INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

LEONARDO CEZÁRIO FERREIRA DA SILVA

UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE LAYOUT DE PÁTIOS FERROVIÁRIOS DE CARGA PARA ESTUDOS NO NÍVEL ESTRATÉGICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes – D.Sc.

Rio de Janeiro

2015

c2015

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

625.1 Silva, Leonardo Cezário Ferreira da

S586a Uma metodologia para avaliação de layout de pátios ferroviários de carga para estudos no nível estratégico / Leonardo Cezário Ferreira da Silva; orientado por Luiz Antonio Silveira Lopes – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

124p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2015.

1. Curso de Engenharia de Transportes – teses e dissertações. 2. Trens. 3. Ferrovias. I. Lopes, Luiz Antonio Silveira. II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

LEONARDO CEZÁRIO FERREIRA DA SILVA

UMA METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE LAYOUT DE PÁTIOS FERROVIÁRIOS DE CARGA PARA ESTUDOS NO NÍVEL ESTRATÉGICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes, D.Sc.

Aprovada em 22 de Dezembro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:

_____

Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes – D.Sc. do IME – Presidente

_____

Prof. Adriano de Paula Fontainhas Bandeira – D.Sc. do IME

_____

Prof. Lino Guimarães Marujo – D.Sc. da UFRJ

Rio de Janeiro
2015

Dedico este trabalho ao Senhor meu Deus, à minha família, aos meus amigos e à minha esposa Flávia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sobretudo e primeiramente, a Deus Pai, sem o qual eu nada seria. Ele me permite, a cada novo dia, ter a oportunidade de um novo aprendizado, uma nova jornada, uma nova batalha, guiando-me pelos caminhos da verdade, do amor e da paz. Agradeço a Ti, meu Deus, por nunca ter desistido de mim.

À minha amada esposa, Flávia Norenberg, que me apoiou a cada instante desses anos de dura batalha pelo aprendizado e que incansavelmente esteve ao meu lado, sem o qual este sonho nunca teria se concretizado. Agradeço pela companheira que você é em minha vida.

À grande pessoa que, muito mais do que um orientador, teve papel determinante em minha vida acadêmica e no desenvolvimento desta dissertação, professor Luiz Antônio Silveira Lopes, D.Sc., pertencente ao corpo de docentes do Instituto Militar de Engenharia.

Ao meu pai, Valdecir, a quem devo tanto por toda batalha nesta vida que encarou por nós, seus filhos e esposa. E minha mãe, Neuza, símbolo de amor incondicional, que não se cansou por um segundo em oferecer todo seu carinho a sua família, abrindo mão de si mesma em prol do próximo, agradeço o privilégio de estar ao seu lado.

À minha avó materna, dona Júlia, que recebeu seus netos em seu lar quando estes ainda encontravam-se na caminhada da infância, dedicando seu tempo e seu amor com o objetivo de educar e instruir na escola da vida. Agradeço a ti, minha avó querida, por todo amor dedicado pelos longos anos que convivemos juntos. Saiba que estarei contigo, nesta e em outras vidas, torcendo e compartilhando o caminho do crescimento ao seu lado.

À outra grande pessoa em minha vida, que transformou-a para melhor, através de sua eterna paciência, devoção, amor ao próximo e grande amizade, que serei eternamente grato, Engenheiro Thales Augusto dos Santos, M.Sc., tutor desta produção científica, que me ajudou e manteve sempre seu companheirismo nas horas difíceis.

Às tantas outras pessoas que compõem a minha vida pessoal, profissional e acadêmica. Aos professores do Instituto Militar de Engenharia, aos familiares, a todos que vibram e orgulham-se a cada nova conquista que alcançamos, a cada novo desafio vencido, a cada nova barreira ultrapassada.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 8
LISTA DE TABELAS 11
LISTA DE SIGLAS 12

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Contextualização 15
1.2 O modo de transporte ferroviário de carga 17
1.3 Objetivos 21
1.3.1 Objetivo geral 21
1.3.2 Objetivos específicos 21
1.4 Justificativa 21
1.5 Estrutura 22

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24
2.1 Conceitos fundamentais de pátios ferroviários 24
2.2 Definição do nível de atuação e a avaliação de layouts de pátios de classificação sob o enfoque de capacidade 37
2.3 Capacidade ferroviária 42
2.3.1 Conceitos gerais 42
2.3.2 Cálculo de capacidade de pátio: método determinístico 52
2.3.3 Cálculo de capacidade de pátio: simulação computacional 53
2.4 Identificando o recurso-gargalo e aumentando a capacidade ferroviária 59
2.4.1 Definições 62
2.4.2 Identificação do gargalo 63
2.4.3 Aumentando a capacidade 65

3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE LAYOUTS 67

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA: ESTUDO DE CASO 73

4.1 Formulação 73
4.1.1 Local em estudo 73
4.1.2 Macroprocesso do pátio do Barbará 77
4.2 Modelagem 80
4.3 Avaliação de resultados e decisão 100
4.3.1 Aplicação do modelo determinístico 101
4.3.2 Aplicação do modelo de simulação 102
4.3.3 Alternativa complementar de ganho de capacidade 115
4.3.4 Comparativo de resultados do modelo 117

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 119

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1 Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de carga 16
FIG. 1.2 Relevância do modo ferroviário na matriz de transportes por país 17
FIG. 1.3 Configuração da malha ferroviária brasileira 18
FIG. 1.4 Evolução do volume transportado pelas concessionárias ferroviárias brasileiras .. 19
FIG. 1.5 Evolução dos investimentos em ferrovias 19
FIG. 1.6 Investimento em ferrovias americanas em 2012 20
FIG. 2.1 Esquemático simplificado de um pátio de classificação 28
FIG. 2.2 Pátio de Classificação de Roseville, Califórnia 28
FIG. 2.3 Exemplo de pátio de classificação com crescimento horizontal 30
FIG. 2.4 Pátio simples 31
FIG. 2.5 Pátio tipo flat yard (plano) com uma saída 32
FIG. 2.6 Pátio tipo flat yard (plano) com duas saídas 32
FIG. 2.7 Pátio tipo flat yard (plano) direcional 33
FIG. 2.8 Hump yard 34
FIG. 2.9 Gráfico de horários de partida 37
FIG. 2.10 Princípio da modelagem de infraestruturas em nível macroscópico 40
FIG. 2.11 Aplicações dos modelos de infraestrutura 41
FIG. 2.12 Capacidade prática implica no nível de confiabilidade desejado 44
FIG. 2.13 Ciclo de ineficiência operacional acumulada 46
FIG. 2.14 Diagrama de tempo de espera 47
FIG. 2.15 Níveis de saturação de acordo com o atraso médio 48
FIG. 2.16 Ciclo de ineficiências e investimentos em capacidade 49
FIG. 2.17 Impacto das falhas nas conexões de trens entre pátios 50
FIG. 2.18 Passos básicos aplicados em uma simulação 55
FIG. 2.19 Ilustração das chegadas independentes e identicamente distribuídas e aleatórias .. 59
FIG. 2.20 Visão macro de um pátio de classificação 60
FIG. 3.1 Metodologia para avaliação de layouts para estudos no nível estratégico 68
FIG. 4.1 Malha ferroviária do operador ferroviário de carga 74
FIG. 4.2 Visão aérea do pátio do Barbará 75
FIG. 4.3 Layout do pátio do Barbará 76

FIG. 4.4 Estrutura da distribuição de vagões nas 12 horas mais intensas do dia 77
FIG. 4.5 Macroprocesso do pátio do Barbará 77
FIG. 4.6 Principais variáveis que afetam a linha de produção de trens (classificação) 79
FIG. 4.7 Passo 0: Variável de controle do modelo 87
FIG. 4.8 Passo 1: Processo de chegada de trens no pátio 89
FIG. 4.9 Passo 2: Processo de recebimento de trens no pátio 90
FIG. 4.10 Passo 3: Processo de inspeção de entrada 91
FIG. 4.11 Passo 4: Processo de classificação (parte 1) 93
FIG. 4.12 Passo 4: Processo de classificação (parte 2) 94
FIG. 4.13 Passo 4: Processo de classificação (parte 3) 95
FIG. 4.14 Passo 5: Processo de atendimento do cliente interno (parte 1) 96
FIG. 4.15 Passo 5: Processo de atendimento do cliente interno (parte 2) 96
FIG. 4.16 Passo 5: Processo de atendimento do cliente interno (parte 3) 97
FIG. 4.17 Passo 6: Processo de formação, inspeção de saída e partida (parte 1) 97
FIG. 4.18 Passo 6: Processo de formação, inspeção de saída e partida (parte 2) 98
FIG. 4.19 Retrato do nível de utilização dos recursos no pátio 99
FIG. 4.20 Retrato da evolução do nível de utilização das linhas do pátio 99
FIG. 4.21 Exemplo de cenários executados 100
FIG. 4.22 Tempo médio de permanência real e simulado 102
FIG. 4.23 Tempo de permanência no pátio atual 103
FIG. 4.24 Utilização dos recursos do pátio atual na ruptura 104
FIG. 4.25 Comparativo do tempo médio de permanência por solução adotada 105
FIG. 4.26 Conjunto de chaves no lado superior 106
FIG. 4.27 Tempo médio de permanência considerando a expansão das linhas de recebimento 106
FIG. 4.28 Evolução da utilização dos recursos do pátio com uma linha de recebimento 107
FIG. 4.29 Evolução da utilização dos recursos do pátio com duas linhas de recebimento ... 107
FIG. 4.30 Evolução da utilização dos recursos do pátio com três linhas de recebimento 108
FIG. 4.31 Utilização dos recursos do pátio com duas linhas de recebimento na ruptura 109
FIG. 4.32 Alternativas de solução para o segundo gargalo do pátio 110
FIG. 4.33 Evolução da utilização dos recursos do pátio com duas linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado inferior 111

FIG. 4.34 Evolução da utilização dos recursos do pátio com três linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado superior 112
FIG. 4.35 Taxa de utilização dos recursos críticos para investigação do terceiro gargalo ... 113
FIG. 4.36 Alternativas de solução para o terceiro gargalo do pátio 114
FIG. 4.37 Ganho de capacidade com adoção de soluções complementares 114
FIG. 4.38 Chave manual do pátio 116
FIG. 4.39 Análise de sensibilidade do aumento da velocidade média do pátio e sua relação com a capacidade de processamento de trens por dia 116
FIG. 4.40 Quantidade de linhas necessárias por demanda 118

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1 A influência de instalações de pátios, entrada de tráfego, política em custos e saída de um pátio 50
TAB. 4.1 Condições do decide conforme estrutura do pátio em estudo 88
TAB. 4.2 Aplicação do modelo determinístico 101

LISTA DE SIGLAS

AAR	Association of American Railroads
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CSCSC	Canadian Supply Chain Sector Council
PIB	Produto Interno Bruto
PNLT	Programa Nacional Logística e Transporte
TU	Tonelada Útil
VHP	Vagão Hora Parado

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação de *layouts* de pátios ferroviários de carga para estudos no nível estratégico.

O trabalho consiste em uma revisão da bibliografia atualmente disponível, considerando conceitos fundamentais de pátios e suas políticas; os métodos determinístico e de simulação computacional para avaliação de pátios sob o enfoque de capacidade; o método de utilização para identificação de gargalos e a priorização na realização de investimentos.

A conceituação inicial permite conhecer o que é um pátio de classificação, enquanto que o entendimento de suas políticas permite compreender como é o seu modelo de funcionamento.

Os métodos de cálculo de capacidade permitem medir qual a frequência de trens que o pátio consegue processar dentro de limites de eficiência operacional, enquanto que o método de identificação de gargalos permite estabelecer qual elemento dentro da instalação atua como restrição de capacidade.

Dado que os recursos financeiros são escassos e que sua utilização deve considerar o retorno em ganho de capacidade e eficiência operacional, a priorização na realização de investimentos permite estabelecer quais expansões serão mais eficazes.

A metodologia considera o desenvolvimento de um modelo de simulação para entendimento do comportamento dinâmico do pátio, conforme desenhado em sua política. O modelo considera o sequenciamento de ocupação e desocupação dos elementos da instalação. Atividades típicas de um pátio, tais como fracionamento de trens recebidos em linhas de classificação e manobras de formação de novos trens são considerados, reproduzindo a operação de forma confiável.

O modelo construído é capaz de identificar quais recursos são mais utilizados e a relação de perda de capacidade de processamento quando atinge níveis de saturação. Além de identificar o gargalo, permite verificar qual a resposta do sistema quando a restrição é eliminada, permitindo o comparativo de eficiência das soluções, etapa importante na decisão de qual investimento realizar.

A metodologia é aplicada e validada em um caso real, avaliando-se a priorização de obras de expansão de um pátio de classificação da região sudeste do Brasil. Tendo como critérios básicos o enfoque em capacidade e o desempenho operacional, os resultados gerados pela aplicação desta metodologia subsidiam decisões de quando e onde executar as obras.

Por fim, são propostos trabalhos futuros que permitirão a continuidade de exploração e desenvolvimento deste assunto, conciliando de forma mais ampla os impactos financeiros do operador ferroviário e a interface do pátio de classificação com os demais elementos do sistema de circulação de trens.

ABSTRACT

This dissertation develops a methodology for evaluating the layouts of freight rail yards for studies at the strategic level.

The work consists in reviewing the currently literature available, considering the fundamental concepts of rail yards and their policies; deterministic and computer simulation methods to evaluate yards under the capacity approach; the bottleneck utilisation method and investments prioritization.

The initial conceptualization enables to know what a classification yard is, while the understanding of its policies allows to comprehend its operating model.

The methods for assessing capacity allow measuring the frequency of trains that the rail yard can process within operational efficiency limits, while the bottleneck identification method allows identifying which element within the facility acts as capacity restriction for the system.

Considering that financial resources are scarce and that choosing the best alternative should consider the return on increasing capacity and operational efficiency, investments prioritization allows establishing what is the most effective expansion.

The methodology considers the development of a simulation model for understanding the dynamic behavior of the rail yard, as designed in its policy. The model considers the sequence of seizing and releasing the elements of the installation. Typical activities of a rail yard, such as braking down the trains received, sorting and making up new trains are considered, reproducing the operation with reliability.

The model is capable of identifying which resource is used more frequently and its relation with capacity loss when it reaches saturation levels. In addition to identifying the bottleneck, it is possible to verify the response when the restriction is eliminated, allowing the comparison of operating efficiency solutions, an important step in deciding which investment must be done.

The methodology is applied and validated in a real case, in which assesses the prioritization of expansion works of a classification yard in southeastern of Brazil. Having focus on capacity and operational performance as basic criteria, the results generated by the application of this methodology subsidize decisions on when and where to perform the construction works.

Finally, future works are proposed to continue the exploration and development of this subject, combining in a broader perspective the financial impacts of the rail operator and the interface between the classification yard and the other elements of the rail system.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o desenvolvimento da economia em escala internacional, a demanda por transporte tem assumido um papel diferenciado ao longo dos anos. Inicialmente tratado como uma ponta da atividade industrial, a até então denominada “entrega” passa a assumir um papel relevante na competitividade das empresas, sendo objeto de estudos para desenvolvimento e investimento em novas tecnologias.

Conforme apresentado pelo Canadian Supply Chain Sector Council (CSCSC, 2014), a definição de *supply chain* universalmente considera três pilares básicos: o suprimento de materiais ao produtor, o processo de manufatura e a distribuição de produtos acabados através da rede de distribuidores ou do varejo até o consumidor final. O transporte, em especial, tem assumido papel destacado no cenário globalizado da logística moderna, pois geralmente é quando o cliente percebe o valor do serviço, através do atendimento de sua demanda ou solicitação.

Em um contexto geral, a definição de transporte pode ser considerada como o movimento ordenado de mercadorias e/ou pessoas entre locais. São consideradas as mais diferentes modalidades para realização deste translado, sejam carros, trens, metrôs, bicicletas, dentre outros.

A história remete a um passado rico em detalhes no campo do transporte de carga. Base essencial da relação mercantil, a região da Mesopotâmia, por exemplo, já observava a movimentação de caravanas de mercadorias para venda de produtos como lã, linho, tapetes, madeira, dentre outros. Muitas vezes realizado na época por tração humana e animal, o transporte atualmente conta com uma grande gama de opções que se diferenciam em velocidade, capacidade de carga, consumo de combustíveis e, consequentemente, diferenças na composição tarifária.

A matriz de transportes nacional demonstra uma grande ênfase no modo rodoviário. De acordo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), em 2015 este modo era responsável por cerca de 61% do transporte de carga nacional, enquanto que o modo ferroviário respondia

por 20%. A distribuição modal da matriz brasileira de acordo com CNT (2015) é apresentada na FIG. 1.1.

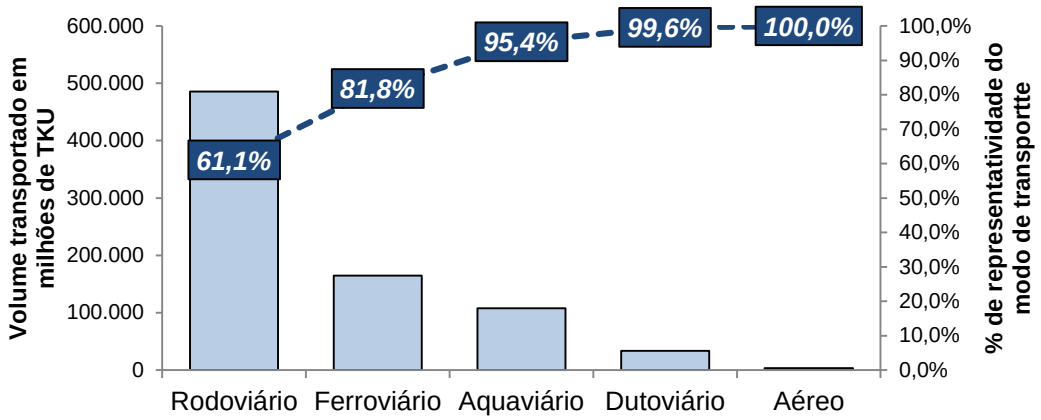

FIG. 1.1 Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de carga
Fonte: adaptado pelo autor de CNT (2015)

Atualmente, uma das práticas mais realizadas é a solução logística através da utilização de mais de um modo de transporte. A soja, por exemplo, pode ser movimentada por barcaças do centro-oeste brasileiro até o interior paulista, mudando para a ferrovia e sendo transportada até o Porto de Santos, quando será novamente movimentada para navios em direção à Europa. Isto demonstra a importância da atuação dos diferentes modos de forma complementar, permitindo um atendimento porta a porta.

1.2 O MODO DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA

O modo ferroviário de transporte desempenha um papel de transformação no desenvolvimento de uma economia. De acordo com a Association of American Railroads (AAR, 2014), aproximadamente 40% do volume de carga entre cidades é realizado pela ferrovia nos Estados Unidos, acima de qualquer outro modo de transporte. Por outro lado, avaliando a relevância do modo ferroviário por país, conforme apresentado na FIG. 1.2, é possível perceber a importância da ferrovia como propulsor de uma economia. Isto permite ganhos em eficiência energética (menor consumo de combustível por tonelada transportada), redução da poluição e redução de congestionamento nas estradas.

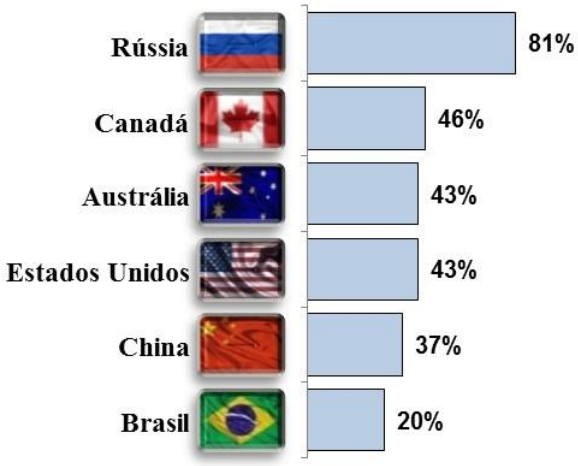

FIG. 1.2 Relevância do modo ferroviário na matriz de transportes por país
Fonte: adaptado pelo autor de PNLT (2011) e Ministério dos Transportes (2012)

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2014), o modo de transporte ferroviário é caracterizado por sua capacidade de movimentar grandes volumes, com elevada eficiência energética, principalmente em casos de deslocamentos em médias e grandes distâncias. Apresenta, ainda, maior segurança, em relação ao modo rodoviário, com menor índice de acidentes e menor incidência de furtos e roubos.

No Brasil, são cargas tradicionais deste modo de transporte o minério de ferro e os produtos agrícolas. Todavia, observa-se também um grande fluxo de produtos siderúrgicos, carvão, produtos químicos e contêineres, principalmente direcionado para importantes portos nos Estados de Rio de Janeiro e São Paulo. "O sistema ferroviário nacional é o maior da América Latina em termos de carga transportada" (ANTT, 2014).

O governo tem desenvolvido uma série de políticas para o estímulo do crescimento do transporte ferroviário de carga no Brasil. O país possui diversos gargalos para escoar a produção de produtos agrícolas, por exemplo, principalmente na região de São Paulo até a chegada ao Porto de Santos. A FIG. 1.3 apresenta a configuração da malha ferroviária brasileira e sua divisão através das diferentes concessionárias, de acordo com a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2014).

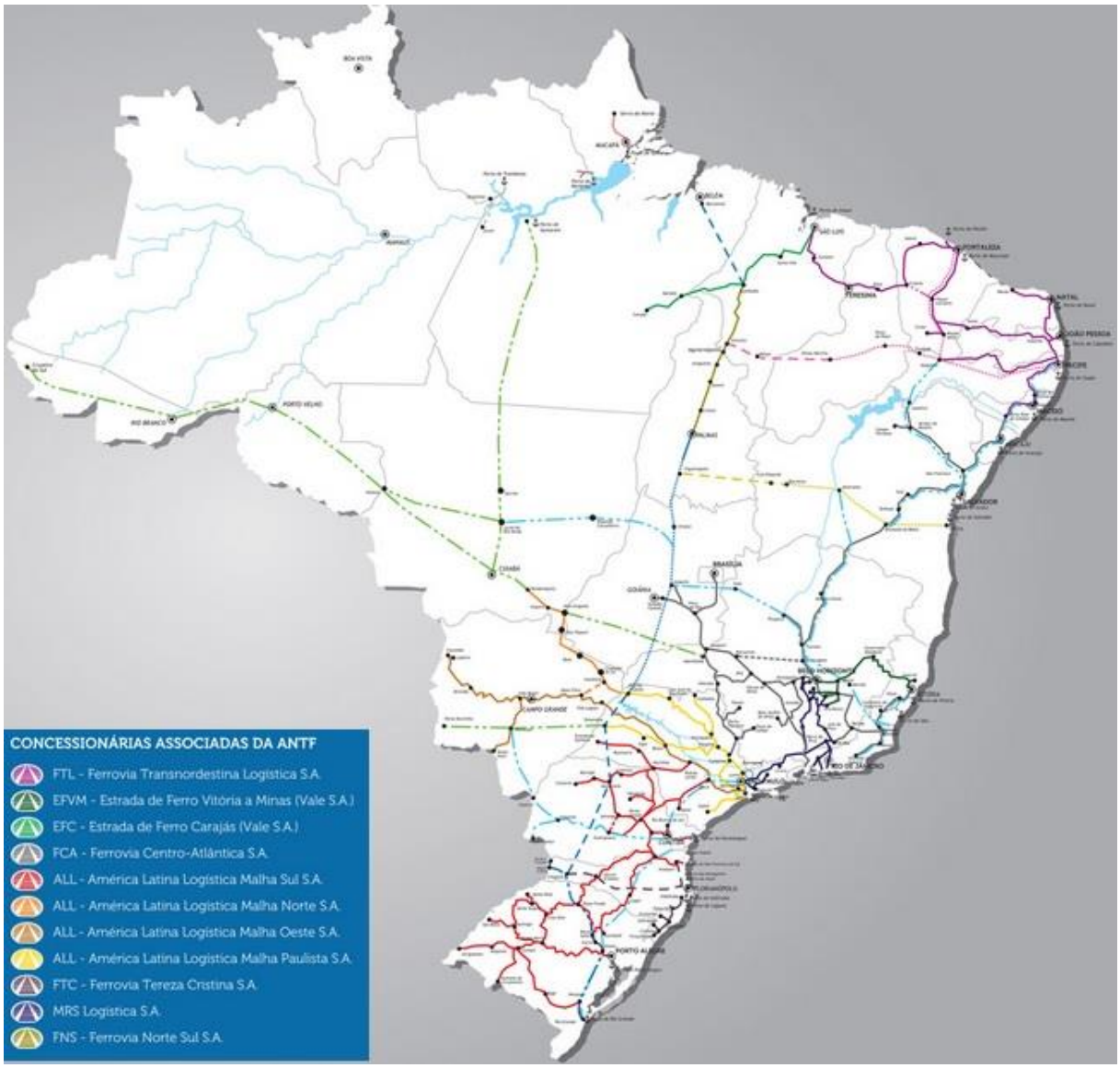

FIG. 1.3 Configuração da malha ferroviária brasileira
Fonte: adaptado pelo autor de ANTF (2014)

De acordo com a CNT (2013), em 16 anos, o crescimento do volume transportado pelo modo ferroviário no Brasil foi da ordem de 133% e os investimentos no setor alcançaram mais de 43 bilhões de reais, em sua maioria pela iniciativa privada, considerando principalmente material rodante (locomotivas e vagões) e via permanente.

"As melhorias observadas foram conquistadas por causa do expressivo volume de investimentos das concessionárias, fundamentais para impedir uma escalada mais acelerada na contração da malha" (CNT, 2013). A evolução do volume transportado e do investimento ao longo dos anos é apresentada na FIG. 1.4 e na FIG. 1.5.

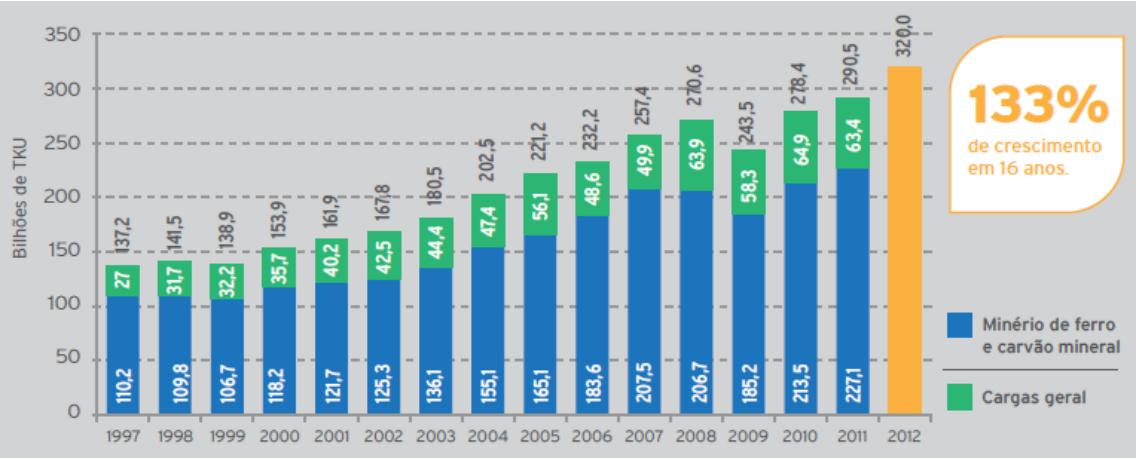

FIG. 1.4 Evolução do volume transportado pelas concessionárias ferroviárias brasileiras
Fonte: CNT (2013)

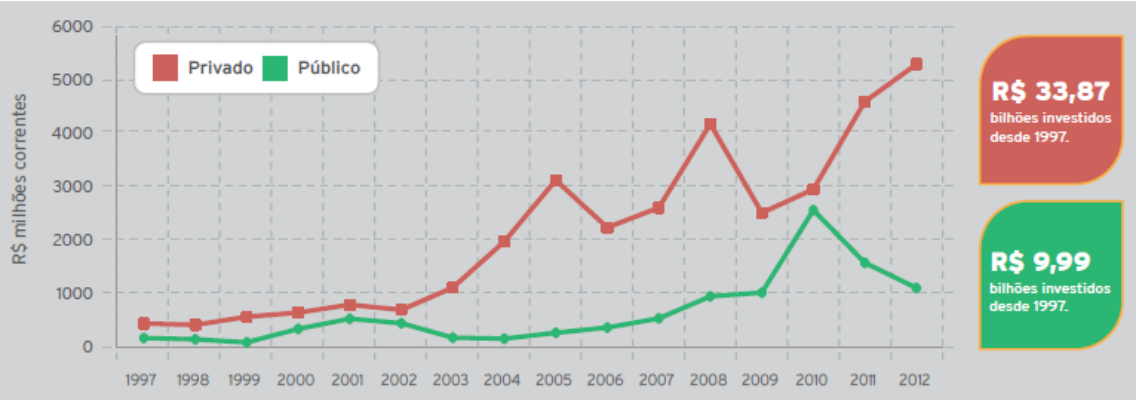

FIG. 1.5 Evolução dos investimentos em ferrovias
Fonte: CNT (2013)

De acordo com a AAR (2014), entre 1980 e 2013 foram investidos nos Estados Unidos aproximadamente 550 bilhões de dólares em locomotivas, vagões, construção de vias, pontes, túneis e outras infraestruturas e equipamentos, o que, aliado a melhorias de eficiência e produtividade, permitiram uma queda de 42% nos preços desde 1981. Em 2012, mais de 62 bilhões de dólares foram investidos nas ferrovias americanas, principalmente na operação. A FIG. 1.6 apresenta as categorias dos investimentos realizados.

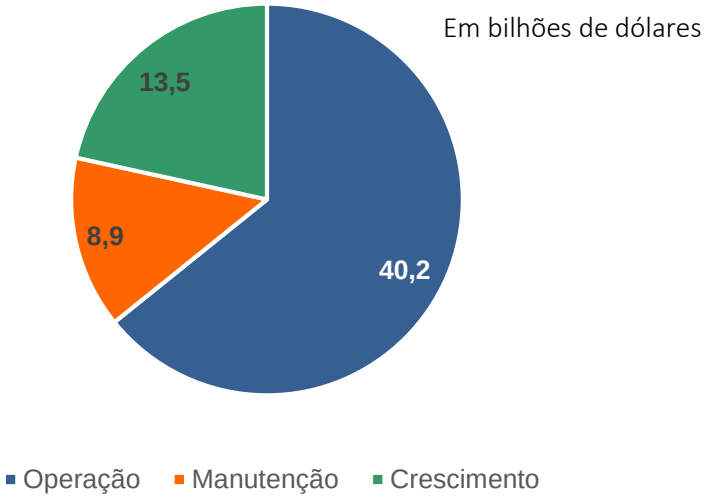

FIG. 1.6 Investimento em ferrovias americanas em 2012
Fonte: AAR (2014)

"As ferrovias estão continuamente trabalhando com os clientes e desenvolvendo estratégias para a melhoria das previsões de demanda de transporte, assim como eficiência e investimentos para prover a capacidade" (AAR, 2014). Alguns dos tópicos destacados pela associação são:

- Planejamento estratégico: redesenho de um pátio, alocação de locomotivas, mudança de modelo operacional etc.;
- Tecnologia da informação: planejamento de circulação *(real-time movement planner)*, planejamento de intervalos da manutenção, sistema de gestão de transporte etc.;
- Pessoas e equipamentos: pessoas treinadas, equipamentos com maior capacidade, maquinário de manutenção etc.;
- Infraestrutura: nova sinalização, novas instalações, remanejamento de vias etc.

Considerando a relevância do tema como fonte geradora de eficiência para o sistema de transporte ferroviário, a presente produção científica tem por alvo apresentar uma metodologia que permita a avaliação de *layouts* de pátios classificadores sob o enfoque de capacidade, abordando temas-chave como conflito na utilização de recursos, identificação de gargalos e seus correspondentes tempos de permanência na instalação, atuando nos elevados tempos de espera de vagões em pontos intermediários.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia para avaliação de *layouts* de pátios ferroviários para estudos em nível estratégico e avaliações operacionais de longo prazo.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são realizados:

- Revisar o conhecimento existentes sobre o tema, avaliando livros, artigos e apresentações de congressos no âmbito nacional e internacional;
- Descrever, de forma geral, o processo de um pátio ferroviário de classificação do tipo *flat yard*, as políticas de classificação e os requisitos de uma política, apresentando o conjunto de atividades padrão típicos de uma operação de carga geral;
- Desenvolver um modelo computacional para simular cenários futuros de atendimento de demanda de longo prazo, considerando o nível de informações macro e a necessidade de respostas ágeis.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme apresentado por Crane *et al.* (1954), um dos primeiros trabalhos que observaram que a maior parte do tempo parado ocorre nos pátios, "o tempo de espera em um pátio de classificação é um dos principais fatores que contribuem para a baixa utilização de vagões de carga, um dos ativos mais importantes de uma ferrovia". Os autores apontam em sua pesquisa que um vagão permanece parado em média 65% do tempo que está sob poder da ferrovia nos Estados Unidos, o que ressalta a importância de tratamento dos atrasos intermediários.

A afirmação de Crane *et al.* (1954) continua válida até os dias atuais, pois, conforme apresentando em estudos mais recentes de Dirnberger *et al.* (2006), duas grandes ferrovias norte americanas reportaram que, em suas operações, os vagões permanecem em pátios cerca de 59% e 64% do tempo total de ciclo.

Por outro lado, Assad (1980) afirma que "estudos indicam que a maior parte dos atrasos ocorre em pátios intermediários, o que sugere que sua política e operação influenciam amplamente o tráfego de trens".

Este trabalho se justifica pela importância de se conduzir, de forma organizada e estruturada, estudos no campo de operação de pátios classificadores e de eficiência de sistemas ferroviários, em função da necessidade de grandes investimentos em ampliações e aquisição de ativos, relacionando os principais tópicos que influenciam e são influenciados nas operações diárias e dando suporte à tomada de decisão em nível estratégico, tendo em vista que as observações de Crane *et al.* (1954) permanecem válidas até os dias atuais.

1.5 ESTRUTURA

Esta dissertação está estruturada em capítulos divididos de acordo com a descrição abaixo:

Capítulo 1 – Introdução: apresenta as considerações iniciais e as motivações do trabalho, conforme os objetivos e a justificativa.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: trata das produções científicas relacionadas à fundamentação teórica da dissertação e que orientam a construção da metodologia de avaliação de *layouts* de pátios classificadores. Neste capítulo é realizada uma revisão do conhecimento já existente, tanto nacional quanto internacional, relacionando o conjunto de elementos considerados em estudos de capacidade de pátios classificadores no nível macroscópico com ferramentas consagradas de ambientes industriais para identificação de gargalos.

