

Uma Metodologia para Modelagem e Simulação de Pátios Ferroviários

1º Thales Augusto dos Santos^{1*}, 2º Lorena Robusti Ferreira²

¹ MRS Logística S.A. - Gerência Geral de Engenharia de Transportes, Avenida Brasil 2001, 36060-010, Juiz de Fora-MG

² MRS Logística S.A. - Gerência Geral de Engenharia de Transportes, Avenida Brasil 2001, 36060-010, Juiz de Fora-MG

e-mail: thales.augusto@mrs.com.br, lorena.robusti@mrs.com.br

Resumo: Pátios ferroviários são instalações que têm propósitos gerais, aplicáveis a qualquer ferrovia, mas que também apresentam especificidades em função do escopo de operações, layout, sistemas de controle e sinalização e atividades de apoio. Pela interação desses fatores, pátios são sistemas complexos e tal condição obviamente se manifesta quando são feitas análises via modelos de simulação. Para mitigar as dificuldades encontradas na modelagem e racionalizar a representação da infraestrutura e modelos operacionais, foi desenvolvida uma metodologia já aplicada em estudos de pátios de Carga Geral e Heavy Haul que se mostrou vantajosa no aspecto do tempo de construção e na representação mais precisa dessas instalações. Este trabalho se propõe a apresentar o método e suas aplicações, com intuito de ser mais uma contribuição ao estudo de capacidade de pátios ferroviários.

Palavras-Chaves: simulação, pátios ferroviários, aplicação, metodologia

1. INTRODUÇÃO

As operações em pátios ferroviários envolvem o processamento de trens e seus vagões de modo a atender os seguintes propósitos [1]:

- Carga e descarga de vagões;
- Embarque e desembarque de passageiros;
- Troca de turno de maquinistas;
- Cruzamento e ultrapassagem de trens;
- Manobras para anexação e desanexação de vagões;
- Serviços de manutenção e atendimento por oficinas.

Certamente, outras atividades poderiam ser incluídas nessa lista, mas, em linhas gerais, essas são as mais comuns. Pode parecer simples e previsível, porém tais operações são executadas conforme as restrições impostas pela infraestrutura de malha, elementos estáticos [1] do pátio, como as linhas, aparelhos de mudança de via, sinais,

plataformas, entre outros. Além disso, a forma como esses recursos estáticos interagem com aqueles dinâmicos (locomotivas e vagões) define como a capacidade instalada é utilizada. Nesse sentido, os modelos operacionais influem diretamente na quantidade de trens e vagões que um pátio é capaz de processar [2].

É de grande relevância a gestão eficiente de pátios pois nessas instalações ocorrem a maioria dos atrasos e esperas de trens e vagões, sugerindo que políticas e modelos operacionais influem imensamente no tráfego ferroviário [2].

Esclarecidas essas condições iniciais, pode-se entender que a análise operacional de pátios ferroviários não segue um receituário e que um modelo analítico usado para um dado caso não será integralmente replicável a outro. Há também outras dificuldades, como o horizonte de tempo avaliado e a frequência de atualização das avaliações conforme o prazo para tomada de decisão, exigindo de

profissionais a constante ponderação entre tempo para modelagem e precisão (aprofundamento) da análise.

Essas avaliações podem ter escopo estratégico, tático e operacional sendo [2]:

- Estratégicas: avaliações de expansão de infraestrutura no longo prazo;
- Táticas: análise de tráfego e alocação de recursos no médio prazo;
- Operacionais: refletem as decisões de dia a dia, como distribuição de vagões vazios, definição da grade de trens e regras de despacho (licenciamento).

Em síntese, tais abordagens têm o propósito de identificar gargalos e oportunidades de redução de custos e aumentar a capacidade de tráfego. Nesse contexto, este trabalho apresenta metodologia desenvolvida na MRS Logística S.A. que é aplicada na avaliação por modelos de simulação de pátios ferroviários com foco tático e estratégico.

