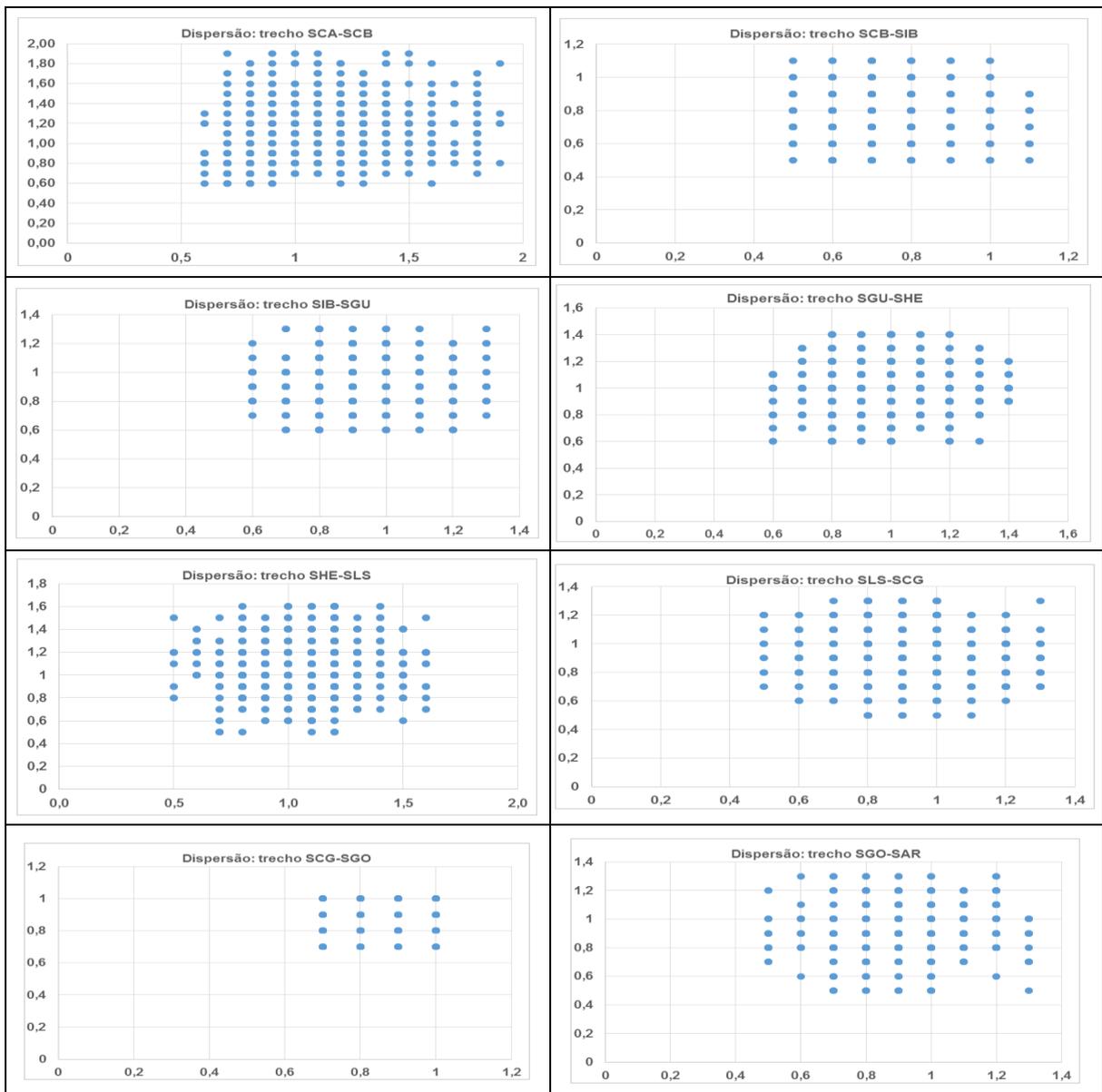
- Origem: “SCA” (Cascavel), trem no sentido exportação; “SGP” (Guarapuava), no sentido importação; “Número”, conforme registro de passagem pelos diversos pátios de manobra;
- Destino: “SGP” (Guarapuava), trem no sentido exportação; “SCA” (Cascavel), no sentido importação; S“XY”, com “XY” designando o pátio de manobra;
- Data de partida/chegada: data-hora de partida/chegada do trem do/ao pátio de manobra;
- Total parada (h): soma dos tempos do trem parado nos diversos pátios de manobra; e em cada pátio de manobra;
- Total marcha (h): soma dos tempos (médios) de deslocamento do trem entre os pátios de manobra de origem e de destino; e o tempo médio de deslocamento entre pátios de manobra sucessivos (por exemplo: entre SCA-SCB: 0,9 h; entre SCB-SIB: 0,8h ...);
- Velocidade média (km/h): a velocidade média do trem no deslocamento entre a origem e o destino (pátio de manobra); e a velocidade média do trem no deslocamento entre pátios de manobra sucessivos (por exemplo: ... entre SLI-SCR: 32,4 km/h; entre SCR-SGP: 23,3 km/h); e
- Total trânsito (h): soma dos tempos “total parada” e “total marcha” do deslocamento do trem entre os pátios de origem e de destino.

A amostra encaminhada pela Ferroeste foi adequadamente modelada e, mesmo os registros incompletos foram utilizados dentro de determinados critérios, conforme descrito a seguir. Inicialmente foi incluído uma coluna em cada planilha mensal com o objetivo de obter um indexador para os diferentes trechos, o que permitiu separar os registros em duas planilhas de partidas de trens, uma para o sentido exportação e outra para o sentido importação.

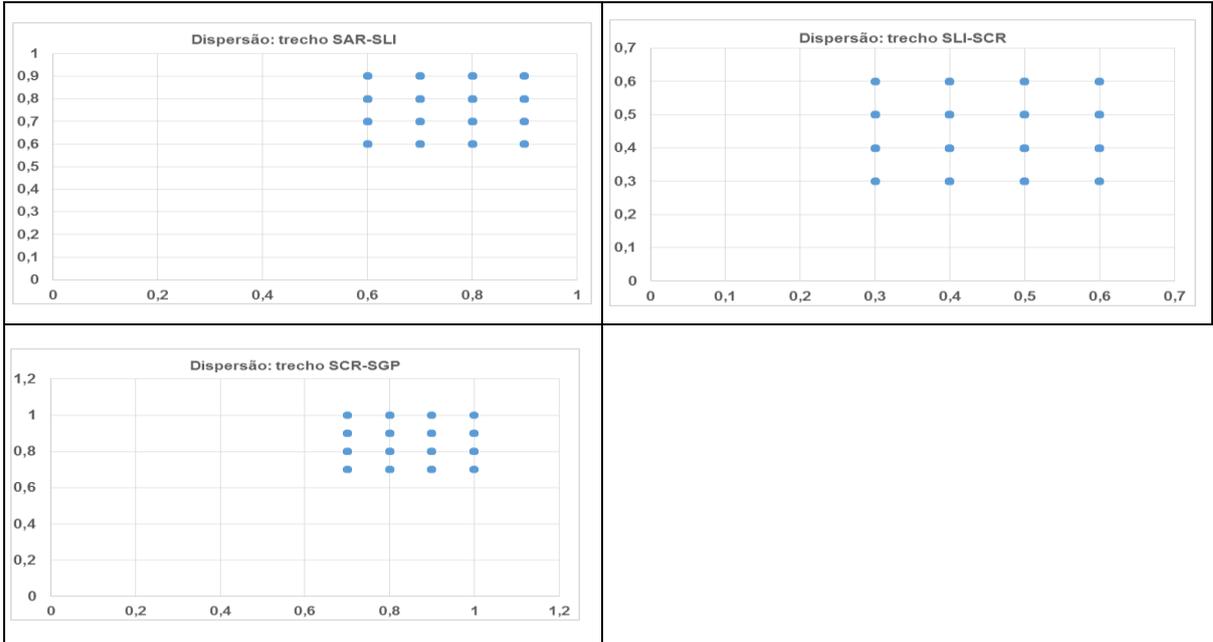
Em seguida, em cada planilha – exportação e importação – verificou-se a existência de dados referentes à chegada do trem na estação de destino. No caso de haver dado referente à chegada do trem ao destino, o registro foi incluído na amostra para as estatísticas do sistema – todo o trecho da linha férrea – e para cada trecho entre os diversos pátios. No caso em que não havia dado referente à chegada do trem ao destino, o registro não foi incluído na amostra para as estatísticas do sistema, mas

foi preservado para o devido tratamento estatístico, se possuísse dados referentes aos trechos entre pátios de manobra.

A partir dos registros nas planilhas com as partidas de trens – exportação e importação – realizou-se o tratamento estatístico do tempo na linha férrea – de origem ao destino – e do intervalo de saída dos trens. Além destes, selecionou-se os registros por cada trecho entre pátios de manobra subsequentes, a fim de realizar o tratamento estatístico do tempo de deslocamento do trem em cada trecho. O tempo de deslocamento, segundo Marinov e Viegas (2010), varia de acordo com o comprimento da linha, a capacidade de tração, as rampas, número e raios de curvas, etc.

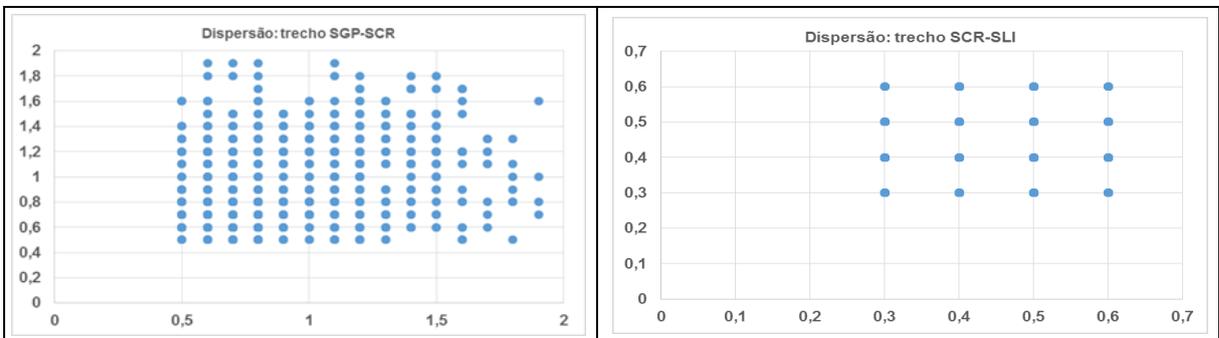


QUADRO 7 – DIAGRAMAS DE DISPERSÃO DOS TEMPOS DE DESLOCAMENTO ENTRE PÁTIOS DE MANOBRA (SENTIDO EXPORTAÇÃO) – Continua
 FONTE: O autor (2016)

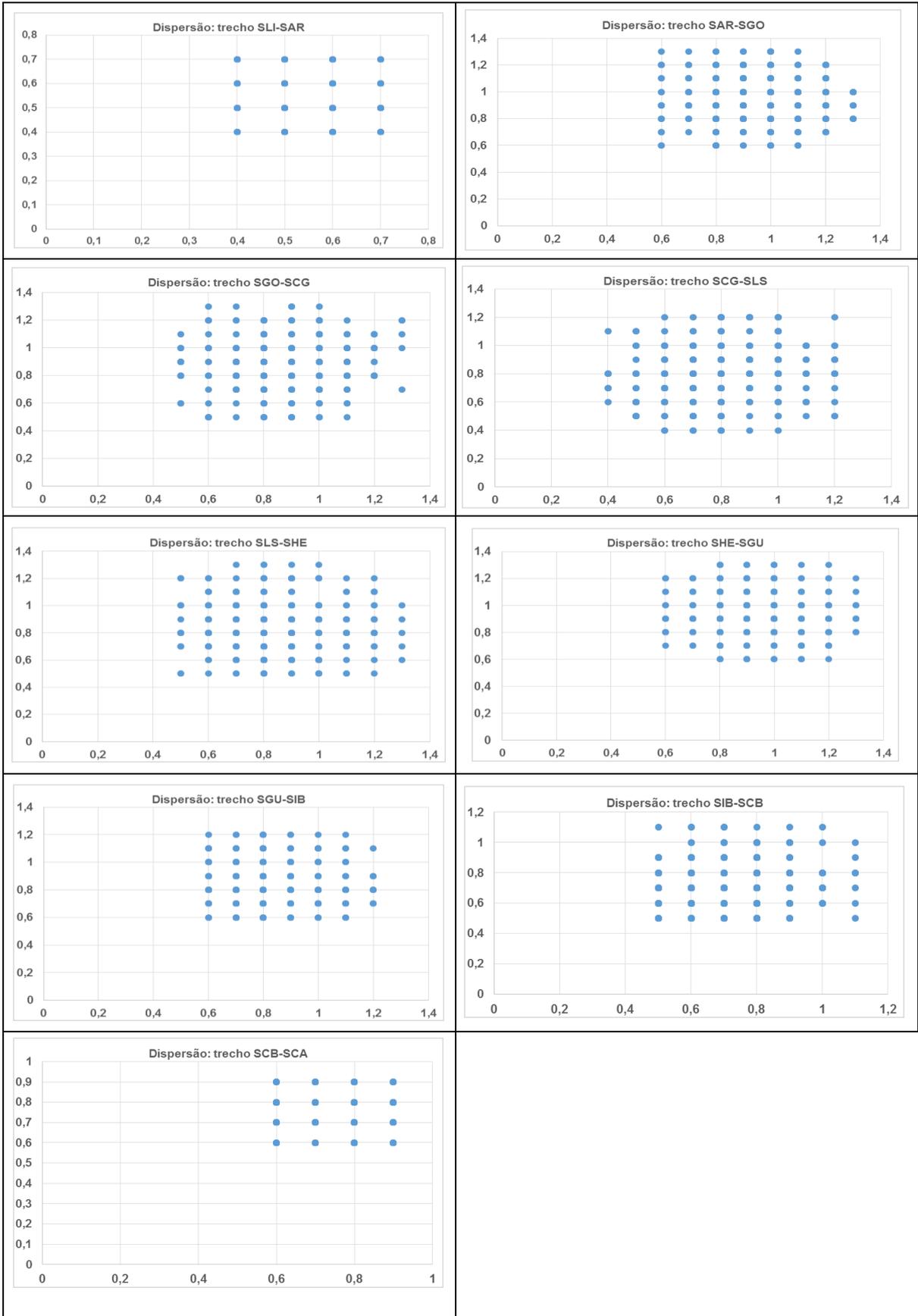


QUADRO 7 – DIAGRAMAS DE DISPERSÃO DOS TEMPOS DE DESLOCAMENTO ENTRE PÁTIOS DE MANOBRA (SENTIDO EXPORTAÇÃO) – Conclusão
 FONTE: O autor (2016)

Nos trechos entre pátios subsequentes, rejeitou-se os registros com velocidade média acima de 50 km/h em razão desta ser a velocidade de projeto (máxima) para a linha férrea. Além disso, conforme critério apresentado na revisão de literatura, retirou-se todos os *outliers* da amostra, bem como a partir dos diagramas de dispersão construídos dos tempos de deslocamento entre pátios de manobra subsequentes, conforme apresentado no Quadro 7 e Quadro 8, não se verificou a existência de correlação entre as observações da amostra.