Capítulo 3 – Metodologia de avaliação de *layouts*: tendo como referência a base de conhecimento desenvolvida ao longo do capítulo anterior, este capítulo propõe a formulação de uma sequência de passos importantes na avaliação de estudos macroscópicos.

Capítulo 4 – Aplicação da metodologia – estudo de caso: é abordado neste capítulo o local em estudo para validação da metodologia e seu macroprocesso de funcionamento. Serão apresentados os principais resultados obtidos através da aplicação de um modelo analítico determinístico e de simulação computacional de um pátio ferroviário.

Capítulo 5 – Conclusões: serão apresentadas as conclusões acerca dos principais tópicos discutidos ao longo do trabalho, principalmente da análise de dados e resultados obtidos no modelo de simulação computacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE PÁTIOS FERROVIÁRIOS

Os pátios ferroviários possuem grande importância na composição (e percepção) do serviço prestado, bem como na composição dos custos operacionais. De acordo com Martland (1992), "os pátios são onde muitos problemas de transporte se tornam visíveis, não apenas os problemas gerados pelo próprio pátio". Uma visualização direta desta afirmação é a formação de filas e altas permanências de vagões dentro do pátio, reduzindo capacidade de manobra e aumentando a possibilidade de novas perdas de conexão dos vagões para outros trens.

O sistema ferroviário é conhecido pela sua rigidez de atuação, onde o grau de liberdade para deslocamento é bastante limitado. Isto se deve ao modo como as movimentações dos carros (locomotivas, vagões etc.) são realizadas, ou seja, sobre trilhos. Diferente de um carro, caminhão, navio ou avião, o trem possui seu deslocamento espacial limitado ao caminho traçado pela via permanente, tornando sua otimização uma atividade complexa.

Os pátios ferroviários possuem como grande ponto positivo proporcionar flexibilidade, ainda que limitada, para este sistema extremamente rígido. Esta flexibilidade parcial deve-se a mesma restrição acima mencionada, ou seja, os pátios estão igualmente sujeitos aos benefícios e restrições de quantidade de linhas, extensão da via, sistema de sinalização etc.

Desta forma, um pátio ferroviário é uma instalação física, composta por uma sequência de linhas paralelas destinada a atividades operacionais diárias, tais como:

- Cruzamento: permite a aproximação de trens em trechos unidirecionais e/ou bidirecionais, reduzindo o intervalo entre trens (*headways*) e permitindo ultrapassagens e cruzamentos;
- Estacionamento temporário em retropátios: termo utilizado para descrever os locais destinados a formação de filas de trens carregados e/ou vazios, geralmente adjacente ou próximos a terminais de carga e terminais de descarga. Muito comum nas operações de *heavy haul* (minério);
- Regularização: por vezes ligado a atividade anterior, dada a falta de flexibilidade do modo ferroviário anteriormente apresentada, a regularização mostra-se essencial e

necessária à gestão de tráfego de trens em função do baixo grau de liberdade nas movimentações;

- Carga e descarga de mercadoria: conforme indicado pelo seu próprio nome, são conjuntos de linhas destinadas ao estacionamento de vagões para o processo de carregamento ou descarga. Geralmente utilizado em operações de carga geral, tais como o manejo de cimento ensacado, por exemplo, onde os vagões estacionados são acessados por empilhadeiras;
- Transbordo de mercadorias: muitas vezes ligadas aos locais de carga/descarga, estes espaços são destinados às atividades de transbordo de mercadorias entre um trem e outro (p.ex. mudança de bitola) ou entre diferentes modos de transporte (p.ex. de caminhão para trem);
- Embarque e desembarque de passageiros: geralmente conhecido como plataformas ou estações, estes locais são típicos de uma movimentação de pessoas, requerendo um espaço destinado para estacionamento dos carros de passageiros para entrada e saída dos usuários, podendo ou não ser realizado por linhas dedicadas (sem interferência nas linhas principais de circulação);
- Abastecimento de locomotivas: sendo esta uma atividade normal e importante em uma ferrovia, estes locais permitem o estacionamento de locomotivas para abastecimento de diesel e areia, por exemplo;
- Revisão e manutenção de locomotivas e/ou vagões: locais destinados para avaliação e correção de problemas nos ativos. Permite a realização de inspeções, manutenção corretiva emergencial e algumas manutenções preventivas mais simplificadas, que não necessitam de deslocamento para oficinas.

De acordo com Assad (1980), a principal função dos pátios é reorganizar o tráfego que está chegando até a partida nos trens que deixam o pátio, o que é ratificado por Marinov *et al.* (2009), apontando que os pátios ditam a movimentação de trens de carga na malha. Estas operações intermediárias, tais como a consolidação de vagões com mesmo destino ou que compartilham subtrechos similares nos mesmos trens, reduzem o fluxo de tráfego e permitem uma maior fluidez do sistema. Um maior detalhamento das principais funcionalidades de um pátio ferroviário é apresentado por Beckmann *et al.* (1956), Petersen (1977), Turnquist *et al.* (1982), Gomes (1982) e Langoni (2006).

Em um sistema de transporte ferroviário de carga, os pátios de classificação desempenham importante papel. São nestas instalações que os trens são fracionados e organizados de forma sistemática nas linhas conforme destino para, posteriormente, serem montados em um trem específico. Conforme apresentado por Mansfield *et al.* (1958), os vagões entram no pátio nos trens de entrada e precisam ser fracionados para posterior formação dos trens de saída, constituindo a etapa de classificação.

Em linhas gerais, uma operação ferroviária típica de um pátio de classificação considera um processo de recebimento, inspeção da composição, triagem e classificação dos vagões liberados, manobra dos vagões restringidos pela manutenção, formação e liberação do trem. Em pátios mais complexos, atividades complementares podem fazer parte do programa de atividades do trem.

Desta forma, baseado nos conceitos acima apresentados, um pátio de classificação pode ser dividido basicamente em três grandes segmentos:

- Área de recebimento: conjunto de linhas destinadas à chegada de trens provenientes das linhas de movimento. Sua função básica é absorver os trens com atividade no pátio, possibilitando a manipulação de seus vagões sem impacto nas linhas principais de tráfego;
- Área de classificação: local onde os veículos são rearranjados de forma sistemática e organizada conforme destino, que pode ser interno (próprio pátio ou terminais com acesso interno) ou externo (demais pátios ou terminais);
- Área de partida: região do pátio onde os veículos, agora montados em um trem, aguardam o horário de saída do pátio, que pode ser "assim que pronto" ou conforme grade de trens (horário fixo).

Para Assad (1980), um vagão típico visita pátios de classificação em pontos intermediários de sua viagem entre a origem e seu destino (do embarcador ao consignatário). Nestes pátios intermediários, os vagões são retirados do trem e colocados em linhas de recebimento. A principal atividade de um pátio é a atividade de classificação, onde os vagões de entrada são agrupados de acordo com seus destinos de saída. Vagões no mesmo grupo vão compartilhar alguns subtrechos iniciais de suas viagens subsequentes ao longo do pátio até os seus destinos. Esta consolidação dos vagões em blocos ou grupos permitem que as ferrovias tirem vantagem das economias associadas com os comboios. A decisão de quais devem ser

agrupados é chamado de política de agrupamento ou blocagem. Blocos incluindo vagões de destinos diversificados precisam ser fracionados em algum pátio subsequente e reclassificados. Portanto existe um equilíbrio entre custos de classificação e atrasos e as vantagens de utilização de economias de comboio. Dada a natureza altamente combinatória do problema, a determinação da política ótima de blocagem constitui uma questão complexa.

No deslocamento entre o local onde foi carregado até seu destino final, um vagão possui diversas paradas intermediárias. Dependendo do desenho operacional do operador ferroviário, em cada um destes locais poderá ocorrer o processo de classificação, ou seja, será seguidamente ordenado em trens diferentes, de modo a garantir a consolidação da carga e a redução da quantidade de trens na malha. Conforme apresentado por Assad (1980), as atividades de classificação e ordenação de vagões podem ser realizadas de duas maneiras:

- Em *hump yards*, onde os vagões percorrem uma via inclinada e são de forma automática direcionados para a via apropriada, alocados em grupos;
- Em *flat yards*, onde os vagões são movimentados por algum veículo em uma superfície plana de via, com o auxílio de locomotivas de manobra.

Turnquist *et al.* (1982) apontam que em *hump yards* os vagões são empurrados a uma velocidade aproximada de 2 milhas por hora (3,2 km/h), com uma elevação entre 10 e 30 pés (3 a 9 metros) acima do nível das linhas de classificação. Uma vez que o vagão desce a inclinação, os vagões são direcionados para a linha apropriada de classificação. Já em *flat yards*, conforme apontado pelos autores, a classificação é feita por locomotivas que levam e trazem vagões das linhas de classificação.

Um terceiro tipo de classificação em pátio é apresentado por Marinov *et al.* (2009), *gravity yard*, modelo similar ao *hump yard* com a diferença que todo o pátio é concebido em uma inclinação contínua e possui necessidade ainda menor de veículos para tração.

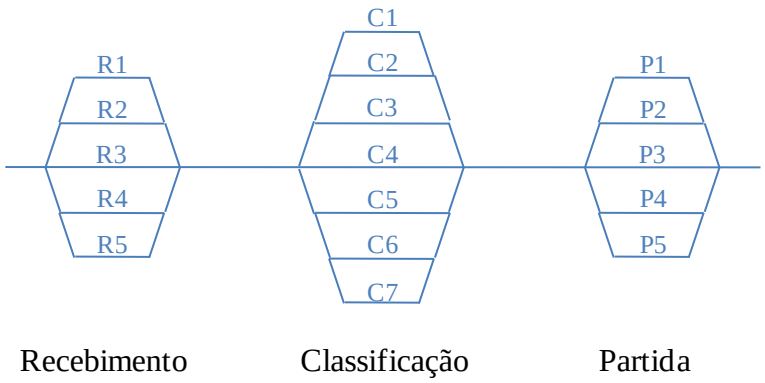

FIG. 2.1 Esquemático simplificado de um pátio de classificação
Fonte: autor (2015)

O exemplo da FIG. 2.1 ilustra um formato com áreas bem divididas, muito comum em locais como a América do Norte. Nestas regiões, geralmente adota-se majoritariamente o modelo *hump yard* e a área construída destinada a manobras geralmente é bastante grande. Outro exemplo é apresentado na FIG. 2.2, o pátio de classificação em Roseville, no estado americano da Califórnia. De acordo com a Union Pacific (2015), o pátio de classificação é o maior da costa oeste americana, com investimento de US$ 142 milhões e que permite um processamento duas vezes mais rápido do que antes da renovação, melhorando os tempos de trânsito.

FIG. 2.2 Pátio de Classificação de Roseville, Califórnia
Fonte: Union Pacific (2015)

No Brasil, contudo, é muito comum um modelo em que as áreas estão paralelas ao invés do sentido longitudinal, conforme apresentado na FIG. 2.3. O padrão predominante é o *flat yard*.

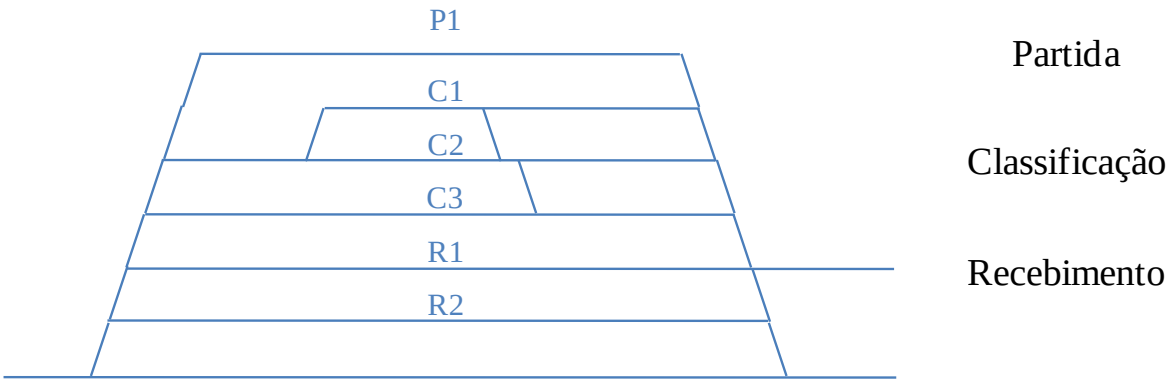

FIG. 2.3 Exemplo de pátio de classificação com crescimento horizontal
Fonte: autor (2015)

Quando avaliamos a malha ferroviária sudeste do Brasil, percebemos, por exemplo, que a região do Vale do Paraíba (SP) é caracterizada por pátios com restritas regiões de recebimento. O principal impacto neste cenário é que possíveis trens adiantados ou atrasados podem permanecer grandes intervalos de tempo aguardando o recebimento de um pátio nas linhas de movimento, reduzindo a capacidade de circulação através do aumento de *headway* de cruzamento. Perdas complementares ocorrem nestes casos, pois torna-se necessária a disponibilidade de um maquinista para permanecer no trem parado, além de possíveis complicações operacionais pela necessidade de um grupo de vagões que estão temporariamente no trem em fila. Por outro lado, observa-se uma maior flexibilidade nos sistemas do Rio de Janeiro e Minas Gerais, com pátios mais organizados e com áreas de recebimento mais adequadas, o que permite a retirada de trens das linhas de movimento.

Se trens são não confiáveis, ou a programação dos trens é designada de forma pobre, então o resultado pode ser performances não confiáveis e congestionamento. Dentro de pátios, as operações podem ser muito complexas. Diferentes pessoas estão envolvidas no processo de recebimento, inspeção, na classificação dos trens que chegam, na formação dos trens que partem, em serviços de locomotivas, na distribuição de vagões vazios e outras funções. Em ferrovia de carga, a confiabilidade na conexão de trens é um importante fator determinante na confiabilidade do serviço final (MARTLAND, 1992).

De acordo com Petersen (1977) e ratificado por Turnquist *et al.* (1982), as operações encontradas em um pátio podem ser agrupadas dentro de cinco atividades:

- Recebimento e inspeção de entrada;
- Classificação e triagem;
- Aguardar por conexão;
- Formação do trem;
- Inspeção de saída e partida

A quantidade e decisão dos locais para inspeção de vagões (e tipos de inspeção – mais simples ou mais completas) podem variar conforme regras de operação da empresa de transporte ferroviário ou conforme o tipo de pátio. Todavia, a visão geral apresentada por Petersen (1977) demonstra potenciais locais de formação de fila antes e/ou dentro do pátio, dependendo de intervalo entre trens, tempo de permanência (e consequente eficiência do pátio) e capacidade do pátio, dentre outros.

Em um pátio bem desenhado, preparado para absorver as demandas projetadas nos planos de longo prazo, é possível realizar a classificação e montagem de mais de um trem ao mesmo tempo. Neste caso, deve-se garantir um conjunto de linhas e frentes de manobras independentes, de modo que as atividades realizadas em paralelo não causem impactos e atrasos no processamento do pátio. Por outro lado, Beckmann *et al.* (1956) ressaltam que a quantidade de vagões que são considerados suficientes (limitantes) em um pátio dependem presumidamente do balanceamento de vários fatores econômicos. Neste caso, a sincronia das atividades de recebimento, classificação e partida apresentam papel importante na performance do pátio.

De acordo com Petersen (1977), "uma classificação conveniente para pátios é pelo seu tamanho, estrutura e recursos, enfatizando os elementos que causam congestionamento ou atrasos no progresso de vagões de carga ao longo do pátio". O autor aponta a existência de cinco tipos de pátios nos principais sistemas ferroviários:

- Pátio simples
- Pátio tipo *flat yard* (plano) com uma saída

- Pátio tipo *flat yard* (plano) com duas saídas
- Pátio tipo *flat yard* (plano) direcional
- *Hump yard*

Fernández *et al.* (2004) ratificam as quatro primeiras configurações como do tipo *flat* e a maior diferenciação está relacionada a existência de diferentes grupos de linhas destinadas à entrada, partida e classificação de vagões, e quanto a utilização de um equipamento para movimentação dos vagões, por exemplo a locomotiva. A descrição de cada um desses tipos é apresentada por Petersen (1977), conforme resumo abaixo:

a. Pátio simples ou *Simple Yard*: sendo muito limitado em recursos, geralmente a única função orientada a vagões que este pátio executa é manobrar pequenos grupos. Podem ocorrer pequenas paradas para troca de equipagem (maquinistas e/ou auxiliar de maquinistas, quando em dupla condução), conexões programadas com outros trens etc. Estruturalmente eles não possuem áreas separadas para recebimento, classificação e partida. A FIG. 2.4 demonstra um exemplo de pátio simples

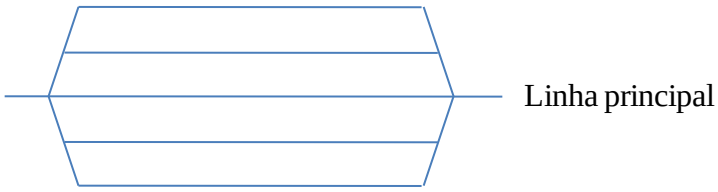

FIG. 2.4 Pátio simples
Fonte: Petersen (1977)

b. Pátio tipo *flat yard* (plano) com uma saída ou *Single-ended flat yard*: trata-se do pátio mais simples que possui recursos de manobra. Somente em um dos lados é possível realizar as manobras, que sequencialmente classifica trens que chegam e forma os que partem. Os processos de classificação e formação são altamente dependentes e precisam ser modelados conjuntamente. A FIG. 2.5 demonstra um exemplo de pátio plano com uma saída.

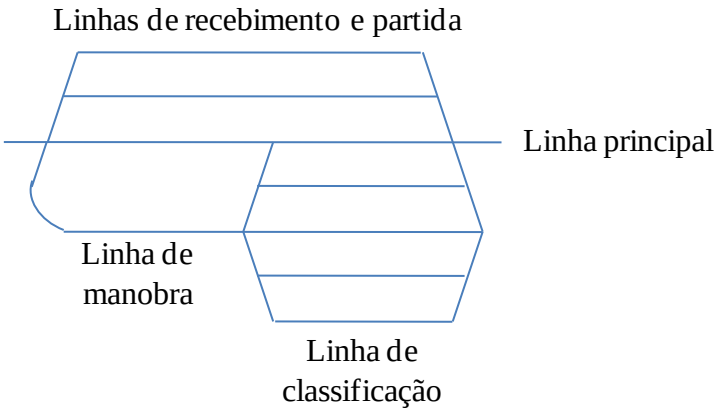

FIG. 2.5 Pátio tipo *flat yard* (plano) com uma saída
Fonte: Petersen (1977)

c. Pátio tipo *flat yard* (plano) com duas saídas ou *Double-ended flat yard*: sendo este o tipo de pátio plano mais comum, permite operações de manobra em ambos os lados. Geralmente um lado é reservado para classificação, enquanto o outro é destinado à formação dos trens. Portanto, as operações de classificação e formação são independentes uma da outra e podem ser modeladas separadamente. Ocasionalmente, as operações de classificação e formação podem ocorrer em ambos os lados e, neste caso, a modelagem deve ser feita de forma conjunta. A FIG. 2.6 demonstra um exemplo de pátio plano com duas saídas.

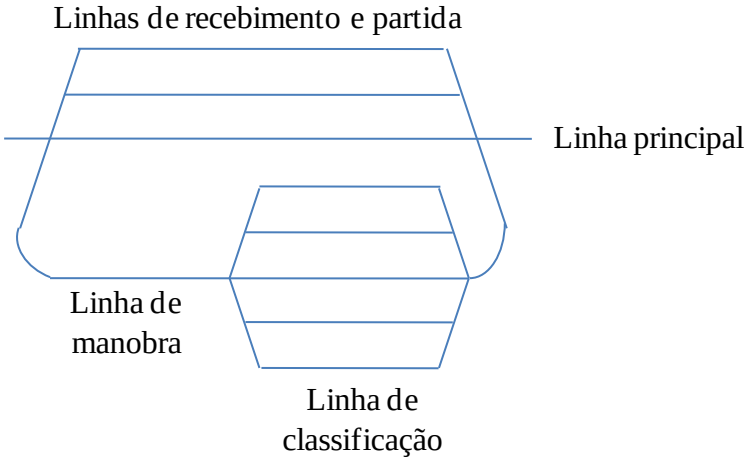

FIG. 2.6 Pátio tipo *flat yard* (plano) com duas saídas
Fonte: Petersen (1977)

d. Pátio tipo *flat yard* (plano) direcional: este tipo de pátio possui duas áreas separadas para classificação. Por exemplo, uma área pode ser utilizada para o tráfego leste enquanto que a outra área é utilizada para o tráfego oeste. As duas áreas operam de forma independente, com o tráfego leste formando fila em um lado enquanto que a fila do tráfego oeste forma do outro lado. Este tipo de pátio pode ser visto como dois pátios planos com duas saídas e é melhor modelado desta maneira. A FIG. 2.7 demonstra um exemplo de pátio plano direcional.

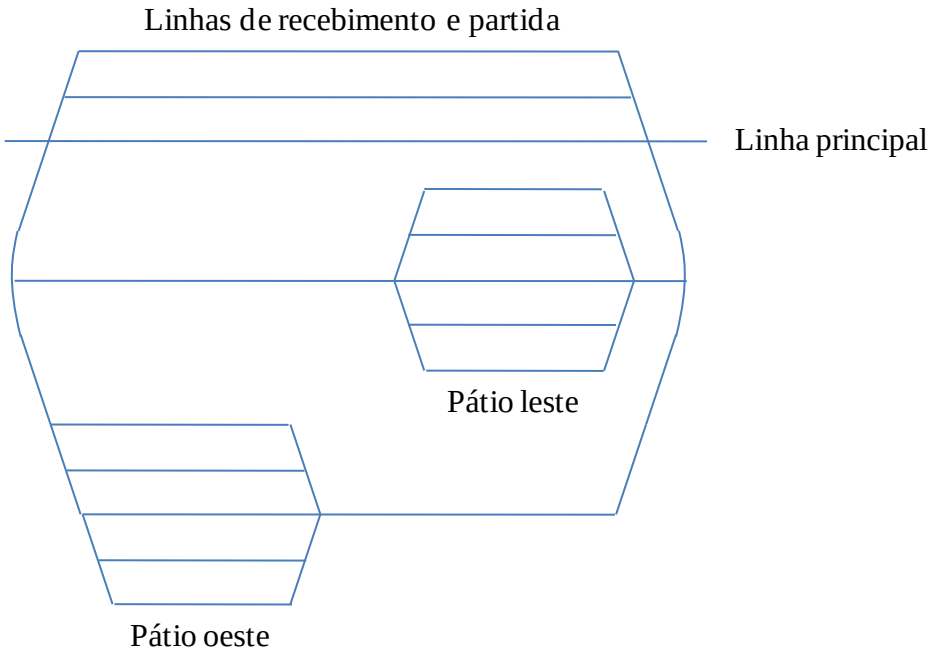

FIG. 2.7 Pátio tipo *flat yard* (plano) direcional
Fonte: Petersen (1977)

e. *Hump yards*: são os mais amplamente utilizados na América do Norte e, igualmente, os pátios mais complexos. Sua característica dominante é a eficiência com que a operação de classificação é realizada. Em um pátio plano (*flat yard*), uma locomotiva precisa movimentar os blocos de vagões para classificação, com a equipe do pátio movimentando cada aparelho de mudança de via para a linha de classificação desejada. Em um *hump yard*, cada vagão é solto do trem em um ponto elevado. O vagão desliza sobre a rede de aparelhos de mudança de via até a linha de classificação desejada. A operação necessária de mudança de via e retardamento de vagões é

altamente automatizada na maioria dos pátios deste tipo. As operações de classificação e formação de trens são sempre separadas. A FIG. 2.8 demonstra um *hump yard*.

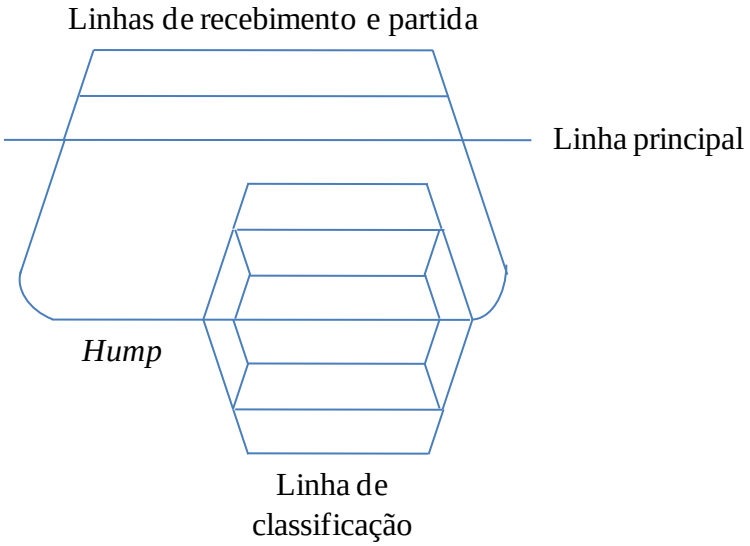

FIG. 2.8 *Hump yard*
Fonte: Petersen (1977)

A maioria dos sistemas de classificação em pátios nos Estados Unidos são os *hump yards*, conforme apresentado por Crane *et al.* (1954), que geralmente permitem uma maior produtividade e uma maior velocidade no processo de ordenação de vagões, reduzindo os riscos de atraso. No presente trabalho, serão apresentadas considerações, metodologia e modelagem de um *flat yard*, por ser o modelo majoritariamente utilizado no Brasil.

Um pátio de classificação é composto por uma série de regras que padronizam suas atividades, buscando reduzir as oscilações de processamento e garantindo um nível de produtividade. Neste contexto, a chamada política de classificação de um pátio é apresentada por Beckmann *et al.* (1956) como "uma série de regras para cada pátio que especifica de forma completa como os trens que chegam serão reconstituídos nos trens que partem". Neste contexto, Mansfield *et al.* (1958) apresentam as definições básicas abaixo para pátios de classificação:

- Política de classificação: a atividade de classificação é essencialmente o processo de fracionamento dos trens que chegam e a montagem dos trens que partem. A regra que determina quantos grupos são manobrados e a qual destino pertence cada um dos grupos é chamada política de classificação do pátio. Conforme reforçado por

Beckmann *et al.* (1956), a política de um pátio influencia não somente em sua operação, mas também no entorno, considerando o sistema de circulação e demais pátios de classificação.

- Cortes e tamanho de cortes: uma vez dentro do pátio, os vagões são rearranjados ao longo de várias linhas conforme sua política. Em função da aleatoriedade ou da política de outros pátios, dois ou mais vagões adjacentes em um bloco podem pertencer a um mesmo grupo na política de classificação deste pátio. Esses vagões podem ser classificados como uma unidade e cada unidade é chamada de corte. O número de cortes classificados por dia é uma medida de saída de classificação.
- Rota de trens e vagões: em geral, a rota é especificada por um pátio de origem, um pátio de destino e os respectivos pátios intermediários onde os vagões são deixados e coletados. Contudo, no caso dos vagões podem ocorrer de pátios intermediários terem políticas de classificação que envolvam não fracionar um determinado grupo de vagões, o que será realizado necessariamente em outro pátio de classificação.

Os requisitos de uma política são apresentados por Beckmann *et al.* (1956), tendo como principais elementos:

a. Recebimento

A definição da prioridade é um elemento essencial, pois, uma vez que existirão muitos trens nas linhas de recebimento, é preciso definir qual a sequência de atividades e qual será o próximo a ser manipulado.

Todavia, em alguns casos o cenário de manobra é ainda mais complicado, sem linhas longas o suficiente para acomodar os trens de forma inteira, sendo necessário fracioná-los. A regra ou conjunto de regras que regem situações como esta, conforme apresentado por Beckmann *et al.* (1956), é designado política de recebimento de um pátio e faz parte da política geral de classificação.

b. Agrupamento

A segunda política está relacionada ao processo de triagem dos vagões, ou seja, uma vez iniciada a manipulação de um vagão ou conjunto de vagões de um trem, torna-se necessário definir para qual linha serão distribuídos.

Conforme apresentado por Beckmann *et al.* (1956), a prática em pátios grandes, especialmente aqueles com uma ampla quantidade de linhas de classificação, é determinar uma ou mais linhas de classificação de forma permanente. Desta forma, é referido a lista de classificações como política de agrupamento, significando que em uma dada classificação os veículos são agrupados em trens de saída (BECKMANN *et al.*, 1956).

c. Formação

A terceira política está relacionada à formação dos trens. De acordo com Beckmann *et al.* (1956), sendo o conjunto de vagões em uma determinada linha de classificação chamado de grupo, torna-se necessário perguntar-se quais grupos devem seguir em quais trens. Uma vez que as condições de tráfego podem variar de um dia para o outro, pode não ser possível saber o número exato de vagões em um grupo de forma antecipada.

d. Programação (Grade de Trens)

A quarta e última política apresentada por Beckmann *et al.* (1956) é a programação, também conhecida como grade de trens, que consiste em uma lista de trens com um horário de partida e um destino para cada. Ela fornece os horários de chegada e partida para cada pátio (estação) incluído no itinerário do trem.

Existem duas considerações básicas no estabelecimento de uma grade de trens: (i) o uso eficiente da capacidade das vias e (ii) entrega imediata do tráfego ao longo de um certo subtrecho de sua viagem. A última questão nos leva a examinar o equilíbrio entre atraso acumulativo e atraso de conexão. Um número de outros fatores podem restringir uma grade

de trens: requerimentos de inspeção, equipe e disponibilidade de locomotivas, considerações de *headway* mínimo etc.

Ainda segundo os autores Beckmann *et al.* (1956), a desvantagem da utilização da grade de trens em situações em que o tráfego flutua é que trens podem circular tanto muito pequenos quanto muito longos, podendo rodar em mais de duas seções para manter os horários programados, o que pode levar o sistema a não trabalhar no modo mais econômico.

Um exemplo apresentado pelos autores é a FIG. 2.9, determinando qual horário um trem deve partir considerando a quantidade de vagões disponíveis.

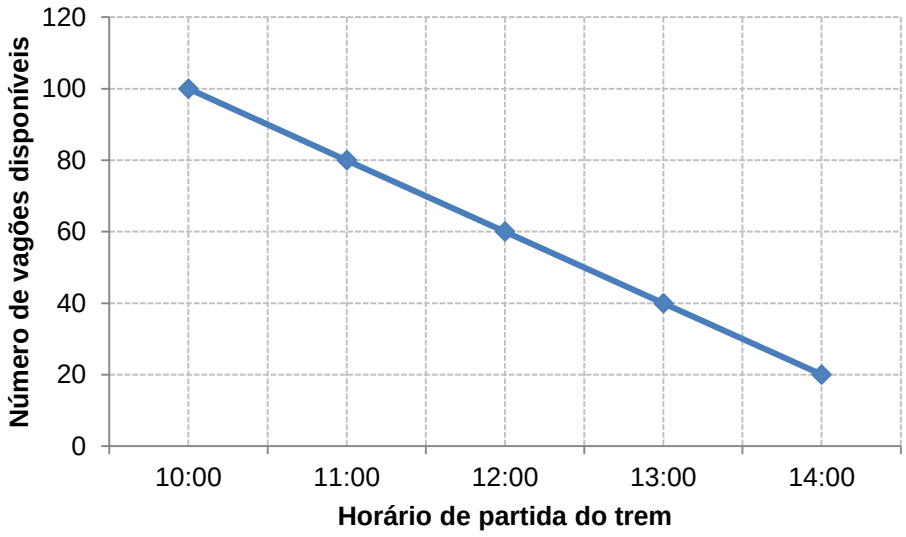

FIG. 2.9 Gráfico de horários de partida
Fonte: adaptado pelo autor de Beckmann *et al.* (1956)

2.2 A DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE ATUAÇÃO E A AVALIAÇÃO DE LAYOUTS DE PÁTIOS DE CLASSIFICAÇÃO SOB O ENFOQUE DE CAPACIDADE

O nível de atuação está relacionado ao horizonte das decisões que estão sendo tomadas para o funcionamento de uma determinada organização.

No horizonte de longo prazo, ou estratégico, as decisões estão relacionadas a organização como um todo, definindo metas, objetivos e decisões de expansão e investimentos. Já o tático é de médio prazo, tratando cada divisão ou unidade de negócio, enquanto que, para o

operacional, o que está em discussão é o curto prazo ou o dia a dia, considerando as tarefas e suas correções e melhorias.

No contexto ferroviário, Marinov *et al.* (2011) transmitem parte desta ideia em caráter prático, apresentando que o nível estratégico está relacionado à visão de longo prazo e que envolve decisões para definição de alvos e metas, níveis e tipos de recursos disponíveis, redesenho e reconstrução da rede física ferroviária, realocação de instalações, construindo e demolindo infraestruturas etc. Por outro lado, o nível tático preocupa-se com o planejamento de médio prazo, considerando planejamentos operacionais de produção, enquanto que o nível operacional está concentrado no curto prazo e nas ações diárias.

O presente trabalho busca reunir os elementos mais importantes e estabelecer uma metodologia para avaliação de *layouts* no longo prazo, determinando como os investimentos podem ser priorizados, uma vez que recursos financeiros são escassos e devem ser utilizados para geração de valor da organização. Dada esta definição do nível de atuação, torna-se importante um aprofundamento no nível macroscópico ou estratégico.

Segundo Porter (1996), o posicionamento estratégico busca atingir uma vantagem competitiva sustentável, preservando o que é único na companhia, com diferentes atividades dos rivais ou com atividades similares em diferentes maneiras. Por outro lado, eficiência operacional significa realizar atividades como criação, produção, venda e distribuição de produtos ou serviços de uma maneira melhor, mais rápida ou com menos *inputs* ou defeitos que os rivais (PORTER, 1996).

Para Assad (1980), as decisões estratégicas envolvem a aquisição de recursos em horizontes de longo prazo e tipicamente requerem altos níveis de investimento. Alguns exemplos primários apontados pelo autor no contexto de sistemas ferroviários são:

- Desenho de rede e melhorias. Abandono de linhas;
- Localização de pátios e instalações/equipamentos de movimentação em grandes pátios;
- Decisões de rotas altamente agregadas. Planejamentos de longo prazo de serviços de trens.

A aplicação de grandes montantes em infraestrutura, tais como duplicação de trecho, criação de pátios de cruzamento, ampliação de pátios de classificação, entre outros, são

exemplos de expansões que fazem parte de planos estratégicos das empresas ferroviárias. Vários fatores são considerados na composição dos planos de longo prazo, tais como risco de oscilação da demanda e alteração do cenário macroeconômico, relacionamento com órgãos governamentais ambientais e de regulação, aquisição de áreas para expansão ferroviária, dentre outros.

Martland (1992) aponta que, no nível estratégico, os executivos seniores possuem duas funções primárias: definir os objetivos estratégicos e gerenciar o progresso na busca do atingimento dos objetivos. Nesse sentido, quando o assunto é avaliar o posicionamento da operação ferroviária no longo prazo, as avaliações estratégicas tem por objetivo identificar como o volume projetado é acomodado e conduzido pela atual estrutura, observando possíveis gargalos e propondo soluções que atendam o plano de expansão de transporte. Tratam-se de avaliações macroscópicas da operação ferroviária.

A criação de um modelo de simulação, por exemplo, pode conter diferentes níveis de profundidade nas variáveis envolvidas no processo. Esse grau de detalhamento oferece, certamente, respostas mais ou menos precisas sobre um determinado cenário, dependendo da proposta e do horizonte de planejamento que está sendo tratado.

Por outro lado, um maior grau de detalhamento, embora ofereça um cenário mais confiável, demanda longo tempo para desenvolvimento, coleta de dados, calibração, validação e, uma vez pronto, maior tempo de processamento. Com isso, estudos iniciais em horizontes de longo prazo podem, por vezes, tornarem-se vagarosos e com grau de precisão incompatível com as incertezas do cenário.

Conforme apontado por Hansen *et al.* (2008), para um melhor entendimento da modelagem de infraestruturas ferroviárias, é importante apresentar algumas definições fundamentais:

- Um nó é a representação de um local arbitrário na malha ferroviária;
- Um arco é a conexão entre dois nós.

Com isso, os autores definem os níveis de detalhes da infraestrutura da seguinte maneira (HANSEN *et al.* 2008):

- Modelos microscópicos possuem o maior nível possível de detalhes em arcos e nós;

- Modelos macroscópicos possuem informações agregadas em arcos e nós;
- Modelos mesoscópicos se posiciona em um ponto intermediário entre os modelos macroscópicos e microscópicos.

Esta abordagem em níveis de decisão – macroscópico, mesoscópico e microscópico – é muito utilizada em abordagens e avaliações de fluxo de tráfego rodoviário. Conforme apontado por Miller (2011), os modelos macroscópicos foram os primeiros a serem derivados pelos cientistas estudando tráfego na década de 1950.

Mais indicados em avaliações de longo prazo, os modelos macroscópicos são simplificações da realidade que está em estudo, visando prover respostas rápidas e generalistas. “Com um nível de detalhamento muito menor de arcos e nós em relação aos modelos microscópicos, possuem uma visão mais abstrata da infraestrutura” (HANSEN *et al*, 2008).

A FIG. 2.10, apresentada pelos autores Hansen *et al.* (2008), demonstra as principais diferenças entre um modelo microscópico e macroscópico, com um nó representando um pátio. É perceptível que o grau de complexidade dos dois modelos é bastante distinto, assim como as respostas que ambos são capazes de produzir e o tempo de processamento de cada um.

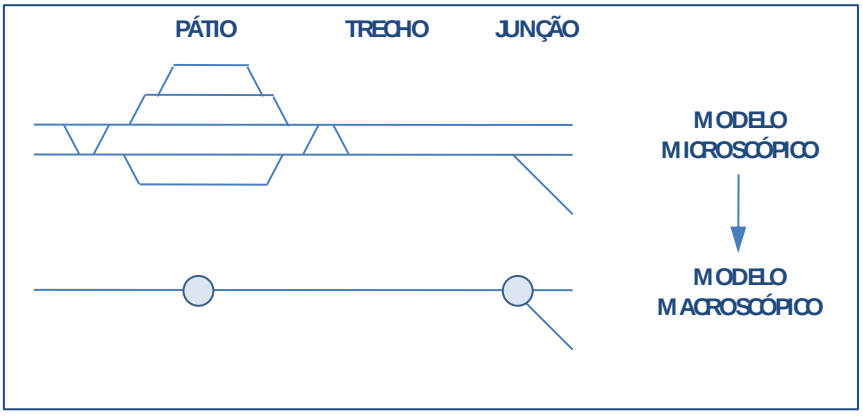

FIG. 2.10 Princípio da modelagem de infraestruturas em nível macroscópico
Fonte: adaptado pelo autor de HANSEN *et al.* (2008)

Por fim, Hansen *et al.* (2008) apresentam as aplicações dos modelos de infraestrutura, conforme apresentado na FIG. 2.11. O nível de esforço para estabelecer uma base de dados de infraestruturas está correlacionado com o nível de detalhes.

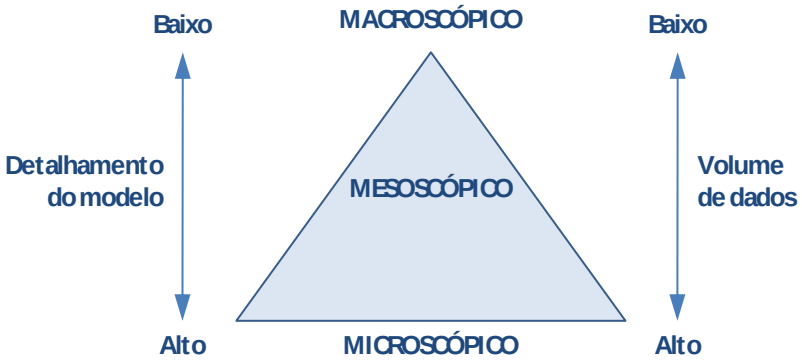

FIG. 2.11 Aplicações dos modelos de infraestrutura
Fonte: adaptado de HANSEN *et al.* (2008)

De acordo com Miler (2011), uma grande vantagem dos modelos macroscópicos é a simplicidade de cálculo quando comparados com modelos microscópicos e possuem menor quantidade de parâmetros. A desvantagem destes modelos é a perda de pequenos detalhes ou dinâmicas que são modelados com os modelos microscópicos.

Uma vez estabelecido o horizonte de atuação, torna-se necessário delimitar como a metodologia avaliará um pátio de classificação para efeito de comparação e decisão da melhor alternativa. Nesse caso, métricas são necessárias para avaliar se uma determinada configuração atual ou futura atende ao crescimento do plano de transporte dentro de níveis de eficiência da operação, ou seja, para quais limites é possível dar vazão à quantidade de trens processados em um pátio dado um determinado *layout*. Torna-se necessário definir o que é capacidade.

2.3 CAPACIDADE FERROVIÁRIA

2.3.1 CONCEITOS GERAIS

No contexto ferroviário de carga, especialmente no setor de carga geral, há uma grande quantidade de clientes compartilhando uma mesma composição. Diferente dos trens de minério, que são geralmente formados em blocos únicos e dificilmente param em pátios intermediários para manobras, os trens de carga geral raramente são formados por blocos únicos (trens unitários). As principais diferenças na operação ferroviárias destes dois tipos de trens são:

- Trens de minério: geralmente com origem/destino fixos, possuem uma formação padrão (mesma quantidade de locomotivas e vagões) e suas paradas intermediárias são para atividades como troca de maquinistas, anexação/desanexação de auxílio (locomotiva extra para superar trechos em rampa) e abastecimento (areia/diesel). Neste tipo de trem, é comum haver apenas um único cliente em atendimento e a operação é mais previsível;
- Trens de carga geral: geralmente com origem/destino variados, podem igualmente variar em tamanho, podendo este ser limitado por fatores como lote mínimo (limite inferior) e capacidade de tração de locomotivas ou tamanho dos pátios de cruzamento (limite superior). Podem possuir diversas paradas intermediárias para manobras de anexação e desanexação de vagões, além de ser um trem formado com diferentes tipos de vagões. Neste tipo de trem, é comum haver mais de um cliente em atendimento e a operação é mais caótica.

Para o atendimento de ambas as demandas de carga em um complexo sistema ferroviário, é primordial apontar as tendências de vazão e fluidez do sistema durante a etapa de projeto de um novo trecho e/ou pátio e na revalidação das instalações existentes, o que remete à avaliação de capacidade.

A definição de capacidade, em seu sentido amplo, está relacionada ao espaço no interior de um corpo vazio, ou ao que pode conter na grandeza deste espaço. Serve como referência de

medição e a possibilidade de materializar, ainda que parcialmente, medições de itens abstratos.

Para Hopp *et al.* (2000), o termo capacidade pode ser definido como o limite superior de rendimento de um processo produtivo. Os autores apontam que, na maioria dos casos, manter o sistema operando na capacidade ou acima dela pode torná-lo instável, como, por exemplo, um crescimento sem limite de trabalhos em processo. Somente alguns sistemas muito especiais conseguem trabalhar com estabilidade na capacidade.

Quando relacionamos esta definição à área de transportes, conseguimos materializar alguns conceitos que observamos diariamente e, através destes, propor medições que permitam uma melhor visualização e controle de uma determinada situação. A capacidade de transporte está relacionada a um referencial de qual o máximo possível de carga e/ou pessoas podem ser transladados de um local para o outro, sendo seu valor variável conforme condições da operação ou o meio escolhido.

Em uma ferrovia, o principal objetivo da análise de capacidade é determinar o número máximo de trens que seriam possíveis operar em uma dada estrutura ferroviária, durante um tempo específico, dadas as condições operacionais (ABRIL *et al.*, 2007).

Para Pachl (2009), a pesquisa de capacidade em sistemas ferroviários é feita por três motivos:

- Validação dos horários em uma infraestrutura planejada ou existente;
- Desenho adequado de capacidade de uma infraestrutura ferroviária;
- Determinação da infraestrutura requerida para um serviço proposto.

Conforme descrito por Abril *et al.* (2007), diferentes tipos de capacidade são usualmente utilizados no ambiente ferroviário:

- Capacidade teórica: é o número de trens que podem percorrer uma rota, durante um intervalo específico de tempo, em um ambiente estritamente perfeito e matematicamente gerado, com os trens circulando permanentemente e idealmente no menor *headway* (isto é, intervalo temporal entre dois trens consecutivos);

- Capacidade prática: é o limite praticável do volume de tráfego representativo que podem ser movidos em uma linha, com uma confiabilidade razoável. O tráfego representativo reflete o atual *mix* de trens, prioridades etc. A capacidade prática é calculada de forma mais realista, o que é relacionado a um nível esperado de qualidade e condições operacionais, conforme ilustrado pela FIG. 2.12;
- Capacidade usada: é o volume de tráfego atual na rede. Reflete o tráfego e as operações que ocorrem na linha atualmente.
- Capacidade disponível: é a diferença entre a capacidade prática e a capacidade utilizada. É um indicador do volume adicional de tráfego que pode ser comportado na rota.

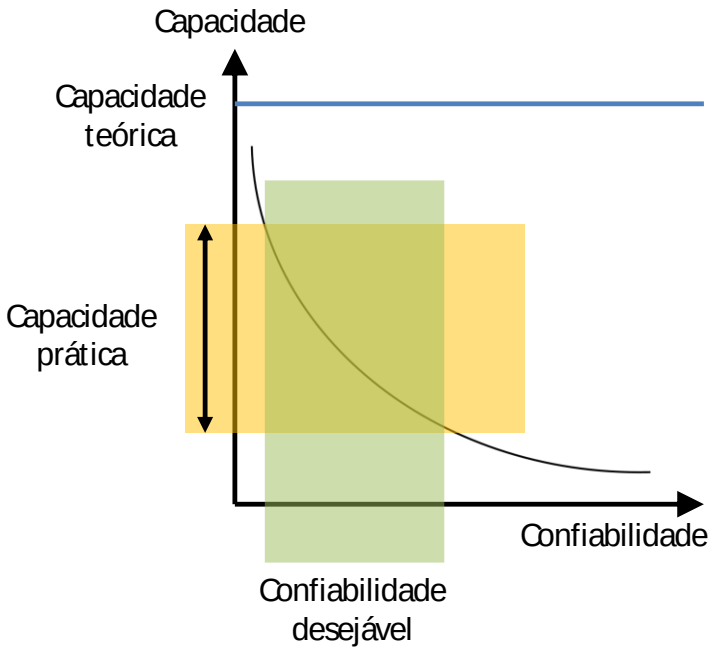

FIG. 2.12 Capacidade prática implica no nível de confiabilidade desejado
Fonte: adaptado pelo autor de Abril *et al.* (2007)

A complexidade observada no ambiente de operação ferroviária é geralmente elevada, sofrendo interferências de diversos agentes internos e externos. Em outras palavras, existem elementos no dia a dia que impactam diretamente na produtividade do pátio e que reduzem sua capacidade de processamento. Segundo Marinov *et al.* (2011), o que se observa na realidade é que:

- Os tempos de permanência de trens de carga que chegam e saem do pátio diferem. Vagões movimentados por locomotivas com pouco tempo disponível estão mais predispostos a chegar atrasados em relação ao horário previsto em grade e partir mais cedo do pátio de manobra, considerando o tempo de permanência desenhado. Os vagões que possuem mais tempo disponível, ao contrário, tendem a chegar mais cedo e partir atrasados do pátio;
- Dependendo do tamanho do fluxo, alguns trens que chegam e partem do pátio possuem frequências diferentes, como um trem por dia ou um trem a cada dois dias;
- O tempo de manobra dos trens que partem varia dependendo do tamanho do comboio.

Em 1954, Crane *et al.* apresentavam que um vagão de carga nos Estados Unidos gastava aproximadamente dois terços do seu tempo parado, enquanto que estudos mais recentes de Dirnberger *et al.* (2006) apontavam que esta relação continua válida até os dias atuais, com duas grandes ferrovias norte americanas tendo reportado que os vagões permanecem em seus pátios aproximadamente 59% e 64% do tempo de ciclo em suas operações. O tempo de espera em pátios de classificação é o maior fator que contribui para a baixa utilização de vagões de carga, um dos ativos mais essenciais de uma ferrovia (CRANE *et al.*, 1954).

Este tempo significativo é derivado de uma série de ineficiências que ocorrem ao longo do sistema e que, somado a situações inesperadas, elevam o tempo dos ativos em filas, influenciando na competitividade do modo de transporte. Com isso, um ciclo de ineficiências vai se acumulando ao longo da cadeia, aumentando os investimentos necessários e os custos da operação. Como o custo desta ineficiência não é absorvido pelo operador, ele é repassado ao cliente sob forma de elevação de tarifa, onerando a cadeia logística e impactando na competitividade de uma empresa, de um setor e de um país. A FIG. 2.13 apresenta um esquemático geral do ciclo de ineficiência operacional acumulada em um sistema de transporte ferroviário de carga.

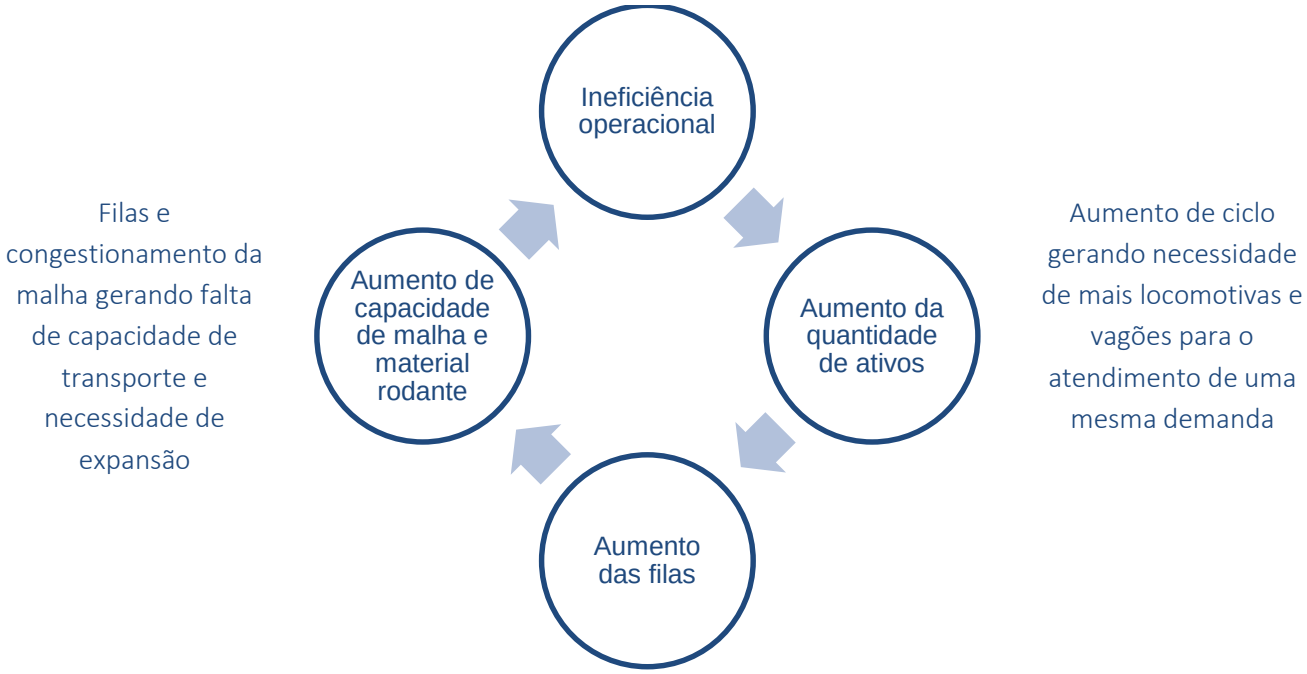

FIG. 2.13 Ciclo de ineficiência operacional acumulada
Fonte: autor (2015)

Um pátio de classificação é um dos primeiros locais a sentir os efeitos da ineficiência do sistema. O acúmulo de quebras e intervalos programados de manutenção, somados às ineficiências das operações de carga e descarga e congestionamento ao longo da malha, resultam em longas filas aguardando entrada de um pátio ou dentro dele, em concorrência de atividades que ocorrem paralelamente, absorvendo a variabilidade de chegada. Mas uma questão fundamental, levantada por Crane *et al.* (1954) permite uma reflexão crítica sobre o tema: os pátios de classificação são realmente gargalos?

Do ponto de vista operacional, as questões acima se traduzem, basicamente, em maior ou menor tempo de manobra, sendo um fator determinante para estudo de capacidade. Do ponto de vista de gestão, pode ser relacionada com uma maior ou menor quantidade de mão de obra para execução de uma mesma operação, bem como fatores de segurança e eficiência que podem ser impactados por uma grande quantidade de pessoas realizando uma mesma atividade.

No âmbito ferroviário, a capacidade está diretamente relacionada à possibilidade de atendimento de uma determinada demanda de transporte e, consequentemente, ao aumento de receitas e a satisfação do cliente na percepção da prestação do serviço. Conforme apresentado

por Abril *et al.* (2007), uma vez que as operações ferroviárias não são perfeitas, alguns distúrbios aleatórios e falhas no gerenciamento real de trens durante a operação ferroviária em alguns trechos reduzem a capacidade. “Efeitos estocásticos são frequentemente difíceis de serem considerados na avaliação de capacidade. Contudo, o equilíbrio entre confiabilidade e a máxima capacidade física é necessário para encontrar o nível ótimo econômico” (ABRIL *et al.*, 2007).

De acordo com Pachl (2009), a capacidade de um trecho pode ser descrita na forma de diagrama de tempo de espera, conforme FIG. 2.14. Percebe-se, contudo, que variações da mesma abordagem podem ser estabelecidas, medindo por exemplo não somente o tempo de espera, mas também a relação de crescimento de ciclo ou o incremento causado no próprio ciclo ao longo do tempo. “Em um diagrama de tempo de espera, o tempo médio de espera por trem é apresentado como uma função do tráfego (trens por unidade de tempo)” (PACHL, 2009).

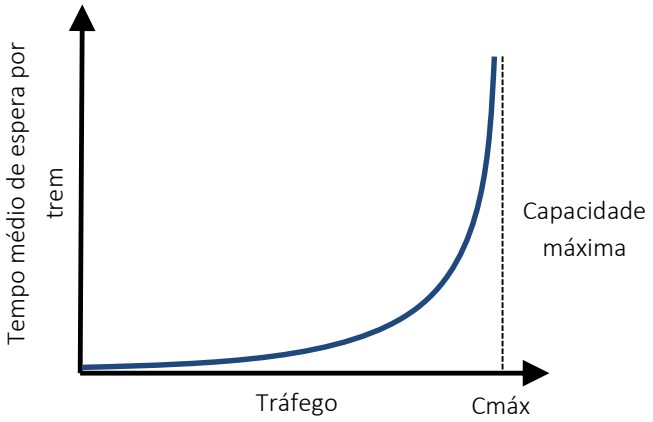

FIG. 2.14 Diagrama de tempo de espera
Fonte: Pachl (2009)

Importante ressaltar que a capacidade máxima apontada na FIG. 2.14 ($C_{máx}$) é meramente teórica, pois, considerando o aumento exponencial no tempo médio de espera por trem, seria impraticável manter uma operação com elevado nível de custo e ineficiência. Por isso, a visão proposta por Abril *et al.* (2007) pode ser considerada mais completa, pois demonstra os estágios de trabalho dentro do sistema ferroviário, conforme explicitado na FIG. 2.15. Nela é apresentada como os atrasos médios aumentam exponencialmente quando o número de trens excede o nível de saturação e como a confiabilidade da rede é perdida. “Portanto, aumentar o número de trens acima dos níveis de saturação não é lucrativo” (ABRIL *et al.*, 2007).

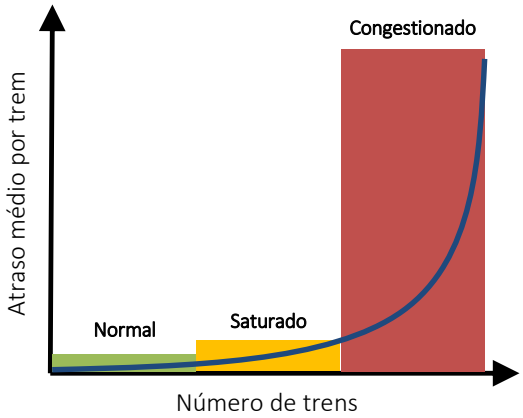

FIG. 2.15 Níveis de saturação de acordo com o atraso médio
Fonte: adaptado pelo autor de Abril *et al.* (2007)

O que é comumente feito em avaliações de longo prazo é a determinação de uma tolerância máxima aceita pelo operador ferroviário, que pode ser desde a manutenção das condições atuais (aumento zero de ciclo) ou incrementos proporcionais ao tipo de serviço prestado. Isto está relacionado ao explicitado por Pachl (2009), ou seja, "o tempo de espera é uma medida de qualidade da operação". Segundo o autor, o tempo de espera se aproxima da tangente vertical, que é a capacidade máxima do sistema. Este é a quantidade máxima de saída, independente da qualidade. Quando o *input* excede a capacidade máxima, vai ocorrer um aumento da fila, que não pode ser reduzido em nenhum ponto além.

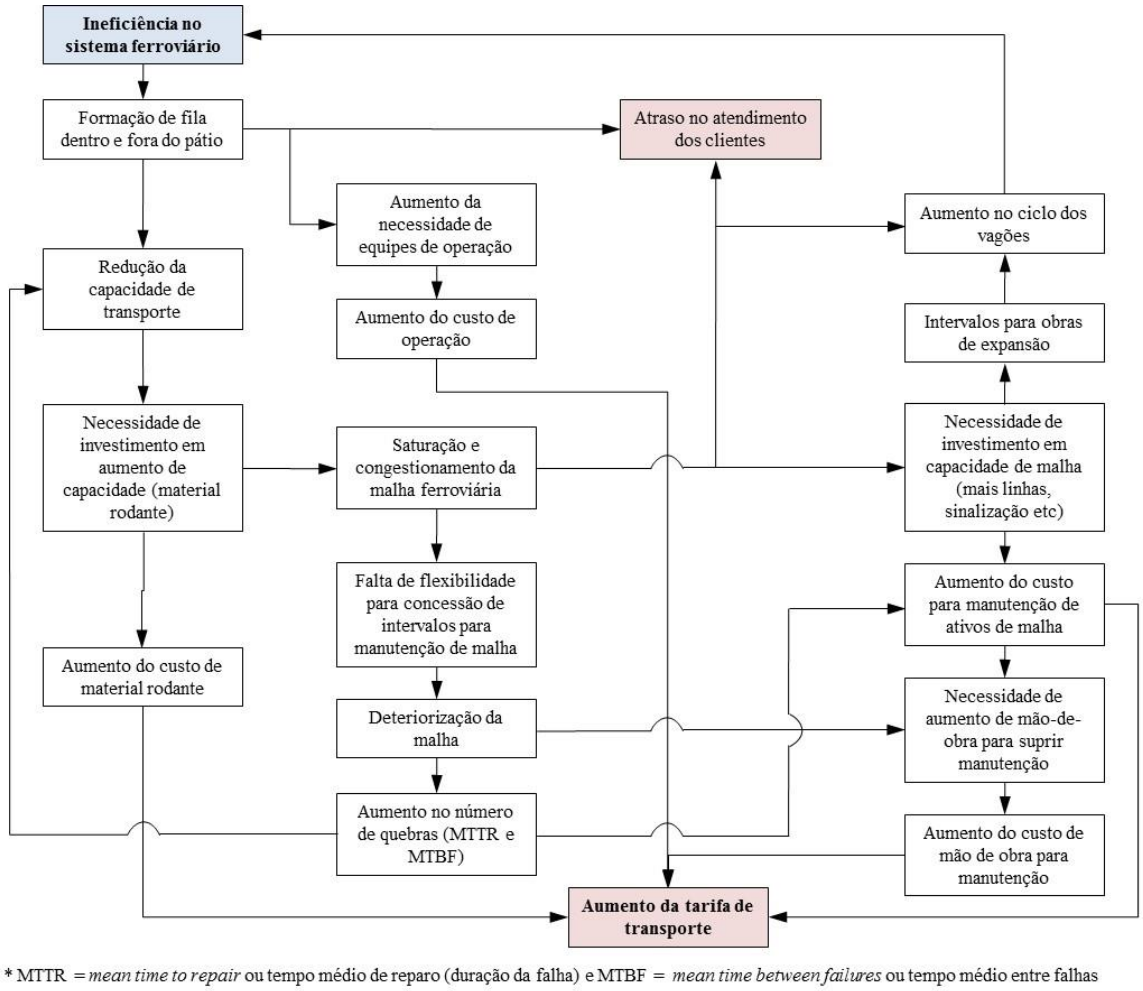

FIG. 2.16 Ciclo de ineficiências e investimentos em capacidade
Fonte: autor (2015)

Beckmann *et al.* (1956) apresentaram a definição de atraso acumulativo como "o somatório dos períodos em que um vagão aguarda a chegada ou a manobra (ou ambos) de outros vagões com os quais precisa ser despachado". Os impactos da falta de eficiência são diversos, tais como: aumento do custo operacional (redução de margem), não atendimento de um cliente, atraso de um trem em um outro pátio que dependa de algum vagão atrasado etc. Alguns elementos são apresentados na FIG. 2.16 e permitem uma reflexão da importância da eficiência operacional em um pátio ou no sistema de circulação, enquanto que a influência de instalações de pátios, entrada de tráfego e política em custos e saída de um pátio simples são apresentadas na TAB. 2.1.

TAB. 2.1 A influência de instalações de pátios, entrada de tráfego, política em custos e saída de um pátio

Efeito de / Efeito sobre			Instalações de pátios	Entrada do tráfego	Política			
					Recebimento	Agrupamento	Formação	Programação (grade de trens)
Custos de pátio	Manipulação	Recebimento	Tamanho da equipe de inspeção		Tamanho das seções em que os trens são fracionados			
		Triagem	*Hump yard* ou *Flat yard*	Ordem dos vagões	Tamanho das seções em que os trens são fracionados	Quantidade de cortes por grupo de vagões		
		Formação	Formação simultânea de dois trens				Quantidade de grupos por trem	Tamanho dos grupos
	Congestionamento		Através do efeito sobre o tempo de manipulação	Chegada agrupada de trens	Prioridade em manipulação	Através do efeito sobre o tempo de manipulação	Através do efeito sobre o tempo de manipulação	Através do efeito sobre o tempo de manipulação
	Acumulação			Nível dos componentes escoa	Substituição do atraso de recebimento por atraso acumulado		Formação restritiva significa partidas menos frequentes	Frequência de partidas
Custo de transferência de uma manobra para um próximo pátio							Tamanho do trem	Tamanho do trem
Saída para o tráfego				Ordem dos vagões dentro dos grupos		Ordem dos vagões	Quantidade de grupos por trem	Tamanho dos grupos

Fonte: Beckmann *et al.* (1956)

Uma outra ilustração dos impactos de ineficiência operacional na ferrovia é apresentada por Marinov *et al.* (2009). De acordo com os autores, uma vez que os blocos de vagões dificilmente seguem diretamente da origem para o destino, são necessárias paradas intermediárias para conexões entre trens e estas acontecem em pátios. A relação de falha nestas conexões, gerada principalmente pelas ineficiências intermediárias, é apresentada na FIG. 2.17.

FIG. 2.17 Impacto das falhas nas conexões de trens entre pátios
Fonte: adaptado pelo autor de Marinov *et al.* (2009)

Visando organizar as iniciativas do campo ferroviário de forma sistemática e metodológica, em 1980, Assad apontava a importância de coletar e categorizar os esforços de

modelagem ferroviária, posicionando a literatura relacionada à ferrovia no contexto dos demais modos de transporte. Igualmente, apresentava uma abordagem de modelos de teoria de filas em pátios, suas principais funções de produção e uma discussão de modelagem.

Por outro lado, Crane *et al.* (1954) propõem o desenvolvimento de um modelo para filas de um pátio de classificação em particular através da aplicação do método de Monte Carlo, permitindo representar uma pequena parte das potencialidades da área de pesquisa operacional no campo ferroviário. Agregando ao tema, Marinov *et al.* (2009) propõem uma metodologia de modelagem de simulação para analisar e avaliar a operação de um pátio através do SIMUL8®, apresentando uma discussão detalhada de como a metodologia pode ser implementada no mundo real.

Para o cálculo de capacidade, conforme apontado por Pachl (2009), Marinov *et al.* (2011) e Rufe (2013), existem dois tipos de modelos: os determinísticos e os estocásticos. Rufe (2013) aponta que o modelo determinístico assume que todos os dados são conhecidos com relativa certeza e a resposta é conhecida. São aqueles que não possuem aleatoriedade em sua composição, ou seja, a saída pode ser calculada de forma exata e precisa, determinadas pelos parâmetros e pelas condições iniciais. Resultados diferentes podem ser alcançados somente mediante alteração dos dados de entrada, do modelo/equação ou ambos.

Os modelos estocásticos, algumas vezes chamados de modelos probabilísticos, definem a probabilidade de ocorrência de eventos aleatórios. São aqueles que possuem variáveis aleatórias em sua composição, e, por exemplo, em modelos de simulação podem levar a construção de diferentes saídas, dependendo do sorteio de valores e eventos durante a execução do modelo. Modelos estocásticos caracterizam e estimam o desempenho do sistema para situações em tempo real. “Por exemplo, em uma situação de montagem, é desconhecido quando uma máquina irá quebrar ou quando ocorrerá escassez de trabalho. Contudo, utilizando dados passados, é possível prever esses eventos aleatórios” (RUFE, 2013).

2.3.2 CÁLCULO DE CAPACIDADE DE PÁTIO: MÉTODO DETERMINÍSTICO

Os modelos analíticos determinísticos são amplamente utilizados no campo ferroviário. Trata-se da aplicação de equações para, de forma simples e direta, calcular a capacidade de circulação ou de pátio.

Para Pachl (2009), os métodos analíticos podem ser úteis em muitos casos de baixa densidade de tráfego ou, de algum modo, em situações relativamente muito simples que requeiram mais tempo para construir e calibrar por simulação do que para resolver o problema. Segundo o autor, a capacidade do *layout* de vias de terminal (estação de passageiros ou pátios de carga) depende do número de linhas e do tempo de permanência dos trens que são processados nesta instalação. Por outro lado, o número necessário de linhas depende do tráfego de entrada e saída que o pátio precisa manipular. Na média, o tráfego de entrada precisa ser igual ao tráfego de saída.

De acordo com Pachl (2009) e Marinov *et al.* (2011), esses métodos são principalmente utilizados para determinar, de forma aproximada, o valor mínimo absoluto de linhas em um pátio e consistem em uma simples equação, tal como:

$$n_{\text{linhas,min}} = t_{\text{permanência, média}} * (n_{\text{trens}} / t)_{\text{médio}} \qquad (2.1)$$

Em que:

$n_{\text{linhas,min}}$ = número mínimo de linhas;

$t_{\text{permanência, média}}$ = permanência média em minutos por trem de carga;

$(n_{\text{trens}} / t)_{\text{médio}}$ = fluxo de tráfego médio, trens de carga por período.

Para Pachl (2009), é importante utilizar a variação de entrada e saída ao longo do tempo para determinar o número de linhas que são necessárias em operações reais, não apenas o tráfego médio. Podem ocorrer horários de pico que, por um tempo limitado, o tráfego de entrada é maior do que o tráfego de saída. Para evitar congestionamento, o pátio precisa estar apto a administrar o tráfego de pico.

Conforme dito anteriormente, os modelos determinísticos possuem como grande vantagem a sua simplicidade de aplicação, permitindo respostas rápidas em avaliações de sensibilidade e servindo de orientação inicial em avaliações macroscópicas. Todavia, o risco da simplificação demasiada pode resultar em respostas que não refletem a realidade operacional das ferrovias, bem como inviabilizar avaliações mais completas que considerem impacto no ciclo dos trens e a visualização de possíveis ineficiências operacionais.

De acordo com Marinov *et al.* (2011), os pátios não dispõem apenas de recursos estáticos (p.ex. quantidade de linhas), mas também de recursos dinâmicos (p.ex. equipe de pátio), que igualmente são restritos e operam dentro de uma capacidade limitada imposta pelos recursos estáticos e que determinam o nível de eficiência operacional de toda a instalação. Desordem e desorganização entre os recursos dinâmicos provocam a materialização de filas, os produtos demoram, assim como há atraso no serviço, com pouca produção e muitos custos injustificados acumulados (MARINOV *et al.*, 2011).

2.3.3 CÁLCULO DE CAPACIDADE DE PÁTIO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

De acordo com Rufe (2013), simulação é um termo amplo e é definido como o uso de métodos e aplicações para imitar sistemas reais. Trata-se de uma técnica descritiva em que o modelo matemático de uma situação do mundo real é desenvolvido e então experimentos são conduzidos no modelo para avaliar o seu comportamento sob várias condições. Simulações buscam duplicar características e comportamentos de um sistema. Desta forma, um modelo de simulação ajuda a responder as perguntas do tipo “e se”, permitindo que as pessoas testem suas soluções e, baseado na simulação de resultados, tomem decisões apropriadas.

O conceito foi ratificado por Hillier *et al.* (2001), ao afirmar que esta técnica consiste em utilizar um computador para imitar (simular) a operação de um processo ou sistema. Sua aplicação para o entendimento de operações ferroviárias é então complementada por Santos (2014), ao considerar que “a utilização de ferramentas de simulação permite a modelagem de corredores ferroviários com aderência à realidade e profundidade, para que se possa emular a malha ferroviária com linhas duplas e singelas, pátios, terminais e sistemas de sinalização”.

A simulação é a única maneira de se obter a compreensão de situações que ainda não existem (RUFE, 2013) e é tipicamente utilizada quando os sistemas estocásticos envolvidos são muito complexos para serem satisfatoriamente analisados por outros tipos de modelos matemáticos (HILLIER *et al.*, 2001).

Para Rufe (2013), independente do tipo de simulação, certos passos básicos são aplicados. Segundo o autor, o processo é descrito graficamente na FIG. 2.18, considerando:

- Identificar o problema e traçar os objetivos. Este passo determina os limites e o escopo do problema e os resultados esperados da simulação. Uma definição clara do objetivo pode prover não somente um guia para o desenvolvimento do modelo como também a base para avaliação do sucesso ou fracasso da simulação. O processo também envolve definir um alvo, escopo e nível de detalhe requerido pela própria simulação;
- Variáveis. Identificar e definir importantes variáveis do sistema e desenvolver relações entre elas para concepção do modelo matemático. Para tanto, a análise de dados de entrada, sejam eles históricos ou considerando premissas futuras, devem ser analisadas criteriosamente e, quando possível, submetida a apreciação de especialistas;
- Construir o modelo de simulação. Isto envolve em decidir sobre a estrutura do modelo e utilizar o computador para executar as simulações. Está previsto nesta etapa que os dados sejam adquiridos ou armazenados, o que significa parte do desenvolvimento do modelo e sua avaliação;
- Validar o modelo. Esta etapa consiste em testar o modelo para se ter certeza que está precisamente refletindo o sistema em estudo. Quanto melhor a validação do modelo, maior a confiança nos resultados. Desta forma, um fator de segurança inferior pode ser atribuído. Um analista geralmente valida o modelo comparando os resultados da simulação com desempenhos conhecidos do sistema nas mesmas condições. Em situações em que os dados da vida real não existam ou sejam difíceis de coletar, um teste de razoabilidade é empregado. Os julgamentos e opiniões de pessoas especialistas no sistema ou em sistemas similares são requeridos para confirmação dos resultados como aceitáveis. A construção do modelo e sua validação são atividades totalmente integradas.

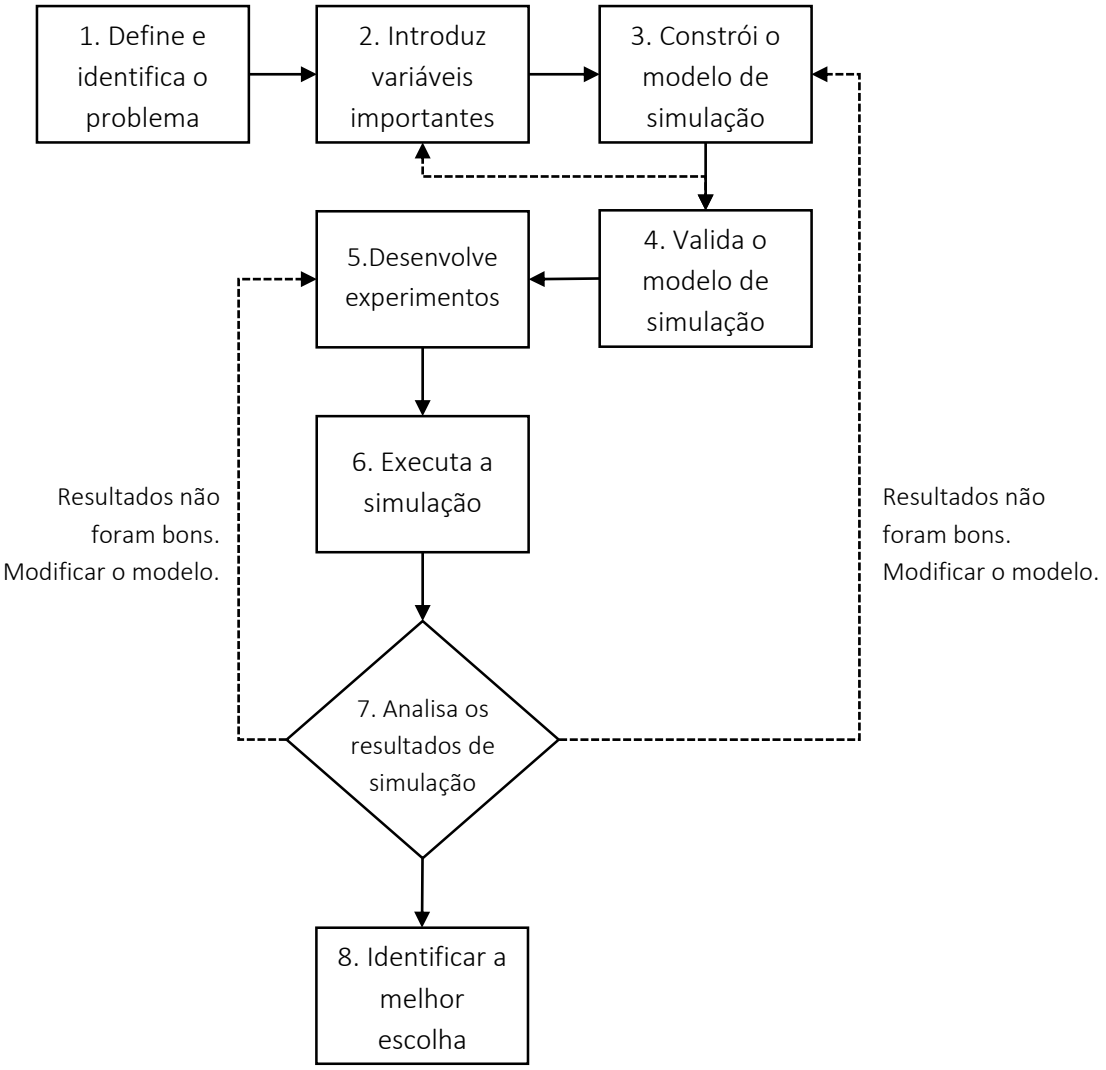

FIG. 2.18 Passos básicos aplicados em uma simulação
Fonte: Rufe (2013)

- Desenvolver um ou mais experimentos. Esses experimentos são a essência da simulação. Eles ajudam a responder as perguntas do tipo "e se" colocadas anteriormente. Seguindo por este caminho, o gerente ou analista aprendem sobre o comportamento do sistema.
- Executar o modelo de simulação. Se o modelo é determinístico, os parâmetros são conhecidos e constantes, somente uma única rodada da simulação é necessária para cada pergunta do tipo "e se". Alternativamente, se o modelo é probabilístico, com parâmetros sujeitos a variabilidade aleatória, múltiplas rodadas (ou replicações) serão necessárias para se obter uma visão clara dos resultados. Simulação probabilística é

essencialmente a forma de se obter amostras aleatórias, com cada replicação refletindo uma observação.

- Analisar os resultados de simulação. A interpretação dos resultados depende do grau em que o modelo se aproxima da realidade. Quanto mais próxima a modelagem, menor a necessidade de ajuste do resultado. Além disso, quanto mais próxima a modelagem da realidade, menor o risco inerente à aplicação dos resultados. Ferramentas estatísticas pós processamento ajudam na interpretação detalhada dos resultados.

A modelagem de uma infraestrutura ferroviária é uma atividade complexa e que requer atenção no desenvolvimento. Muito além da escolha da linguagem computacional a ser utilizada ou do tipo de software de simulação, o alinhamento de expectativas e o grau de precisão na resposta são itens que precisam ser previamente determinados. Modelos mais precisos demandam uma modelagem mais complexa, entrando mais profundamente no detalhe da operação e, consequentemente, demandando maior tempo na elaboração, calibração e avaliação dos resultados. Por outro lado, estudos cujo tempo de resposta seja um fator crítico, demandando uma avaliação rápida de um cenário, naturalmente são traduzidos em modelos menos precisos e com grau de resposta mais generalistas.

O objetivo do estudo de uma operação para planos estratégicos geralmente considera a segunda abordagem apresentada, o que remete ao problema de definição do nível de atuação (macroscópico, mesoscópico ou microscópico) anteriormente tratado. Por se tratarem de estudos de longo prazo, referentes a projeções de volume com inerente grau de incerteza, é tolerável uma menor precisão nas respostas, embora elas precisem apontar para direção correta.

Diferente de estudos tático-operacionais que realizam replanejamentos baseado nas adversidades encontradas ao longo do dia, por exemplo, ou ainda a avaliação de impactos em alteração do plano mensal ou da realização de um trem esporádico e preferencial, os estudos estratégicos estão mais preocupados em apontar quais são os próximos gargalos operacionais no longo prazo e quais são as soluções associadas para garantia do transporte, geralmente de maior porte como investimentos e mudança do modelo operacional. Ele fornece grandes números de investimento e custeio, municiando a Diretoria e o Conselho de Administração

com cenários da empresa projetados no futuro. Trata-se de uma ferramenta de suporte à decisão.

Uma dúvida constante ao realizar as avaliações deste porte, comuns às equipes de Engenharia nas ferrovias, é a mistura destes elementos em estudos distintos. Enquanto que, por um lado, visões detalhadas de cenários nos próximos dez ou vinte anos podem produzir uma massa desnecessária de dados em cenários incertos, com grandes tempos de processamento e lentidão na resposta dos estudos, por outro lado a utilização de modelos estratégicos e mais generalistas na avaliação pontual de estudos operacionais pode fornecer dados que, se não errados, são por vezes incompletos ou não totalmente adequados.

O importante a ser ressaltado é que modelos de simulação, por mais complexos e detalhados, oferecerão algum grau de imprecisão, ainda que mínimo em alguns casos. Qualidade da informação utilizada na entrada, aleatoriedade das variáveis, sorteios realizados pelo modelo, nível de imprecisão dos volumes projetados, nível de imprecisão de cenários operacionais que atualmente não existem (e não podem ser comparados) são exemplos de fatores que impactam diretamente no resultado final, e uma atenção importante do grupo de estudo é desenvolvê-lo de modo a minimizar os riscos e imprecisões nas respostas avaliadas.

O mercado de simulação computacional oferece uma série de soluções para a representação de um determinado cenário, seja ele no âmbito industrial, logística, entre outros. As aplicações são as mais diversificadas possíveis, desde um modelo de uma mina de minério de ferro, a circulação de trens em uma malha fechada ou na avaliação de uma praça de pedágio, diferenciando-se em linguagem, robustez e capacidade de processamento.

Alguns exemplos de *softwares* de simulação disponíveis e que atendem a proposta de modelar a operação de um pátio ferroviário são SIMUL8®, RTC Berkeley®, Arena® e Anylogic®, mas muitos outros permitem, em diferentes níveis de complexidade e utilizando diferentes linguagens de programação, reproduzir a operação de recebimento, classificação e partida de trens. Contudo, muito além da escolha do modelo de simulação, alguns fatores igualmente importantes a serem observados pela equipe de estudo durante o processo de modelagem são qualidade do dado, manutenção do dado e propriedade intelectual do dado.

Hansen *et al.* (2008) apresentaram uma avaliação completa sobre estes fatores, conforme apresentado abaixo:

- Qualidade do dado: o uso de informações incorretas ou inconsistentes podem causar posteriormente sérios problemas no processo de planejamento. Torna-se essencial uma verificação da qualidade da infraestrutura do modelo, que pode ser realizado através da visualização do dado, crítica de profissionais experientes e pela simulação de tempos calculados e realizados;
- Manutenção do dado: torna-se necessário que todas as mudanças e alterações infraestrutura real que está sendo reproduzida sejam introduzidos no modelo;
- Propriedade intelectual do dado: algumas questões devem ser verificadas antes da utilização das informações, tais como "Quem possui acesso legal aos dados e aos modelos desenhados?" ou "É possível transferir tanto os dados quanto os modelos desenhados a outras pessoas?". Alguns exemplos de dados são: planos de *layout* de via, planos de sinalização, esquemas ilustrativos, entre outros.

Uma grande vantagem da utilização do modelo de simulação em relação ao modelo determinístico é que, através da reprodução da realidade em ambiente computacional, é possível inserir a aleatoriedade que ocorre nas operações diárias.

Um pátio de classificação está inserido em um sistema de circulação e, como tal, influencia e sofre influências na região inserida. Isto significa que o desempenho do pátio pode variar mediante o modo como os trens chegam para ser processados, assim como o meio pode ser influenciado dependendo da maneira em que os trens forem "produzidos" pelo pátio.

Um exemplo de como o pátio sofre influência do meio está no horário de chegada dos trens, que pode variar no tempo conforme performance de circulação e possíveis falhas que tenha enfrentado em seu percurso. Estas falhas ou eventos que proporcionam o atraso do trem são igualmente variáveis no tempo, dependendo das condições de ativos e situações imprevisíveis que retêm a movimentação dos trens. Com isso, podem ocorrer grandes lacunas de tempo sem chegada de trens, gerando ociosidade dentro do pátio, enquanto que em outros momentos podem ocorrer chegadas concentradas, com consequente formação de filas. A ilustração destes cenários de chegadas linearmente distribuídas e aleatórias é apresentada na FIG. 2.19.

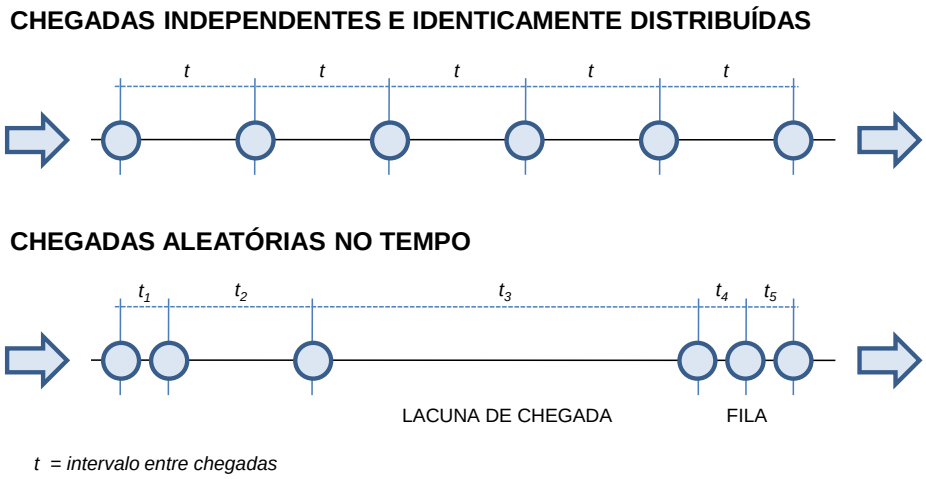

FIG. 2.19 Ilustração das chegadas independentes e identicamente distribuídas e aleatórias
Fonte: autor (2015).

Por outro lado, um pátio de classificação igualmente influencia o meio mediante situações intrínsecas ao processamento de trens, que igualmente podem variar no tempo. A falta de uma frente de manobra, por exemplo, seja por falha de ativos ou por falta de mão-de-obra, podem gerar tempos de processamento superior ao habitual, alterando o horário de partida dos trens, podendo gerar congestionamentos na malha. Uma vez mapeadas, condições como esta podem ser inseridas no modelo de simulação, atribuindo ao sistema um caráter cada vez mais real e detalhado.

2.4 IDENTIFICANDO O RECURSO-GARGALO E AUMENTANDO A CAPACIDADE FERROVIÁRIA

Iniciando uma análise mais objetiva de um pátio de classificação, é possível perceber algumas similaridades entre seu modo de funcionamento e uma unidade industrial de manufatura. Para Dirnberger *et al.* (2006), porque pátios ferroviários de classificação podem ser considerados sistemas de produção, é possível conhecer a dinâmica do sistema do pátio adotando-se ferramentas de gerenciamento da produção que levaram a um significante aumento de desempenho no processo de fabricação.

A conceituação é ratificada por Marinov *et al.* (2011), citando que "pátios podem ser considerados como sistemas de produção caracterizados por capacidade física limitada e que podem se tornar facilmente supersaturados quando os limites não são respeitados".

A visão de um pátio de classificação por este prisma permite perceber alguns pontos importantes no seu funcionamento, ou seja:

- Existe uma entrada, que é formada pelos trens que chegam seguindo um certo padrão determinado. Esta entrada, ou *input*, pode ser baseada em horários pré-fixados (operações regulares com grade de trens) ou seguindo certa distribuição densidade de probabilidade;
- Existe um processamento, que é composto pelas atividades de classificação em si. Neste processamento, ou *process*, os trens são manipulados (manobrados), com os vagões sofrendo novas combinações e sendo agrupados conforme novo destino. Analogamente a anterior, esta etapa está sujeita as oscilações de performance das frentes de manobra;
- E, por fim, existe uma saída, que é a produção dos trens formados e prontos para partida, que será regida por uma política específica tal como horário fixo previsto na grade de trens. No *output*, os trens formados serão entregues para circulação.

Um resumo da estrutura é apresentada na FIG. 2.20.

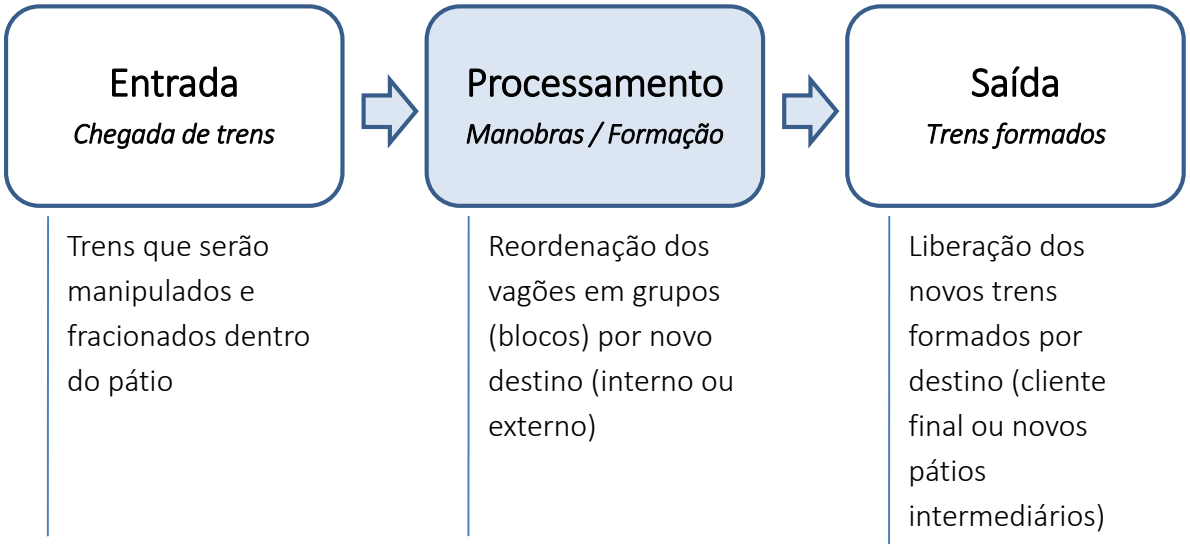

FIG. 2.20 Visão macro de um pátio de classificação
Fonte: autor (2015).

Um detalhamento ainda maior pode ser dado à visão de manufatura de um pátio de classificação. A etapa de processamento, por exemplo, pode ser composta por diversas atividades, tais como:

- Inspeção de entrada: verificação das condições dos vagões e carga, voltados para manutenção da segurança no transporte;
- Manobra de vagões: reordenação e agrupamento dos vagões conforme destino;
- Manobra de locomotivas: geralmente aplicado em trens grandes em que sejam necessários fracionamentos da composição e utilização de tração distribuída;
- Manobra de vagões marcados pela equipe de inspeção: reordenação e agrupamento dos vagões reprovados pela equipe da manutenção durante a inspeção;
- Abastecimento de diesel e areia: aplicado nos casos em que o pátio com a instalação completa de abastecimento (bicos, bandejamento etc.);
- Formação: uma vez disponíveis todos os vagões no pátio, o novo trem de saída é formado nas linhas de partida;
- Inspeção de saída: verificação das condições dos vagões e carga, voltados para manutenção da segurança no transporte de carga. Esta etapa ganha maior destaque nos locais em que existe intercâmbio entre trens de carga e trens de passageiros, de modo a garantir a segurança dos passageiros nas plataformas das estações de trens urbanos;
- Documentação: processo paralelo às demais atividades, consistindo no manifesto da carga em transporte.

A realização das atividades acima mencionadas está sujeita à natureza do pátio, ou seja, para qual finalidade ele foi desenhado dentro do sistema de circulação. Deste modo, por exemplo, nem todo pátio contará com uma instalação de abastecimento, podendo ser destinado estritamente à manobra e formação de novos trens.

Uma vez conhecido o processo de funcionamento, através do detalhamento das políticas da instalação e seu modelo operacional, e estabelecida a vazão média de trens que um pátio de classificação consegue produzir dentro de limites de eficiência operacional, quando houver uma ampliação do plano de transporte, torna-se necessário aumentar sua capacidade. Contudo, dada a elevada quantidade de recursos presentes nesta instalação, realizando

atividades em série e em paralelo, seu diagnóstico pode ser uma atividade complexa. Torna-se então necessário definir qual o recurso que está limitando a capacidade do sistema para atuação, conhecendo qual o gargalo.

2.4.1 DEFINIÇÕES

Para identificação dos recursos que estão atuando como gargalo no sistema e, consequentemente, limitando sua capacidade, alguns conceitos apresentados por Hopp *et al.* (2000) são importantes de serem apresentados:

- Estação de trabalho. Em um ambiente industrial, estação de trabalho (também conhecida como estação e centro de processo) é a coleção de uma ou mais máquinas ou estações manuais que desempenham essencialmente funções idênticas. Criando um paralelo com um pátio de classificação, cada unidade que transforma o estado do trem (p.ex. recebimento, transformando um trem "em circulação" em "à disposição do pátio"; ou classificação, transformando sequenciamento original de vagões em agrupamento por destino, etc.) pode ser interpretada como uma estação de trabalho;
- Rota. Descreve a sequência de estações de trabalho em que um produto passa. No ambiente do pátio de classificação, descreve qual a sequência de estações de trabalho que serão visitadas e as respectivas atividades que um trem irá desempenhar dentro da instalação entre o processo de chegada no pátio até sua transformação em um ou mais trens de partida;
- Taxa de transferência. É a taxa média de saída do processo de produção por unidade de tempo (p.ex. unidades por hora);
- Tempo de ciclo. Também conhecido pelas variações tempo médio de ciclo, tempo de fluxo, tempo de rendimento ou tempo de permanência, o tempo de ciclo de uma determinada rota é o tempo médio entre a entrada de um trabalho no início da rota até alcançar um ponto de medição no fim da rota, ou seja, tempo levado como WIP (*work in process*) ou simplesmente tempo em processo. Relacionando o termo a um pátio ferroviário, o tempo de ciclo é o tempo decorrido entre a entrega de um determinado trem em um pátio até o encerramento de suas atividades e partida, ou seja, o tempo em que efetivamente o trem esteve sendo servido pelo pátio;

- Utilização. A utilização de uma estação de trabalho é a fração de tempo em que ela não está ociosa por falta de peças ou insumos. Isto considera a fração de tempo em que a estação de trabalho está em atividade com insumos ou possui insumos em espera (fila) e é impedida de processar em função de uma falha, de um tempo de preparo etc. De acordo com os autores, a utilização pode ser computada da seguinte forma:

$$\text{Utilização} = \frac{\text{Taxa de chegada}}{\text{Tx prod efetiva}} \tag{2.2}$$

Onde a taxa efetiva de produção (Tx prod efetiva) é definida como a máxima taxa média em que a estação de trabalho consegue produzir, considerando os efeitos de falhas, tempos de preparo etc.

2.4.2 IDENTIFICAÇÃO DO GARGALO

Um fator que influencia diretamente no desempenho de um sistema é o gargalo. Para Kuo *et al.* (1995), uma máquina é o gargalo se a sensibilidade do índice de performance do sistema relacionada a taxa de produção for a maior quando comparado com todas as outras máquinas. Já para Chiang *et al.* (2001), o gargalo de uma linha de produção é a máquina que impede a performance do sistema de uma maneira mais forte. Contudo, a definição que é a aparentemente mais completa foi definida por Betterton *et al.* (2012), que diz que "o gargalo é o recurso que afeta o desempenho de um sistema da maneira mais forte, ou seja, o recurso que para um dado incremento de mudança, possui a maior influência no desempenho do sistema".

Conforme apontado por Betterton *et al.* (2012), torna-se importante a realização de melhorias no gargalo, ou seja, o aumento da taxa efetiva de saída do gargalo atual, o que permitirá um aumento da taxa efetiva de saída de todo o sistema. Este conceito é a base da Teoria das Restrições estabelecida pelo Dr. Eliyahu M. Goldratt, que estabelece em linhas gerais os seguintes passos:

- Identificação das restrições;
- Exploração máxima das restrições;
- Subordinação dos demais recursos ao gargalo;

- Aumento de capacidade das restrições;
- Assim que houver alteração do recurso restritivo, iniciar novamente o ciclo.

É essencial saber quando parar de realizar melhorias sobre o gargalo em estudo, sob risco de estar realizando investimentos ou alterações de processos onde o ganho será marginal ou nulo. Isto se deve ao fato de que "o gargalo pode ter mudado para outro local" (BETTERTON *et al.*, 2012) e que melhorias não resultarão no aumento da taxa efetiva de saída do sistema.

De acordo com Hopp *et al.* (2000), a "taxa do gargalo é a taxa (peças por unidades de tempo ou trabalhos por unidade de tempo) de uma estação de trabalho tendo a maior utilização no longo prazo". Isto relaciona o índice de performance do gargalo com o conceito de utilização e, conforme apontado pelos autores, entenda-se por longo prazo que as interrupções em função de falhas, paradas do operador, problemas de qualidade etc., são calculadas ao longo do tempo considerado. Isto implica que o tratamento apropriado das interrupções será diferente dependendo da frequência de planejamento.

Para Hopp *et al.* (2000), em linhas consistindo de uma rota única em que cada estação de trabalho é visitada exatamente uma vez e não há nenhuma perda de rendimento, a taxa de chegada de cada estação de trabalho é a mesma. Ou seja, é de se esperar que a estação com maior utilização seja a com menor taxa efetiva. Por outro lado, os autores apontam que em linhas com rotas mais complexas ou perdas de rendimento, o gargalo pode não ser a estação de trabalho mais lenta. Uma estação mais rápida que experimenta uma taxa de chegada mais alta pode possuir uma utilização maior. "Por esta razão, é importante definir o gargalo em termos de utilização conforme aqui realizado" (HOPP *et al.*, 2000), ratificando a conceituação inicial de gargalo apresentada por Lawrence *et al.* (1994) que o aponta como "o que recurso em que a utilização ao longo do tempo é máxima".

Para Faget *et al.* (2005), o método da utilização mede o percentual de tempo que uma estação está em estado ativo, o que resulta no apontamento da estação com maior percentual como o gargalo, e para Roser *et al.* (2001), a máquina com o mais longo período médio ativo é considerada o gargalo, uma vez que esta máquina é a menos provável de ser interrompida por outras máquinas, o que a torna a mais provável de ditar a taxa de rendimento total do sistema.

Na presente produção científica, o modelo de simulação é construído utilizando o software Arena®, uma marca registrada da Rockwell Automation, Inc. É então utilizado o medidor de utilização dos recursos para identificação do recurso gargalo e avaliação de ganhos de capacidade.

2.4.3 AUMENTANDO A CAPACIDADE

Conforme abordado por Pachl (2009), em caso de capacidade insuficiente para atendimento da frequência de tráfego futura, a capacidade pode ser aumentada de diferentes maneiras:

- Modificando a grade de trens ou o procedimento operacional;
- Removendo seções de velocidade baixa;
- Modificando o arranjo de sinalização;
- Modificando o *layout* de vias.

"Em um primeiro momento, alguém precisa tentar solucionar problemas de capacidade por meio da operação" (PACHL, 2009). Exemplos disto são a padronização de atividades no pátio: ganho de capacidade por redução de variabilidade, eliminação de atividades que não agregam valor e balanceamento de atividades com outros pátios.

Outra grande restrição para capacidade em sistemas ferroviários é a baixa velocidade, que juntamente com o arranjo de sinalização, influenciam no tempo de deslocamento de um veículo ferroviário em determinada região.

Por fim, a modificação de *layouts* de via oferece um salto de capacidade através da introdução no sistema de um novo recurso que pode ser utilizado pelos trens, geralmente reduzindo ou preferencialmente eliminando conflitos e competição por utilização. Exemplos possíveis de serem citados são a criação de uma nova alça de manobra, a flexibilização através de um novo conjunto de aparelhos de mudança de via (AMVs), dentre outros, que requerem investimento por vezes considerável, contudo não raro retornando saltos de performance. "A modificação de *layouts* de via é maneira mais cara de aumentar a

capacidade. É somente recomendado quando outras maneiras para resolver o problema falham" (PACHL, 2009).

Embora seja de extrema importância para regularidade do sistema, a modificação da grade de trens ou de procedimento operacional não será explorada nesta produção científica, em virtude do seu caráter majoritariamente operacional e relacionado a decisões de curto prazo. O ponto de partida será que suas avaliações já foram previamente estudadas e implementadas, sendo que a capacidade será a partir deste ponto direcionada por mudanças na infraestrutura.

Tendo em vista a característica estratégica dos demais itens e sua contribuição no aumento de capacidade de pátio, este trabalho concentra seus esforços em criar comparativos de capacidade e eficiência operacional por análise de sensibilidade da velocidade média de movimentação de vagões, simulando a eliminação de baixas velocidades e a melhoria / instalação de sistemas de sinalização, bem como a avaliação de expansões nos recursos-gargalo, abordando a questão de modificação do *layout* de vias.

3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE LAYOUTS

Conforme anteriormente apresentado, a metodologia de avaliação de pátios de classificação possui um enfoque em capacidade, permitindo o entendimento do nível de vazão de trens por dia que a instalação é capaz de operar dentro de níveis de eficiência e custo, bem como possibilita uma avaliação comparativa das soluções candidatas à eliminação de gargalo.

Para sustentar o enfoque proposto, o método de utilização é aplicado para diagnóstico de qual recurso restringe a capacidade de todo o sistema do pátio, atuando como gargalo de produção. Este é um método consagrado nos ambientes industriais de manufatura, cuja aplicação mostra-se efetiva, conforme referências bibliográficas apresentadas ao longo do capítulo 2.

A metodologia é iniciada com uma sequência de atividades, aqui intituladas de etapa prévia de determinação de demanda, que busca transformar o plano de transporte de longo prazo, geralmente apresentado em TU (tonelada útil), em quantidade de metros ocupados no pátio. Isto é possível porque a demanda de longo prazo é alocada no respectivo vagão-tipo para seu atendimento, visualizando-se, neste caso, o quantitativo de ativos disponíveis e o quantitativo que deverá ser adquirido ou transformado (adaptado) para o transporte.

Com o tipo de vagão definido, o tamanho dos blocos dos trens pode ser conhecido, considerando o desenho operacional do trem ao longo dos pátios e, por consequência, qual o tamanho de linha que será requisitado por cada trem. Outras variáveis são igualmente obtidas, tais como frequência e tamanho médio de metros por trem, por grupo de vagões e, consequentemente, por linha ocupada.

O segundo grupo de atividades, relativas à aplicação da metodologia em si, avalia como a demanda anteriormente transformada será absorvida pela atual estrutura do pátio, identificando as restrições e a resposta da instalação perante a intervenção nestas restrições. Com a adoção da ferramenta de simulação computacional, é possível compreender dinamicamente como a instalação responde ao fluxo de entrada e saída de vagões, manobras, atividades intermediárias e atendimento ao cliente, apontando os recursos com maior utilização.

O terceiro grupo de atividades, de cunho auxiliar, são as respostas fornecidas pela metodologia, tais como o tempo médio de permanência no pátio, quantidade de linhas necessárias e determinação de prioridades de investimentos. Outras respostas internas de modelagem como percentual de calibração e tempo de *warm up* também podem ser consultadas. O fluxograma completo da metodologia é apresentado na FIG. 3.1.