2. DESENVOLVIMENTO

Postas as condições anteriores, o ponto de partida é conhecer o layout ferroviário e o modelo operacional do pátio que será avaliado.

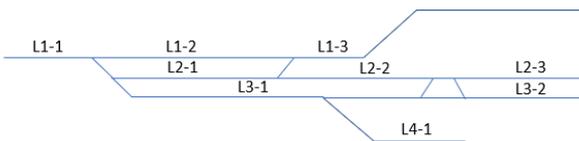


Fig. 1 Exemplo de Layout de Pátio com nove segmentos de linha, três aparelhos de mudança de via e três travessões. (Elaborada pelo autor).

Na Figura 1, nota-se o arranjo de linhas e como elas se conectam. Em termos práticos, trata-se de uma rede orientada em que os movimentos de trens e vagões ocorrem conforme as conexões físicas da infraestrutura e o modelo operacional praticado. Essa rede pode ser representada como:

$$G = (N, A) \quad (1)$$

Em que:

G: Infraestrutura (rede);

N: Número de nós (AMVs que conectam linhas);

A: Linhas

Essa topologia representa uma rede ordenada que pode ser avaliada para definir a rota do

ponto de origem ao destino com base em algoritmos para busca do caminho mais curto do ponto A para B ou para identificação de todos os caminhos que ligam A e B [3].

Conforme a topologia de rede, ou seja, o layout de pátio, é criada uma matriz que representa as conexões entre a linha *i* e a linha *j*:

Tabela 1. Conexões entre Linhas Conforme Sentido. (Elaborada pelo autor).

Linha i	Linha j	Sentido
L1-1	L1-2	Leste
L1-2	L1-1	Oeste
...
L4-1	L3-1	Oeste

Destarte, o seguinte algoritmo pode ser definido para encontrar uma rota que ligue a origem ao destino de um dado trem *t*:

Início (2)

Posição = Origem;

Enquanto Posição <> Destino;

Para todo $i \in N$;

Para todo $(i,j) \in A$;

Se $a_{i,j} = sentido$

Posição = $a_{i,j}$

Fim

Esta é uma abordagem simples para encontrar um caminho viável da origem (ponto de entrada) do veículo ferroviário até o destino (saída do pátio). Entretanto, como mencionando anteriormente, há regras que definem o modelo operacional e, desta forma, a circulação de um trem em um pátio está sujeita a restrições:

Tabela 2. Restrições à Circulação Conforme Tipo de Trem. (Elaborada pelo autor).

Trem	Linha 1	Linha 2	Linha n
T1	0	1	1
T2	1	1	1
Tt	0	0	1

A Tabela 2 representa as restrições que um trem *t* tem para percorrer as linhas do pátio. De forma simples, a codificação representa a condição binária “permite ou não permite

passagem”, que poderia ser expandida para uma codificação mais complexa indicando:

- 0: sem restrições;
- 1: Permite somente circulação;
- 2: Permite circulação, parada e manobra em qualquer sentido.

Com isso, o algoritmo expresso em (2) pode ser adequado para:

Início (3)
Posição = Origem;
Enquanto Posição <> Destino;
Para todo $i \in N$;
Para todo $(i,j) \in A$;
Se $a_{i,j} = sentido$ E $R_{t,i} = 0$
Posição = $a_{i,j}$
Fim

Em que:

R: conjunto de restrições do trem t na linha i .

Outro fator a se levar em consideração são os AMVs associados a cada rota, ou seja, usados em um movimento da linha i para a linha j . Essa situação é representada na Tabela 3:

Tabela 3. AMVs Utilizados ao Circular da linha i para a linha j . (Elaborada pelo autor).