QUADRO 8 – DIAGRAMAS DE DISPERSÃO DOS TEMPOS DE DESLOCAMENTO ENTRE PÁTIOS DE MANOBRA (SENTIDO IMPORTAÇÃO) – Continua
 FONTE: O autor (2016)



QUADRO 8 – DIAGRAMAS DE DISPERSÃO DOS TEMPOS DE DESLOCAMENTO ENTRE PÁTIOS DE MANOBRA (SENTIDO IMPORTAÇÃO) – Conclusão
 FONTE: O autor (2016)

O tratamento estatístico para os registros existentes em cada mês, isoladamente, de junho de 2013 a maio de 2015, obedeceu aos critérios anteriormente descritos. Tal procedimento foi realizado para verificar se em algum mês existiria anormalidade na operação dos trens. Entretanto, ao se comparar as estatísticas obtidas de um mês com os demais meses, não se encontrou alterações significativas. Assim, optou-se por relacionar todos os registros de junho de 2013 a maio de 2015 para a realização do tratamento estatístico de toda a amostra, atentando para os critérios descritos anteriormente, cujo resumo é apresentado no Quadro 9, a seguir.

Trecho		Nr_Obs	Média	Valor		Primeiro Quartil	Mediana	Terceiro Quartil	Limite		Amplitude	Variância	Desvio Padrão
				Mín	Máx				Inferior	Superior			
SCA-SGP	Tempo na Linha (h)	1063	9,679	7,10	12,20	9,00	9,60	10,300	7,050	12,250	5,10	0,8749	0,9354
	Intervalo de Saída (h)	839	17,951	7,02	41,42	11,33	16,60	23,533	6,967	41,833	34,40	60,3149	7,7663
1.Sca_Scb	Tempo no Trecho (h)	946	1,094	0,60	1,90	0,90	1,10	1,300	0,300	1,900	1,30	0,0743	0,2725
2.Scb_Sib		839	0,742	0,50	1,10	0,60	0,70	0,800	0,300	1,100	0,60	0,0170	0,1305
3.Sib_Sgu		847	0,909	0,60	1,30	0,80	0,90	1,000	0,500	1,300	0,70	0,0225	0,1500
4.Sgu_She		840	0,970	0,60	1,40	0,90	1,00	1,100	0,600	1,400	0,80	0,0247	0,1573
5.She_Sls		820	1,067	0,50	1,60	0,90	1,10	1,200	0,450	1,650	1,10	0,0402	0,2004
6.Sls_Scg		766	0,907	0,50	1,30	0,80	0,90	1,000	0,500	1,300	0,80	0,0268	0,1637
7.Scg_Sgo		643	0,836	0,70	1,00	0,80	0,80	0,900	0,650	1,050	0,30	0,0086	0,0929
8.Sgo_Sar		792	0,909	0,50	1,30	0,80	0,90	1,000	0,500	1,300	0,80	0,0262	0,1617
9.Sar_Sli		634	0,750	0,60	0,90	0,70	0,80	0,800	0,550	0,950	0,30	0,0075	0,0866
10.Sli_Scr		716	0,456	0,30	0,60	0,40	0,50	0,500	0,250	0,650	0,30	0,0073	0,0853
11.Scr_Sgp		792	0,821	0,70	1,00	0,80	0,80	0,900	0,650	1,050	0,30	0,0066	0,0812
SGP-SCA	Tempo na Linha (h)	951	8,847	6,30	11,40	8,20	8,8	9,5	6,25	11,45	5,10	1,0226	1,0112
	Intervalo de Saída (h)	998	15,971	0,57	42,00	9,07	14,67	22,325	-10,821	42,213	41,43	74,4684	8,6295
1.Sgp_Scr	Tempo no Trecho (h)	749	0,957	0,50	1,90	0,70	0,90	1,200	-0,050	1,950	1,40	0,1073	0,3276
2.Scr_Sli		644	0,440	0,30	0,60	0,40	0,40	0,500	0,250	0,650	0,30	0,0074	0,0858
3.Sli_Sar		535	0,548	0,40	0,70	0,50	0,50	0,600	0,350	0,750	0,30	0,0086	0,0926
4.Sar_Sgo		584	0,942	0,60	1,30	0,80	0,90	1,000	0,500	1,300	0,70	0,0248	0,1576
5.Sgo_Scg		543	0,876	0,50	1,30	0,80	0,90	1,000	0,500	1,300	0,80	0,0257	0,1604
6.Scg_Sls		522	0,793	0,40	1,20	0,70	0,80	0,900	0,400	1,200	0,80	0,0289	0,1699
7.Sls_She		636	0,847	0,50	1,30	0,73	0,80	1,000	0,313	1,413	0,80	0,0265	0,1629
8.She_Sgu		594	0,934	0,60	1,30	0,80	0,90	1,000	0,500	1,300	0,70	0,0234	0,1529
9.Sgu_Sib		576	0,834	0,60	1,20	0,70	0,80	0,900	0,400	1,200	0,60	0,0199	0,1410
10.Sib_Scb		581	0,717	0,50	1,10	0,60	0,70	0,800	0,300	1,100	0,60	0,0173	0,1315
11.Scb_Sca		562	0,758	0,60	0,90	0,70	0,80	0,800	0,550	0,950	0,30	0,0089	0,0943

QUADRO 9 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS REGISTROS OPERACIONAIS DO PERÍODO DE JUNHO DE 2014 A MAIO DE 2015
FONTE: O autor (2016)

A partir destes registros operacionais tratados estatisticamente, foi usado o *software* Stat::Fit – *plug-in* padrão no *software* Simul8 – que realizou testes de aderência – Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling – para identificar a distribuição de probabilidade estatisticamente mais adequada para representar o intervalo de saída dos trens e o tempo de deslocamento nos diversos trechos da linha férrea.

Assim, o uso do *software* Stat::Fit possibilitou identificar uma distribuição beta e seus respectivos parâmetros – valor mínimo, valor máximo, alfa e beta – como a

distribuição de probabilidade estatisticamente adequada para representar o intervalo de saída dos trens, partindo de Cascavel com destino à Guarapuava, conforme apresentado no Gráfico 2. A referida distribuição foi usada para caracterizar no *software* Simul8, o comportamento das partidas dos trens no sentido exportação.

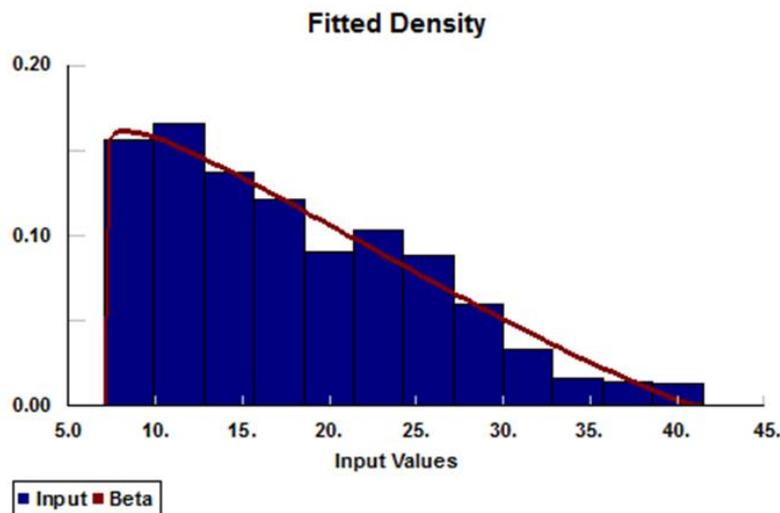


GRÁFICO 2 – INTERVALO DE PARTIDA (SENTIDO EXPORTAÇÃO): DISTRIBUIÇÃO BETA (7, 41.4, 1.05, 2.21)
 FONTE: O autor (2016)

Entretanto, o *software* Stat::Fit não identificou a existência de distribuição de probabilidade que seja estatisticamente adequada para representar o tempo de deslocamento do trem em cada trecho entre pátios de manobra, conseqüentemente, adotou-se histogramas das distribuições relativas aos tempos de deslocamento nos trechos da ferrovia. O número de classes utilizado em cada histograma foi fixado a partir da quantidade de valores discretos dos tempos de deslocamento em cada trecho.

Assim, os Gráficos 3 a 13 apresentam os histogramas empregados no modelo computacional implementado no *software* Simul8, os quais caracterizam o comportamento do tempo de deslocamento em cada trecho da linha férrea trens no sentido exportação, conforme pode ser observado a seguir.

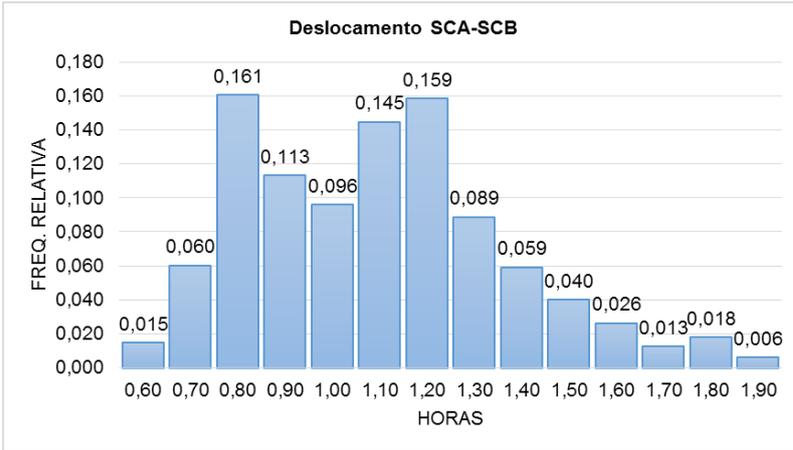


GRÁFICO 3 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO CASCAVEL (SCA) – CAMPO BONITO (SCB)
 FONTE: O autor (2016)

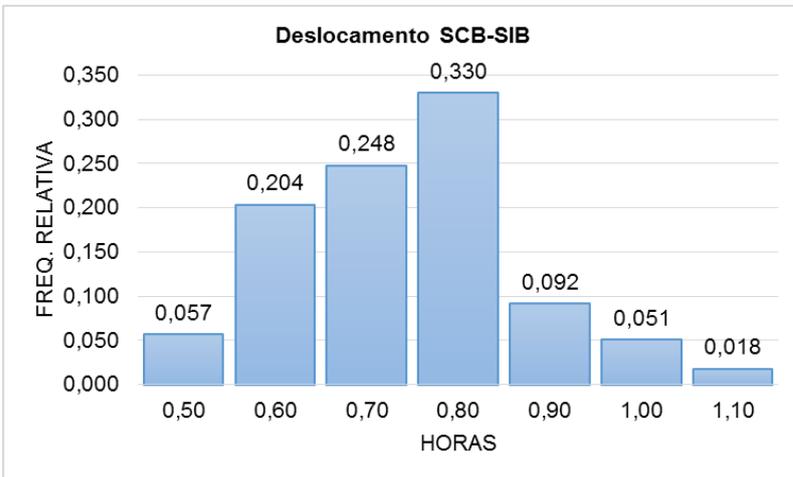


GRÁFICO 4 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO CAMPO BONITO (SCB) – IBEMA (SIB)
 FONTE: O autor (2016)

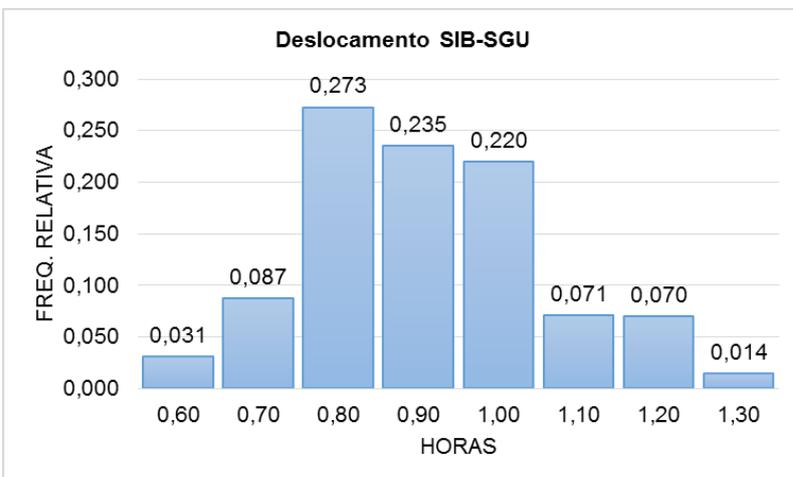


GRÁFICO 5 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO IBEMA (SIB) – GUARANIAÇU (SGU)
 FONTE: O autor (2016)

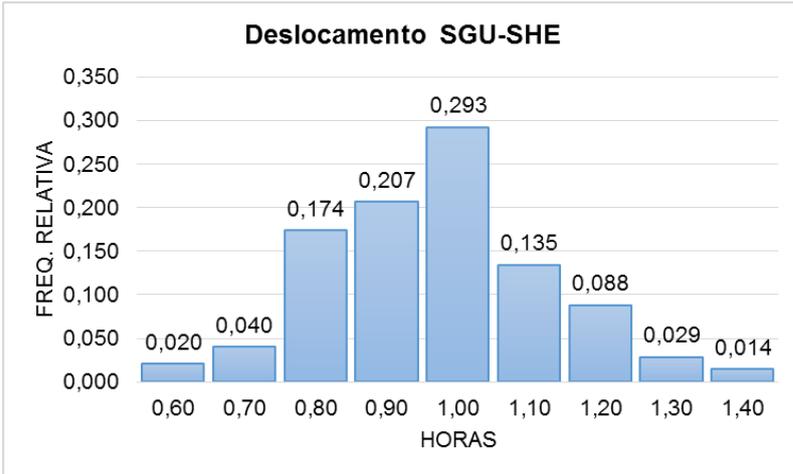


GRÁFICO 6 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO GUARNIAÇU (SGU) – HERVEIRA (SHE)
 FONTE: O autor (2016)

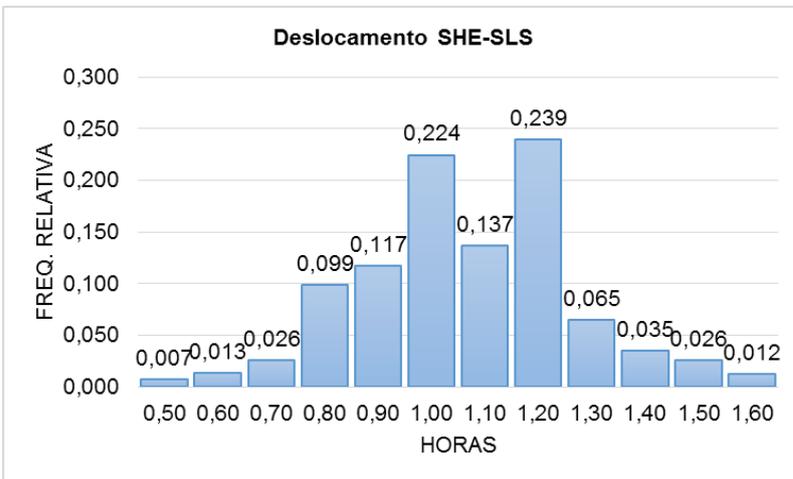


GRÁFICO 7 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO HERVEIRA (SHE) – LARANJEIRAS DO SUL (SLS)
 FONTE: O autor (2016)