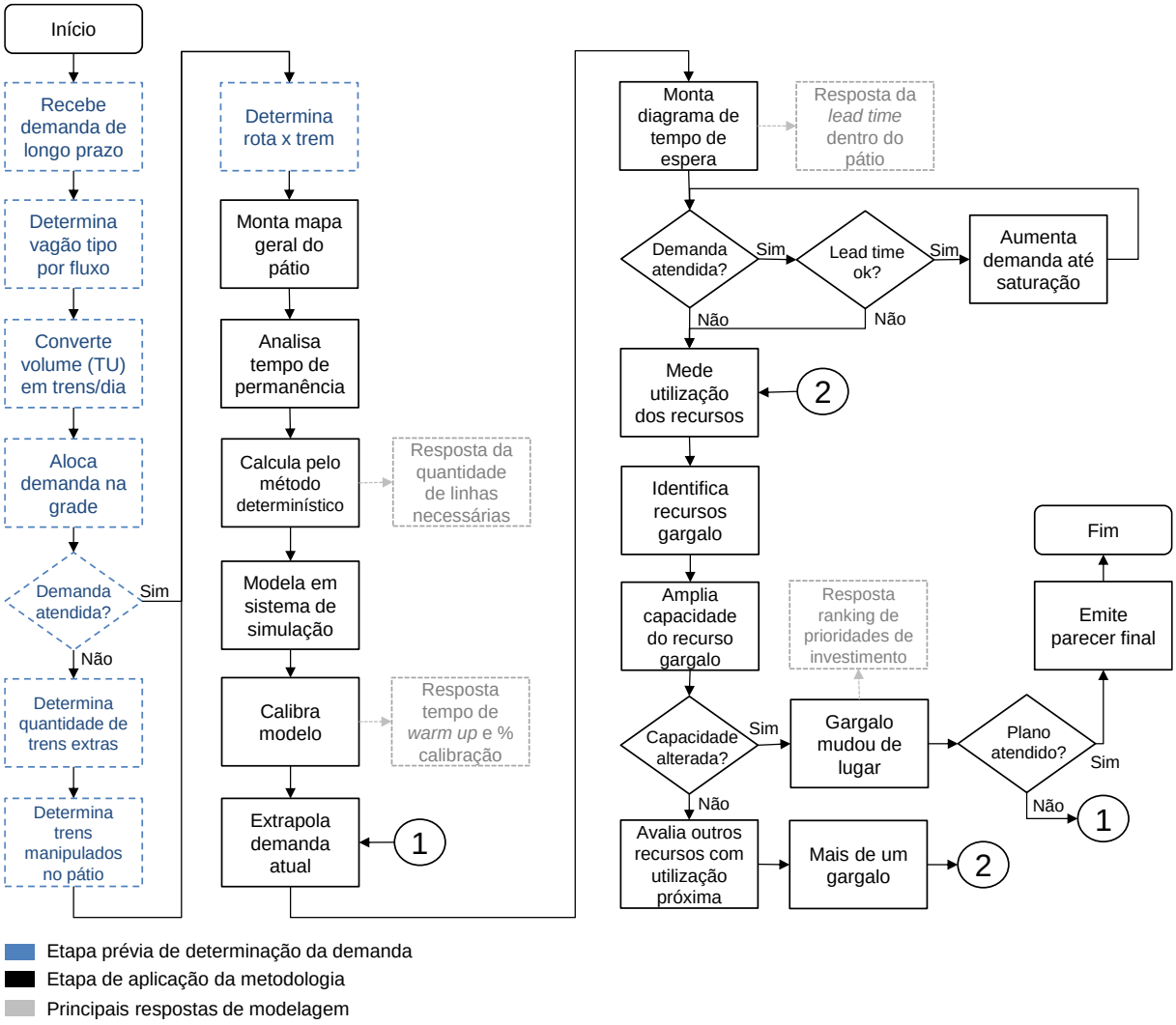

FIG. 3.1 Metodologia para avaliação de *layouts* para estudos no nível estratégico
Fonte: autor (2015).

Desse modo, tem-se como principais itens da metodologia:

1. Receber o Plano de Negócios da empresa e, filtrando as cargas que serão manipuladas no pátio (anexadas e desanexadas), extrair a base de rota (origem/destino);

2. Para cada rota, determinar qual o vagão-tipo de atendimento e suas características. Determinar quais vagões são possíveis de atender cada tipo de fluxo, baseado em suas características (finalidade, peso, capacidade de transporte etc.);
3. Baseado na característica de peso médio do vagão e dos vagões que são possíveis atender cada fluxo, converter o volume projetado em quantidade de vagões. Com a base de vagões no mês de pico de demanda e com a característica de tamanho do vagão, converter o volume projetado em metros de vagões por dia;
4. Alocar o volume projetado nos trens atuais de grade e identificar se todo volume pode ser atendido;
5. Caso o volume possa ser atendido, seguir para o passo 8;
6. Caso o volume não possa ser atendido, verificar quantos trens extras são necessários para atender o volume projetado;
7. Determinar qual a quantidade de trens que serão manipulados no pátio;
8. Determinar o sequenciamento rota x trem, ou seja, quais grupos de vagões serão anexados em quais trens e quais grupos de vagões serão deixados por quais trens;
9. Montar o mapa geral do pátio baseado na grade, considerando como é a entrada/saída de trens durante as 24 horas do dia;
10. Analisar no mapa qual o tempo médio de permanência dos vagões no pátio;
11. Realizar cálculo de capacidade pelo método determinístico como referência inicial, determinando qual a quantidade de linhas que são necessárias para atender os volumes projetados;
12. Realizar modelagem do pátio em sistema de simulação, visando perceber a interação dinâmica e a utilização dos recursos da instalação;
13. Realizar calibração do modelo considerando dados reais de um determinado período, visando verificar se o sistema está reproduzindo o pátio real de forma confiável. Caso ocorra um alto grau de desvio entre o real e o simulado, adequações deverão ser realizadas no modelo para melhorar os resultados simulados;
14. Realizar a extrapolação da demanda atual, verificando a resposta em termos de tempo médio de permanência e % de utilização dos recursos. Um exemplo de extrapolação é o incremento proporcional de todos os fluxos do pátio, com intervalos regulares;
15. Montar o diagrama de tempo de espera, conforme apresentado por Pachl (2009) e Abril *et al.* (2007);

16. Caso a demanda seja atendida e o *lead time* continua em linha com o atualmente praticado, continua-se a extrapolação até a saturação do *layout*;
17. Caso a demanda não seja atendida e/ou o *lead time* já esteja em níveis não aceitáveis, denotando um pátio ineficiente com alto tempo de processamento, mede-se a utilização dos recursos;
18. Investigar qual elemento do pátio restringe a sua capacidade, ou seja, qual recurso possui uma alta taxa de utilização e é o gargalo da instalação;
19. Ampliar a capacidade do recurso, seja aumentando a quantidade disponível (p.ex. aumentar a quantidade de linhas de recebimento) ou fazendo com que o recurso processe o trem de maneira mais rápida (p.ex. colocando mais uma alça de manobra para que as linhas de recebimento não fiquem tanto tempo com trens aguardando fila interna);
20. Caso a capacidade tenha sido alterada, o gargalo mudou de lugar e monta-se uma priorização dos investimentos a serem realizados no pátio;
21. Caso a capacidade não tenha sido alterada ou tenha sido alterada de forma marginal e pouco perceptível, avalia-se o percentual de utilização de outros recursos, pois nos casos em que as utilizações estejam em níveis muito próximas, atuar somente em um recurso não permitirá o salto de capacidade esperado;
22. Caso o plano de transporte inicialmente desejado não tenha sido atingido com a nova configuração, continua-se o processo de extrapolação atuando nos demais gargalos identificados pelo método da utilização;
23. Caso o plano de transporte tenha sido atingido, encerra-se a avaliação tendo posse da lista de mudanças necessárias de *layout* do pátio, bem como a ordem de prioridades.

Caso não seja possível realizar expansão do pátio ou alterar sua estrutura de modo a aumentar a sua flexibilidade, é necessário avaliar migração de fluxo para outros pátios.

Segundo Beckmann *et al.* (1956), pré-classificação é outro artifício frequentemente utilizado e que pode contribuir em casos como este. É primeiramente um método de transferência do trabalho de classificação de um pátio para o outro. Tal transferência pode ser necessária se um pátio ficar sobrecarregado, por exemplo, que tornem os atrasos muito pesados. Ou pode ser útil se um pátio é melhor equipado do que outro, de modo que o trabalho de classificação possa ser mais facilmente realizado lá. Divisões de atividades entre

pátios está além do objetivo desta produção científica e recomenda-se a leitura de *Division of sorting work between yards* disponível em Beckmann *et al.* (1956).

Outro ponto relevante é avaliar o conjunto de *layouts* candidatos para a área possível de construção, baseado no perfil da carga que será manipulada no pátio. Alguns itens são importantes, mas não exaustivos, de serem observados:

a. Qual a finalidade do pátio? A resposta para esta pergunta mostra-se um dos principais elementos para avaliar o projeto de um pátio. Embora as variantes construtivas e de engenharia civil excedam o propósito deste trabalho, é importante olhar para o *layout* e buscar entender que tipo de resultado é esperado com aquele desenho. Por exemplo, linhas em que ocorrerão carregamento de vagões por pá carregadeira demandarão uma plataforma de movimentação em sua lateral (e, consequentemente, espaço para sua viabilização);
b. O que está no entorno do pátio? Assim como o anterior, este item é de vital importância. A futura operação deverá considerar, por exemplo, que uma certa região em que ocorrerão testes na composição (geralmente com elevado ruído) não poderá ficar ao lado de um hospital, por exemplo, onde silêncio é mandatório. Do mesmo modo, o relacionamento com a comunidade local passa a ser um item que influencia na operação ferroviária e é por ela influenciada, requerendo avaliações por vezes mais qualitativas do que quantitativas;
c. Blocos grandes geralmente demandam linhas grandes, enquanto que perfil de pátio com carga fracionada geralmente denota a necessidade de linhas menores e em maior quantidade. Isto evita uma grande quantidade de manobras a cada vez que for necessário acessar um bloco;
d. A interação de um pátio com o entorno é importante. Quando o trecho for de baixa densidade e sem perspectiva de incremento de carga, admite-se pátios com poucas ou nenhuma alça de manobra, onde os trens precisarão acessar a linha principal de circulação para execução das movimentações internas. Por outro lado, em trechos de grande densidade, as janelas para acessar a linha principal serão escassas e toda movimentação deverá necessariamente ser feita dentro do pátio;

e. Outro item importante é o tamanho da linha, uma vez que está ligado diretamente com a finalidade do pátio. Linhas grandes para blocos pequenos resultará em desperdício e subutilização dos recursos, enquanto que o contrário resultará em maior tempo de manobras resultante dos frequentes fracionamentos de trens;
f. Igualmente importante é o tempo de permanência ou rotatividade de vagões no pátio. Uma linha com 100 vagões que permanecem 24h no pátio possui capacidade de 100 vagões por dia, enquanto que os mesmos 100 vagões que permanecem 12h dobram a capacidade do pátio;
g. Por fim, necessário avaliar com bastante critério a instalação de travessões no pátio. Se sua instalação for baseada no tamanho do trem, sua utilização poderá facilmente ser perdida caso haja alteração do modelo operacional da empresa, o que pode resultar em interferências nas linhas de movimento.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA: ESTUDO DE CASO

Conforme fundamentação teórica anteriormente apresentada, a avaliação de um pátio ferroviário de classificação pode ser uma atividade complexa, demandando uma análise sistemática e estruturada análise da configuração adequada para atendimento dos volumes de longo prazo.

Por uma questão de organização da análise e aplicação da metodologia, será utilizada neste estudo de caso a estrutura de trabalho chamada de abordagem de sistemas e explicitada por Marinov *et al.* (2011) na aplicação de um estudo do campo ferroviário, considerando sua divisão nas quatro etapas apresentadas: formulação, modelagem, avaliação e decisão.

Para Marinov *et al.* (2011), o propósito da etapa de formulação é a determinação das características e especificidades da situação, para então isolar e definir o problema. Já a etapa de modelagem propõe desenvolver uma replicação confiável de um sistema real que possa ser usada para prover um melhor entendimento de como ele opera. Posteriormente, a etapa utilizada é a de avaliação do desempenho do sistema por indicadores. Por fim, considerando os resultados obtidos na etapa de avaliação, a etapa final é fazer as decisões adequadas e de acordo com os objetivos da empresa.

4.1 FORMULAÇÃO

4.1.1 LOCAL EM ESTUDO

A metodologia apresentada no capítulo 3 é aplicada no pátio de Barbará, localizado no município de Barra Mansa, no estado do Rio de Janeiro, operado pela concessionária MRS Logística S.A.

A MRS Logística S.A. é uma empresa ferroviária de carga que administra uma malha de aproximadamente 1.643 km nos estados Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. A empresa foi criada em 1996 após o plano de privatizações da antiga Rede Ferroviária Federal (RFFSA)

e está localizada na região de maior concentração do PIB brasileiro. A malha ferroviária da empresa é apresentada na FIG. 4.1.

FIG. 4.1 Malha ferroviária do operador ferroviário de carga
Fonte: MRS Logística S.A. (2015).

Este pátio foi escolhido por apresentar as condições estudadas neste trabalho, ou seja:

- É um pátio de classificação, caracterizado por receber trens de diferentes localidades e ser um ponto concentrador de distribuição de vagões entre os estados de Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo;
- É um pátio do tipo *flat yard* e possui áreas destinadas a recebimento, classificação e partida de trens;

- Possui uma particularidade de atendimento de cliente interno, o que torna o seu estudo de capacidade uma atividade complexa, considerando interfaces e disputa pela requisição de recursos;
- Demonstra grande desafio operacional ao manobrar uma grande quantidade de carga, sendo elas chapas grossas, cimento a granel, cimento acondicionado, gusa para consumo interno, zinco, produtos siderúrgicos para consumo interno, produto siderúrgicos para exportação, sucata/resíduos metálicos e tubo de aço para exportação.

No total, seis terminais são atendidos diretamente pelo pátio, sendo três deles com ligação interna e três com necessidade de acesso às linhas do movimento por trens de manobra. Uma visão aérea do pátio e o atual *layout* do pátio são apresentados, respectivamente, nas FIG. 4.2 e FIG. 4.3.

FIG. 4.2 Visão aérea do pátio do Barbará
Fonte: Google Earth (2015).

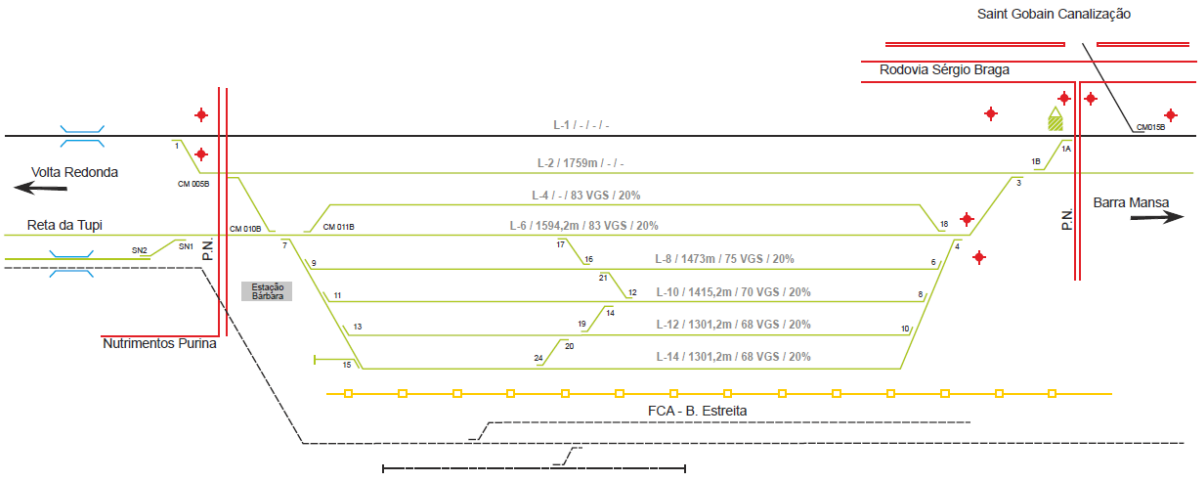

FIG. 4.3 *Layout* do pátio do Barbará
Fonte: MRS Logística S.A. (2015).

O pátio caracteriza-se por apresentar trens que nele manobram (trens de passagem), iniciam (trens com origem no pátio) ou encerram (trens cujo pátio é a parada final). Dividido em janelas de atendimento, possui três frentes de manobra que geralmente ficam divididas entre atendimento interno do pátio, atendimento ao cliente interno do pátio (acesso pela alça de manobra, chamada de reta) e atendimento externo do pátio.

Para o pátio em questão e considerando o mês base de referência como Outubro de 2014, um total de 11 trens possuem programação de atividades conforme grade, sendo 2 deles excludentes. As velocidades autorizadas dentro da instalação são, respectivamente, 30 km/h e 10 km/h para o avanço e o recuo dos trens durante a manobra, embora a velocidade média real seja inferior aos limites em função dos sucessivos processos de aceleração e frenagem.

Por desenho do pátio, todo trem é recebido na linha 4, seja ele oriundo do lado inferior ou superior de circulação. Uma vez no pátio e apto para continuidade do processo de classificação, o trem acessa a linha reta, que atua como alça de manobra e permite os seguidos movimentos de entrada e saída nas linhas de classificação, compondo o processo de fracionamento de vagões. Uma vez posicionados nas linhas de classificação, cada vagão ou grupo de vagões aguarda a conexão específica do seu próximo trem, conforme demonstração da FIG. 4.4. Na figura é possível igualmente visualizar os horários de grade e de partida, que serão respeitados pelos trens que são formados na linha 14.

Um grande fluxo de utilização da instalação é verificado durante o dia, com trens chegando e saindo do pátio, bem como atendendo clientes internos. A distribuição de como os vagões são deixados no pátio (desanexados de trens) e coletados do pátio (anexados em trens) é apresentado na FIG. 4.4, demonstrando a estrutura de funcionamento do pátio ao longo das 12 horas mais intensas em atividades. Nela é possível visualizar, por exemplo, que trem 2 deixa vagões para o pátio (atividades internas), para o trem 6 e para o trem 7. Em contrapartida, recebe os vagões do pátio que estão prontos para viagem, conforme sentido das setas apresentadas na figura.

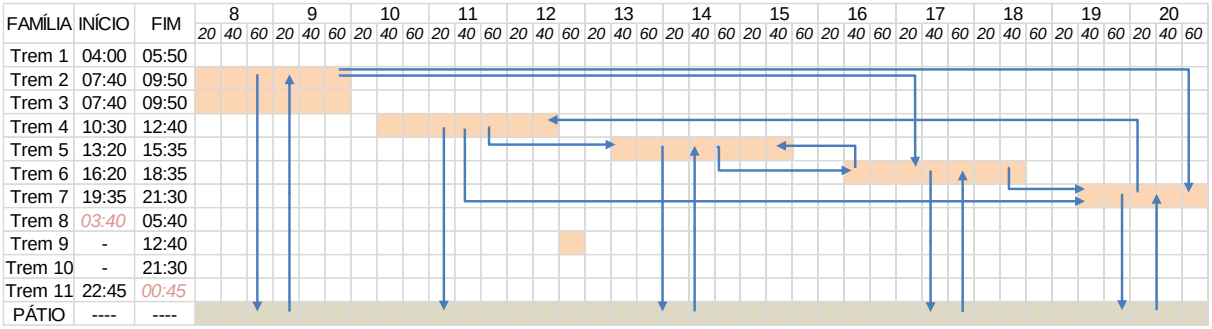

FIG. 4.4 Estrutura da distribuição de vagões nas 12 horas mais intensas do dia
Fonte: adaptado pelo autor a partir da grade de trens (2015)

Por uma questão de confidencialidade das informações da MRS Logística S.A., não serão explicitadas nesta produção científica os valores de TU no longo prazo (previsão de demanda), tampouco dados operacionais como tipo de vagão por fluxo, tamanho dos vagões, velocidade média ou comprimento dos blocos de vagões nos trens.

4.1.2 MACROPROCESSO DO PÁTIO DO BARBARÁ

Para entendimento do funcionamento da instalação, em linhas gerais, o macroprocesso do pátio do Barbará considera as seguintes atividades apresentadas na FIG. 4.5.

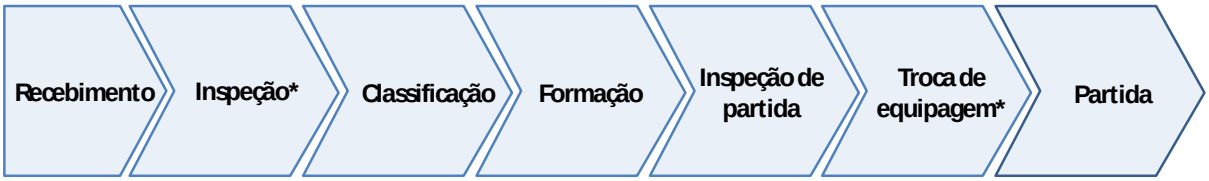

FIG. 4.5 Macroprocesso do pátio do Barbará
Fonte: autor (2015).

- Recebimento: etapa destinada à retirada de trens das linhas de movimento;
- Inspeção: verificação da integridade dos vagões e da mercadoria, dependendo do tipo e da condição do trem;
- Classificação: ordenar vagões conforme tipo e/ou destino;
- Formação: Preparação dos trens que deixarão o pátio;
- Inspeção de partida: verificação da integridade dos vagões e da mercadoria;

- Troca de equipagem: troca de maquinista para circulação do trem, aplicável somente em algumas situações, dependendo de fatores como horário de caderno da equipe (tempo em trabalho) e habilitação para condução no trecho subsequente;
- Partida: Liberação do trem para circulação, que pode ser por grade, por lote mínimo, por horário não definido (trens extras) etc.

O macroprocesso da FIG. 4.5 reflete majoritariamente os trens de passagem no pátio, ou seja, que deixam vagões que serão manipulados na instalação, classificados conforme destino e anexados em novas composições de passagem ou com origem no pátio. Existem também alguns passos complementares como atendimento do cliente interno, além de etapas intermediárias de aguardo por conexão, por exemplo, que não estão refletidas na figura, mas que são consideradas na modelagem para efeito de cálculo de capacidade.

Os principais indicadores que influenciam na avaliação de capacidade do pátio são:

- Tempo total dos vagões à disposição do pátio (ou VHP, vagão hora parado);
- Taxa de utilização dos principais recursos disponíveis no pátio (AMVs, linhas etc.);
- Tempo médio em fila para acessar um recurso requisitado (linhas, AMVs, equipe de inspeção etc.).

As principais variáveis que afetam a linha de produção de trens por um pátio de classificação, conforme apresentado na FIG. 4.6, são:

- A quantidade de vagões intercalados, ou seja, a arrumação da composição que está sendo recebida e como seus vagões estão ordenados. Quanto maior a quantidade de vagões intercalados, maior a necessidade de volta de manobras para agrupar os vagões na ordem adequada (maior quantidade de cortes);
- A quantidade de vagões reprovados pela manutenção, isto é, a quantidade de vagões que estão fora dos padrões de segurança (freio, acondicionamento da carga etc.) e que necessitam de intervenção;
- Tempo de execução das atividades, ou seja, uma vez mapeado o processo do pátio e diagnosticado quais atividades ocorrem em série e paralelo, qual o tempo despendido em cada uma e que influenciarão na permanência dos vagões na instalação;

- Concorrência na utilização de recursos, isto é, quais são os recursos mais demandados (p.ex. AMVs) e que denotam pontos críticos no processo-chave do pátio.

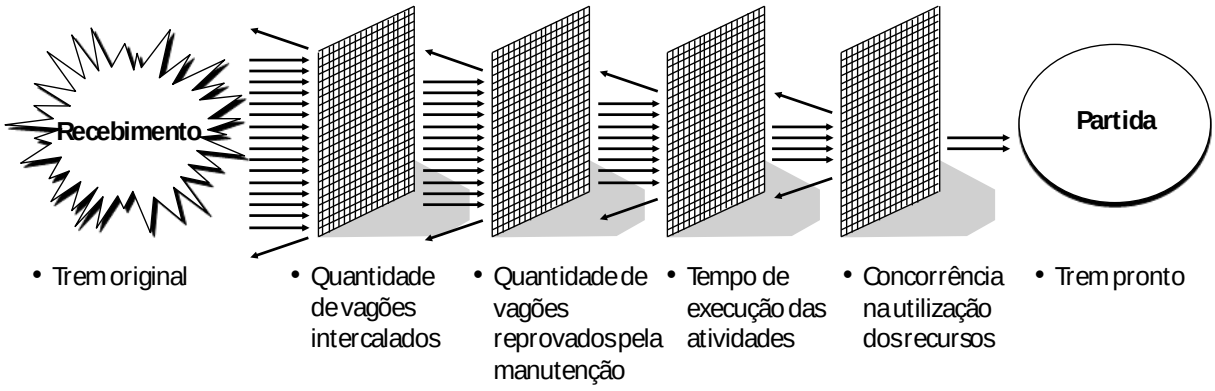

FIG. 4.6 Principais variáveis que afetam a linha de produção de trens (classificação)
Fonte: autor (2015).

Considerando o estudo em avaliações estratégicas, o nível de dados e de precisão apontados na pirâmide de Hansen *et al.* (2008), neste trabalho estas variáveis seguirão o desenho previsto no modelo operacional da concessionária de transporte ferroviário, ou seja:

- Vagões intercalados seguirão o desenho previsto em grade, onde é considerado se o trem é organizado na origem, no pátio intermediário ou no destino;
- Para o tempo de execução de manobra, em função do risco de extrapolação dos valores atuais para cenários futuros, com novo *layout* e novas condições operacionais, o valor histórico é substituído pelo tempo simulado pelo próprio modelo, ou seja, considerando a distância de deslocamento de cada bloco dentro das linhas do pátio e da velocidade média praticada em condições de manobra;
- A concorrência de utilização de recursos é calculada no próprio modelo, fornecendo respostas importantes e indicativas de quais locais sofrerão saturação primeiro e regiões dentro do pátio onde melhorias podem ser realizadas (novos AMVs, uma nova reta de manobra etc.).

Especificamente para a variável tempo de manobra no modelo de simulação, observa-se que ela é decorrente de fatores como *layout* e modelo operacional do pátio atual. Desta forma,

a extrapolação de valores atuais poderia implicar em uma avaliação enviesada, pois estaria ocorrendo uma simplificação, admitindo que um novo pátio (com até o dobro de linhas do atual) e novo modelo operacional resultariam no mesmo padrão de tempo.

Para correção deste efeito, opta-se por utilizar as premissas futuras de tamanho de trem, tamanho de grupo de vagões (e consequentemente corte de vagões) e velocidades de operação em pátio, obtendo-se os novos valores simulados de tempo de manobra e permanência, cuja aderência nas condições atuais mostrou-se alta.

4.2 MODELAGEM

A formulação matemática do modelo determinístico é relativamente simples, com aplicação direta da equação 2.1 apresentada por Pachl (2009) e Marinov *et al.* (2011). Por este motivo, sua avaliação será apresentada de forma agregada e comparativa ao final do capítulo 4 na seção de resultados, ficando esta parte inicial dedicada à modelagem por simulação.

Conforme apontado por Marinov *et al.* (2009), a ideia principal por trás de uma abordagem por modelo de simulação é a divisão das operações de pátios em segmentos, de modo que seu comportamento em cada segmento possa ser descrito e analisado separadamente.

A modelagem de um pátio pode ser realizada em diversos sistemas de simulação disponíveis no mercado. Para reprodução do pátio em estudo, será aqui utilizado o Arena®, um software de simulação por eventos discretos que permite reproduzir os mais diferentes tipos de processos com flexibilidade, relativa facilidade na modelagem e bom tempo de resposta.

Segundo Hillier *et al.* (2001), simulação por eventos discretos é a que alterações do estado do sistema ocorrem instantaneamente em pontos aleatórios no tempo como resultado da ocorrência de eventos discretos. Por exemplo: em um sistema de fila onde o estado do sistema é o número de clientes no sistema, o evento discreto que altera seu estado é a chegada de clientes e a sua saída em função de um atendimento realizado.

Segundo Santos (2014), o "software Arena® possui grande flexibilidade, o que possibilita a modelagem de diversos processos". Sua aplicação pode ser feita em indústrias de mineração, transportes, telecomunicações, serviços financeiros, linhas de produção etc. Além disto, permite testar cenários do tipo "e se" para avaliação de resultados, conforme anteriormente abordado por Rufe (2013).

a. Recursos, atributos, variáveis e política de fila

O Arena® demanda o apontamento dos recursos que serão ocupados e utilizados ao longo do processamento. No pátio em questão, foram utilizados os seguintes recursos para avaliação do *layout* no longo prazo:

- Linhas. Cada linha do pátio foi cadastrada como um recurso independente, com suas respectivas capacidades, aqui representadas em metros. Nesta simulação foram consideradas as sete linhas do pátio em sua configuração atual, além das condições de expansão (novas linhas), cadastradas como:
  - r.linha4 – destinada ao recebimento dos trens (retirada das linhas do movimento);
  - r.linha6 – destinada ao armazenamento dos vagões destinados ao Rio de Janeiro;
  - r.linha8 – destinada ao armazenamento dos vagões destinados à Minas Gerais;
  - r.linha10 – destinada ao armazenamento dos vagões destinados à São Paulo;
  - r.linha12 – destinada ao armazenamento dos vagões destinados ao cliente interno;
  - r.linha14 – destinada a formação dos trens para posterior partida;
  - r.reta – destinada a manobra e fracionamento de trens dentro do pátio, bem como circulação para atendimento do cliente interno;
  - r.linha.novorecebimento – primeira linha de expansão da área de recebimento;
  - r.linha.segundonovorecebimento – segunda linha de expansão da área de recebimento;
  - r.novareta – primeira linha de expansão da alça de manobra (lado superior);
  - r.segundanovareta – segunda linha de expansão da alça de manobra (lado inferior).

- AMVs de entrada e saída. Antes de se realizar o cadastro dos aparelhos de mudanças de via no sistema, é necessário entender o seu funcionamento dentro do *layout* do pátio. Quando cada recurso for utilizado de forma independente, geralmente localizados distantes um do outro, recomenda-se que sejam cadastrados de forma independente. Isto permite que seja feito o processo de ocupação de forma separada, sendo que nem todas as entidades utilizarão todos os recursos. No pátio em questão, como cada AMV é muito próximo um do outro, na prática não é possível que sejam utilizados de forma independente, ou seja, um trem manobrando atingirá em seu percurso mais de um AMV por vez. Neste caso, para simplificação da modelagem sem prejuízo da reprodução da realidade, os recursos foram modelados de forma agrupada, ou seja, mais de um aparelho de mudança de via é utilizado durante a manobra. Nesta simulação foram cadastradas da seguinte forma:
  - r.amv.inf – reproduzindo o conjunto de AMVs do lado inferior do pátio;
  - r.amv.sup – reproduzindo o conjunto de AMVs do lado superior do pátio;
  - r.novo.amv.inf – expansão da chave de entrada do pátio pelo lado inferior, permitindo o acesso a área de recebimento sem impedir manobras pela alça do lado inferior;
  - r.novo.amv.sup – expansão da chave de entrada do pátio pelo lado superior, permitindo o acesso a área de recebimento sem impedir manobras pela alça do lado superior.

- Travessões. Uma vez que o modelo operacional de longo prazo adota a utilização majoritariamente de trens maiores do que as seções internas divididas pelos travessões, os mesmos não foram modelados em um sistema de avaliação de longo prazo, sem prejuízo da resposta final. Contudo, para casos em que existe potencial e frequente utilização dos travessões, é importante que seja ponderada sua modelagem no sistema, uma vez que haveria menos concorrência por recursos únicos disponíveis para manobra;
- Locomotiva de manobra. Cada locomotiva disponível no pátio foi cadastrada no recurso r.locomotiva.manobra, sendo que cada manobra que será realizada no pátio demanda a ocupação deste recurso;

- Equipe de inspeção. Assim como a locomotiva de manobra, cada equipe de inspeção disponível no pátio foi cadastrada no recurso r.equipe.inspecao. A cada momento que o processo do pátio demande a realização de uma inspeção, sendo no estudo realizado tanto na entrada quanto na saída dos vagões, o recurso é solicitado e ocupado;

- Cliente interno. Por fim, o cliente interno é representado pelo recurso r.cliente.interno, representando a saída de vagões do pátio para carregamento e posterior devolução.

Na simulação realizada, cada trem que chega no pátio (entidade) recebe um conjunto de atributos que determinarão as suas características ao longo do modelo. São elas:

- Tamanho do grupo de vagões destinados ao Rio de Janeiro, aqui representados por a.tamanho.trem.rj, apontado em metros;
- Tamanho do grupo de vagões destinados à Minas Gerais, aqui representados por a.tamanho.trem.mg, apontado em metros;
- Tamanho do grupo de vagões destinados à São Paulo, aqui representados por a.tamanho.trem.sp, apontado em metros;
- Tamanho do grupo de vagões destinados ao cliente interno, aqui representados por a.tamanho.trem.rj2, apontado em metros;
- Tamanho total do trem, aqui representado por a.tamanho.trem, que consiste no somatório dos demais atributos de tamanhos de grupos de vagões, ou seja:

$$\text{a.tamanho.trem} = \sum \text{a.tamanho.trem “n”} \qquad (4.1)$$

Sendo “n” igual a rj, mg e sp, todos medidos em metros. Desse modo, toda entidade (trem) recebe sua referência de tamanho no módulo *assign* logo após sua criação pelo módulo *create*, baseado no plano de produção do operador ferroviário.

- Definição da origem e destino do trem (O/D), que basicamente diferencia por qual lado o trem (entidade) deverá acessar o pátio. Representado por a.destino, se retornar o valor 1 (a.destino == 1), significa que o pátio será acessado pelo lado inferior,

solicitando e ocupando os recursos r.amv.inf, r.novo.amv.inf ou ambos. Por outro lado, se retornar o valor 0 (a.destino == 0), significa que o pátio será acessado pelo lado superior, solicitando e ocupando os recursos r.amv.sup, r.novo.amv.sup ou ambos;

- Definição do tempo, representado por a.tempo, que basicamente busca o valor atual em que o trem (entidade) entrou no sistema (expressão TNOW), para posterior coleta de dados e medição de quanto tempo os vagões permaneceram no pátio (coletado no módulo *Record*, tipo *Time Interval*, referenciado pelo atributo a.tempo);
- Outros atributos foram apontados no modelo, buscando atender a lógica de ocupação/desocupação dos recursos corretos frente as novas possibilidades de acesso após a expansão.

As variáveis, cuja função é armazenar valores de utilização global, foram cadastradas seguindo o formato a seguir:

- Demanda dos trens atuais e no longo prazo, representada por v.demanda.trem$_i$, para todo i variando entre 1 e 7 quando representada as condições atuais (base ano 2015), no formato de quantidade de trens por dia. É utilizada principalmente no início do modelo, influenciando na criação das entidades através do valor do tempo entre chegadas, ou seja:

$$\text{Intervalo entre chegadas} = \frac{24}{\text{v.demanda}} \tag{4.2}$$

Onde v.demanda expressa a quantidade de trens por dia e o intervalo entre chegadas expresso em horas.

- Velocidade de manobra, representada por v.velocidade, no formato de km/h;
- Tamanho das linhas do pátio, representada por v.tamanho.linha4, v.tamanho.linha6, v.tamanho.linha8, v.tamanho.linha10, v.tamanho.linha12, v.tamanho.linha14,

v.tamanho.reta e v.tamanho.cliente.interno, no formato de metros. Utilizado principalmente nas expressões de decisão (*decide*);

- Tamanho do vagão, representado por v.tamanho.vagao.medio, no formato de metros, utilizado principalmente na expressão de inspeção de vagões (*delay*);

- Por ser um modelo único para testes de *layouts* distintos, variáveis de determinação de quantidade de recursos disponíveis e tipo de demanda foram apontadas através de v.fator.aumento.linhas.classificacao (aumento linhas de manobra), v.fator.aumento.demanda (aumento da quantidade de carga a ser processada no pátio para os casos de extrapolação), v.qtde.linhas.recebimento (apontando se o pátio possui uma, duas ou três linhas), v.qtde.retas (considerando as configurações com alça lado inferior, alça inferior + alça superior, alça inferior + alça inferior e alça inferior + alça inferior + alça superior), v.novo.amv.inferior (binário para pátio com e sem novo AMV lado inferior) e v.novo.amv.superior (binário para pátio com e sem novo AMV lado superior).

A política de filas adotada foi do tipo primeiro que entra, primeiro que sai (no modelo FIFO – *first in, first out*), sendo que as utilizadas no modelo em questão foram:

- Vagões aguardando nas linhas de classificação conforme destino, representando pelo módulo *hold*;
- Solicitação de ocupação dos recursos, representado pelo módulo *seize*.

b. Estabelecimento da variável de controle

A função da variável de controle na modelagem realizada permite a alteração da capacidade dos recursos através da definição de valores pré-determinados nas variáveis de expansão e permite a alteração da demanda através da definição de índices de multiplicação, evidenciando uma taxa de crescimento da quantidade de trens que requisitam atividades nos recursos disponíveis no pátio.

Desta forma, a manipulação de cenários no *Process Analyzer* torna-se uma tarefa mais simples e fácil, permitindo a flexibilidade de atribuir diferentes configurações de *layouts* de pátio através da definição prévia de valores que determinarão qual caminho no modelo a entidade trem deverá seguir e avaliar a curva de capacidade do pátio através do aumento da demanda de entrada.

A entidade de controle é criada apenas uma vez no instante zero, antes da entrada no modelo de qualquer um dos trens designados nas caixas de *create*, e define a capacidade de cada recurso conforme o plano de expansão definido no cenário. São elas:

- MR(r.linha6), atribuindo novo valor MR(r.linha6)*v.fator.aumento.linhas. classificacao;
- MR(r.linha8), atribuindo novo valor MR(r.linha8)*v.fator.aumento.linhas. classificacao;
- MR(r.linha10), atribuindo novo valor MR(r.linha10)*v.fator.aumento.linhas. classificacao;
- MR(r.linha12), atribuindo novo valor MR(r.linha12)*v.fator.aumento.linhas. classificacao;
- MR(r.linha14), atribuindo novo valor MR(r.linha14)*v.fator.aumento.linhas. classificacao.

Para a definir a demanda e permitir que seja realizada a saturação do *layout*, as seguintes variáveis sofrem alteração conforme plano desejado:

- v.demanda.trem1, atribuindo novo valor v.demanda.trem1*v.fator.aumento.demanda;

- v.demanda.trem2, atribuindo novo valor v.demanda.trem2*v.fator.aumento.demanda;
- v.demanda.trem3, atribuindo novo valor v.demanda.trem3*v.fator.aumento.demanda;
- v.demanda.trem4, atribuindo novo valor v.demanda.trem4*v.fator.aumento.demanda;
- v.demanda.trem5, atribuindo novo valor v.demanda.trem5*v.fator.aumento.demanda;
- v.demanda.trem6, atribuindo novo valor v.demanda.trem6*v.fator.aumento.demanda;
- v.demanda.trem7, atribuindo novo valor v.demanda.trem7*v.fator.aumento.demanda;

Ou seja, como o objetivo é exclusivamente testar a saturação do pátio, todas as demandas são multiplicadas proporcionalmente por um fator v.fator.aumento.demanda. Todavia, a atribuição de índices diferentes por trem poderá ser igualmente realizada, caso seja conhecida curvas diferentes de demanda no longo prazo.

O esquemático é apresentado na 4.7 abaixo.

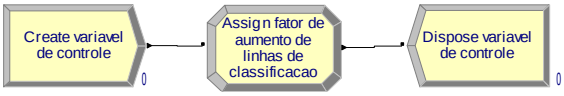

FIG. 4.7 Passo 0: Variável de controle do modelo
Fonte: autor (2015).

c. Processo de chegada de trens no pátio

Os trens chegam no pátio através da entidade trem pelos módulos *create*, conforme esquemático é apresentado na FIG. 4.8 abaixo. Cada uma das entidades assumem um conjunto de atributos, conforme tamanho dos blocos e destino.

Por ser um modelo flexível e que permite diferentes configurações de *layout* conforme definição das variáveis de expansão, o módulo *decide* direciona as entidades para os módulos do *advanced transfer*, considerando as condições apresentadas na TAB. 4.1.

TAB. 4.1 Condições do *decide* conforme estrutura do pátio em estudo

Condição do *decide*	**Novo AMV inferior**	**Novo AMV superior**	**Quantidade de linhas de recebimento**
v.novo.amv.inferior == 0 .and. v.novo.amv. superior == 0 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 1	Não	Não	1 linha
v.novo.amv.inferior == 0 .and. v.novo.amv. superior == 0 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 2	Não	Não	2 linhas
v.novo.amv.inferior == 0 .and. v.novo.amv. superior == 0 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 3	Não	Não	3 linhas
v.novo.amv.inferior == 1 .and. v.novo.amv. superior == 0 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 1	Sim	Não	1 linha
v.novo.amv.inferior == 1 .and. v.novo.amv. superior == 0 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 2	Sim	Não	2 linhas
v.novo.amv.inferior == 1 .and. v.novo.amv. superior == 0 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 3	Sim	Não	3 linhas
v.novo.amv.inferior == 0 .and. v.novo.amv. superior == 1 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 1	Não	Sim	1 linha
v.novo.amv.inferior == 0 .and. v.novo.amv. superior == 1 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 2	Não	Sim	2 linhas
v.novo.amv.inferior == 0 .and. v.novo.amv. superior == 1 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 3	Não	Sim	3 linhas
v.novo.amv.inferior == 1 .and. v.novo.amv. superior == 1 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 1	Sim	Sim	1 linha
v.novo.amv.inferior == 1 .and. v.novo.amv. superior == 1 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 2	Sim	Sim	2 linhas
v.novo.amv.inferior == 1 .and. v.novo.amv. superior == 1 .and. v.qtde.linhas. recebimento == 3	Sim	Sim	3 linhas

Fonte: autor (2015)

Baseado nos valores previamente apontados, as entidades são direcionadas para módulos do tipo *Route* ou do tipo *Pickstation*, dependendo da quantidade de opções pré-selecionadas.

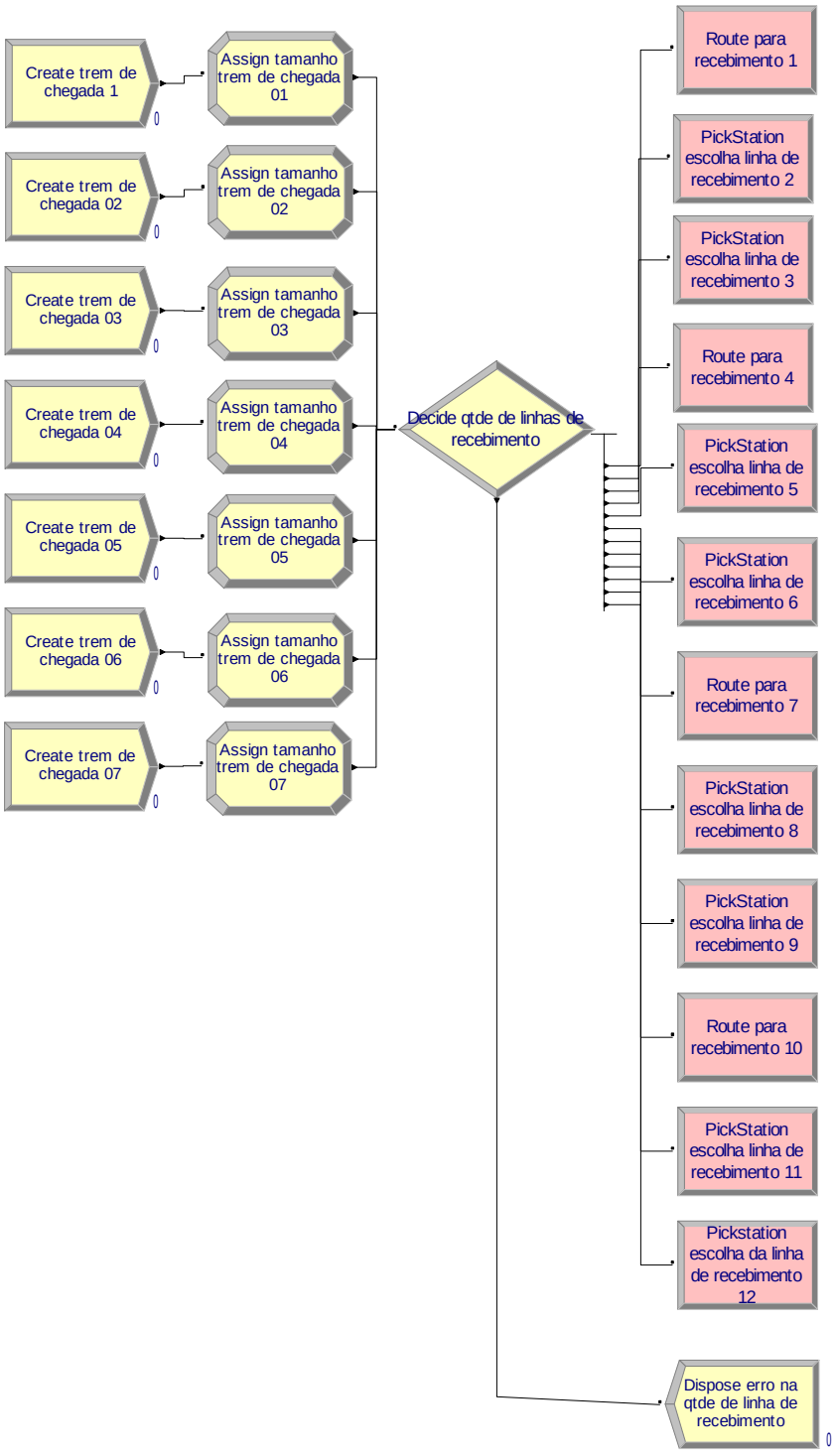

FIG. 4.8 Passo 1: Processo de chegada de trens no pátio
Fonte: autor (2015)

d. Processo de recebimento de trens

O processo de chegada de trens respeita a condição definida na etapa anterior, acessando cada módulo *station* conforme direcionamento dos módulos *route* e *pickstation*.

Uma vez na etapa de recebimento, a entidade trem ocupará o recurso linha 4 (recebimento) conforme sentido em que o trem circula, ou seja:

- Se for um trem que se aproxima do pátio pelo lado inferior, há um módulo *seize* para os recursos AMV inferior e linha 4;
- Se for um trem que se aproxima do pátio pelo lado superior, há um módulo *seize* para os recursos AMV superior e linha 4.

Em ambos os casos, a entidade trem desloca-se sobre os recursos solicitados através do módulo *delay*, considerando o tamanho da linha (v.tamanho.linha4) e a velocidade média praticada (v.velocidade).

Posteriormente, há o módulo *release* indicando a liberação do AMV de entrada do pátio, seguindo através do módulo *route* para o processo de inspeção de entrada. Um dos conjuntos de recebimento é apresentado na FIG. 4.9 abaixo.

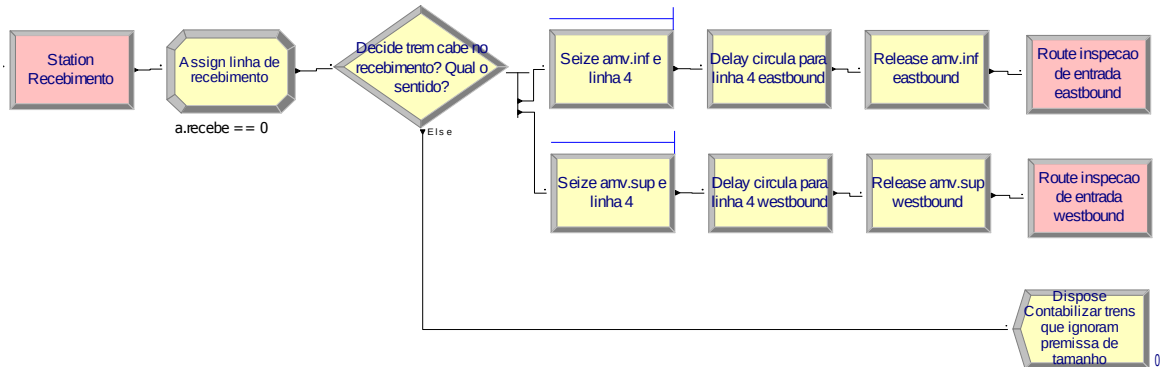

FIG. 4.9 Passo 2: Processo de recebimento de trens no pátio
Fonte: autor (2015)

Considerando o conjunto de combinações advinda das expansões desenhadas, o conjunto acima representado repete-se doze vezes, referente a cada uma das doze saídas (*route* ou *pickstation*) previstas no Passo 1: Processo de chegada de trens no pátio.

e. Processo de inspeção de entrada

Uma vez liberada do processo de recebimento do pátio para prosseguir no modelo, a entidade trem chega ao processo de inspeção de entrada.

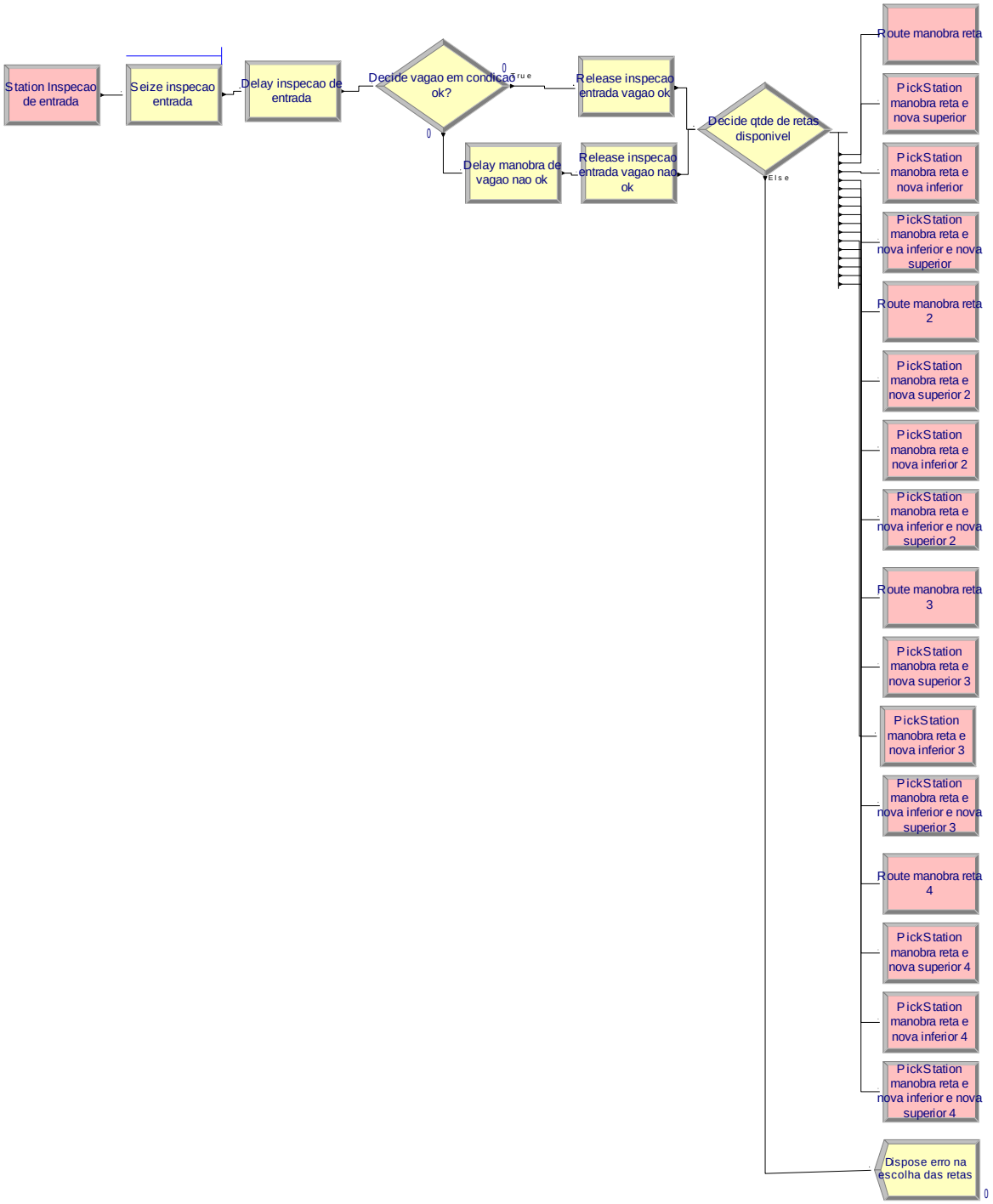

FIG. 4.10 Passo 3: Processo de inspeção de entrada
Fonte: autor (2015)

O processo foi modelado de maneira bem direta, considerando os módulos *seize* e *delay* para ocupação e realização da atividade pela equipe de inspeção do pátio e, caso haja o diagnóstico da presença de vagões avariados, ocorre um novo *delay* representando o tempo extra de manobras dos vagões marcados pela equipe de manutenção, conforme representado pela FIG. 4.10.

Novamente por ser um modelo flexível e que permite a simulação de diferentes configurações (*layouts*), existe um módulo *decide* que direcionará a entidade trem para a respectiva estrutura de classificação, conforme dezesseis opções representadas pelos módulos *rout*e e *pickstation*.

f. Processo de classificação

O processo de classificação consiste na etapa mais complexa dentre as atividades desempenhadas no pátio de classificação. Cada trem (entidade) criado no início do modelo considera uma quantidade de vagões maior ou igual a zero para cada um dos grupos atendidos pelo pátio, sendo Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e cliente interno. Esta quantidade de vagões é aqui representada em metros e ocupará proporcionalmente cada uma das linhas dedicadas quando classificados.

O primeiro grupo de módulos é relacionado ao início da manobra de fracionamento dos trens, onde cada entidade (trem) acessa o recurso reta (alça de manobra) através dos módulos *seize* e *delay*, com posterior desocupação da chave acessada através do *release*, o que representa a saída do trem fisicamente da linha de recebimento e seu deslocamento para a linha reta. Neste instante, o módulo *assign* é utilizado para indicar posteriormente qual conjunto de recursos será corretamente desocupado, uma vez que o modelo é único para representar várias combinações diferentes.

Um módulo *decide* direcionará a entidade para o caminho adequado, considerando qual linha de recebimento foi ocupada, relativo ao modelo único. Seu referencial de escolha está atrelado ao atributo a.escolhe.reta, que admite valores 0, 1, 2, dependendo do conjunto anteriormente ocupado. A representação é indicada na 4.11.

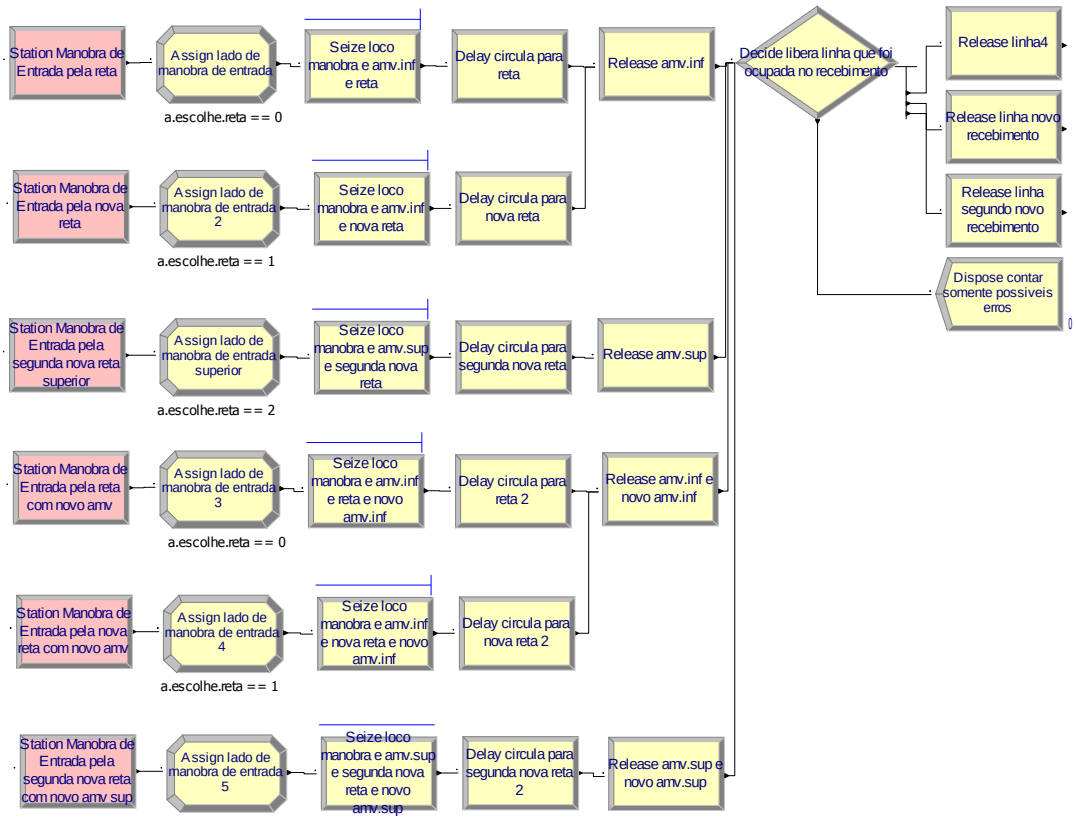

FIG 4.11 Passo 4: Processo de classificação (parte 1)
Fonte: autor (2015)

Uma vez posicionado na linha reta, chega o momento de manobrar cada conjunto de vagões na linha adequada. Um módulo *separate* é utilizado neste instante, com o objetivo de duplicar cada entidade para separar as entidades que representam os vagões fracionados das entidades que provocam a desocupação dos recursos anteriores. Desta forma, não há risco de se ter uma tentativa de desocupação de um recurso não ocupado. Estas entidades tem por objetivo apenas liberar recursos e não são consideradas nas estatísticas finais do modelo.

O processo de desocupação basicamente verifica qual os conjuntos anteriormente ocupados e libera os recursos correspondentes, conforme apresentado na FIG. 4.12.

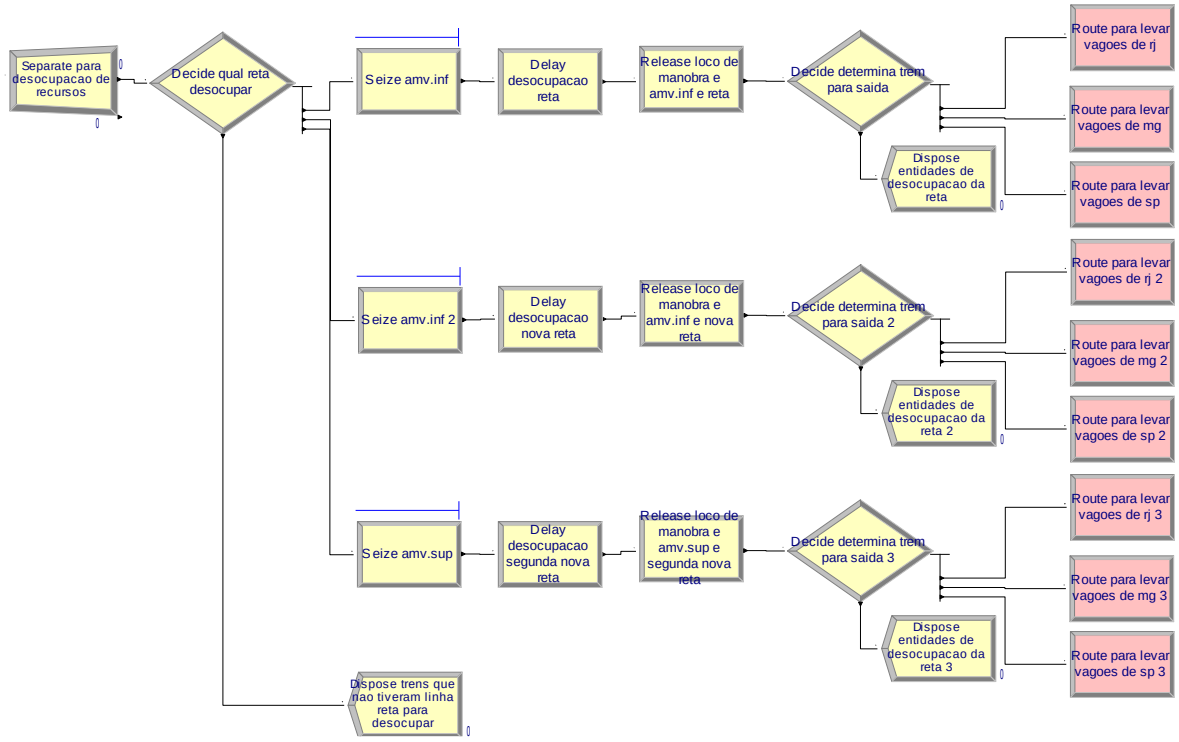

FIG. 4.12 Passo 4: Processo de classificação (parte 2)
Fonte: autor (2015)

A terceira parte representa a classificação propriamente dita, ou seja, a alocação de cada grupo de vagões em suas respectivas linhas de aguardo, conforme desenho do pátio anteriormente realizado e apresentado na FIG. 4.13. Conectado na saída *duplicate* do módulo *separate* anteriormente apresentado, neste momento o trem é dividido em quatro partes distintas através de três novos conjuntos de módulos *separate*, verificando a existência ou não de vagões para a linha correta naquele grupo através da lógica presente no módulo *decide* e a correspondente circulação do grupo na linha de classificação através dos módulos *seize* e *delay*.

Ao final, uma fila é formada representando o conjunto de vagões que aguardarão conexão em cada linha, caracterizada pelo módulo *hold* do tipo infinito. Neste instante, o trem que no início do processo encontrava-se na alça de manobra, agora encontra-se fracionado conforme destino nas linhas de classificação do pátio.

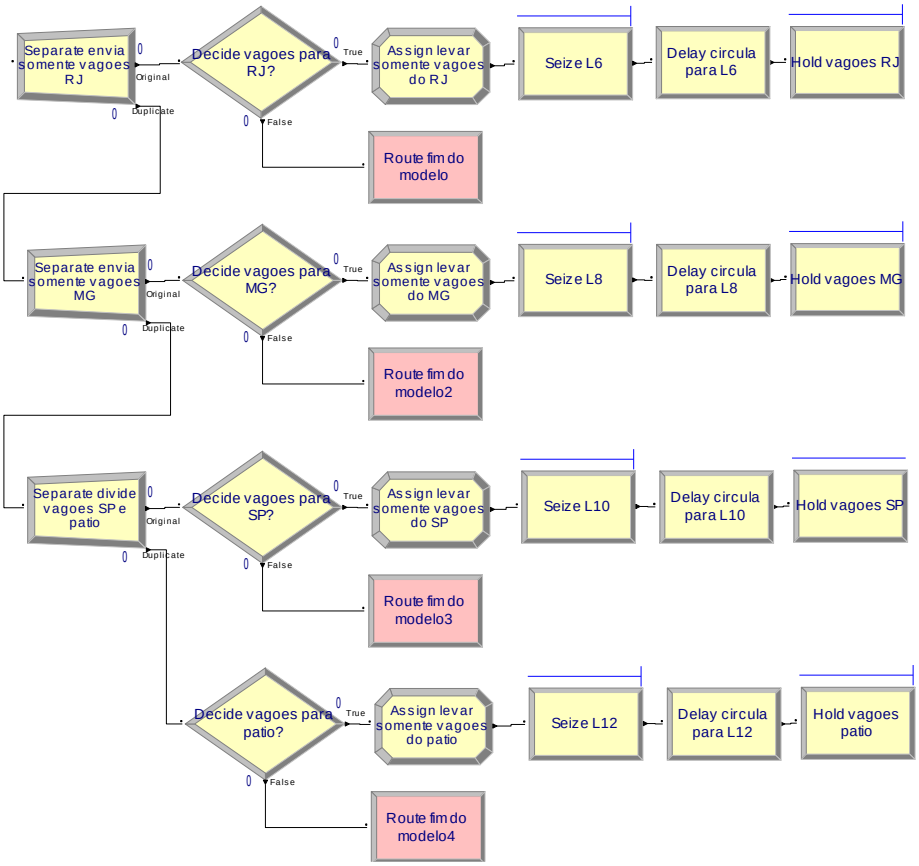

FIG. 4.13 Passo 4: Processo de classificação (parte 3)
Fonte: autor (2015)

g. Processo de atendimento do cliente interno

Este processo consiste no atendimento de um terminal que possui acesso por dentro do pátio, com a saída de trens com locomotivas de manobra coletando vagões que estão à disposição e circulando pela linha reta (alça de manobra).

Para tanto, existem três janelas de atendimento, bem como a restrição de respeitar a quantidade de vagões possíveis de serem alocados dentro do terminal. Desta forma, o processo inicia-se com a criação da entidade trem pelo módulo *create*, sendo que a primeira condição de verificação é a existência ou não de vagões para atendimento. Caso haja vagões disponíveis, ou seja, NQ(Hold vagoes patio.Queue) > 0, o módulo *remove* busca cada grupo de vagões disponível; caso contrário, a entidade é então descartada pelo módulo *dispose* e nenhuma estatística é registrada para o modelo. A FIG. 4.14 demonstra o modelo.

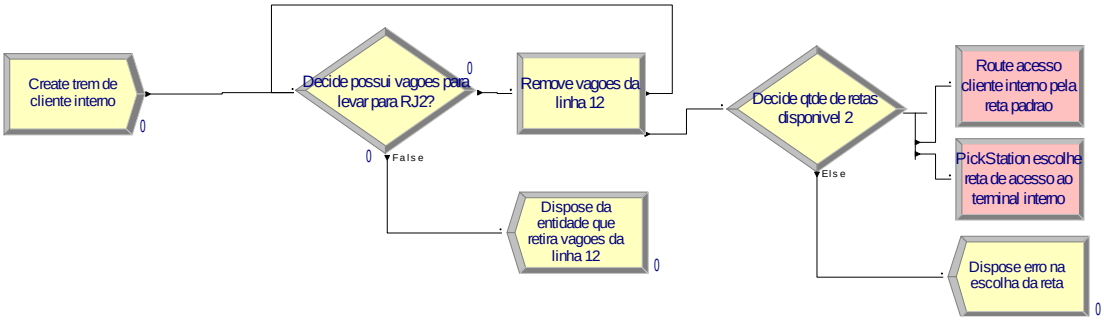

FIG. 4.14 Passo 5: Processo de atendimento do cliente interno (parte 1)
Fonte: autor (2015)

Como o modelo conta com a flexibilidade da expansão, um segundo módulo *decide* verifica qual a configuração (*layout*) que está sendo simulada. Caso a condição seja apenas com uma reta (v.qtde.retas == 1 .or. v.qtde.retas == 2), o módulo *route* direciona para a reta original do pátio. Por outro lado, caso a condição seja com duas retas disponíveis (v.qtde.retas == 3 .or. v.qtde.retas == 4), o módulo *pickstation* seleciona a reta com menor fila (*Test condition: Minimum*; *Selection based on Number in Queue* e *Number En Route to Station*).

A segunda parte, apresentada na FIG. 4.15, considera a identificação da reta ocupada (módulo *assign*) e uma consequente requisição dos recursos necessários (módulo *seize*) e deslocamento ao terminal (módulo *delay*). Um *delay* representa o carregamento dos vagões no terminal, enquanto que, ao final, um novo módulo *decide* identifica o *layout* do pátio (atual ou com expansão) que está sendo utilizado.

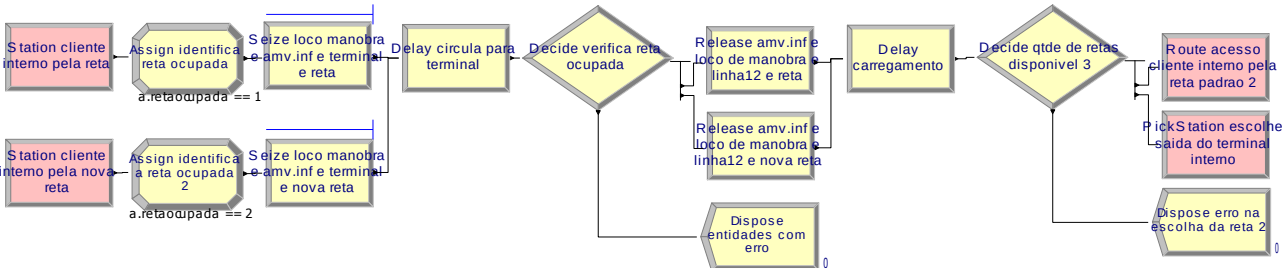

FIG. 4.15 Passo 5: Processo de atendimento do cliente interno (parte 2)
Fonte: autor (2015)

A terceira parte do processo de atendimento interno começa de forma similar a anterior, ou seja, com a identificação de qual o *layout* que está sendo simulado (módulo *assign*) e

requisição dos recursos necessários (módulo *seize*). Um *delay* representa a circulação para via de formação, enquanto que *decide* identifica novamente a configuração que está sendo simulado, seguido de um módulo *release* liberando os recursos ocupados e um módulo *hold* para formação da fila aguardando conexão, conforme apresentado na FIG. 4.16.