Linha A	Linha B	AMV 1	AMV 2	AMV m
Linha i	Linha j	0	1	1

A Tabela 3 pode ser interpretada como a lista de AMVs que são requisitados ao executar o movimento de uma linha a outra ao longo da rota encontrada para um dado trem. Destarte, o algoritmo (3) é atualizado para:

Início (4)
Posição = Origem;
Enquanto Posição <> Destino;
Para todo $i \in N$;
Para todo $(i,j) \in A$;
Se $a_{i,j} = sentido$ E $R_{t,i} = 0$ E $\sum_k^m S_k = 0$
Posição = $a_{i,j}$
Fim

Em que:

S_k: estado (ocupado ou vazio) do AMV k usado na rota de i a j .

Além das restrições, trens e vagões possuem atividades planejadas no pátio que podem ser

consideradas com a criação de uma lista de atributos para cada trem que descrevem o tipo, duração e o local (linha) em que uma dada atividade deve acontecer. Assim, ao circular pelas linhas, trens e vagões incorrem em tempo de atividade ao encontrarem a(s) linha(s) que têm atividade planejada.

3. APLICAÇÃO

O método descrito na seção 2 pode ser aplicado a qualquer ferramenta de simulação ou programação que venha a ser usada para avaliação de capacidade operacional de pátios.

No caso específico da MRS, a ferramenta mais comum nesse propósito é o software Arena® que, ao longo de vários anos, tem sido usado para criar modelos de corredores ferroviários, terminais e pátios.

A primeira oportunidade em que o presente método foi usado em combinação com ferramenta de simulação foi na elaboração de projeto para ampliação de um pátio ferroviário da Baixada Santista e, desde então, vem sendo replicado em outros sistemas, inclusive em pátios de *heavy haul* e ferramentas que integram operações de circulação de trens em linhas de CCO com processos de pátios e terminais.

Para representar a infraestrutura de malha foram usadas planilhas eletrônicas integradas com os modelos em Arena®. Isso se mostrou útil, pois esses arquivos são amplamente usados nas organizações e de fácil utilização. Além desse aspecto, outro fator positivo é que alterações no arranjo e capacidade de linhas, nas rotas de trens e tempos de atividades podem ser feitos diretamente na planilha usada como interface com o modelo de simulação.

De certa forma, isso simplifica a execução de análises, permitindo até mesmo que pessoas sem conhecimentos profundos dos modelos possam efetuar avaliações, concentrando esforço nos testes de cenários e não em ajustes mais complexos via configuração de modelos e linguagens de programação.

Linhas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U			
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0			
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0			
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0			
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0			
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0			
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0			
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0			
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fig. 2 Cadastro de Infraestrutura em Planilha de Interface. Lista de linhas e respectivas conexões. (Elaborada pelo autor).

Linhas	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N										
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0										
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0										
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0										
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0										
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0										
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0										
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0										
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0										
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1										
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1									
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1								
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1							
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1						
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1					
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1			
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fig. 3 Cadastro de AMVs em Planilha de Interface. Lista de AMVs usados entre linhas de partida e de chegada. (Elaborada pelo autor).

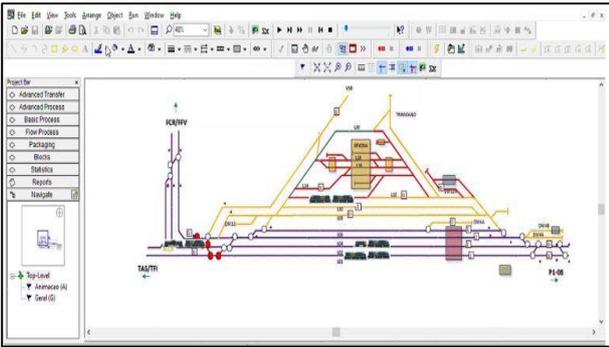


Fig. 4 Vista do Modelo de Simulação Arena® de um pátio da MRS Logística S.A. (Elaborada pelo autor).

4. RESULTADOS

A aplicação do método exposto anteriormente permitiu a avaliação de projetos de melhoria e expansão a partir de resultados quantitativos de capacidade e produtividade de pátios.