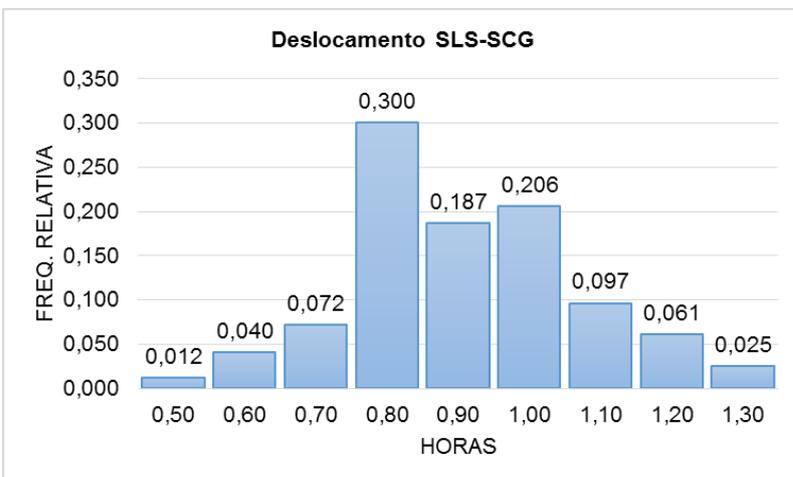


GRÁFICO 8 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO LARANJEIRAS DO SUL (SLS) – CANTAGALO (SCG)
 FONTE: O autor (2016)

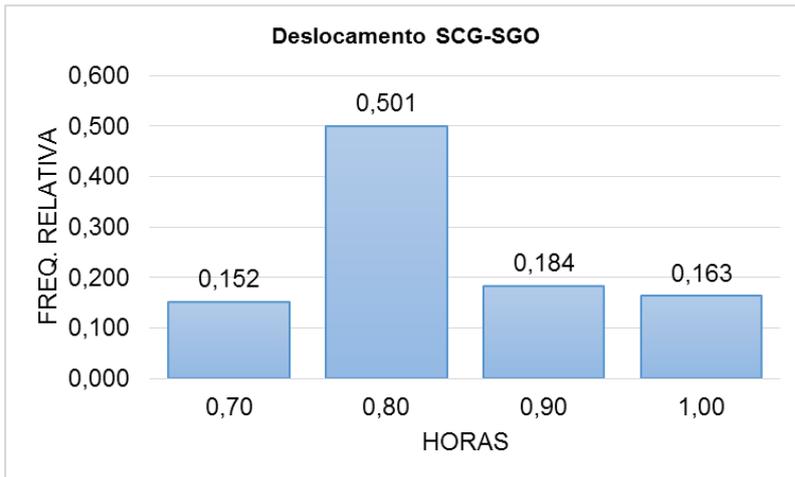


GRÁFICO 9 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO CANTAGLO (SCG) – GOIOXIM (SGO)
 FONTE: O autor (2016)

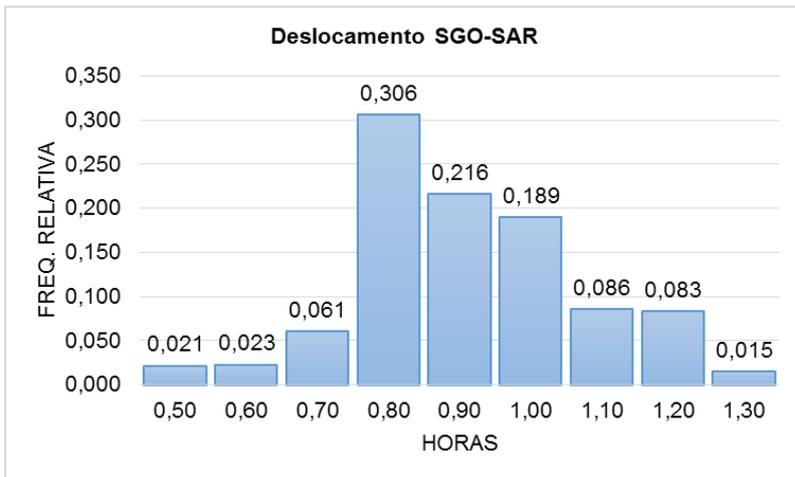


GRÁFICO 10 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO GOIOXIM (SGO) – ARARAS (SAR)
 FONTE: O autor (2016)

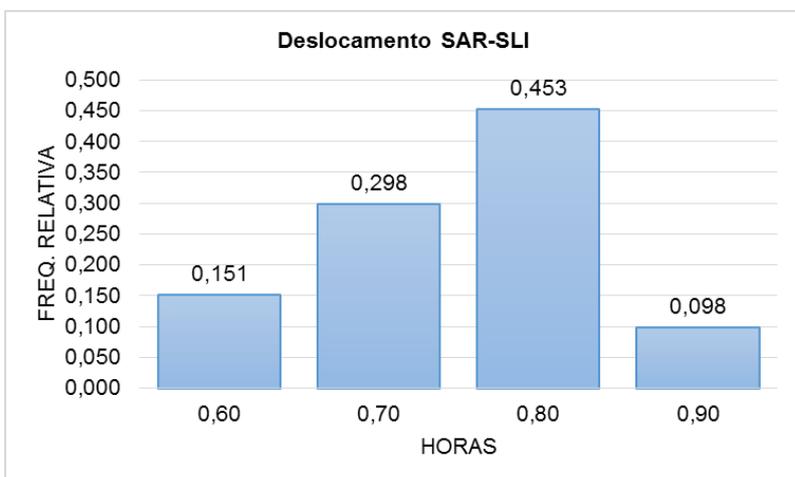


GRÁFICO 11 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO ARARAS (SAR) – LIMOEIRO (SLI)
 FONTE: O autor (2016)

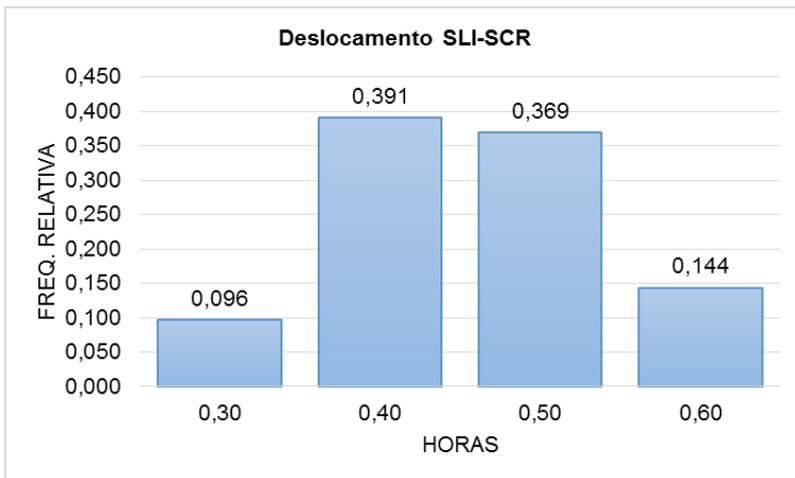


GRÁFICO 12 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO LIMOEIRO (SLI) – CAMPO REAL (SCR)
 FONTE: O autor (2016)

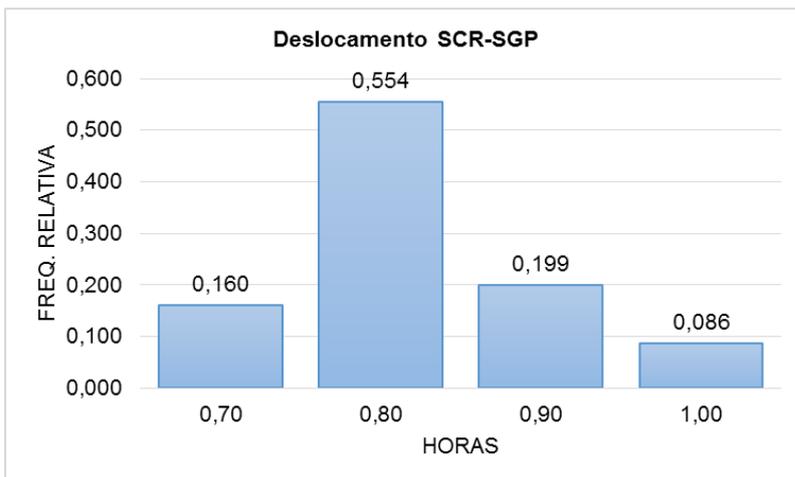


GRÁFICO 13 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO EXPORTAÇÃO): TRECHO CAMPO REAL (SCR) – GUARAPUAVA (SGP)
 FONTE: O autor (2016)

Prosseguindo com o uso do *software* Stat::Fit, foi possível identificar uma distribuição beta e seus respectivos parâmetros – valor mínimo, valor máximo, alfa e beta – como a distribuição de probabilidade estatisticamente adequada para representar o intervalo de saída dos trens, partindo de Guarapuava com destino à Cascavel, conforme apresentado no Gráfico 14. A referida distribuição foi usada para caracterizar no *software* Simul8, o comportamento das partidas dos trens no sentido importação.

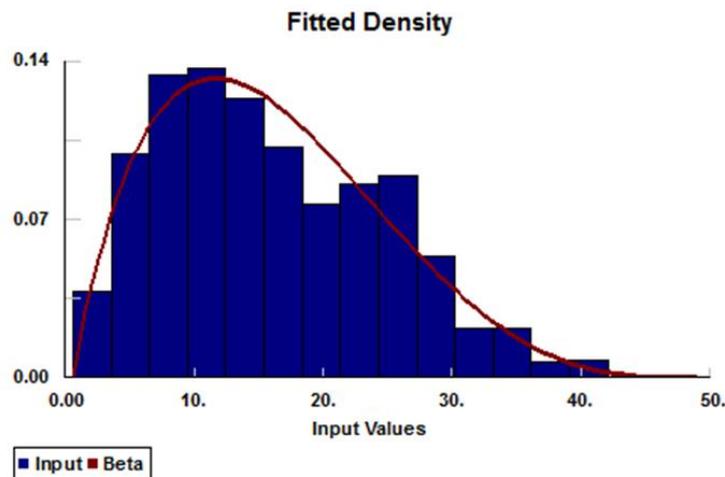


GRÁFICO 14 – INTERVALO DE PARTIDA (SENTIDO IMPORTAÇÃO): DISTRIBUIÇÃO BETA (0.57, 48.9, 1.93, 4.11)
 FONTE: O autor (2016)

Da mesma forma, o *software* Stat::Fit não identificou distribuição de probabilidade que seja estatisticamente adequada para representar o tempo de deslocamento do trem em cada trecho entre pátios de manobra. Por conseguinte, adotou-se histogramas das distribuições relativas aos tempos de deslocamento nos trechos da ferrovia e, o número de classes em cada histograma foi fixado a partir da quantidade de valores discretos dos tempos de deslocamento em cada trecho.

Por fim, os Gráficos 15 a 25 apresentam os histogramas empregados no modelo computacional implementado no *software* Simul8, os quais caracterizam o comportamento do tempo de deslocamento em cada trecho da linha férrea trens no sentido importação, conforme pode ser observado a seguir.

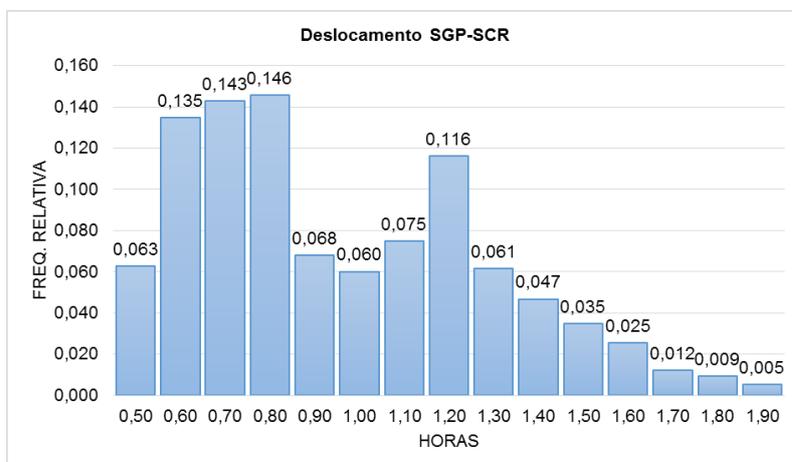


GRÁFICO 15 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO GRUARAPUAVA (SGP) – CAMPOR REAL (SCR)
 FONTE: O autor (2016)

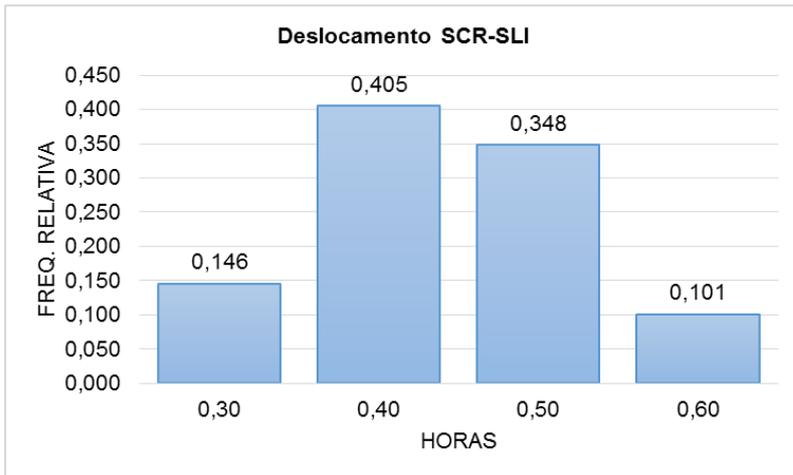


GRÁFICO 16 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO CAMPO REAL (SCR) – LIMOEIRO (SLI)
 FONTE: O autor (2016)

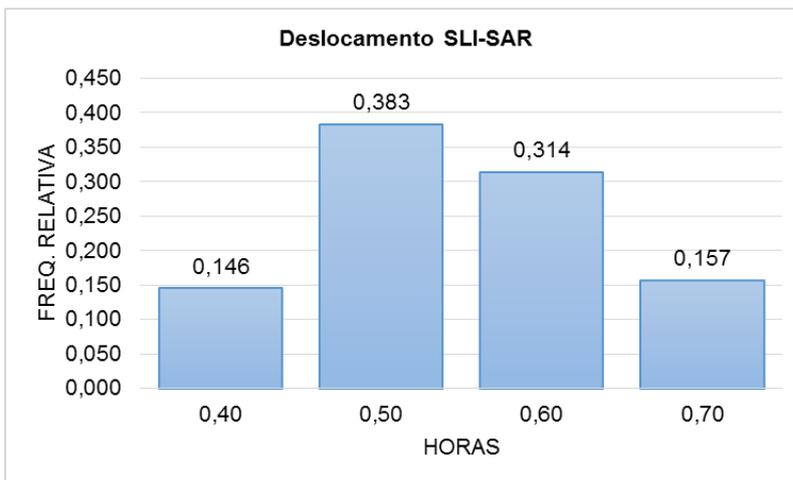


GRÁFICO 17 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO LIMOEIRO (SLI) – ARARAS (SAR)
 FONTE: O autor (2016)

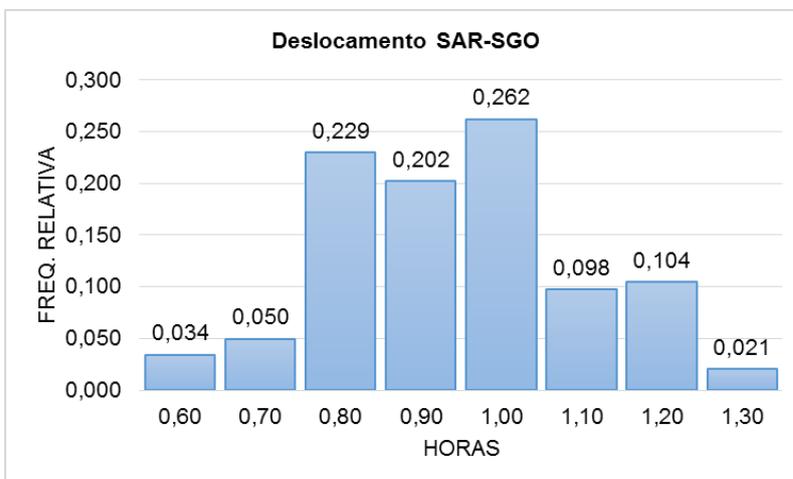


GRÁFICO 18 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO ARARAS (SAR) – GOIOXIM (SGO)
 FONTE: O autor (2016)

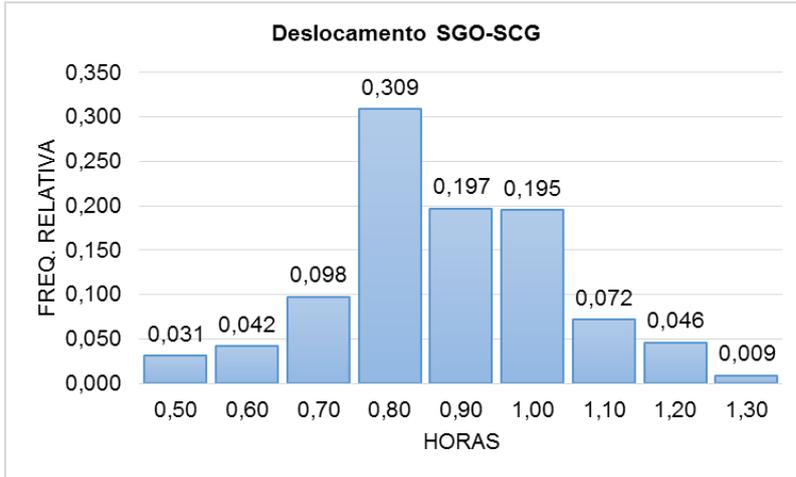


GRÁFICO 19 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO GOIOXIM (SGO) – CANTAGALO (SCG)
 FONTE: O autor (2016)

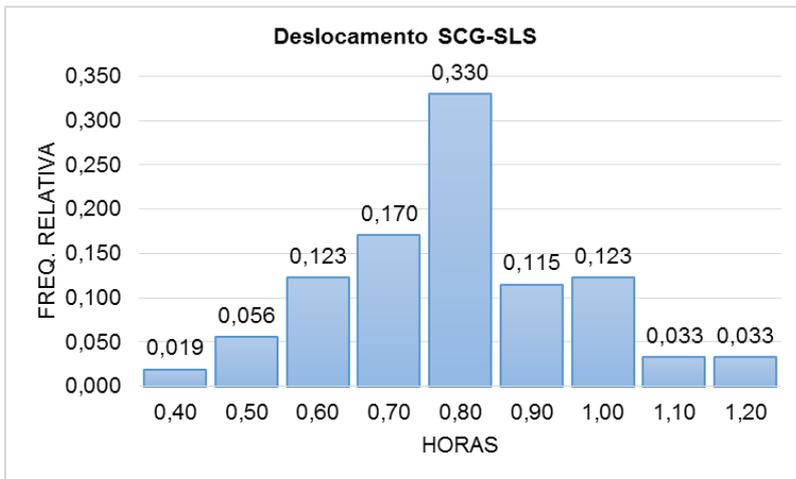


GRÁFICO 20 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO CANTAGALO (SCG) – LARANJEIRAS DO SUL (SLS)
 FONTE: O autor (2016)

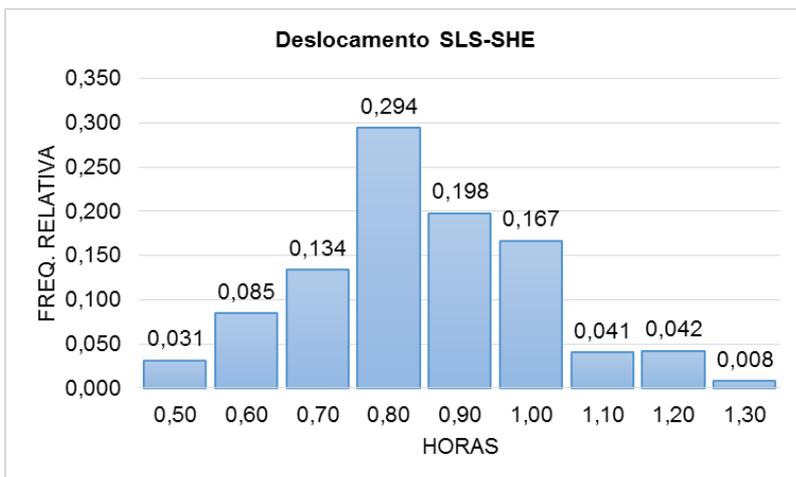


GRÁFICO 21 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO LARANJEIRAS DO SUL (SLS) – HERVEIRA (SHE)
 FONTE: O autor (2016)

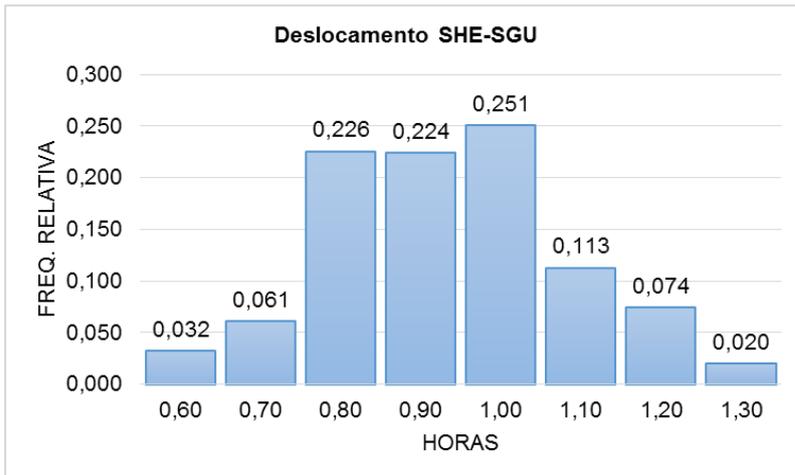


GRÁFICO 22 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO HERVEIRA (SHE) – GUARANIAÇU (SGU)
 FONTE: O autor (2016)

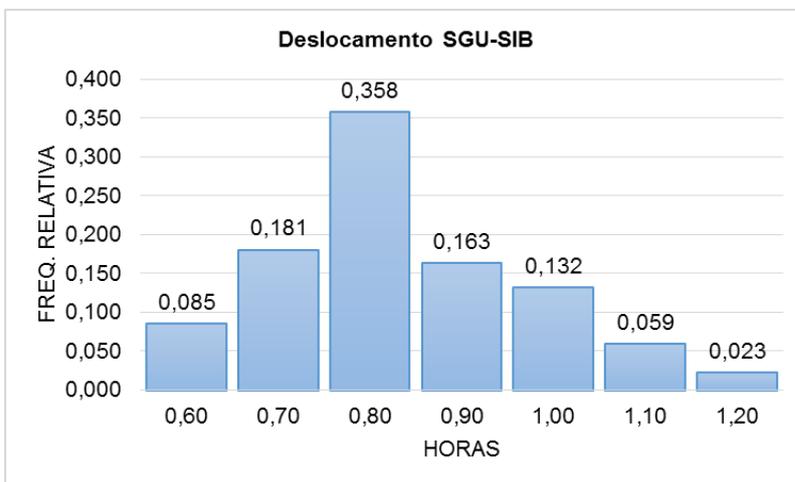


GRÁFICO 23 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO GUARANIAÇU (SGU) – IBEMA (SIB)
 FONTE: O autor (2016)

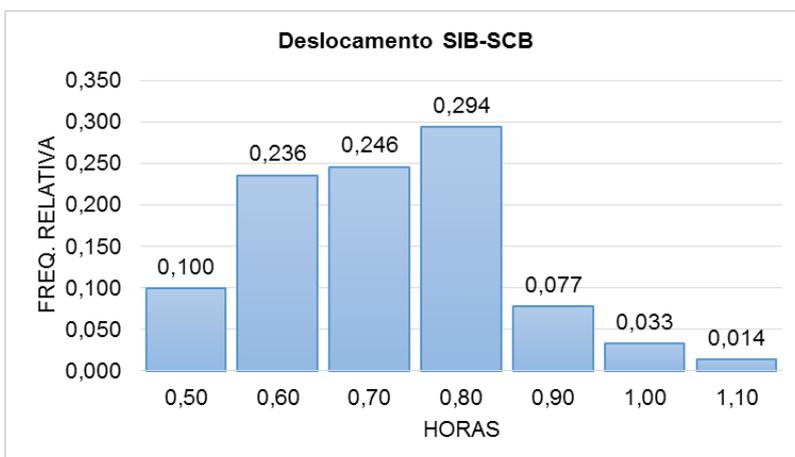


GRÁFICO 24 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO IBEMA (SIB) – CAMPO BONITO (SCB)
 FONTE: O autor (2016)

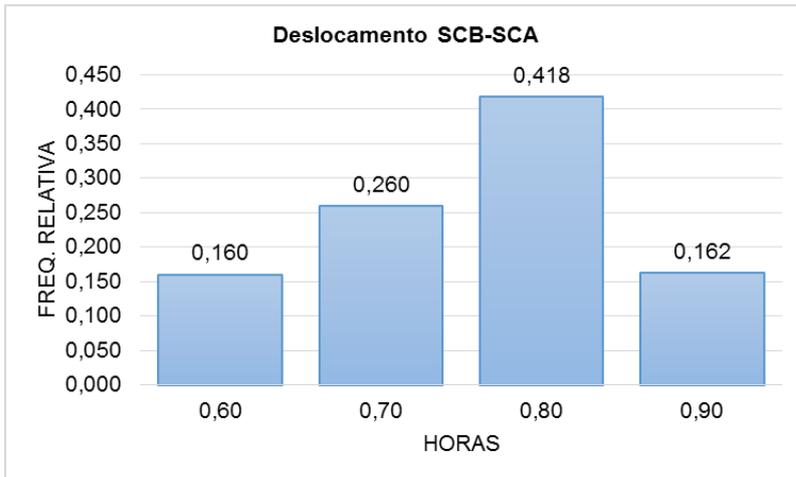


GRÁFICO 25 – TEMPO DE DESLOCAMENTO (SENTIDO IMPORTAÇÃO): TRECHO CAMPO BELO (SCB) – CASCAVEL (SCA)
 FONTE: O autor (2016)

3.2.4 Implementação do modelo computacional

A implementação do modelo computacional tem como referência o modelo conceitual apresentado anteriormente.

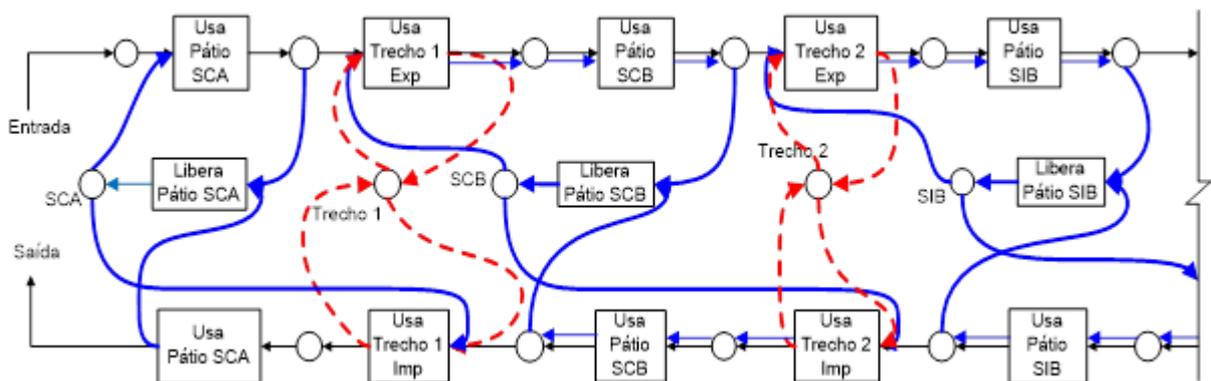


FIGURA 7 – MODELO CONCEITUAL – INÍCIO DO FLUXO DE EXPORTAÇÃO
 FONTE: O autor (2016)

A Figura 7 apresenta o início do fluxo de exportação e o término do fluxo de importação, e sua lógica operacional foi convertida em modelo computacional utilizando o *software* Simul8, conforme pode ser observado na Figura 9a.

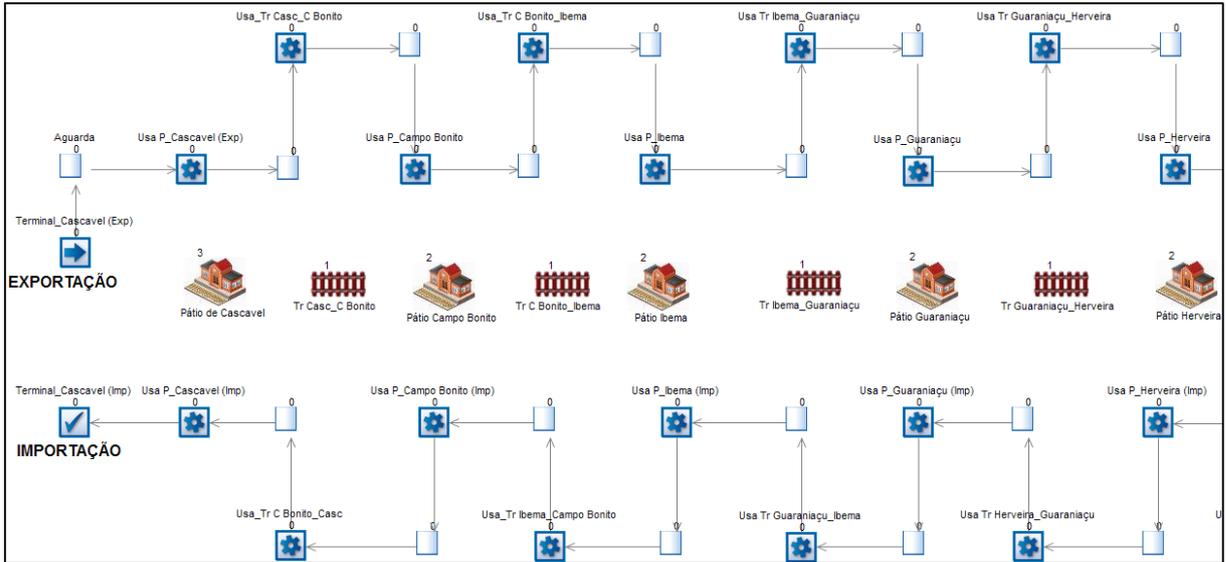


FIGURA 9a – MODELO COMPUTACIONAL – TRECHO CASCAVEL–HERVEIRA
 FONTE: O autor (2016)

O restante do modelo computacional implementado é apresentado nas Figuras 9b e 9c, as quais obedecem a lógica operacional existente no modelo conceitual. A Figura 9c apresenta o término do fluxo de exportação e o início do fluxo de importação.

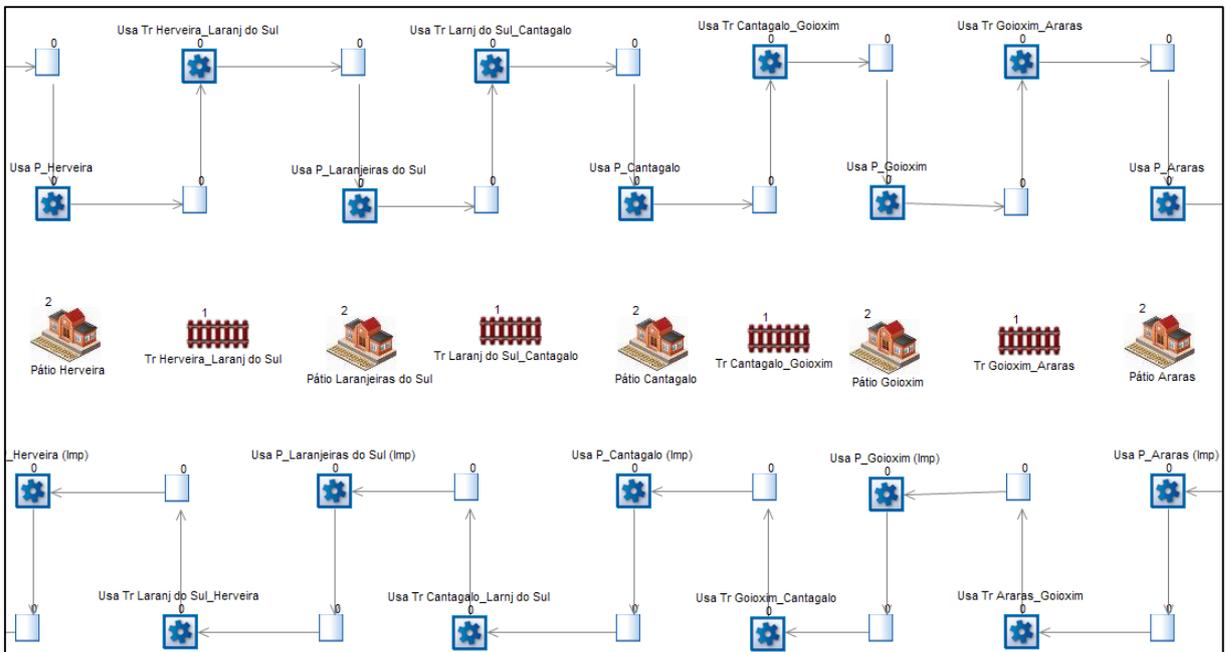


FIGURA 9b – MODELO COMPUTACIONAL – TRECHO HERVEIRA-ARARAS
 FONTE: O autor (2016)

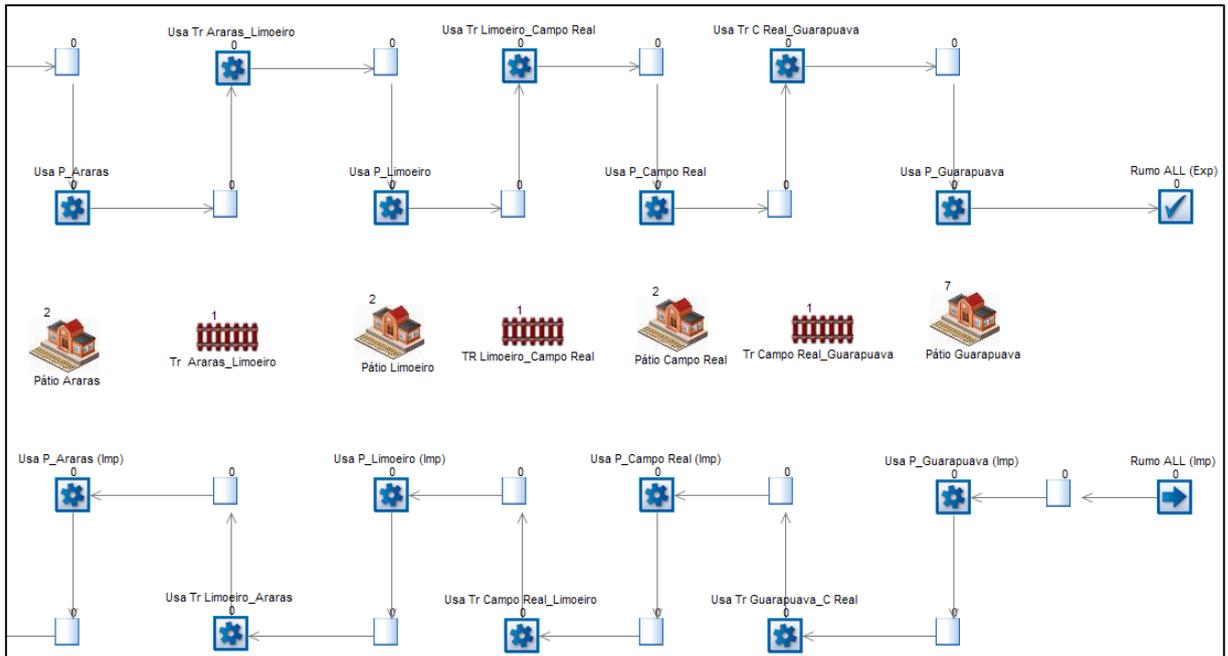


FIGURA 9c – MODELO COMPUTACIONAL – TRECHO ARARAS-GUARAPUAVA
 FONTE: O autor (2016)

As atividades ‘Terminal_Cascavel (Exp)’ e ‘Rumo ALL (Imp)’ são atividades de ‘entrada’, as quais possuem uma taxa de partida de trens com distribuição de probabilidades específicas, conforme apresentadas anteriormente.

Cada atividade ‘Usa Tr’ – Usa Trecho – possui seu intervalo de tempo específico de operação conforme definido ao final do tratamento estatístico dos dados operacionais da amostra, cujos histogramas apresentou-se anteriormente. No caso das atividades ‘Usa P_’ – Usa Pátio – o tempo de operação foi considerado instantâneo, face às simplificações adotadas na elaboração do modelo, no qual foi considerado o tempo médio de deslocamento entre pátios de manobra. Além disto, foi considerado que a ferrovia opera sob um regime 7/24, ou seja, operando 7 dias por semana em uma jornada de trabalho de 24 horas.

Neste momento em que se pode dar início à simulação do modelo computacional, se identifica que o sistema está vazio e livre. Assim, para ser possível validar o modelo operacional e realizar experimentações, deve-se definir o ‘período de aquecimento’ (*warm-up*), o momento em que o sistema está completamente ‘carregado’ e em equilíbrio (*steady state*).

Na definição do *steady state*, realizou-se a simulação do cenário operacional vigente em crescentes períodos de tempo de operação e, definiu-se como indicador

de desempenho o número de ‘trabalho concluído’, ou seja, ‘quantidade de trens no destino’, por ser o principal indicador a ser usado para responder o problema proposto.

Além disto, fez-se uso da ferramenta ‘*Trial Calculator*’ na opção ‘*Multiple Runs*’ do Simul8, que, de uma forma prática possibilita dimensionar o número adequado de replicações de um modelo (CHWIF *et al.*, 2015) de forma a garantir que a média do indicador de desempenho ‘quantidade de trens’ (*number completed*) varie, no máximo, 5% em relação aos respectivos valores médios, com o grau de confiança de 95%.

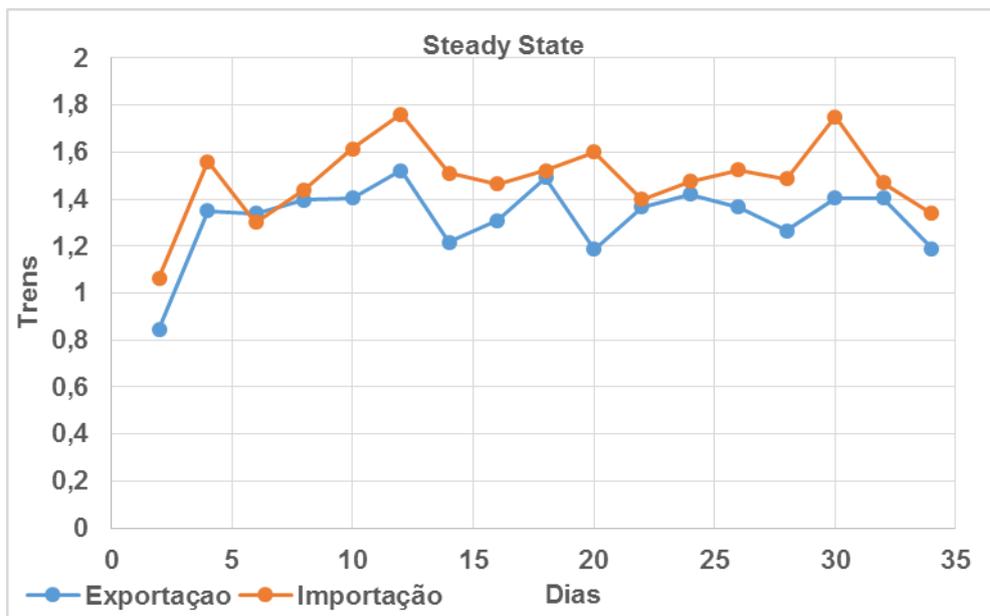


GRÁFICO 26 – STEADY STATE: NÚMERO TRENS/DIA – SIMUL8
 FONTE: O autor (2016)

A partir das condições apresentadas acima e com os dados obtidos na simulação, elaborou-se o Gráfico 26, onde consta a média diária de ‘trens no destino’ no sentido exportação e no sentido importação. A escolha do indicador ‘quantidade de trens’ foi definida em função de se obter coerência com o objetivo do modelo, que é identificar a quantidade máxima diária de trens que podem trafegar no sentido exportação e importação – cenário de exaustão operacional – e a sua validação (SARGENT, 2014).

Portanto, a partir dos dados plotados no Gráfico 26 considerou-se que o processo entra em equilíbrio (*steady state*) a partir do 10º dia. Tal escolha foi motivada a fim de se obter com segurança o equilíbrio do processo, além do que, o tempo de simulação gasto no *warm-up* é pequeno quando comparado ao tempo total de simulação.

Uma vez definido o período de *warm-up* e, considerando que apesar da implantação do modelo conceitual estar condicionada pelas limitações técnicas existentes no *software*, deve-se obter a maior aderência possível do modelo computacional com a realidade do processo operacional da linha férrea em estudo e, para isto, a validação do modelo deve ser realizada, conforme apresentado a seguir.

Apesar de Pidd (2004) considerar desnecessário realizar a validação do modelo computacional quando se usa *software* de simulação e de não se identificar recomendações de outros autores, optou-se por verificar o modelo computacional implementado no Simul8, considerado em conformidade após as seguintes ações:

- Verificado se o modelo computacional possui as filas de espera, atividades e recursos conforme previsto no modelo conceitual;
- Verificado se o modelo computacional, dentro das limitações do software, repete a lógica de emprego dos recursos e os seus vínculos conforme previsto no modelo conceitual;
- Verificado se as atividades no modelo computacional estão com as suas respectivas distribuições de probabilidade ou histogramas;
- Verificado se o tempo de *warm-up* foi adequadamente registrado no Simul8; e
- Verificado se o tempo de deslocamento dos recursos é nulo.

3.2.5 Validação do modelo operacional

Para a validação do modelo operacional – *warm-up* de 240 horas – foi realizada uma comparação dos dados de saída do modelo de simulação com os dados reais da operação do sistema, empregando teste de hipótese – teste z de duas amostras para a diferença entre médias (LARSON; FABER, 2010) – considerando que

das amostras das populações de tempo de deslocamento – do modelo computacional e da série histórica – obteve-se amostras independentes e com tamanho acima de 30 observações. Assim, foi possível obter uma conclusão objetiva, uma vez que se disponibiliza de quantidade de dados do sistema em estudo – operação de linha ferroviária – capaz de atender os requisitos estatísticos, em razão de ser um sistema observável.

Na realização do teste de hipótese, confrontou-se os resultados referentes ao tempo de deslocamento dos trens, da origem ao destino, obtidos a partir do modelo computacional – Tabela 3 – com os registros operacionais de junho de 2014 a maio de 2015 – Tabela 4 – a fim de avaliar o nível de fidelidade (aderência) do modelo à realidade operacional da linha férrea em estudo.

TABELA 3 – TEMPO DE DESLOCAMENTO DOS TRENS: MODELO COMPUTACIONAL

Dados Simulação (h)		
Mês	2 anos (17520h)	
Sentido	Exp	Imp
Média (x_1)	9,708	8,901
Desvio Padrão (σ_1)	0,6372	0,6457
Nº Observações (n_1)	968	1085

FONTE: O autor (2016)

O número de observações do modelo computacional foi obtido a partir da simulação de 2 anos – 17520 horas – em uma única replicação (*RUN*), e no caso da série histórica, do período de junho de 2014 a maio de 2015, o número de observações foi determinado a partir da retirada dos *outliers*.

TABELA 4 – DESLOCAMENTO DE TRENS (H): DADOS DE JUNHO DE 2014 A MAIO DE 2015

Dados Operacionais: tempo na linha férrea (h)		
Mês	Jun/14 a Maio/15	
Sentido	Exp	Imp
Média (x_2)	9,679	8,847
Desvio Padrão (σ_2)	0,9354	1,0112
Nº Observações (n_2)	1063	951

FONTE: O autor (2016)

Considerando que x_1 é a média amostral do tempo de deslocamento dos trens, gerada pelo modelo computacional e x_2 é a média amostral do tempo dos trens, obtida dos dados operacionais da linha férrea Cascavel-Guarapuava, foi realizado o teste de hipóteses.

Na realização do teste de hipótese considerou-se como hipótese nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$ e como hipótese alternativa $H_a: \mu_1 \neq \mu_2$, onde μ_1 é a média populacional do tempo de deslocamento dos trens e μ_2 é a média populacional do tempo de deslocamento dos trens.

Como resultado do teste de hipótese, apresentado na Tabela 5, pode-se concluir que no nível de significância de 5% há evidência suficiente para aceitar a hipótese nula. Em consequência, considera-se validado o modelo operacional e apto para a realização de experimentos.

TABELA 5 – TESTE DE HIPÓTESE: TEMPO DE DESLOCAMENTO DOS TRENS

Teste de Hipóteses		
Mês	Jun/14 a Maio/15	
Sentido	Exp	Imp
$\sigma_{x_1-x_2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma^2_1}{n_1}\right) + \left(\frac{\sigma^2_2}{n_2}\right)}$	0,0353	0,0382
$z = \frac{(x_1 - x_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sigma_{x_1-x_2}}$	0,8275	1,4080
$z_0 = \pm 2,575$ ($\alpha = 0,01$)	Aceita	Aceita
$z_0 = \pm 1,96$ ($\alpha = 0,05$)	Aceita	Aceita

FONTE: O autor (2016)

4 REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Conforme argumenta Krueger (1999), compreender capacidade – em uma ferrovia – é essencial para definir a quantidade de tráfego que pode ser movido em um sistema ferroviário, bem como o nível de serviço e confiabilidade que pode ser esperado. Considerando esta abordagem, realizou-se experimentos com a finalidade de investigar o cenário em que ocorre a exaustão operacional da linha férrea Cascavel-Guarapuava e, para isto, simulou-se a operação da linha férrea segundo um agendamento de partida de trens – Tabela 6 – em um período de 1 ano de operação ou 8.760 horas, com o número replicações determinado pela ferramenta ‘*Trial Calculator*’ na opção ‘*Multiple Runs*’ do Simul8 para cada rodada nos seguintes cenários:

- No presente cenário operacional, com partida de 1,337 trens/dia no sentido exportação e 1,503 trens/dia no sentido importação;
- No cenário em que ocorre a partida de 3 trens/dia, tanto no sentido exportação como no sentido importação;
- No cenário em que ocorre a partida de 5 trens/dia, tanto no sentido exportação como no sentido importação;
- No cenário em que ocorre a partida de 7 trens/dia, tanto no sentido exportação como no sentido importação;
- No cenário em que ocorre a partida de 9 trens/dia, tanto no sentido exportação como no sentido importação;
- No cenário em que ocorre a partida de 11 trens/dia, tanto no sentido exportação como no sentido importação; e

- No cenário em que ocorre a partida de 12 trens/dia, tanto no sentido exportação como no sentido importação;

TABELA 6 – AGENDAMENTO DE PARTIDA DE TRENS

Nr de trens/dia	Média de Intervalo de Partida (h)	Obs
1,337	17,951	Exportação
1,503	15,971	Importação
3	8,000	Exp/Imp
5	4,800	
7	3,429	
9	2,667	
11	2,182	
12	2	

FONTE: O autor (2016)

Para os cenários definidos acima foi considerado que os trens operam sob um regime 7/24, ou seja, operam 7 dias por semana em uma jornada de trabalho de 24 horas nos 365 dias/ano, bem como foi considerado a condição ideal de total disponibilidade da linha. Tais pressupostos tem por objetivo possibilitar a obtenção da Capacidade (Física) Teórica e as mesmas, não invalidam os critérios de análise de desempenho dos cenários, em especial a respeito da taxa de utilização dos recursos. Uma menor disponibilidade de dias – horas – de operação implica que se deve realizar planejamento com uma menor quantidade total de trens transportando cargas anualmente.

Para operacionalizar os cenários, inicialmente determinou-se o intervalo de partida dos trens, ou seja, o agendamento de partidas de trens, conforme apresentado na Tabela 6. Para o cenário operacional vigente, os intervalos de partida foram definidos pelos dados reais, os quais determinaram as distribuições de probabilidade mostradas no Gráfico 2, para a exportação, e no Gráfico 14, para a importação.

Dado que o objetivo da pesquisa é avaliar a capacidade da operacional da ferrovia, empregou-se partidas regulares – programadas – de trens (SMS, 2008) para os demais cenários, ou seja, o intervalo de partida dos trens foi determinado em função do número de trens/dia, que por sua vez, definiu o valor (horas) da distribuição *average*, a qual foi adotada para caracterizar o intervalo de partida de trens, tanto para a exportação como para importação, em razão de sua flexibilidade característica, pois segundo Chwif *et al.* (2015, p. 55), a distribuição *average* “é uma distribuição normal

com o coeficiente de variação pré-definido em 25%, ou seja, o desvio padrão vale 25% do valor da média”.

Uma vez definido o intervalo regular de partida de trens foi possível elaborar três tipos de gráficos a partir das simulações no modelo operacional dos cenários definidos anteriormente. Nos gráficos constam a medida de desempenho do tempo médio de deslocamento do trem da origem ao destino, do número médio de trens e a porcentagem de utilização do recurso ‘linha’, todos em função da partida diária de trens – número de trens/dia – e obtidos empregando a ferramenta ‘*Trial Calculator*’ na opção ‘*Multiple Runs*’ do Simul8, fim de que os indicadores variem, no máximo, 5% em relação aos respectivos valores médios, em um grau de confiança de 95%.

Subsidiariamente, a fim de caracterizar a precisão dos valores do tempo médio de deslocamento de cada cenário foram elaborados os intervalos de confiança de 95% – Tabela 7 e Tabela 8.

TABELA 7 – INTERVALO DE CONFIANÇA: TEMPO MÉDIO NA LINHA – SENTIDO EXPORTAÇÃO

Nr de trens/dia	Limite Esquerdo (h)	Tempo Médio na Linha (h)	Limite Direito (h)	Desvio Padrão (h)
1,34	9,66	9,7	9,72	0,6392
3	9,90	9,92	9,95	0,6881
5	10,25	10,29	10,33	0,8222
7	10,63	10,68	10,74	0,9005
9	11,19	11,22	11,26	1,0178
11	12,29	12,37	12,46	1,3633
12	14,84	14,99	15,15	2,6657

FONTE: O autor (2016)

TABELA 8 – INTERVALO DE CONFIANÇA: TEMPO MÉDIO NA LINHA – SENTIDO IMPORTAÇÃO

Nr de trens/dia	Limite Esquerdo (h)	Tempo Médio na Linha (h)	Limite Direito (h)	Desvio Padrão (h)
1,50	8,86	8,89	8,92	0,6430
3	9,28	9,31	9,34	0,7439
5	9,65	9,67	9,68	0,8804
7	10,09	10,10	10,12	0,9493
9	10,68	10,72	10,76	1,0889
11	12,00	12,06	12,12	1,4771
12	14,57	14,73	14,89	2,7186

FONTE: O autor (2016)

O Gráfico 27, elaborado a partir dos dados das simulações, apresenta a relação do tempo médio do trem na linha em função do número de trens/dia previsto nos cenários apresentados anteriormente. Observa-se que, conforme ocorre a

saturação da linha com trens em trânsito, há o incremento do tempo médio na linha – tempo de deslocamento do trem.

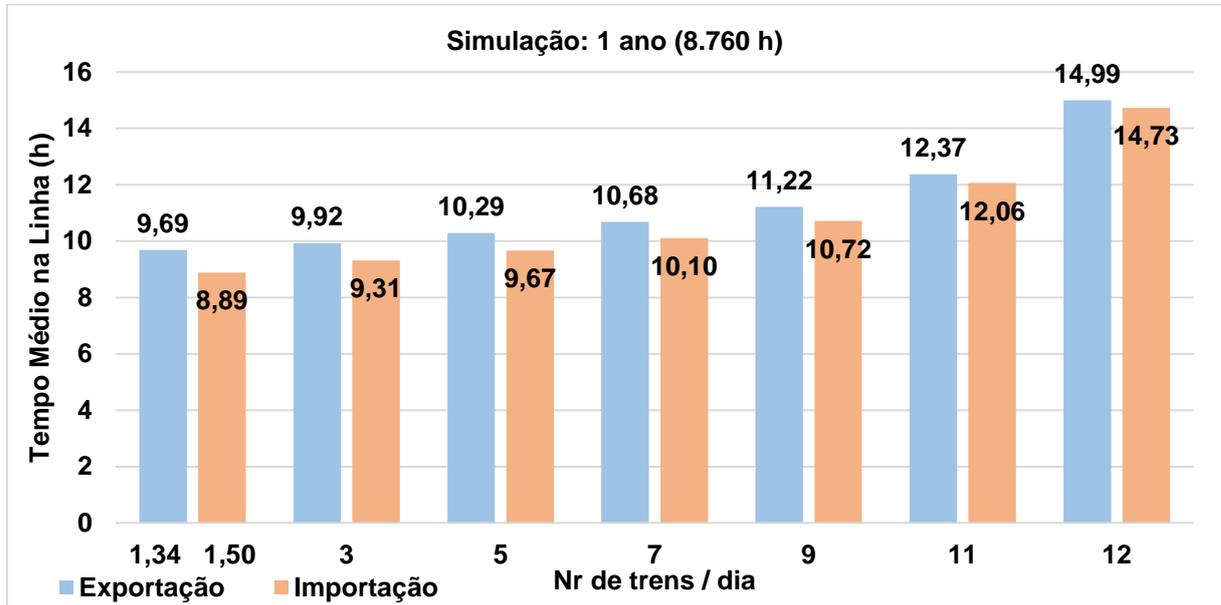


GRÁFICO 27 – TEMPO MÉDIO NA LINHA X NÚMERO DE TRENS / DIA
 FONTE: O autor (2016)

Pode-se verificar no Gráfico 27 que o incremento no tempo médio na linha entre cenários no sentido exportação varia de 0,23 horas até 2,62 horas, do atual cenário de operação – 1,34 trens/dia – para o cenário de 3 trens/dia, e do cenário de 11 para 12 trens/dia, respectivamente.

Tais dados indicam que os incrementos iniciais na quantidade de trens/dia usando a ferrovia, não geram significativos aumento no tempo de deslocamento e na redução da velocidade média comercial, entretanto, são significativos quando a quantidade passa de 11 para 12 trens/dia em operação.

Em outras palavras, para um incremento inicial de 1,66 trens/dia há acréscimo de aproximadamente 14 minutos no tempo médio na linha, e para o incremento de 1 trem/dia – cenário de 11 para 12 trens/dia – há acréscimo de 2 horas e 37 minutos aproximadamente, no tempo médio na linha.

Ainda no Gráfico 27, identifica-se que o incremento no tempo médio na linha entre cenários no sentido importação varia de 0,42 horas até 2,67 horas, do atual cenário de operação – 1,34 trens/dia – para o cenário de 3 trens/dia, e do cenário de 11 para 12 trens/dia, respectivamente.

Tais dados indicam que os incrementos iniciais na quantidade de trens/dia em operação, não geram significativos aumento no tempo de deslocamento e na redução da velocidade média comercial, entretanto, são significativos ao se passar a operação de 11 para 12 trens/dia.

Em outras palavras, para um incremento inicial de 1,5 trens/dia há acréscimo de aproximadamente 25 minutos no tempo médio na linha, e para o incremento de 1 trem/dia – cenário de 11 para 12 trens/dia – há acréscimo de 2 horas e 40 minutos aproximadamente, no tempo médio na linha.

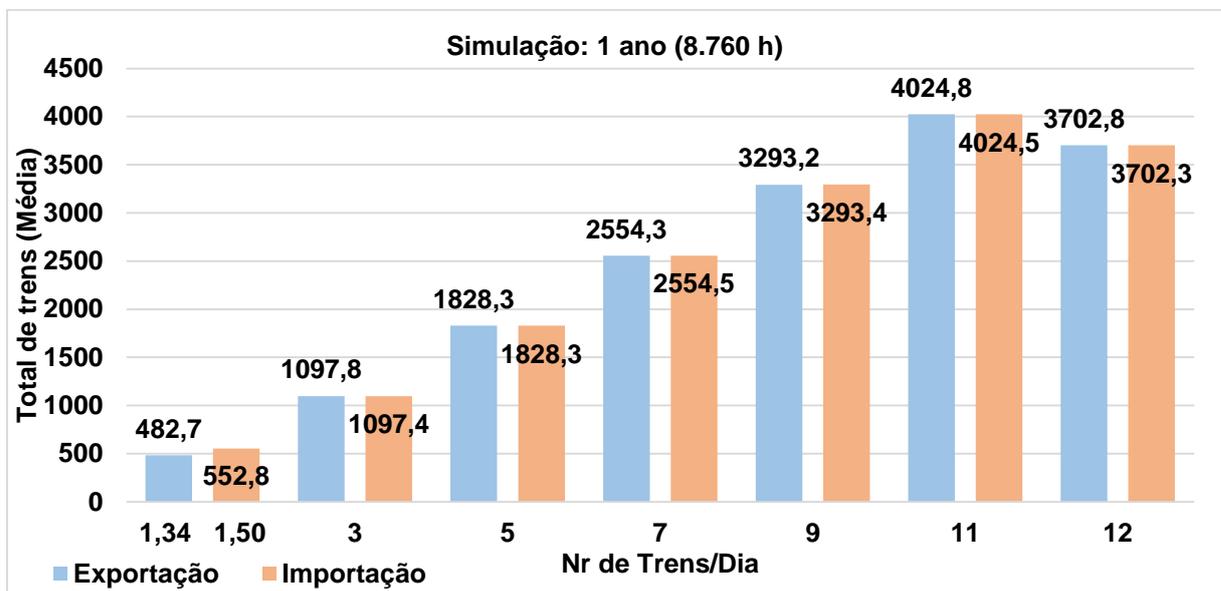


GRÁFICO 28 – TOTAL DE TRENS (MÉDIO) X NÚMERO DE TRENS / DIA
 FONTE: O autor (2016)

O segundo gráfico – Gráfico 28 – apresenta a relação do total médio de trens que transitaram em 1 ano – 8.760 h – na linha férrea em função do número de trens/dia, conforme cenários apresentados anteriormente.

Identifica-se no Gráfico 28, que nos cenários de 3 a 12 trens/dia, o total médio de trens que podem trafegar na linha, em um período de 1 ano, é praticamente o mesmo, tanto na exportação, como na importação. Isto ocorre em razão dos intervalos de partida serem idênticos e realizados no mesmo horário agendado.

Identifica-se também que a ferrovia em estudo possui um limite máximo de aproximadamente 4025 trens, possíveis de trafegar na linha férrea em um período de 1 ano, portanto, no cenário em que há o tráfego de 11 trens/dia ocorre a exaustão operacional da linha férrea.

O terceiro tipo de gráfico está dividido no Gráfico 29 e no Gráfico 30 para melhor visualização e análise dos dados. Nestes gráficos são apresentados o nível de utilização média do recurso ‘linha’ – trechos de ferrovia entre pátios de manobra – em cada cenário em estudo.

No Gráfico 29 são apresentados os dados referentes aos cenários da operação atual e os referentes à circulação de 3, 5 e 7 trens/dia e no Gráfico 30, os referentes aos demais cenários. O valor de 100% de utilização indica que o recurso é permanentemente empregado, ou seja, não há tempo ocioso.

Além da divisão em dois gráficos para melhor visualização, adotou-se um limite superior na escala percentual de utilização de 60% no Gráfico 29 e, no Gráfico 30, um intervalo nesta escala percentual, de 30% a 100%. Deve-se atentar que com o incremento da saturação da ferrovia pelo aumento da frequência do número de trens em trânsito, ocorre a elevação do nível de utilização do recurso ‘linha’.

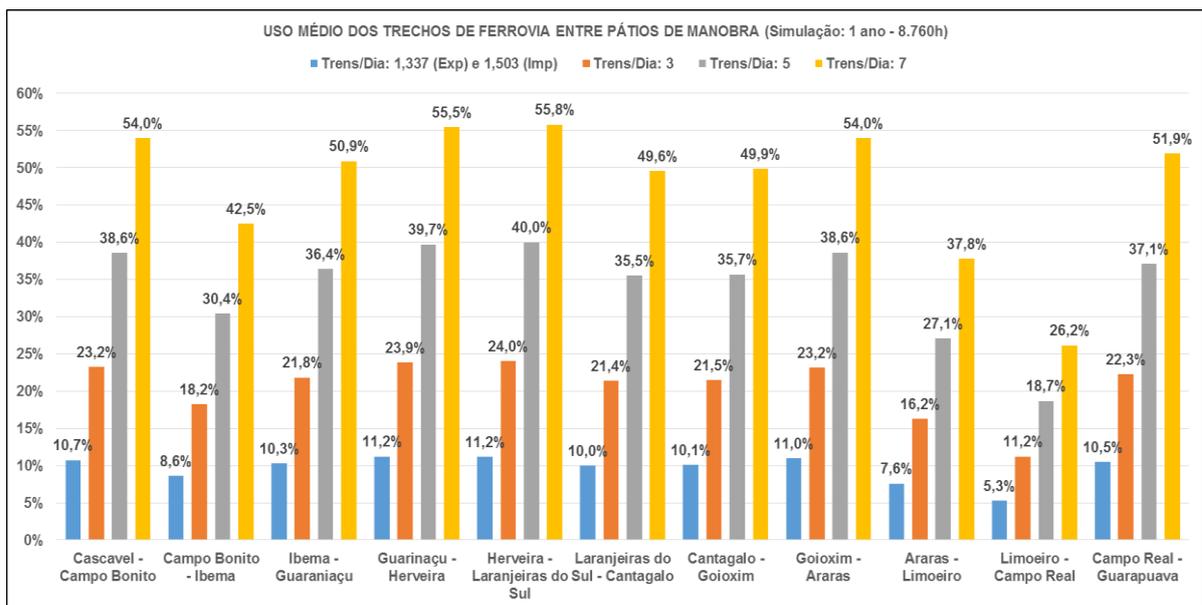


GRÁFICO 29 – USO DO RECURSO ‘LINHA’ X NÚMERO DE TRENS / DIA – CENÁRIO ATUAL E CENÁRIOS COM 3, 5 E 7 TRENS/DIA
 FONTE: O autor (2016)

A partir dos dados do Gráfico 29, identifica-se que no cenário de 7 trens/dia o nível médio de utilização do recurso ‘linha’ em 8 trechos está em torno 52% de utilização do tempo disponível e nos trechos Campo Bonito-Ibema, Araras-Limoeiro e Limoeiro-Campo Real o nível médio de utilização é respectivamente, 42,5%, 37,8% e 26,2%. Tal condição no cenário em tela, aponta que há Capacidade Disponível na linha férrea Cascavel-Guarapuava.

Especificamente, ao se contextualizar o cenário de 7 trens/dia identifica-se que:

- Em relação ao atual cenário operacional, o tempo médio na linha tem um acréscimo de 10,22% – de 9,69h para 10,68h – no sentido exportação e de 13,61% – de 8,89h para 10,10h – no sentido importação;
- O total de número de trens possui um acréscimo de 429,88% no sentido exportação – de 482 para 2554 – e de 362,68% no sentido importação – de 552 para 2554; e
- O trecho do recurso ‘linha’ mais solicitado é o trecho entre o Pátio de manobra Herveira e o de Laranjeiras do Sul, com 55,8% de utilização do tempo disponível, seguido do trecho entre o Pátio de manobra Guaraniãçu e o de Herveira, com 55,5% de utilização do tempo disponível, e que o trecho do recurso ‘linha’ menos solicitado é o trecho entre o Pátio de manobra Limoeiro e o de Campo Real, com 26,2% de utilização do tempo disponível.

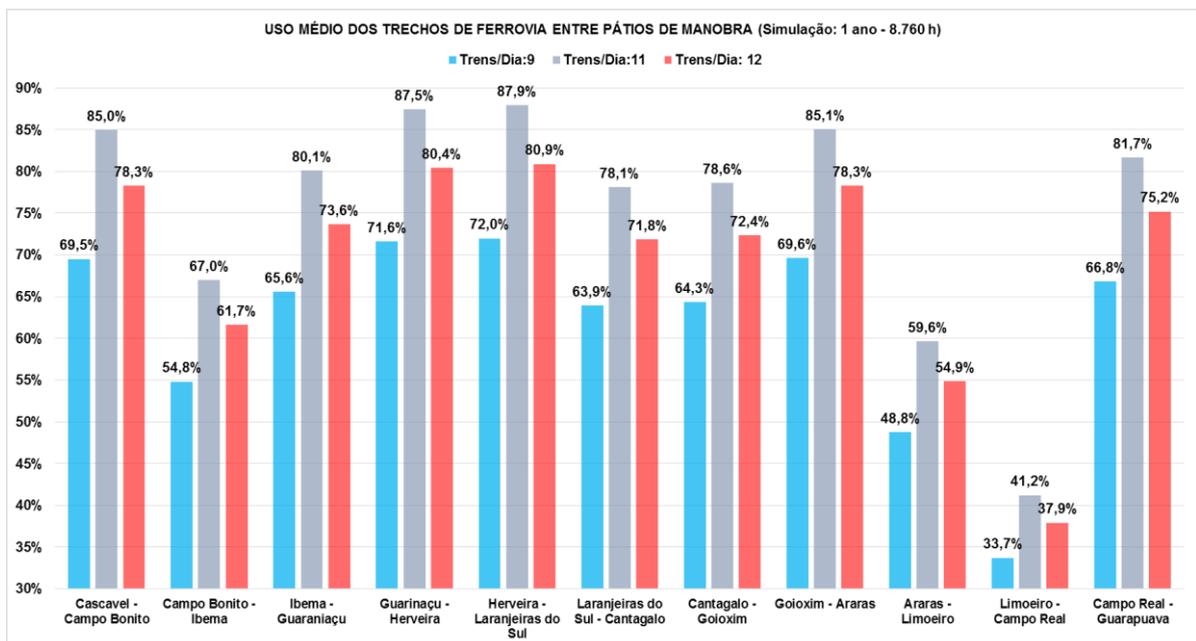


GRÁFICO 30 – UTILIZAÇÃO DO RECURSO ‘LINHA’ X NÚMERO DE TRENS / DIA – CENÁRIOS COM 9, 11 E 12 TRENS/DIA
 FONTE: O autor (2016)

Ao se analisar os dados do Gráfico 30, identifica-se que no cenário de 12 trens/dia, o nível médio de utilização do recurso 'linha' em 8 trechos varia de 71,8% a 80,9% de utilização do tempo disponível e nos trechos Campo Bonito-Ibema, Araras-Limoeiro e Limoeiro-Campo Real é respectivamente, 61,7%, 54,9% e 37,9%. Verifica-se que estes níveis de utilização do recurso 'linha' são inferiores aos apresentados no cenário de 11 trens/dia.

Portanto, faz-se necessário realizar uma contextualização do cenário de 11 trens/dia, no qual se identifica que:

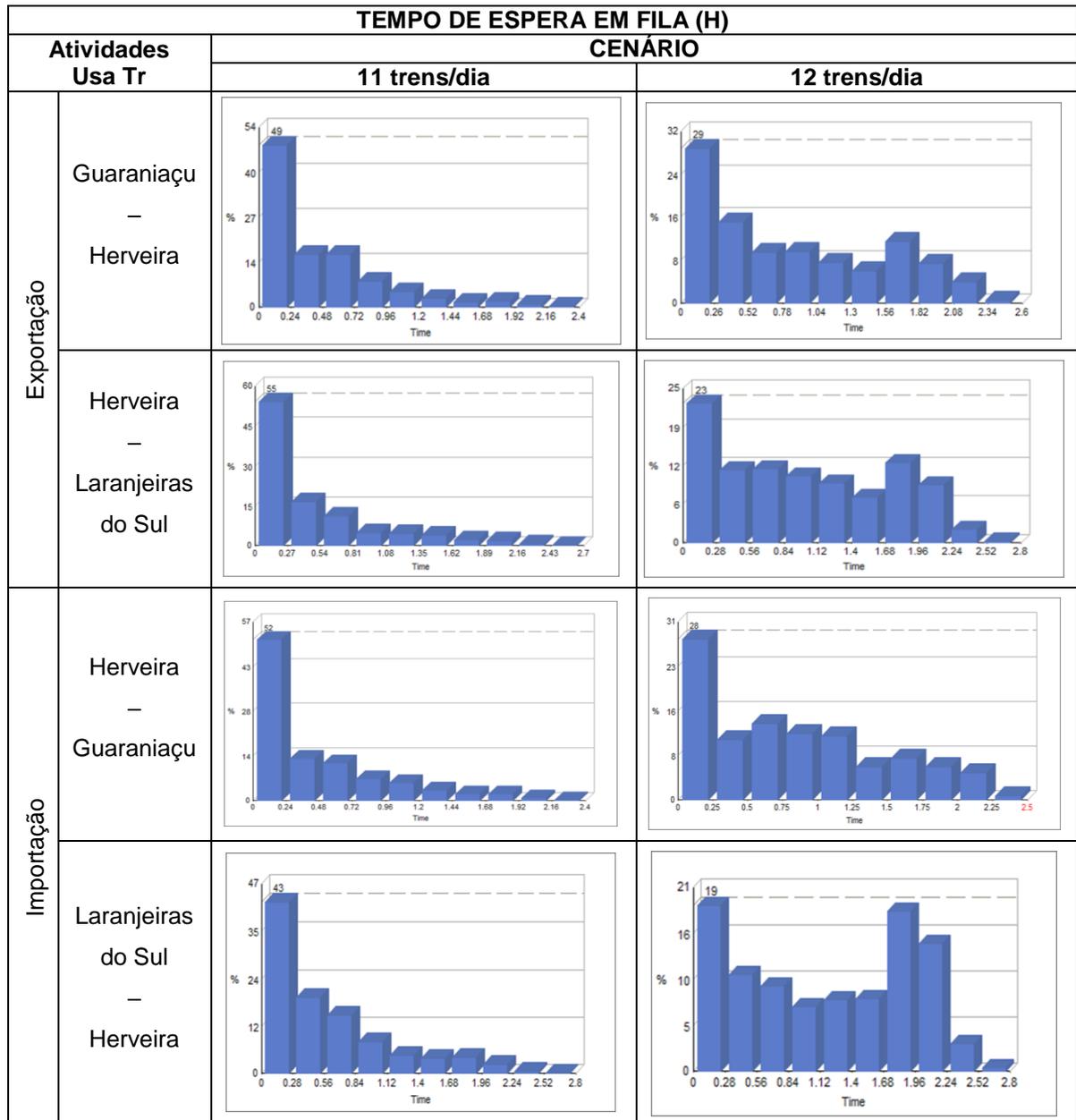
- Em relação ao atual cenário operacional, o tempo médio na linha tem um acréscimo de 27,66% – de 9,69h para 12,37h – no sentido exportação e de 35,66% – de 8,89h para 12,06h – no sentido importação;
- O total de número de trens possui um incremento de 734,86% no sentido exportação – de 482 para 4024 – e de 628,99% no sentido importação – de 552 para 4024; e
- O trecho do recurso 'linha' mais solicitado é trecho entre o Pátio de manobra Herveira e o de Laranjeiras do Sul, com 87,9% de utilização do tempo disponível, seguido do trecho entre o Pátio de manobra Guaraniaçu e o de Herveira, com 87,5% de utilização do tempo disponível, e que o trecho do recurso 'linha' menos solicitado é o trecho entre o Pátio de manobra Limoeiro e o de Campo Real, com 41,2% de utilização do tempo disponível.

Por fim, para melhor caracterizar e identificar o cenário em que ocorre a exaustão operacional da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava, elaborou-se o Quadro 10, onde consta histogramas dos tempos de espera em fila para atividades 'Usa Tr' (Usa Trecho) referentes aos trechos entre os pátios de manobra Guaraniaçu e Herveira, e entre os pátios de manobra Herveira e Laranjeiras do Sul.

Em cada um destes trechos, o recurso 'linha' possui as mais elevadas percentagens de utilização do tempo disponível na operação a linha férrea. A análise destes trechos críticos permite caracterizar o cenário onde ocorre a exaustão

operacional da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava e, portanto, definir o seu limite operacional, que é o problema da presente pesquisa.

Desta forma, considera-se desnecessário apresentar dados referentes aos tempos de espera em fila para atividades ‘Usa Tr’ (Usa Trecho) dos demais trechos entre pátios de manobra nos diferentes cenários.



QUADRO 10 – TEMPO DE ESPERA EM FILA PARA ATIVIDADES: USA TR GUARANIAÇU_HERVEIRA, USA TR HERVEIRA_LARANJEIRAS DO SUL, USA TR HERVEIRA_GUARANIAÇU, USA TR LARANJEIRAS DO SUL_ HERVEIRA.
 FONTE: O autor (2016)

Do estudo dos dados existente no Quadro 10 identificou-se que o cenário com 11 trens/dia é o cenário em que ocorre a exaustão operacional da linha férrea singela

Cascavel-Guarapuava, em razão de que, no cenário com 12 trens/dia, quando comparado ao cenário com 11 trens/dia, ocorre a redução do número médio total de trens – Gráfico 28 – o aumento de tempo médio na linha – Gráfico 27 – e a redução do uso médio do recurso ‘linha’ – Gráfico 30.

A redução do número médio total de trens, o aumento de tempo médio na linha e a redução do uso médio do recurso ‘linha’ são consequências da geração de filas, conforme pode ser observado no Quadro 10, as quais surgem em função da incapacidade do sistema – linha férrea – de atender a demanda de 12 trens/dia.

O incremento sistemático do número de trens trafegando diariamente na ferrovia Cascavel-Guarapuava, tanto no sentido exportação como no sentido importação, possibilitou compreender o comportamento operacional da referida ferrovia.

Os incrementos iniciais em trens/dia, quando ocorre acréscimo em torno de 10% no tempo de deslocamento, permitem incrementar em aproximadamente 5 vezes mais o número de trens transitando anualmente na ferrovia, como pode ser observado ao se passar do cenário atual de operação para o cenário de 7 trens/dia – Gráficos 27 e 28.

Entretanto, ganhos posteriores em números de trens transitando anualmente na ferrovia irão requerer maior uso dos recursos, em especial do recurso ‘linha’, o que implicará em maior tempo de deslocamento e formação de filas de espera para uso dos recursos. Por conseguinte, como o tempo disponível dos recursos é limitado, haverá um momento em que a ferrovia entra em colapso – fica exaurida – o que ocorre no cenário com 11 trens/dia, conforme pode ser observado nos Gráficos 27, 28 e 30.

5 CONCLUSÃO

Em razão do desequilíbrio atual da matriz de transporte de cargas brasileira, é desejável fazer uso de forma mais intensiva do modal ferroviário. O uso mais intensivo do modal não significa realizar investimento na ampliação da infraestrutura do modal, haja vista ser mais vantajoso economicamente esgotar a Capacidade Prática da infraestrutura existente do modal ferroviário. Por conseguinte, faz-se necessário identificar a existência de Capacidade Disponível, o que pode ser obtido empregando metodologia de modelagem e simulação na operação da linha férrea.

Assim, tal metodologia foi empregada na operação da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava, com desenvolvimento de modelos, os quais foram devidamente validados e verificados, e realizados simulações de diversos cenários. A metodologia permitiu identificar o cenário de 11 trens/dia como o que define, em 2015, o limite da capacidade operacional em número de trens/dia, além dos gargalos operacionais existentes na referida linha férrea.

A partir dos resultados de simulação, no cenário com partidas programadas de 11 trens/dia – no sentido exportação e no sentido importação – sob um regime de operação de 24h/dia e 7dias/semana, é possível operar em 1 ano, aproximadamente 4024 pares de trens – exportação e importação. Quanto ao gargalo operacional, o recurso ‘linha’ no trecho mais solicitado foi usado 87,9% do seu tempo disponível.

Neste cenário de 11 trens/dia é provável haver necessidade de modificar os atuais critérios operacionais em razão dos trechos mais solicitados disporem de baixíssima disponibilidade de tempo, além do que, o tempo de operação médio na linha férrea ser superior a 12 horas.

No caso em que o cenário de partidas programadas são 7 trens/dia – no sentido exportação e no sentido importação – sob um regime de operação de 24h/dia e 7dias/semana, será possível operar em 1 ano, aproximadamente 2550 pares de trens – exportação e importação. O recurso ‘linha’ no trecho mais solicitado utiliza 55,5% do seu tempo disponível.

Neste cenário de 7 trens/dia não se identifica a necessidade de modificar os atuais critérios operacionais em razão do trecho mais solicitado ainda dispor de elevada disponibilidade e o tempo médio na linha (deslocamento do trem) variar em um intervalo de 10,09h a 10,74h – Tabela 7 e 8.

A partir do exposto acima, estima-se que a Capacidade (Física) Teórica da linha férrea é o trânsito de 22 trens/dia – 11 no sentido exportação e 11 no sentido importação. Por conseguinte, determina-se a Capacidade Prática de forma simplificada, como 2/3 da Capacidade Teórica (KRUEGER, 1999), ou seja, a Capacidade Prática da linha férrea singela Cascavel-Guarapuava é 7,33 trens/dia. Tal capacidade é factível nas atuais condições de operação – 2015 – conforme argumentos apresentados anteriormente. Consequentemente, determina-se que a Capacidade Disponível é de 4 a 5 trens/dia.

Quanto aos gargalos operacionais do sistema – linha férrea – identifica-se que os principais são os seguintes trechos, em ordem decrescente de criticidade: Herveira-Laranjeiras do Sul, Guaraniaçu-Herveira, Goioxim-Araras, Cascavel-Campo Bonito, Campo Real-Guarapuava e Ibema-Guaraniaçu. Tais trechos se tornam mais demandados à medida que ocorre o incremento no número de trens/dia em operação e no cenário de 11 trens/dia possuem ocupado, mais de 80% de seu tempo disponível.

Conclui-se que a metodologia de modelagem e simulação empregada no presente trabalho de pesquisa permitiu desenvolver um modelo confiável e com suficiente flexibilidade para ser adaptado à diferentes perfis operacionais, inclusive, para emprego de diferentes tipos de trens. Destaca-se também que a simulação empregando o *software* Simul8 mostrou-se uma ferramenta viável, de fácil manuseio e capaz de fornecer indicadores de desempenho que identificam gargalos e folgas na operação da linha férrea, tanto assim, que os trechos identificados como gargalos no presente trabalho de pesquisa.

Para os futuros trabalhos de pesquisa sugere-se que sejam incluídos os seguintes objetivos:

- Ampliar o sistema em estudo, incluindo a montagem, desmontagem, carga e descarga de trens, bem como a operação de preparação, transporte e armazenagem de grãos e/ou demais cargas nos terminais ferroviários;
- Incremento da produtividade – tonelada transportada – com o aumento da capacidade de tração e respeitada as atuais condições operacionais;
- Incremento da produtividade – tonelada transportada – com o aumento da capacidade de tração e/ou redução do tempo de deslocamento em trechos da linha férrea, como por exemplo: redução em 10% do tempo de trânsito no trecho Herveira-Laranjeiras do Sul, dado ser um trecho que restringe a capacidade da linha;

- Identificar o limite da produtividade definida pelas restrições de comprimento da composição – locomotivas e vagões – impostas pelas características técnicas da linha férrea, entre as quais, o comprimento dos ramais – desvios – nos pátios de manobra;
- Ampliar a quantidade de ramais em pátios de manobra, como o de Herveira, que está associado aos trechos de linha que restringem a capacidade da ferrovia;
- Duplicar trecho de linha, como o de Herveira-Laranjeiras do Sul;
- Desenvolver um planejamento operacional anual para a linha férrea Cascavel-Guarapuava considerando a recorrência das interrupções de operação da ferrovia;
- Identificar vantagens e desvantagens para a operação a partir da adoção de quadro-horário de partida de trens;
- Determinar a melhor composição de trem-tipo para diferentes períodos de demanda.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT).

Acompanhamento das Concessões Ferroviárias: relatório anual 2012. maio 2013. Disponível em:

<<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4994/Relatorios.html#lista>>. Acesso em: 3/2/2016

_____. **Acompanhamento das Concessões Ferroviárias:** relatório anual 2013. maio 2014. Disponível em:

<<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4994/Relatorios.html#lista>>. Acesso em: 2/2/2016

_____. **Declaração de Rede 2015:** Estrada de Ferro Paraná Oeste. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/25863/Declaracao_de_Rede.html#lista>. Acesso em: 1/4/2015.

_____. **Evolução do Transporte Ferroviário 2015.** out. 2015. Disponível em:

<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/15884/Evolucao_do_Transporte_Ferroviario.html>. Acesso em: 1/12/2015.

_____. **Relatório Anual do Acompanhamento das Concessões Ferroviárias 2007.** set. 2008. Disponível em:

<<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4994/Relatorios.html#lista>>. Acesso em: 1/12/2015

_____. **Relatório Anual 2006.** Disponível em:

<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4880/Relatorios_Anuais.html#lista>. Acesso em: 20/8/2014.

_____. **Relatório Anual 2014.** Disponível em:

<http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4880/Relatorios_Anuais.html#lista>. Acesso em: 6/2/2016.

ALICEWEB. Disponível em: < <http://aliceweb.mdic.gov.br//index/home>>. Acesso em: 4/2/2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ABEPRO).
Disponível em:
<<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&ss=1&c=362>>. Acesso em:
27/03/2016.

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. Discrete-event system simulation. 4th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

BARAT, J. Infraestruturas de logística e transporte: análise e perspectivas. In: SILVEIRA, M. R. (Org.). **Circulação, transportes e logísticas**: diferentes perspectivas. São Paulo: Outras Expressões, 2011. p. 217-246.

BATISTA, C. N. O. **Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006. Disponível em:
<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-28092006-143106/pt-br.php>>. Acesso em: 14/04/2015.

BRASIL. Decreto n. 96.913, de 03 de outubro de 1988. Outorga concessão à Estrada de Ferro Paraná Oestes S. A. – FERROESTE para construção, uso e gozo da estrada de ferro que menciona e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 30 out. 1988. Disponível em:
<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D96913impressao.htm>. Acesso em: 18/03/15.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 4. ed. São Paulo: Atual, 1987 (Métodos Quantitativos).

CAMARGO, P. V.; CUNHA, C. B. **Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de granéis em ciclo fechado**. Journal of Transport Literature, vol. 6, n. 2, p. 33-65. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2238-10312012000200003&lng=pt&nrm=iso&tling=en>. Acesso em: 25/09/14.

CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção**: uma abordagem causal. 139 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. Disponível em:
<www.researchgate.net/.../53d7a04e0cf2631430bfbb01.pdf>. Acesso em:
22/09/2014

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & prática**. 2. ed. São Paulo: Ed dos Autores, 2006.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C.; VIEIRA, D. R.; PÉCORÁ JUNIOR, J. E.; PEREIRA, W. I. **Introdução ao Simul8: um guia prático**. 1. ed. atual. São Paulo: Ed. dos Autores, 2015. Disponível em: <www.livrosimulacao.eng.br>. Acesso em: 11/9/2015

CONCANNON, Kieran; et. al. **Simulation Modeling with Simul8**. Canada: e-impressions Inc., 2007.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Plano CNT de transporte e logística 2014**. Brasília: CNT, 2014. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Plano-CNT-de-Log%C3%ADstica.aspx>>. Acesso em: 18/8/2014.

_____. **Transporte e economia – o sistema ferroviário brasileiro**. Brasília: CNT, 2013. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Paginas/Transporte-e-Economia.aspx>>. Acesso em: 03/8/2015.

CREMONESE, D. T. **Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-16122014-154937/pt-br.php>>. Acesso em: 1/2/2015.

ESTRADA DE FERRO PARANÁ OESTE S. A. (FERROESTE). Disponível em: <<http://www.ferroeste.pr.gov.br/>>. Acesso em: 18/03/15.

FIORONI, M. M. **Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições**. 255 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Ed. rev. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-03062008-180002/pt-br.php>>. Acesso em: 1/4/2015.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

KRUEGER, H. **Parametric Modeling in Rail Capacity Planning**. In: Proceedings of 1999 Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix, AZ. pp 1194-1200. Disponível em: < <http://www.informs-sim.org/wsc99papers/173.PDF>>. Acesso em: 31/01/16.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. Tradução de: VIANNA, Luciane F. P. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

MARINOV, M.; VIEGAS, J. **A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network**. Simulation Modelling Practice and Theory. 2010. Disponível em: <<http://202.114.89.42/resource/pdf/4991.pdf>>. Acesso em: 16/04/2015.

MARTINS, R. S. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: MIGUEL, P. A. C (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia da produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. p. 47-63.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (MT). **Logistic Infrastructure Scenario in Brazil**. Minneapolis, setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/1425-investimentos-na-infraestrutura-de-transporte-do-brasil.html>>. Acesso em: 5/4/2016.

_____. **Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT – Relatório Final**. Brasília, setembro de 2012. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/3254>>. Acesso em: 17/8/2013.

_____. **Relatório Executivo do Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT 2009**. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/conteudo/69403>>. Acesso em: 2/7/2014.

MORABITO NETO, R.; PUREZA V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia da produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012. p. 169-198.

PARANÁ. Secretaria do Estado da Agricultura e do Abastecimento. Departamento de Economia Rural. **Soja – Análise da Conjuntura Agropecuária**: novembro de 2015. Disponível em: < http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/2016/Soja_2015_16.pdf>. Acesso em: 31/01/2016

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWKI, R. P. **Introduction to simulation using SIMAN**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Sciences**. John Wiley and Sons, Chichester, 5th edition, 2004.

POURYOUSEF, H.; LAUTALA, P.; WHITE T. **Railroad Capacity Tools and Methodologies in the U.S. and Europe**. Journal of Modern Transportation, vol. 23, issue 1, pp. 30-42. 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/journal/40534/23/1/page/1>>. Acesso em: 14/02/16.

SARGENT, R. G. **Verification and Validation of Simulation Models**. In: Proceedings of 2014 Winter Simulation Conference, 2014, Savannah, GA. pp 118-131. Disponível em: <<http://informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/013.pdf>>. Acesso em: 10/01/16.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf>. Acesso em: 26/03/2015.

SIMULATION MODELLING SERVICES PTY LTD (SMS). **Computer Simulation Modelling of Rio Tinto's Pilbara Rail Network**. Documento no: 27-521.01. Janeiro de 2008. Disponível em: <<http://ncc.gov.au/images/uploads/DeRaRrSu-001.pdf>>. Acesso em: 28/01/2016.

SLACK, N.; CHAMBERS S.; HARLAND C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. Planejamento e controle de capacidade. In: _____. **Administração da produção**. 12. reimpr. São Paulo: Atlas, 2009. p. 253-276.

UNITED STATES OF AMERICA (USA). Department of Defense. Modeling & Simulation Coordination Office. **Recommended Practices Guide (RPG)**. 2011. Disponível em: <http://www.msco.mil/vva_rpg.html>. Acesso em: 7/01/16.

WANKE, P. F. Estágio atual das empresas de transporte de cargas no Brasil. In: _____. **Logística e transporte de cargas no Brasil: produtividade e eficiência no século XXI**. São Paulo: Atlas, 2010. (Coleção Coppead de Administração). p. 1-55.

WORONIUK, C.; MARINOV, M. **Simulation modelling to analyse the current level of utilisation of sections along a rail route**. Journal of Transport Literature, vol. 7, n. 2, pp. 235-252. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2238-10312013000200012&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 26/11/14.

GLOSSÁRIO

ATIVIDADE: uma função do sistema que normalmente requer tempo para ser completada e resulta em uma mudança de estado do sistema.

BITOLA: É a distância entre as faces internas dos boletos dos trilhos, tomada na linha normal a essas faces, 16 mm abaixo do plano constituído pela superfície superior do boleto.

BITOLA MÉTRICA: aquela igual a 1,000 m.

BOLETO: Parte superior do trilho, sobre a qual deslizam as rodas dos veículos.

ENTIDADE: qualquer item distinguível.

ESTADO DO SISTEMA: estado das variáveis do sistema em qualquer instante de tempo.

EVENTO: um instante no tempo da simulação no qual uma mudança para um novo estado do sistema pode ocorrer. Uma atividade é sempre limitada por dois eventos: um começo e um fim de atividade.

MEDIDA DE DESEMPENHO: uma quantidade cujo valor pode ser usado para julgar quão bom está a performance do sistema.

REPLICAÇÕES (RUNS): são repetições da simulação do modelo, com a mesma configuração, a mesma duração e com os mesmos parâmetros de entrada, mas com uma semente de geração dos números aleatórios diferentes. Quanto maior o número de replicações, mais precisos os resultados serão.

RODADA (TRIAL / EXPERIMENT): é o que ocorre aquando se seleciona/inicia o comando que executa a simulação no computador. Uma rodada pode envolver várias replicações.

STEADY STATE: é o período de tempo no qual as condições iniciais não afetam mais o comportamento do sistema.

TONELADA ÚTIL (tu): total de carga movimentada no transporte remunerado.

VELOCIDADE COMERCIAL: velocidade média desenvolvida pelo trem entre sua formação e encerramento, seja na chegada a estação de destino ou na passagem por estação de intercâmbio, considerando todos os tempos de parada, exceto os tempos excessivos (anormais), os quais são expurgados.

VELOCIDADE DE PERCURSO: velocidade média desenvolvida pelo trem entre sua formação e encerramento, seja na chegada a estação de destino ou na passagem por

estação de intercâmbio, descontado os tempos das paradas em pátios.

WARM-UP: é o intervalo de tempo no qual o desempenho do sistema está fortemente relacionado com as suas condições iniciais, conseqüentemente, nenhum resultado da simulação deve ser coletado para a compilação de estatísticas.