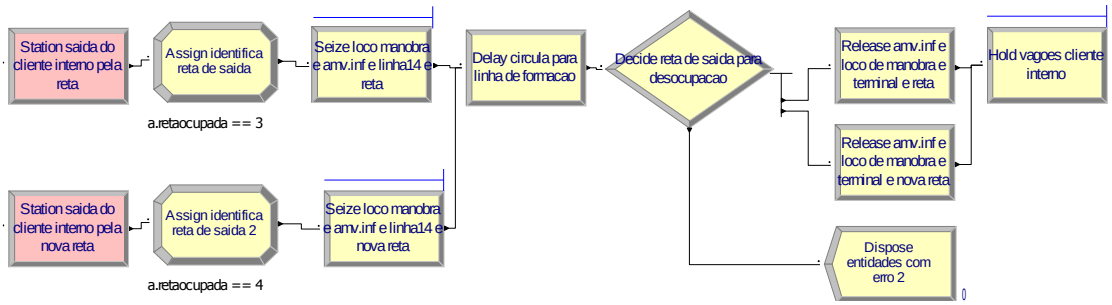

FIG. 4.16 Passo 5: Processo de atendimento do cliente interno (parte 3)
Fonte: autor (2015)

h. Processo de formação, inspeção de saída e partida

O último processo destina-se à formação, inspeção e partida do trem formado pelo pátio. O trem que chegou no pátio no início do modelo deixa vagões na instalação, bem como coleta novos vagões que deixarão o pátio. Esta ordenação de deixar e retirar vagões é prevista na grade de trens e na lógica representada pela entrada da entidade pelo módulo *station*. Caso haja vagões disponíveis daquele trem, aqui representado pelo módulo *decide* e a condição NQ(Hold vagoes RJ.Queue) > 0, os grupos são removidos da linha de classificação e inicia-se a formação do trem. A FIG. 4.17 representa a primeira parte desta etapa.

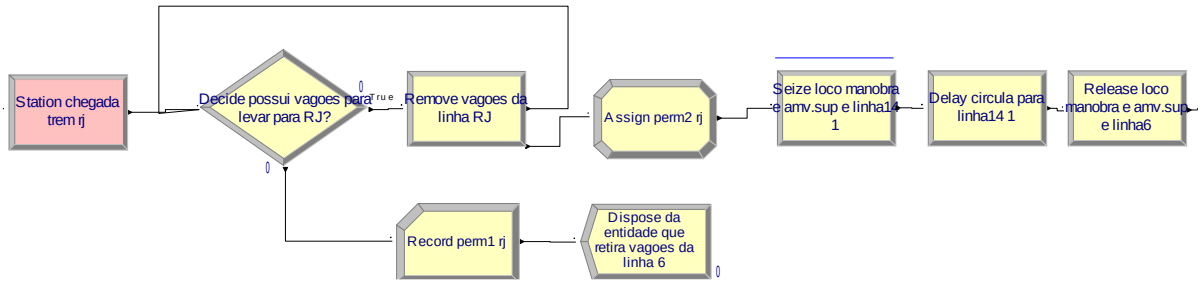

FIG. 4.17 Passo 6: Processo de formação, inspeção de saída e partida (parte 1)
Fonte: autor (2015)

Uma vez formado, o trem será inspecionado pela equipe da manutenção. Caso algum vagão seja marcado, um *delay* representa a manobra de retirada visando manter a segurança ferroviária. O processo se encerra com a partida do trem, representado pelos módulos *seize*, *delay* e *release*, enquanto que a estatística é coletada pelo módulo *record*, considerando o tipo *time interval* do atributo a.tempo. A representação da segunda parte segue na FIG. 4.18.

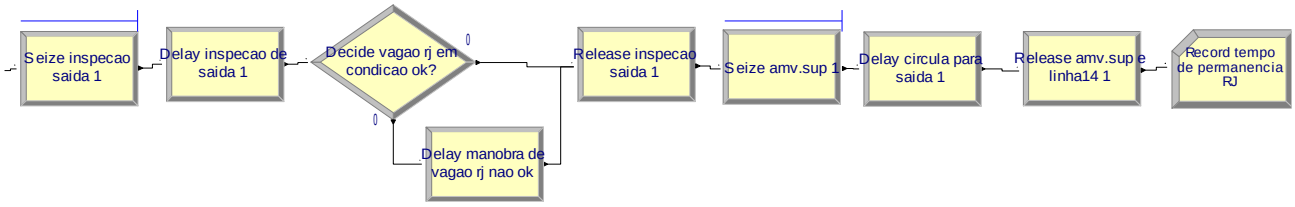

FIG. 4.18 Passo 6: Processo de formação, inspeção de saída e partida (parte 2)
Fonte: autor (2015)

O sequencial acima apresentado repete-se para cada conjunto de trens e linhas do modelo, conforme desenho da grade do pátio.

Com isso, a modelagem é então finalizada e cada condição pode ser testada, variando-se *layout* do pátio, demanda, disponibilidade de equipes e velocidade de manobra.

i. Indicadores de status de recursos e gráficos de acompanhamento

Alguns indicadores de verificação do status dos recursos foram introduzidos no modelo, visando facilitar a visualização da dinâmica de funcionamento da ferramenta. Níveis de utilização dos recursos são apontados por *levels*, representando a condição atual do pátio. A FIG. 4.19 demonstra um exemplo desta representação.

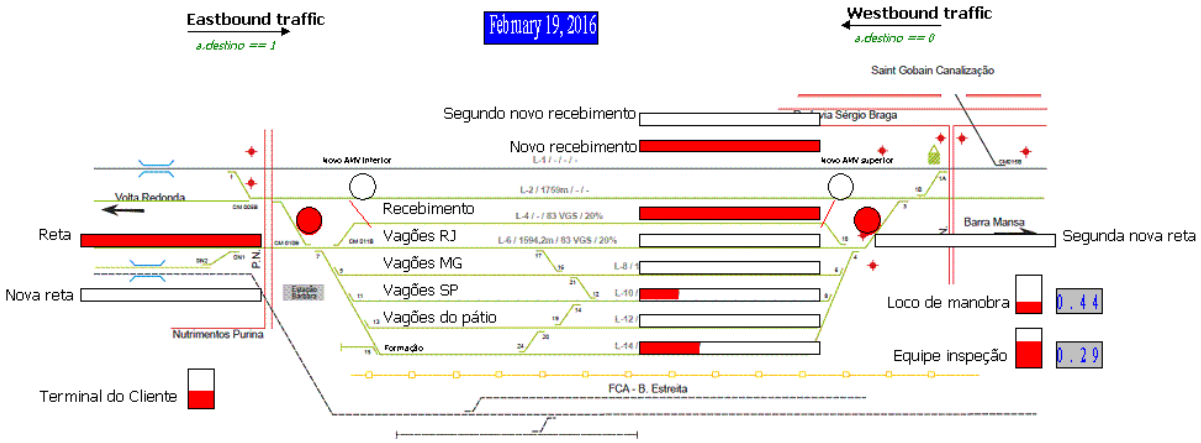

FIG. 4.19 Retrato do nível de utilização dos recursos no pátio
Fonte: autor (2015)

A visão de evolução (*plot*) é igualmente possível, permitindo o entendimento do comportamento da quantidade de vagões por linha do pátio, conforme representação da FIG. 4.20.

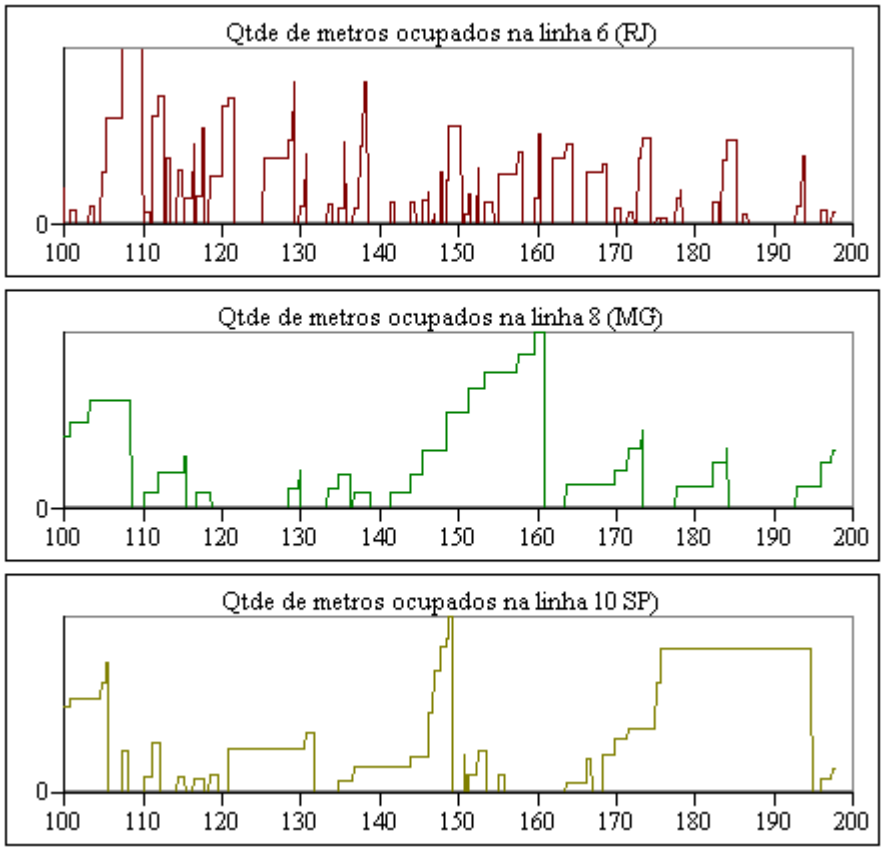

FIG. 4.20 Retrato da evolução do nível de utilização das linhas do pátio
Fonte: autor (2015)

Para entendimento comparativo dos resultados entre cenários, a ferramenta *Process Analyzer* mostra-se mais eficiente e completa, permitindo obter resultados a partir da alteração das variáveis previamente definidas no modelo. Um exemplo é apresentado na FIG. 4.21.

	Scenario Properties				Controls							
	S	Name	Program File	Reps	v.velocidade	v.fator.aumento.demanda	v.qtde.linhas.recebimento	v.qtde.retas	Record tempo de permanencia total	r.linha4.ScheduledUtilization	r.linha6.ScheduledUtilization	r.linha8.ScheduledUtilization
1		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior	51 : Modelo Barbará	10	10	1.0	2	2	26.32	0.3723	0.1931	0.1953
2		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +10%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.1	2	2	25.71	0.4037	0.1879	0.1939
3		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +20%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.2	2	2	25.21	0.4348	0.2056	0.1928
4		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +30%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.3	2	2	24.07	0.4640	0.2005	0.1894
5		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +40%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.4	2	2	23.71	0.4953	0.1986	0.1932
6		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +50%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.5	2	2	23.29	0.5103	0.1969	0.1969
7		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +60%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.6	2	2	22.89	0.5419	0.1953	0.1834
8		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +70%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.7	2	2	22.97	0.5628	0.2003	0.1945
9		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +80%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.8	2	2	22.60	0.5939	0.1908	0.2022
10		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +90%	51 : Modelo Barbará	10	10	1.9	2	2	22.40	0.6066	0.1893	0.1868
11		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +100	51 : Modelo Barbará	10	10	2.0	2	2	22.16	0.6255	0.1949	0.1911
12		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +110	51 : Modelo Barbará	10	10	2.1	2	2	22.08	0.6448	0.1939	0.1934
13		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +120	51 : Modelo Barbará	10	10	2.2	2	2	22.30	0.6686	0.1941	0.1992
14		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +130	51 : Modelo Barbará	10	10	2.3	2	2	21.99	0.6864	0.1868	0.2000
15		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +140	51 : Modelo Barbará	10	10	2.4	2	2	22.29	0.6963	0.1846	0.2029
16		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +150	51 : Modelo Barbará	10	10	2.5	2	2	22.30	0.7077	0.1883	0.2039
17		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +160	51 : Modelo Barbará	10	10	2.6	2	2	22.77	0.7177	0.1862	0.2047
18		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +170	51 : Modelo Barbará	10	10	2.7	2	2	23.17	0.7375	0.1889	0.2099
19		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +180	51 : Modelo Barbará	10	10	2.8	2	2	23.20	0.7505	0.1868	0.2064
20		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +190	51 : Modelo Barbará	10	10	2.9	2	2	24.03	0.7627	0.1839	0.2126
21		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +200	51 : Modelo Barbará	10	10	3.0	2	2	25.07	0.7855	0.1784	0.2213
22		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +210	51 : Modelo Barbará	10	10	3.1	2	2	26.35	0.7994	0.1784	0.2311
23		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +220	51 : Modelo Barbará	10	10	3.2	2	2	29.07	0.8094	0.1818	0.2255
24		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +230	51 : Modelo Barbará	10	10	3.3	2	2	31.98	0.8200	0.1780	0.2367
25		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +240	51 : Modelo Barbará	10	10	3.4	2	2	41.81	0.8397	0.1815	0.2353
26		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +250	51 : Modelo Barbará	10	10	3.5	2	2	122.80	0.8569	0.1766	0.2574
27		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +260	51 : Modelo Barbará	10	10	3.6	2	2	280.41	0.8600	0.1719	0.2687
28		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior +270	51 : Modelo Barbará	10	10	3.7	2	2	411.87	0.8747	0.1670	0.2881
29		FBB atual com 2 linhas de recebimento +1 reta na superior +1 amv superior	51 : Modelo Barbará	10	10	3.8	2	2	521.50	0.8783	0.1669	0.2889

FIG. 4.21 Exemplo de cenários executados
Fonte: adaptado pelo autor a partir da ferramenta *Process Analyzer* do Arena® (2015)

Para o estudo em questão, foram executados cerca de 1250 cenários comparativos com variação de demanda, velocidade, quantidade de linhas de recebimento, quantidade de alças de manobra disponíveis e existência ou não de novo conjunto de AMVs inferior e superior, com mais de 35000 resultados disponíveis para análise.

4.3 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS E DECISÃO

Conforme apresentado no capítulo 2, o recurso gargalo pode ser compreendido como aquele que será limitador da quantidade produzida pelo sistema e cuja intervenção sobre ele permitirá o aumento de capacidade de todo o sistema. Conceituações mais abrangentes foram apresentadas por Kuo *et al.* (1995), Chiang *et al.* (2001) e Betterton *et al.* (2012), enquanto

que Hopp *et al.* (2000), Faget *et al.* (2005) e Roser *et al.* (2001) apontam a descrição numérica da utilização como um método válido para identificação de gargalos.

A metodologia de avaliação de *layouts* apresentada no capítulo 3 possui como base teórica o estudo de gargalos em um pátio de classificação, identificando os recursos com maior utilização e estabelecendo alternativas que aumentem a capacidade de processamento da instalação. Aplicando a metodologia em um estudo de caso no pátio do Barbará, instalação sob responsabilidade da concessionária MRS Logística S.A., temos os cenários apresentados conforme subitens a seguir.

4.3.1 APLICAÇÃO DO MODELO DETERMINÍSTICO

A utilização do método determinístico, embora de resposta rápida e direta, mostrou-se superficial, como já era esperado. Com seu perfil extremamente simplificado, alguns resultados fogem da realidade operacional, principalmente quanto à estimativa de tempo de permanência futuro. Os resultados avaliados foram:

TAB. 4.2 Aplicação do modelo determinístico

DEMANDA ATUAL (2015) = 8 TRENS/DIA

	em horas	*em qtde*	*em horas*	*em qtde*
Tipo linha	**t perm**	**n trens**	**t**	**n linhas**
Recebimento	1	8.5	24	1
Classificação	12	8.5	24	5
Partida	1	8.5	24	1
Total linhas pátio				**7**

DEMANDA FUTURA (2019) = 17,6 TRENS/DIA

	em horas	*em qtde*	*em horas*	*em qtde*
Tipo linha	**t perm**	**n trens**	**t**	**n linhas**
Recebimento	1	17.6	24	1
Classificação	12	17.6	24	9
Partida	1	17.6	24	1
Total linhas pátio				**11**

Fonte: autor (2015).

Por outro lado, suas respostas são alcançadas de forma bastante rápida, através da aplicação direta da Equação 2.1. Com isso, é possível fazer algumas sensibilidades e ter um direcionador de como será o comportamento das expansões de quantidade de linhas necessárias para operação de volumes futuros.

4.3.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

a. Calibração e validação do modelo

Para calibração e validação da modelagem realizada em ambiente computacional, é necessário comparar os resultados produzidos com a realidade observada no pátio. Nesta etapa, torna-se igualmente importante a determinação do tempo de *warm-up*, ou simplesmente o aquecimento do sistema, período em que é necessário para o modelo entrar em regime. Estes valores iniciais são descartados, de modo que não haja poluição da base de dados e dos resultados.

Para definição do tempo de *warm-up*, foi utilizada a inspeção visual do gráfico conforme apresentado por Betterton *et al.* (2012). O tempo médio de permanência simulado dos trens no pátio e o tempo médio de permanência real dos trens são apresentados na FIG. 4.22.

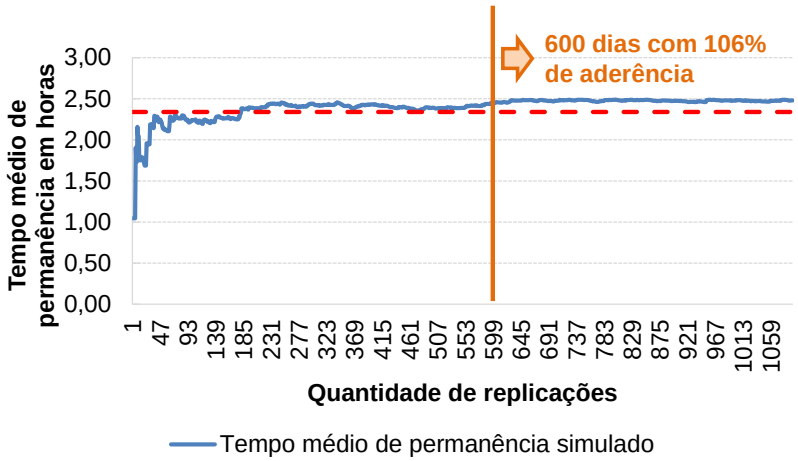

FIG. 4.22 Tempo médio de permanência real e simulado
Fonte: autor (2015)

Através da análise dos dados, percebe-se que existe um início de estabilidade já a partir de dia 200 de simulação, com uma aderência de 105%. Contudo, optou-se por um cenário mais conservador de estabilidade a partir do dia 600 de simulação, quando as oscilações tornam-se ainda mais desprezíveis quando comparadas com o cenário anterior. Nesse caso, a aderência simulada foi de 106%, ou seja, um desvio aceitável de 6% em relação a realidade, considerando a complexidade da operação do pátio de classificação e o nível estratégico das respostas. Dessa forma, o tempo de *warm-up* foi definido em 600 dias. Para se ter uma

reposta mais completa, foi considerado o período de 365 dias para cada replicação estudada e um total de 10 replicações por cenário.

b. Cenário atual do pátio

O pátio possui disponível para recebimento a linha 4. A classificação é realizada nas linhas 6, 8, 10 e 12, utilizadas para fracionar os vagões de atendimento do Rio de Janeiro, Minas Gerais, São Paulo e cliente interno. A linha 14 é utilizada para formação e partida de trens.

Considerando a demanda média da calibração como ponto inicial e extrapolando a quantidade de vagões processados dentro do pátio, a curva do tempo de permanência dos vagões no pátio é apresentada na FIG. 4.23.

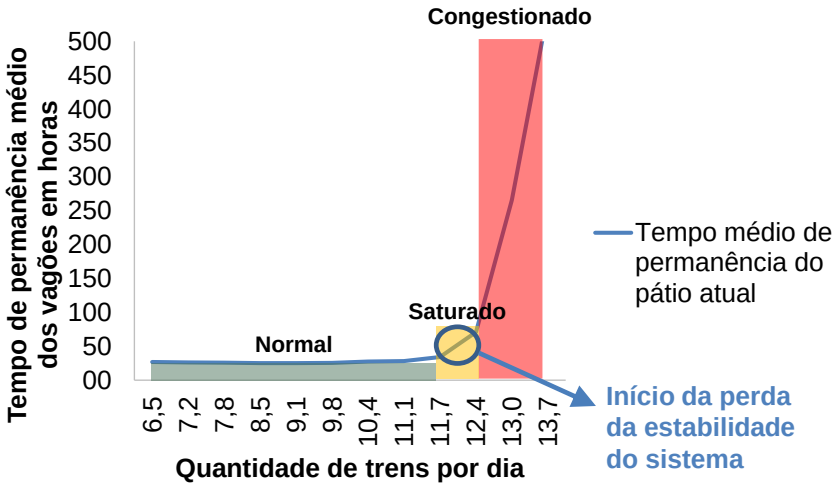

FIG. 4.23 Tempo de permanência no pátio atual
Fonte: autor (2015)

O comportamento exponencial da curva do tempo de permanência do pátio em sua configuração atual denota a perda de capacidade de processamento do pátio, ou seja, o sistema entrou em um grau de utilização tão alto que a fila e o processamento interno tornam-se impraticáveis na realidade.

Avaliando a utilização dos recursos no ponto de ruptura da estabilidade perante a capacidade do pátio, temos o seguinte mapa apresentado na FIG. 4.24.

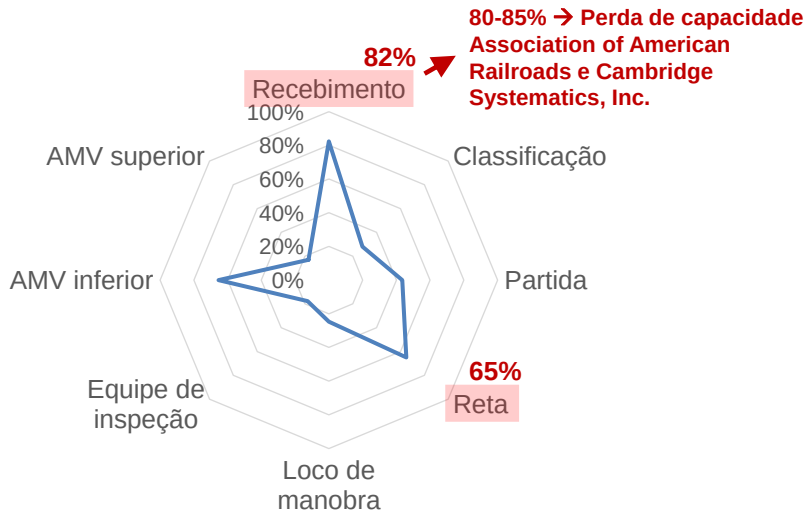

FIG. 4.24 Utilização dos recursos do pátio atual na ruptura
Fonte: autor (2015)

Os recursos com maior utilização são o recebimento, a alça de manobra e o conjunto de chaves de entrada no lado inferior do pátio, o que denota uma tendência de que esta seja a sequência inicial de gargalos do pátio, conforme método de utilização abordado por Hopp *et al.* (2000).

Percebe-se na FIG. 4.24 que o gargalo limitador de capacidade do pátio em sua estrutura atual é a região de recebimento e que sua taxa de utilização no ponto de perda de capacidade foi de 82%. Isto demonstra alinhamento com estudos prévios da Association of American Railroads e Cambridge Systematics, Inc., que demonstram que a capacidade é atingida em cerca de 80% de utilização, quando a partir deste ponto o sistema passa a operar em um ambiente de fluxo de trens muito elevado, com capacidade muito limitada de acomodar desvios e recuperação de incidentes.

Para confirmar se o método de utilização proposto por Hopp *et al.* (2000) é aderente ao pátio de classificação, é realizado um teste de aumento da capacidade de cada um dos recursos disponíveis do pátio de forma isolada, a saber: linhas de recebimento, linhas de classificação, linhas de partida, alças de manobra, locomotiva de manobra, equipe de inspeção, conjunto de chaves no lado inferior e conjunto de chaves no lado superior. O objetivo é verificar qual a quantidade de trens processados foi obtida como resposta em cada cenário de expansão estudado, conforme apresentado na FIG. 4.25.

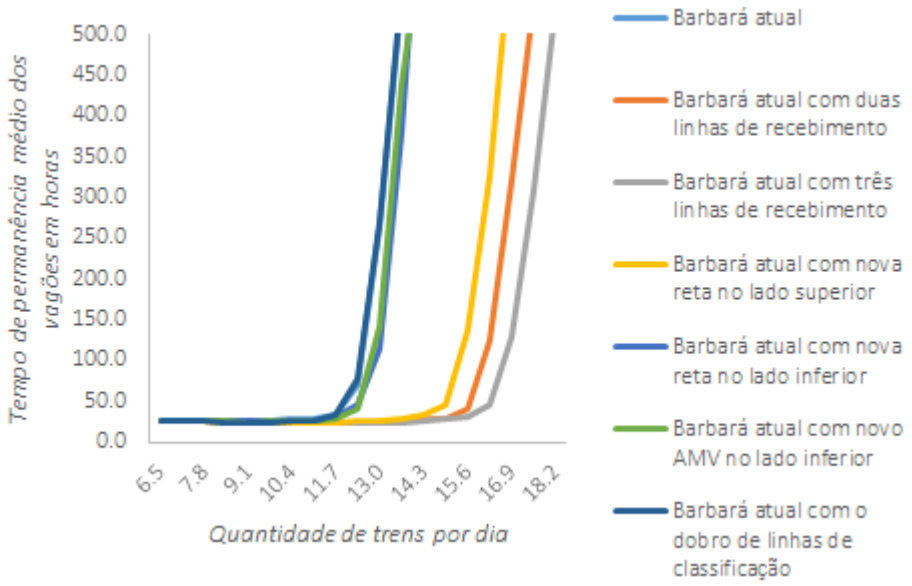

FIG. 4.25 Comparativo do tempo médio de permanência por solução adotada
Fonte: autor (2015)

Os resultados demonstram que as expansões dos recursos que possuíam maior taxa de utilização (recebimento e alça de manobra) foram as que permitiram maior ganho de capacidade, enquanto que grande parte das expansões dos demais recursos foram traduzidas em pouco ou nenhum ganho para o sistema do pátio. Isto ratifica o conceito anteriormente apresentado, ou seja, "é importante definir o gargalo em termos de utilização conforme aqui realizado" (HOPP *et al.*, 2000) e "gargalo é o recurso em que a utilização ao longo do tempo é máxima" (LAWRENCE *et al.*, 1994).

Lembrando que o conjunto de chaves de acesso ao pátio, sejam no lado inferior ou no lado superior, foram modeladas de modo único em função da proximidade de cada chave individualmente uma da outra, o que impede que uma manobra seja feita sem que as outras sejam igualmente utilizadas, conforme apresentado na FIG. 4.26.

FIG. 4.26 Conjunto de chaves no lado superior
Fonte: MRS Logística S.A. (2015)

c. Atuação no primeiro gargalo: linha de recebimento

Após a verificar que a região de recebimento é o ponto do pátio que mais restringe sua capacidade, uma alternativa desenhada é o aumento das linhas dessa região. É realizada uma sensibilidade de mais uma e mais duas linhas, sendo que os resultados são apresentados na FIG. 4.27.

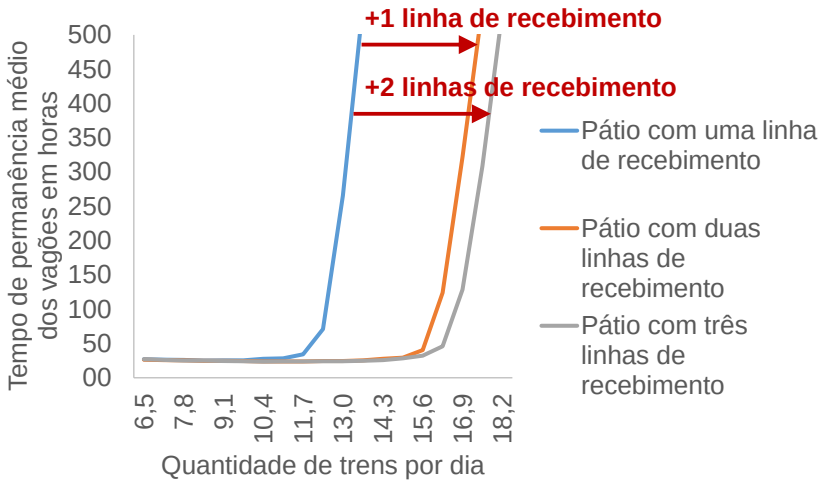

FIG. 4.27 Tempo médio de permanência considerando a expansão das linhas de recebimento
Fonte: autor (2015)

Conforme apresentado na figura acima, o ganho de capacidade proporcionado por mais uma linha foi considerável, tendo como referência a base de comparação atual. Contudo, o mesmo salto não se repete quando é adicionada uma segunda linha.

Para verificar esta questão, foi realizada uma avaliação da utilização dos principais recursos nos três cenários, sendo eles pátio com uma linha de recebimento, pátio com duas linhas de recebimento e pátio com três linhas de recebimento, conforme apresentado na FIG. 4.28, na FIG. 4.29 e na FIG. 4.30.

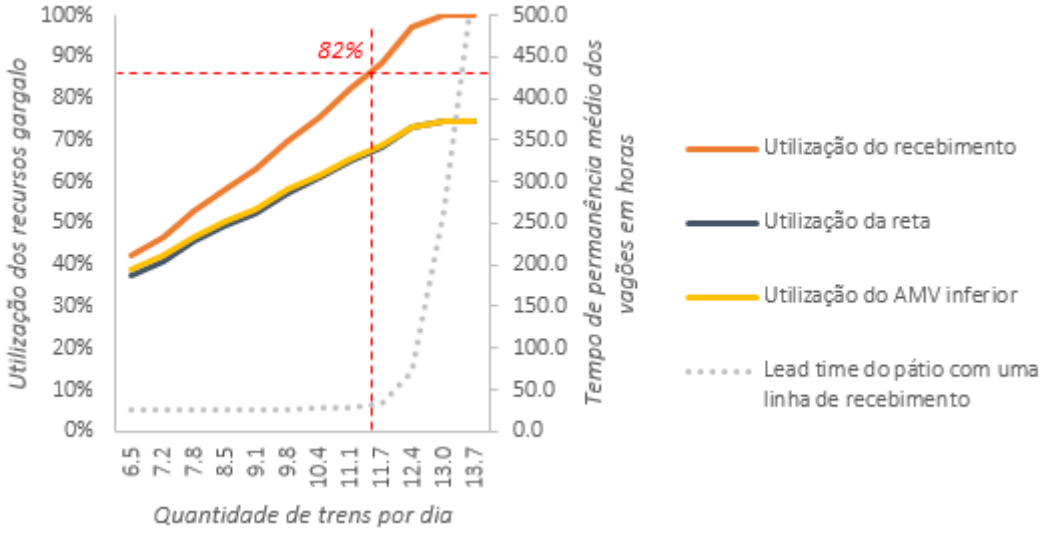

FIG. 4.28 Evolução da utilização dos recursos do pátio com uma linha de recebimento
Fonte: autor (2015)

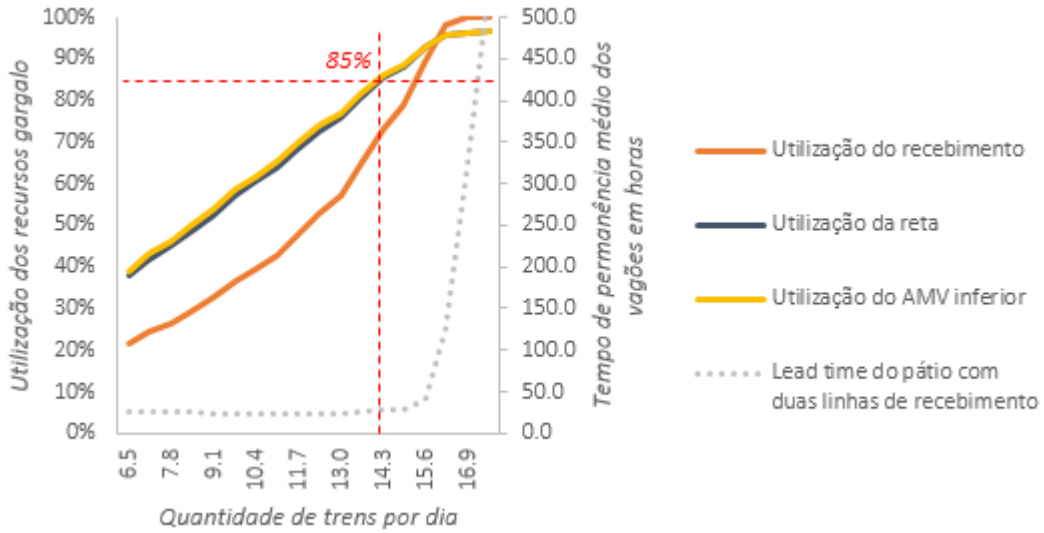

FIG. 4.29 Evolução da utilização dos recursos do pátio com duas linhas de recebimento
Fonte: autor (2015)

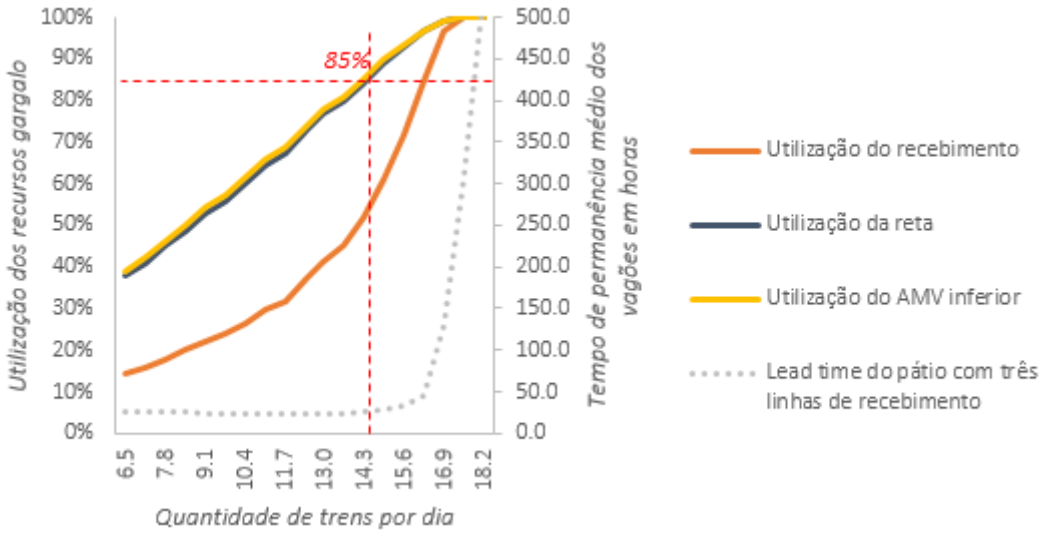

FIG. 4.30 Evolução da utilização dos recursos do pátio com três linhas de recebimento
Fonte: autor (2015)

Os resultados demonstram que:

- No cenário do pátio com uma linha de recebimento, o recurso gargalo é a linha 4 em função da sua limitada capacidade de absorver o fluxo de entrada;
- No cenário do pátio com duas linhas de recebimento, o incremento de capacidade (fluxo de trens processados pelo pátio) é considerável, sendo que na ruptura da capacidade o novo gargalo é a utilização da alça de manobra e do conjunto de chaves no lado inferior;
- Por esse motivo que a adição de uma terceira linha não possui um ganho elevado de capacidade, pois o gargalo já não se encontra mais no recebimento.

Esta avaliação ratifica novamente o referencial teórico anteriormente apresentado, ou seja, torna-se importante a escolha de até qual nível de detalhe será trabalhado o recurso restritivo, pois "o gargalo pode ter mudado para outro local" (BETTERTON, 2012).

d. Atuação no segundo gargalo: alça de manobra

Uma vez explorado o primeiro gargalo e incluída mais uma linha na região do recebimento, percebe-se através do método da utilização uma migração da restrição para a alça de manobra, conjunto de chaves no lado inferior ou ambos, conforme apresentado na FIG. 4.31.

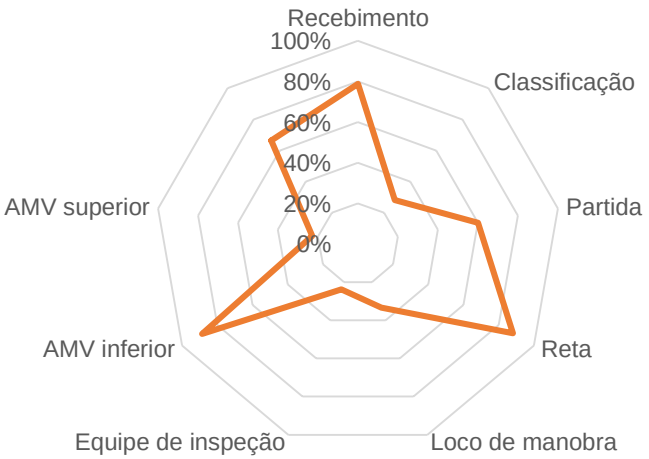

FIG. 4.31 Utilização dos recursos do pátio com duas linhas de recebimento na ruptura
Fonte: autor (2015)

Para determinação dos ganhos provenientes de cada iniciativa, foram realizadas avaliações individuais de expansão que tratam os recursos-gargalo, ou seja:

- Pátio atual com duas linhas de recebimento (solução do primeiro gargalo);
- Pátio atual com duas linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado inferior, duplicando o acesso ao cliente interno;
- Pátio atual com duas linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado superior, reduzindo a utilização do conjunto de chaves do lado inferior e deixando a alça de manobra preferencialmente para acesso ao cliente interno;
- Pátio atual com duas linhas de recebimento e um novo conjunto de chaves no lado inferior.

Todavia, já existe um indicativo de que a solução de inclusão isolada da nova alça de manobra no lado inferior do pátio não será a mais adequada, em virtude da alta taxa de utilização observada no conjunto de chaves do lado inferior.

Os resultados demonstraram que o segundo gargalo está localizado na alça de manobra do pátio. Isto ocorre porque todo trem precisa acessá-la para fracionamento dos trens recebidos nas linhas de classificação, formação de trens na linha de partida e acesso ao cliente interno. Os cenários são apresentados na FIG 4.32.

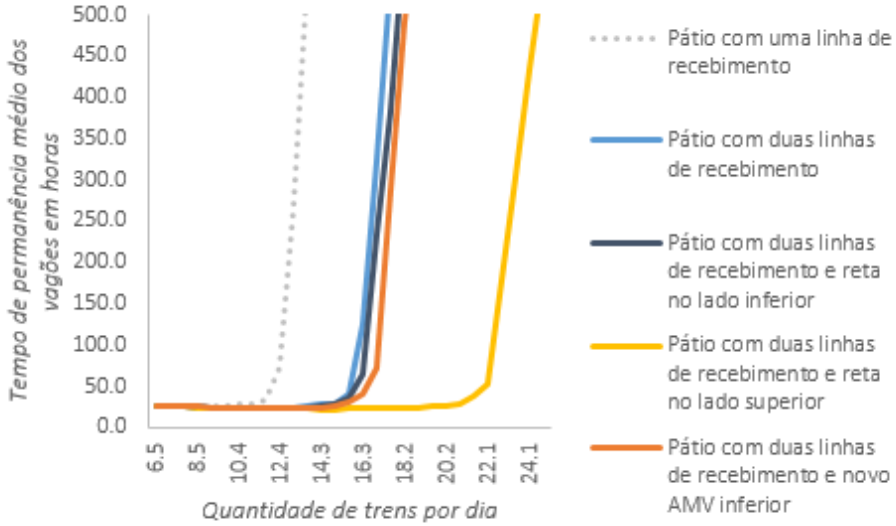

FIG. 4.32 Alternativas de solução para o segundo gargalo do pátio
Fonte: autor (2015)

Conforme diagnóstico anterior, as avaliações de simulação permitiram indicar que, além de uma nova alça de manobra, é necessário que ela se posicione no lado superior do pátio. Isto ocorre em função da quantidade de conflitos gerados no lado inferior do pátio, provenientes da competição de trens em classificação, trens em formação e trens acessando o cliente interno e que gera um congestionamento naquela região, impedindo o avanço da capacidade. As utilizações dos recursos em cada uma das alternativas estudadas estão presentes na FIG. 4.33 e FIG. 4.34.

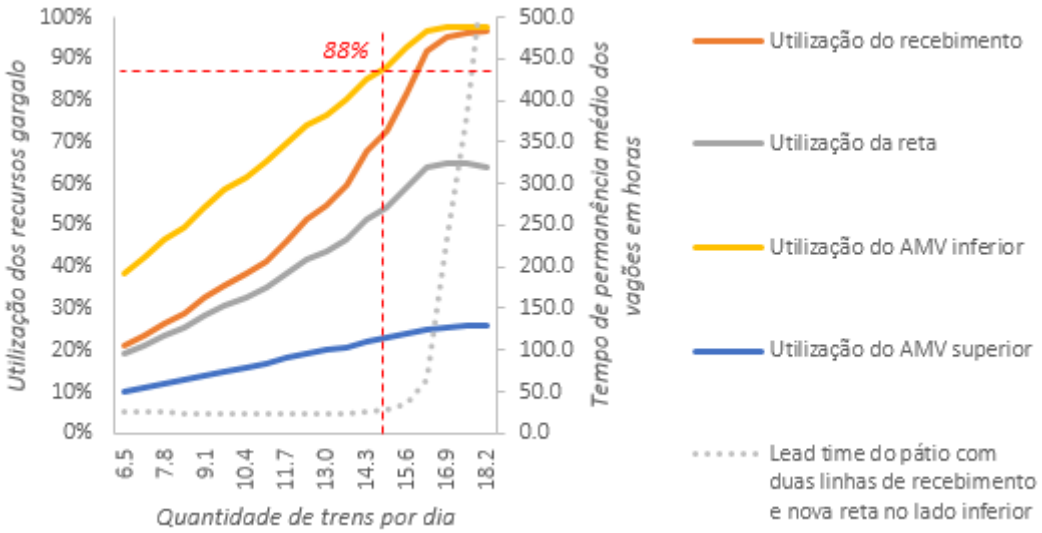

FIG. 4.33 Evolução da utilização dos recursos do pátio com duas linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado inferior
Fonte: autor (2015)

Quando ocorre a criação de uma nova alça de manobra no lado inferior, a única chave de acesso continua sendo altamente demandada e ela passa ser a nova restrição de capacidade, de modo que o ganho da nova opção de manobra é marginal.

Quando ocorre a expansão da alça de manobra no lado superior, toda a classificação passa a ser preferencialmente realizada naquele lado, balanceando a utilização da chave no lado inferior e superior. O lado inferior fica preferencialmente utilizado para acesso ao cliente interno e formação de trens para partida do pátio.

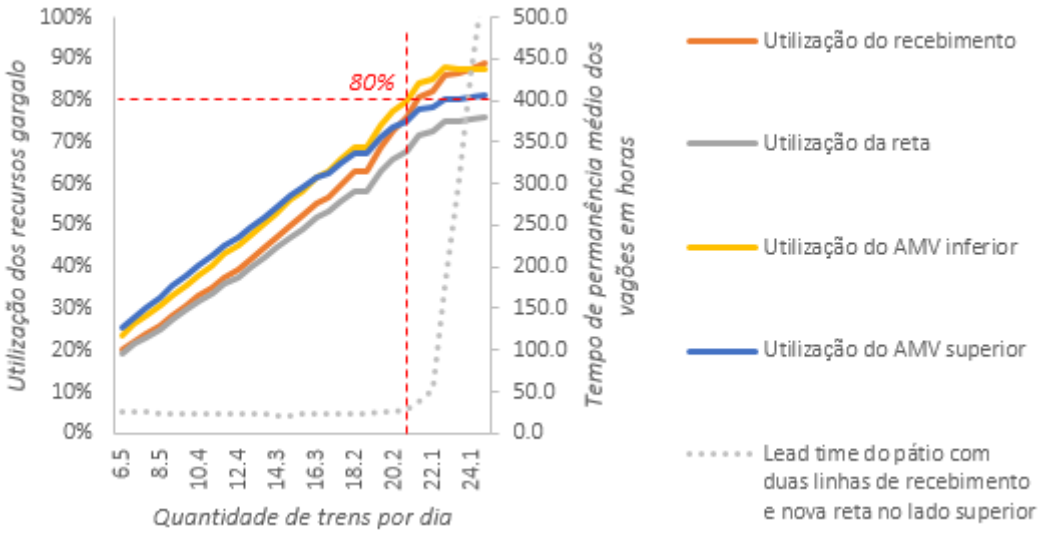

FIG. 4.34 Evolução da utilização dos recursos do pátio com três linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado superior
Fonte: autor (2015)

Outras opções de posicionamento da alça de manobra poderiam ser testadas, contudo foram avaliadas somente as mais habituais em função da rotina do pátio. De qualquer forma, os números já indicam que o objetivo final desta solução deve ser reduzir o conflito de recursos no lado inferior do pátio.

Uma vez definida a nova solução, a nova estrutura do pátio passa a ser a atual com duas linhas de recebimento e uma nova alça de manobra no lado superior. A partir deste ponto, o terceiro gargalo precisa ser investigado para dar continuidade ao processo de aumento de capacidade do pátio de classificação.

Percebe-se, todavia, que as utilizações dos novos recursos críticos estão muito próximas, o que indica que somente a atuação em um deles não deve resolver o problema com elevado incremento de capacidade, conforme demonstrado na FIG. 4.35.

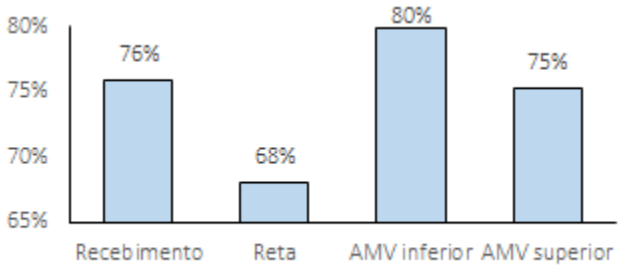

FIG. 4.35 Taxa de utilização dos recursos críticos para investigação do terceiro gargalo
Fonte: autor (2015)

e. Atuação no terceiro gargalo: linha de recebimento, AMV no lado inferior e AMV no lado superior

Conforme indicado no item anterior, neste ponto de análise a estrutura do pátio conta com uma linha a mais para recebimento de trens e uma alça de manobra no lado superior do pátio, além do *layout* atual. A avaliação dos recursos críticos aponta uma proximidade entre as utilizações, o que indica que somente a atuação em um deles possivelmente não resolverá o problema do pátio neste estágio.

Para comprovar a hipótese, é realizada nova análise considerando cada solução de forma independente, ou seja:

- Pátio atual com duas linhas de recebimento e uma alça de manobra no lado superior (atual estágio do estudo);
- Pátio atual com duas linhas de recebimento, uma alça de manobra no lado superior e um novo conjunto de AMVs no lado inferior, isolando a entrada no recebimento;
- Pátio atual com duas linhas de recebimento, uma alça de manobra no lado superior e um novo conjunto de AMVs no lado superior, isolando a entrada no recebimento;
- Pátio atual com três linhas de recebimento e uma alça de manobra no lado superior.

O comparativo dos resultados é apresentado na FIG. 4.36.

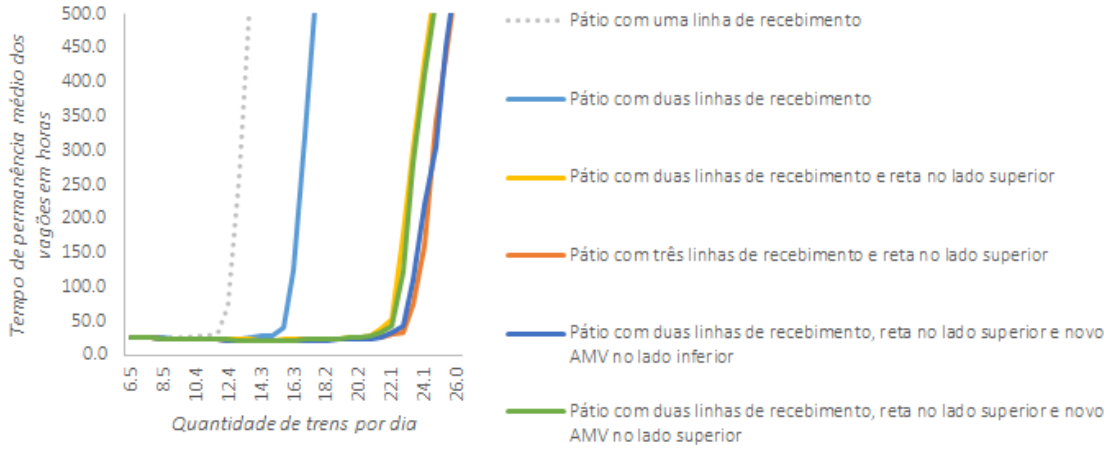

FIG. 4.36 Alternativas de solução para o terceiro gargalo do pátio
Fonte: autor (2015)

Os resultados demonstram que as soluções implementadas de forma isolada pouco ou nada adicionam ao sistema. Isto ratifica a hipótese inicial, ou seja, com as utilizações muito próximas, o gargalo se move de um recurso para outro de forma muito rápida, impedindo os ganhos esperados com o investimento em novas linhas ou novos conjuntos de chaves.

Por outro lado, é possível deduzir que a adoção das soluções em conjunto permitirá um salto de capacidade ao pátio, o que pode ser visualizado na FIG. 4.37.

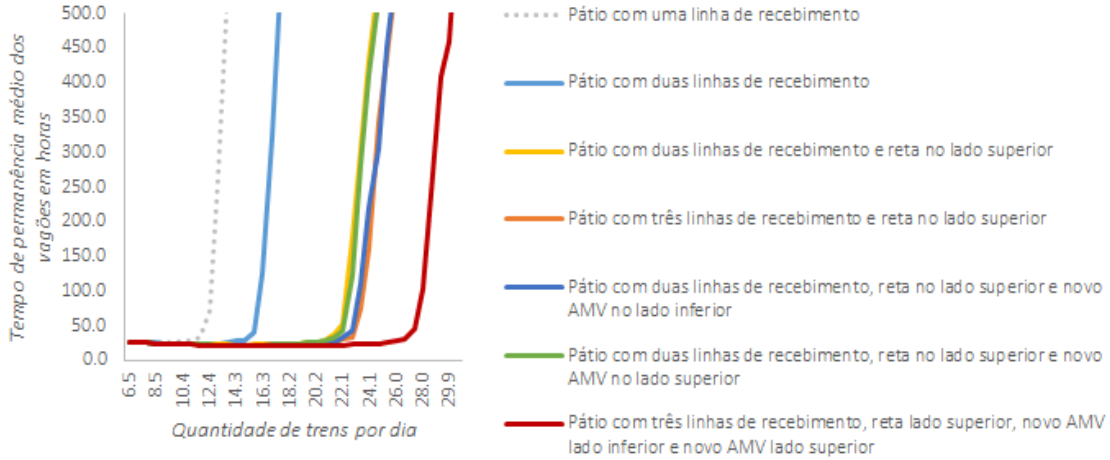

FIG. 4.37 Ganho de capacidade com adoção de soluções complementares
Fonte: autor (2015)

Deste modo, o novo *layout* que norteia a priorização do investimento e que permitirá aumento de capacidade será o pátio atual com três linhas de recebimento, uma alça de

manobra no lado superior, um novo conjunto de AMVs no lado inferior e um novo conjunto de AMVs no lado superior, sendo o objetivo destes dois últimos isolar a entrada nas linhas de recebimento.

A continuidade do método poderia ser realizada, sempre identificando o recurso-gargalo dentro da estrutura do pátio e priorizando onde investir, retornando o maior ganho de capacidade até que as demandas futuras sejam atendidas. O método permite, por consequência, fasear as soluções, ou seja, obter um pacote de soluções para cada nível de demanda esperada. Deste modo, obtém-se a relação de soluções indicadas para cada cenário de expansão da empresa, alinhado com o planejamento estratégico do operador ferroviário.

Alternativas ao modelo de alteração do *layout* da instalação podem ser realizado, como por exemplo a remoção de baixas velocidades. Eles atuam como uma alternativa complementar de ganho de capacidade e são de forma geral apresentadas no item a seguir.

4.3.3 ALTERNATIVA COMPLEMENTAR DE GANHO DE CAPACIDADE

Uma outra possibilidade de aumento de capacidade no pátio, conforme abordado por Pachl (2009), é removendo seções de baixa velocidade. Como um pátio de manobra possui por característica ter uma velocidade média real relativamente baixa quando comparada com as velocidades praticadas nas linhas principais de movimento, iniciativas que permitam a redução do tempo de desmembramento de trens, manobra e formação serão traduzidas em aumento de capacidade.

O pátio em estudo possui como característica a ausência de sinalização, com manobradores realizando a operação de AMVs de forma manual, conforme FIG. 4.38. Iniciativas de ganhos de velocidade, que partem desde a simples automatização das chaves até a sinalização completa do pátio, permitem o aumento da velocidade média praticada.

FIG. 4.38 Chave manual do pátio
Fonte: MRS Logística (2015)

Embora os estudos destas soluções excedam a proposta deste trabalho, uma sensibilidade é apresentada na FIG. 4.39 visando demonstrar se é interessante ou não avaliar esta alternativa.

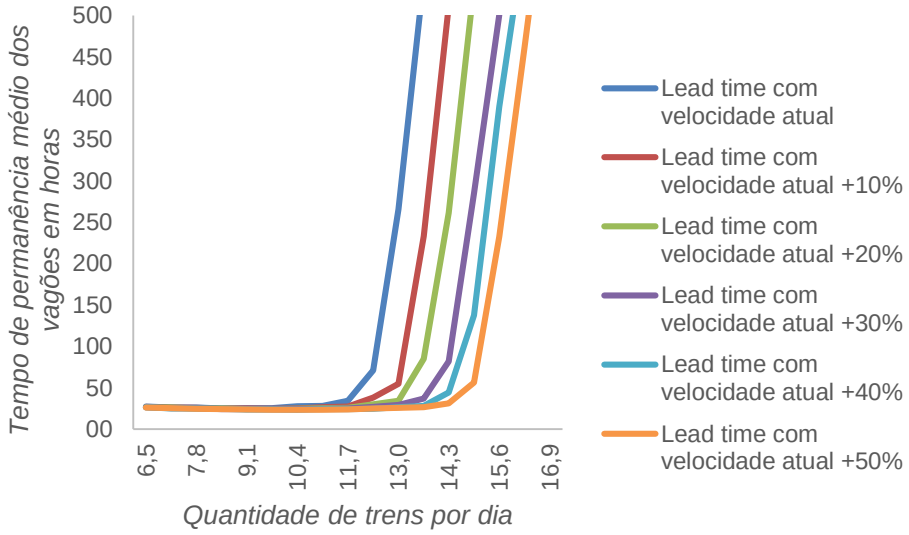

FIG. 4.39 Análise de sensibilidade do aumento da velocidade média do pátio e sua relação com a capacidade de processamento de trens por dia
Fonte: autor (2015)

Os resultados demonstraram, conforme esperado, que os investimentos em aumento de velocidade são correspondidos com saltos de capacidade, sendo que sua implantação dependente de avaliações econômico-financeiras do projeto.

4.3.4 COMPARATIVO DE RESULTADOS DO MODELO

A aplicação do modelo determinístico apresentado por Pachl (2009) e Marinov *et al.* (2011) mostrou-se bastante simplificada para medição e decisão em pátios de classificação que possuem alta competição por recursos comuns, tal como o apresentado no estudo de caso.

As principais fragilidades apontadas na utilização do modelo são:

- Tempo de permanência: por ser uma variável de entrada, torna-se difícil estimar qual será o tempo de permanência médio por trem no futuro, gerando uma falta de credibilidade na utilização do modelo. Contudo, é possível traçar cenários visualizando qual a quantidade de linhas necessárias para manter o tempo atual ou caso seja desejada alguma variação (menor, considerando redução de ciclo ou maior, considerando alguma estimativa de perda no processo). Em ambos os casos, tratam-se de suposições;
- Não fornece nenhum dado complementar quanto à formação de fila ou taxa de utilização de um determinado recurso. Neste caso, a operação pode estar se tornando altamente ineficiente com consequente aumento de ciclo, sem o tratamento devido;
- Não avalia conflito de recursos, tampouco taxa de utilização;
- Visão focada estritamente na quantidade de linhas para realização de uma demanda, desprezando outros recursos do pátio como AMVs, equipes etc.

É válido lembrar que o presente trabalho não explorou novos métodos determinísticos para aplicação do pátio, por entender que a resposta por simulação permite a compreensão de uma vasta quantidade de características de instalação. Algumas respostas acima mencionadas poderiam ser fornecidas através da aplicação de um modelo de filas, conforme proposição de Marinov *et al.* (2011) e Petersen (1977). Embora importante, sua aplicação em pátios de classificação já foi extensivamente trabalhada na literatura nacional e internacional e excedem a proposta de trabalho, por entender que as respostas são explicitadas de forma mais direta e completa através do desenvolvimento de um modelo de simulação computacional.

Fazendo um comparativo entre os modelos aqui apresentados, percebe-se que em uma visão geral a resposta de quantidade de linhas pode ser similar em alguns pontos, mas ainda assim sem muitos detalhes da operação, conforme FIG 4.40.

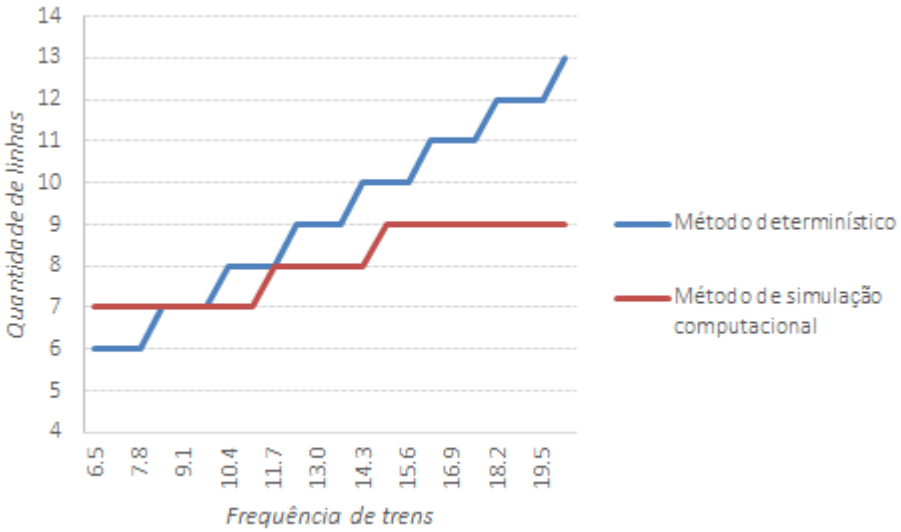

FIG. 4.40 Quantidade de linhas necessárias por demanda
Fonte: autor (2015)

Pelos motivos aqui apresentados, recomenda-se a adoção do método determinístico como uma primeira resposta (indicativa) ao estudo de capacidade de pátios, todavia complementado por uma abordagem mais completa por simulação computacional, onde será possível entender o sistema dinâmico em funcionamento.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação inicial deste trabalho foi abrir as discussões sobre um tema importante e recorrente nas empresas ferroviárias, considerando o desenho de um pátio de classificação que dê o suporte necessário para o cumprimento do plano de transporte de longo prazo e permita a longevidade da operação. A complexidade do conteúdo aliada a relevância do seu tratamento transforma-se em terreno rico para o estudo, tendo como bases principais a eficiência da operação de manobra de trens e eficácia nos resultados de produção diária.

O grau de investimento necessário nestas instalações é elevado e, em contrapartida, a literatura disponível sobre o assunto é restrita a poucas produções científicas, dificultando a tomada de decisão das empresas. Considerando esta oportunidade, a proposição de uma metodologia para avaliação de *layouts* de pátios visa contribuir para o início do preenchimento desta lacuna.

A atuação no nível estratégico permite definir parâmetros, métodos e o conjunto de ações que sustentam a eficiência operacional, aumentando a qualidade do serviço prestado. A metodologia permite a organização sistemática do estudo, fornecendo subsídios numéricos através das formulações matemáticas apresentadas ao longo da produção científica.

A revisão da bibliografia disponível nos acervos nacionais e internacionais permitiu conciliar o conhecimento difundido na literatura de processos de manufatura e políticas de funcionamento de pátios, ou seja, o entendimento do processo de manobra de trens, como são as interdependências dos recursos e quais os métodos que são candidatos ao tratamento da restrição de capacidade, solucionando o gargalo.

O enfoque em capacidade permite a compreensão da instalação em estudo por formulação matemática e, através do conhecimento consagrado de identificação de gargalos amplamente utilizado em ambientes de manufatura, é possível verificar qual subsistema do pátio atua como restrição para o desenvolvimento de patamares superiores de processamento.

O método determinístico e o método da simulação computacional são então apresentados e, com respostas distintas sob a ótica de profundidade de detalhamento, mostram-se complementares considerando as informações fornecidas e permitem retornos mais imediatos e de curto prazo para a tomada de decisões de cunho estratégico.

A aplicação do método de utilização mostra-se aderente na investigação dos recursos que atuam como restrição na instalação e os resultados apresentados estão alinhados com estudos prévios realizados por instituições de prestígio como Association of American Railroads e

Cambridge Systematics, Inc., corroborando o valor das visões desenvolvidas com bases sólidas.

A proposta de metodologia pode ser subdividida em três partes: uma etapa prévia de determinação da demanda, cujo objetivo é a transformação dos volumes em TU (tonelada útil) para quantidade de metros que serão ocupados no pátio; a segunda etapa de aplicação da metodologia em si, ou seja, o apontamento dos principais pontos discutidos ao se avaliar o *layout* de um pátio, enfatizando o método da utilização como um bom candidato para diagnóstico de gargalos; e, por último, o grupo dos resultados, que permitiram as análises e o entendimento do cenário da operação da instalação.

Ao aplicar a metodologia em um estudo de caso, as simulações complementaram os resultados obtidos pelo método determinístico. Um *ranking* dos investimentos prioritários no pátio baseado na eficiência de resposta e detalhado por nível de demanda pode ser observado e, sobretudo, sua utilização permitiu um maior detalhamento e entendimento do desempenho da instalação, incluindo fatores como o comportamento do processo de inspeção e utilização de AMVs, linhas e frentes de manobra, o que não seria possível obter de forma precisa no formato determinístico utilizado.

Este tipo de trabalho permite igualmente uma reflexão muitas vezes não tão direta e que está relacionado ao *modus-operandi* da instalação. Como foi possível perceber, todo o estudo de capacidade possui como base o processo de funcionamento do pátio, ou seja, seu alicerce principal está no tipo de atividade executada no pátio, seu sequenciamento e as políticas que sustentam o seu funcionamento. O processo é reproduzido no sistema de simulação e, embora seja possível identificar oportunidades de melhoria, nem sempre é possível aproveitá-las em sua totalidade.

Em síntese, o valor do planejamento estratégico para a operação ferroviária está na capacidade de dar visão antecipada e a transformação desta visão em ações e projetos que garantam o atingimento dos objetivos da organização. Como projetos ferroviários envolvem infraestrutura, com grande *lead time* de realização, torna-se fundamental o gerenciamento das atividades no tempo e da eficiência do sistema em operação, garantindo sua continuidade e sustentabilidade no longo prazo e o atendimento das demandas dos *stakeholders*.

Finalmente, recomenda-se a elaboração de estudos científicos complementares a este trabalho, principalmente considerando a padronização de atividades e possíveis particularidades operacionais não observadas na operação tratada, de modo a subsidiar de

forma mais robusta as avaliações de longo prazo. Outra abordagem proposta é a extensão deste trabalho para outros tipos de pátios tais como o *hump yard*, que poderá contribuir para o desenvolvimento da comunidade científica, uma vez que notoriamente este tipo de pátio possui um processo de classificação mais robusto e de maior velocidade quando manipulando uma alta quantidade de vagões por dia.

A criação do paralelo entre eficiência e o valor investido será igualmente válido para uma avaliação mais abrangente em função de sua riqueza de informações e, por fim, o desenvolvimento de metodologia com estrutura similar pode ser adaptada, validada e aplicada para o modo de transporte ferroviário de passageiros, considerando as características particulares e inerentes deste tipo de sistema, sendo igualmente uma nova possibilidade para estudo futuro.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAR, Association of American Railroads, disponível em www.aar.org. Acessado em 25 de Outubro de 2014 às 08:35h.

ABRIL, M. *et al.* An Assessment of Railway Capacity. **Transportation Research Part E**, 4 Abril 2007. 774-806.

ANTF, Associação Nacional de Transportadores Ferroviários, disponível em http://www.antf.org.br. Acessado em 12 de Novembro de 2014 às 10:15h.

ANTT, Agência Nacional de Transporte Terrestre, disponível em http://www.antt.gov.br. Acessado em 12 de Novembro de 2014 às 09:48h.

ASSAD, A. A. Models for Rail Transportation. **Pergamon Press Ltd**, Grã-Bretanha, v. 14A, p. 205-220, 1980.

BECKMANN, M. *et al.* Studies in the Economics of Transportation, Estados Unidos da América, p. 127-171, 1956.

BETTERTON, C. E. *et al.* Detecting bottlenecks in serial production lines – a focus on interdeparture time variance. **International Journal of Production Research**, Estados Unidos da América, v. 50, n. 15, 2012.

CAMBRIDGE SYSTEMATICS. National Rail Freight Infrastructure Capacity and Investment Study, 2007.

CHIANG, S. -Y. *et al.* **C-bottlenecks in Serial Production Lines – Identification and Application**, Mathematical Problems in Engineering, v. 7, p. 543-578, 2001.

CNT. O Sistema Ferroviário Brasileiro – Brasília, 2013. 58 p.

CNT. Boletim Estatístico – CNT, 2015. 1 p.

CRANE, R. R. *et al.* An Analysis of a Railroad Classification Yard, 1954.

CSCSC, Canadian Supply Chain Sector Council, disponível em www.supplychaincanada.org/en/supply-chain. Acessado em 25 de Outubro de 2014 às 09:50h.

DIRNBERGER, J.R. *et al.* **Improving Railroad Classification Yard Performance Through Bottleneck Management Methods**, AREMA 2006 Annual Conference, 2006.

FAGET, P. *et al.* **Applying discrete event simulation and an automated bottleneck analysis as an aid to detect running production constraints**, Winter Simulation Conference, 2005.

FERNÁNDEZ, J. E. *et al.* A strategic model of freight operations for rail transportation systems, **Transportation Planning and Technology,** v. 27, n. 4, p. 231-260, 2004.

GOMES, C. M. N. Análise de Desempenho Operacional de Pátios Ferroviários, 1982. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 1982.

HANSEN, I. A. *et al.* Railway, Timetable & Traffic, Alemanha, p. 54-57, 2008.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 7a. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, v. I, 2001. Cap. 22, p. 1084-1086.

HOPP, W. J. *et al.* Factory Physics, v. 2, Estados Unidos, p. 213-227, 2000.

KUO, C. -T. *et al.* **Bottlenecks in serial production lines: a system-theoretic approach**, Mathematical Problems in Engineering, v.2, p. 233-276, 1995.

LAWRENCE, S. R. *et al.* **Shifting productions bottlenecks: causes, cures and conundrums**, Production and Operations Management, v.3, p. 21-37, 1994.

LANGONI, R. A. **Metodologia para Análise Operacional de Pátios Ferroviários de Classificação**. INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA, 2006.

MANSFIELD, E. *et al.* A Model for the Location of a Railroad Classification Yard, **Management Science**, v. 4, n. 3, 1958.

MARINOV, M. *et al.* A simulation modeling methodology for evaluating flat-shunted yard operations, **Simulation Modelling Practice and Theory,** n. 17, p. 1106-1129, 2009.

MARINOV, M. *et al.* Tactical management of rail freight transportation services: evaluation of yard performance, **Transportation Planning and Technology,** n. 34, p. 363-387, 2011.

MARTLAND, C. D. Rail freight service productivity from the manager's perspective, **Pergamon Press Ltd**, v. 26A, n. 6, p. 457-469, 1992.

MILLER, S. Traffic Modeling, 2011.

MRS LOGÍSTICA S.A., disponível em www.mrs.com.br. Acessado em 25 de Setembro de 2015 às 17:30h.

PACHL, J. Railway Operation and Control, 2ª ed., VTD Rail Publishing, 2009.

PETERSEN, E. R. Railyard Modeling: Part II – The Effect of Yard Facilities on Congestion. **Transportation Science**, v. 11, n. 1, 1977.

PORTER, M.E. What is Strategy?, **Harvard Business Review,** 1996.

PNLT, Relatório final do Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas PNLT, Set/2012.

RUFE, P. D. Fundamentals of manufacturing, 3ª ed., Society of Manufacturing Engineers (SME), 2013.

ROSER, C. *et al.* **A practical bottleneck detection method**, Winter Simulation Conference, 2001.

SANTOS, T. A. Um Modelo de Simulação para Análise de Desempenho de Corredores Ferroviários, 2014. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia, 2014.

TURNQUIST, M.A. et al. Queuing Models of Classification and Connection Delay in Railyards. **Transportation Science**, v. 16, n. 2, 1982.

UNION PACIFIC, disponível em www.up.com. Acessado em 24 de Janeiro de 2015 às 14:30h.