Por meio dos resultados de simulação foi obtida a medição da ocupação de linhas e como esse indicador se comporta à medida que mais trens e vagões são inseridos no sistema.

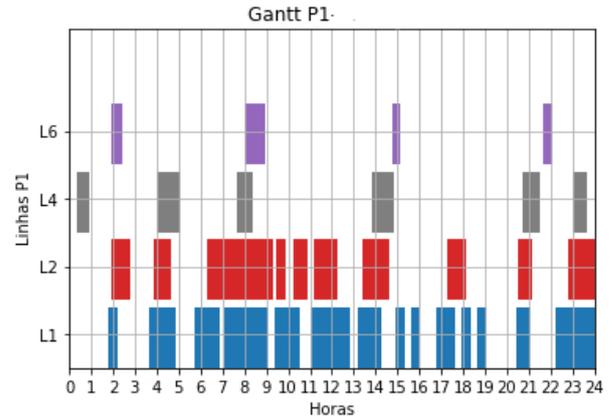


Fig. 5 Gráfico de Gantt Obtido de Simulações Operacionais de um Pátio da MRS Logística S.A. (Elaborada pelo autor).

Outras estatísticas e indicadores podem ser coletados a critério do profissional responsável pela condução do estudo. Novamente, as peculiaridades de cada pátio vão nortear as informações que precisam ser obtidas. É importante ter em mente que descobertas importantes podem surgir, uma vez que a modelagem desses processos oferece a possibilidade de avaliar uma miríade de situações, muitas vezes desconsideradas, simplesmente porque os métodos de avaliação utilizados são determinísticos e simplificados, não tão robustos ou detalhados o suficiente como os modelos de simulação.

Nesse ínterim, retomando os fatores que interagem e afetam a capacidade, é preciso ter uma visão de que esta não é estática e varia de acordo com configurações de linhas, grade e frequência de trens e níveis de serviço. A capacidade em si é um conceito complexo, vagamente definido e que tem vários significados. [4].

5. CONCLUSÕES

Pátios ferroviários como abordado nas seções anteriores são instalações complexas e diversas conforme as funções desempenhadas e a realidade de cada ferrovia. Do mesmo modo, a modelagem computacional de tais locais sofre dos mesmos problemas.

Utilizar métodos que simplifiquem e sistematizem parte desse processo permite que mais tempo seja destinado à análise e descoberta de soluções do que na própria modelagem.

De forma alguma, o método exposto neste trabalho é exaustivo e capaz de tratar todas as questões envolvidas em cada problema, mas pode ser visto como uma forma útil na elaboração de modelos mais detalhados em termos da infraestrutura de malha, até com certa agilidade para desenvolvimento.

Dada a relevância para a eficiência operacional e sustentabilidade do negócio, o estudo de capacidade de pátios requer métodos e ferramentas que possam refletir a maioria dos fatores envolvidos e de forma flexível, para ajustar as avaliações a diferentes cenários.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é dedicado aos colegas ferroviários de todas as empresas do setor, pesquisadores e, em especial, à equipe de Engenharia de Transportes da MRS Logística S.A. Pessoas estas que contribuem tanto para a disseminação de conhecimento e desenvolvimento do sistema ferroviário brasileiro em nível de classe mundial.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Marinov, M.; Şahin, I.; Ricci, S.; Franklin, G., *Railway Operations, Time-tabling and Control*, Research in Transportation Economics 41, 2013, pág 59-75.
- [2] Assad, A., *Models for Rail Transportation*, Transpn Res.Vol 14 A, 1980, pág 205-220.
- [3] Ahuja, R.; Magnanti, T.; Orlin, J., *Network Flows, Theory, Algorithms and Applications*, Prentice-Hall, 1993, pág 76-95.
- [4] Krueger, H., *Parametric Modeling in Rail Capacity Planning*, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference