

DISTRIBUIÇÃO DO ABASTECIMENTO DOS TRENS DE MINÉRIO NO CIRCUITO EXPORTAÇÃO, COM FOCO EM CUSTOS, UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO E SIMULAÇÃO EVENTOS DISCRETOS

Henrique Lacerda Junqueira

MRS logística S.A./Instituto Militar de Engenharia

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo de caso que tem como objetivo avaliar a distribuição do abastecimento dos trens de minério exportação entre os postos existentes, considerando os seguintes critérios: custo do diesel em cada posto, litros consumidos no processo de demarragem, eficiência energética, modelo operacional dos trens, posição das locomotivas e custo do trem hora parado (THP). O diesel é a principal despesa da companhia e atualmente a diretriz é abastecer o máximo de trens no posto onde o diesel tem menor valor. Através da simulação de eventos discretos utilizando o *software* Arena® e a otimização com o Solver do Excel, será possível determinar qual a estratégia operacional de menor custo.

Palavras chave: Otimização, simulação, ferrovia, pátios, abastecimento de diesel.

ABSTRACT

This article presents a case of study that evaluates the fueling distribution between fueling stations for ore export trains, considering some criteria as: cost of diesel at each station, liters consumed in trains departure, fuel efficiency, operating model trains, locomotives position and cost of train stopped time (THP). The diesel is the main company's cost. Currently the guideline is to maximize fueling process in the station which diesel has the lowest value. Using discrete event simulation in Arena® software and optimization with the Excel Solver it is possible to determine the operational strategy that minimizes costs.

Palavras chave: Otimização, simulação, ferrovia, pátios, diesel

1. INTRODUÇÃO

A MRS Logística é uma operadora ferroviária de carga que administra uma malha de 1.643 km situada na região Sudeste, abrangendo os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, região esta que concentra cerca da metade do PIB brasileiro. Por sua localização estratégica e atuação em um dos segmentos mais importantes para a economia brasileira, o negócio da MRS tem grande potencial de geração de riqueza.

Diante do cenário econômico favorável dos últimos anos, com o preço da tonelada de minério de ferro ultrapassando os US\$180,00 (cento e oitenta dólares), o grande desafio para as ferrovias consistiu em garantir o atendimento do crescente volume de transporte dos seus clientes. Neste mesmo sentido, a ferrovia demandou investimentos altos e constantes, que nos últimos anos foram da ordem de R\$ 1 bilhão (um bilhão de reais), aplicados em manutenção e melhoria da via férrea, dos equipamentos ferroviários, em sistemas de segurança e em projetos de mobilidade urbana.

Além dos altos investimentos necessários no subsídio da operação ferroviária, algumas despesas tem papel importante no processo de tomada de decisão devido ao impacto que geram ao caixa da cia. Atualmente, a maior delas é o gasto com o diesel consumido pelas locomotivas.

Desta forma, este artigo trata de um estudo da melhor distribuição do abastecimento de diesel nos trens minério exportação entre os postos existentes. Para resolver o problema foi desenvolvido um modelo de otimização utilizando o Solver do Excel. Para encontrar o cenário mais econômico foram levados em consideração o custo de trem parado (THP), consumo de diesel na demarragem, eficiência energética e o modelo operacional dos trens.

Para dar suporte ao modelo de otimização, a capacidade e o THP dos pátios onde são realizados os abastecimentos foram determinados usando a simulação de eventos discretos. Os modelos de simulação englobaram todas as atividades que os trens executam nos pátios e as paradas na circulação para manutenção dos corredores que reduzem a capacidade dos pátios.

A estrutura do presente artigo compreende a revisão bibliográfica acerca da otimização e simulação, desenvolvimento dos modelos, para posteriormente aplicar a modelagem ao problema proposto. Com o resultado será possível dizer qual a melhor distribuição de abastecimento com a demanda e modelo operacional definido.

2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Situada na principal região econômica do país e onde se concentra a exploração do minério de ferro, a MRS tem mais de 76% do volume transportado representado por este mineral. Os trens de minério percorrem o chamado carrossel, descendo pela Ferrovia do Aço, corredor destinado para circulação dos trens carregados até a região portuária e sobem até a região de carregamento pela Linha do Centro. Estes corredores são separados por 100 Km e ambos são compostos por linhas singelas e trechos com rampas acentuadas, sendo necessário em alguns casos complemento de tração.

O abastecimento dos trens de minério exportação pode ser feito em três postos: P1-07, localizado próximo às regiões de carregamento no município de Jeceaba, Minas Gerais, e no estado do Rio de Janeiro, estão os postos de Barra do Piraí, situado no município de mesmo nome, e Santa Rosa no município de Itaguaí. Para os pátios do P1-07 e Barra do Piraí, além do abastecimento, estão previstas outras atividades para os trens que serão tratadas mais a frente.

O problema de abastecimento configura-se quando somamos às atividades dos trens nos pátios o modelo operacional dos trens e a leiaute dos pátios. A união destes fatores cria um problema complexo de como alocar os trens nos postos e qual o limite de cada posto. Para resolver esta equação e alocar de forma ótima os trens nos postos, duas técnicas foram utilizadas, a simulação de eventos discretos e a otimização.

Para realizar a simulação de eventos discretos, foi utilizado o software Arena®, dado que a MRS já possui a licença do mesmo e é largamente utilizado em estudos na empresa. Embora não seja um software específico para operação ferroviária, suas ferramentas permitem que a operação seja representada de forma fiel a realidade.

Segundo Banks et. Al. (1996), a disponibilidade de linguagens computacionais em estudos de simulação, o crescimento da capacidade computacional e na metodologia de simulação tornaram esta uma das ferramentas mais difundidas e bem aceitas no ramo da pesquisa operacional. Ainda segundo Banks, a simulação é a ferramenta adequada quando se necessita estudar e fazer experimentações com as interações entre elementos de um sistema complexo, experimentar novas políticas de operação antes de sua implementação, ou até mesmo para verificar e confirmar o resultado de estudos analíticos.

Dos Santos (2014) ressalta que a simulação permite modelar o comportamento de sistemas de qualquer grau de complexidade, com um nível de detalhes mais ajustado a cada caso, e não é

necessário, em geral, fazer hipóteses simplificadoras e específicas como nos métodos analíticos, o que pode incorrer no comprometimento da validade destes.

Para resolver o problema e escolher a melhor distribuição do abastecimento entre os postos, foi utilizado o Solver do Microsoft Excel, pois foi a ferramenta disponível pela empresa.

De acordo com Hillier e Lieberman (2006), a programação linear é uma técnica poderosa para lidar com o problema de alocação de recursos limitados entre atividades que competem entre si, bem como outros problemas com uma formulação matemática similar. Ela se tomou uma ferramenta-padrão de grande importância para inúmeras organizações comerciais e industriais. Além disso, praticamente todas as organizações sociais estão preocupadas com a alocação de recursos em algum contexto e há um reconhecimento crescente da enorme aplicabilidade dessa técnica.

3. METODOLOGIA

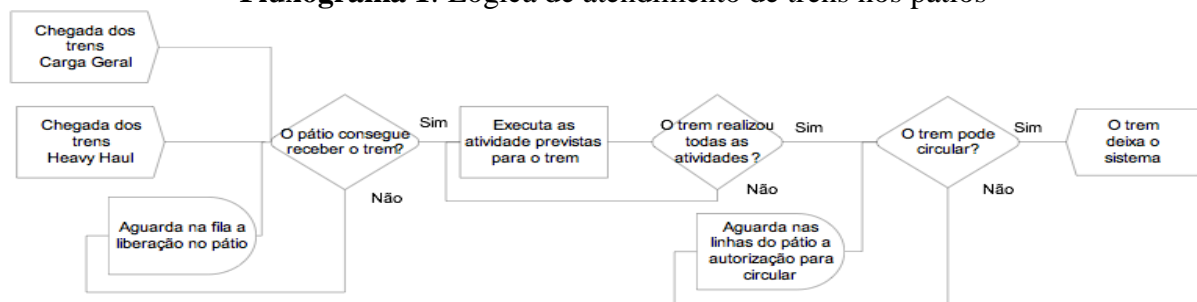
O artigo é um estudo de caso em que foram utilizadas as técnicas de simulação de eventos discretos e otimização para determinar a opção mais econômica para a companhia.

3.1 Modelo de simulação

Foi construído um modelo de simulação para cada pátio contemplando todas as atividades dos trens de carga geral e *heavy haul*. Nos modelos, as chegadas dos trens respeitam o *headway* mínimo entre trens e para melhor representação, foram implementadas as paradas para manutenção que acontecem nos corredores adjacentes aos pátios. Dos três pátios usados para abastecer os trens com diesel, em dois deles existem atividades além do abastecimento. Entre elas estão: a troca de equipagem, substituição das locomotivas do comando e/ou da cauda, complemento de tração, inspeção de locomotivas, ativação de sistemas de sinalização, entre outras. A vantagem é que ao realizar estas atividades o abastecimento pode ser feito na sombra.

Das inúmeras respostas do modelo de simulação, duas foram usadas no modelo de otimização. A primeira é a capacidade dos pátios em atender os trens dado o mix de modelo operacional desenhado para atender a demanda e a segunda informação é o tempo de permanência dos trens nos pátios somado com o tempo da fila de entrada nos pátios. É esperado que com o aumento da demanda de trens no pátio, a fila de entrada e/ou o conflito na saída dos trens faça com que o tempo de permanência mais o tempo de fila aumentem. O fluxograma 1 representa de forma simplificada a lógica usada para construção dos modelos de simulação.

Fluxograma 1: Lógica de atendimento de trens nos pátios



3.2 Modelo de otimização

Segundo Taha (2008), para que o modelo de programação seja linear, três condições básicas devem ser atendidas: proporcionalidade, aditividade e certeza. A primeira diz que a contribuição de cada variável de decisão, tanto na função objetivo quanto nas restrições seja diretamente proporcional ao valor da variável. A segunda requer que a contribuição total de todas as variáveis da função objetivo e das restrições seja a soma direta das contribuições individuais de cada variável. A terceira é a certeza que exige que os coeficientes da função objetivo e das restrições do modelo de programação linear são determinísticos, o que significa que são constantes conhecidas.

De acordo com estas características o modelo desenvolvido não é linear, pois viola a condição de proporcionalidade. Isso inviabiliza a solução do problema através do método Simplex. O método mais indicado para resolver o problema é o Evolucionário, pois ele permite resolver problemas mais complexos, utilizando o algoritmo genético.

O modelo de otimização foi desenvolvido para definir a melhor distribuição do abastecimento dos trens heavy haul entre os postos existentes da MRS. O modelo contempla os três postos existentes para abastecimento das locomotivas com diesel no circuito exportação. Como premissa, é necessário dizer o percentual de trens que segue cada modelo de formação da composição no sentido carregado, pois dependendo do modelo as locomotivas são obrigadas ou impedidas de serem abastecidas em um posto específico.

O modelo toma a decisão da melhor distribuição com foco em custos, para isso é preciso inserir alguns parâmetros:

- $I = \{1, \dots, I\}$: Postos existentes para abastecimento de diesel nos trem
- $J = \{1, \dots, J\}$: Posição das locomotivas no abastecimento
- $K = \{1, \dots, K\}$: Modelo operacional dos trens
- C_i : custo de diesel no posto i ;
- L_{ijk} : volume médio em litros abastecido pelos trens nos postos i , e j a posição dessa locomotiva no trem, no modelo operacional k ;
- Q_{ijk} : Quantidade de locomotivas nos trens nos postos i , na posição j , no modelo operacional k ;
- T_{ijk} : custo da hora do trem parado (THP) para abastecimento nos postos i , das locomotivas na posição j , no modelo operacional k ;
- D_{ijk} : Volume em litros gasto para demarrar as locomotivas nos postos i , depois de realizado o abastecimento das locomotivas na posição j , no modelo operacional k ;
- R_i : Limite de abastecimento em litros de cada posto i , de acordo com a capacidade de ressuprimento;

As variáveis para decisão do modelo são X_{ijk} , a quantidade de abastecimento de trens nos postos i , da locomotiva na posição j , e de acordo com o modelo operacional k .

Abaixo seguem a função objetivo e as restrições usadas para determinar a alocação dos trens nos posto com o menor custo operacional.

Minimizar

(1)

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} * C_i * L_{ijk} * Q_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} * T_{ijk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} * Q_{ijk} * D_{ijk}$$

Sujeito a

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} \leq E_{ijk} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} = N_{ijk} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} = N_{ijk} \quad (4)$$

$$X_{ijk} = 0 \quad (5)$$

$$X_{ijk} = \text{inteiro} \quad (6)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo com abastecimento de diesel nos postos considerando os modelos operacionais, posição das locomotivas nos trens ou fora deles (escoteira), volume médio por abastecimento e quantidade de locomotivas em cada modelo de trens ao passar em cada posto, a este valor é somado o THP dos trens de acordo com a demanda, acrescido à equação o volume de diesel consumido na demarragem dos trens em cada posto. As restrições (2) limitam a quantidade de trens atendidos em cada pátio seja menor que sua capacidade. As restrições (3) garantem que todas as locomotivas dos comandos, cauda e fora de trem sejam abastecidas, independente do modelo operacional. As restrições (4) são a garantia que o volume abastecido nos postos seja menor que a capacidade de ressurgimento dos postos e as restrições (5) impedem o abastecimento de determinados modelos operacionais em alguns postos ou pátios. A restrição (6) garante os valores encontrados na solução sejam somente números inteiros.

4. APLICAÇÃO DO MODELO

4.1 Pátios com postos de abastecimento de diesel

Abaixo serão descritos os postos de abastecimento e suas características operacionais e detalhes importantes do leiaute do pátio.

- P1-07 (FJC), pátio com 3 linhas de abastecimento cujo sistema de abastecimento é preparado para atender até 2 trens simultaneamente nas linhas L1 e L2 ou L1 e L4, sem perda de vazão, podendo abastecer até 3 locomotivas em cada linha. O ressurgimento é ferroviário com os trens saindo da região de Belo Horizonte e o posto possui tancagem de 2,7 milhões de litros e vazão para abastecimento dos trens de aproximadamente 1.000 litros/minuto por locomotiva. O ressurgimento deste posto permite um abastecimento diário de 570.000 litros/dia.
- Santa Rosa (FOS), pátio com abastecimento em duas linhas, possui tancagem de 670 mil litros e seu ressurgimento é rodoviário. Este posto permite simultaneidade no abastecimento dos trens, entretanto, quando houver dois trens em abastecimento ao mesmo tempo, a vazão reduzirá pela metade. O ressurgimento deste posto permite um

abastecimento diário de 600.000 litros/dia.

- Barra do Pirai (FBP), pátio onde as locomotivas são abastecidas fora do trem, é usado para abastecer as locomotivas do auxílio fixo de Barra do Pirai a Humberto Antunes podendo abastecer as locomotivas vindas como Vzão. Seu ressuprimento é rodoviário e possui baixa vazão de abastecimento das locomotivas, cerca de 350 litros/min. O abastecimento no pátio pode ocorrer na L6, linha usada para atender aos trens vazios ou nas linhas internas da oficina. Ambas opções tem impacto e podem gerar perda de capacidade no pátio.

4.2 Definição do modelo operacional dos trens

Há algumas possibilidades de formação dos trens carregados e cada modelo possui características que preenchem o *trade off* entre capacidade x economia. As opções de formação de trens são as seguintes:

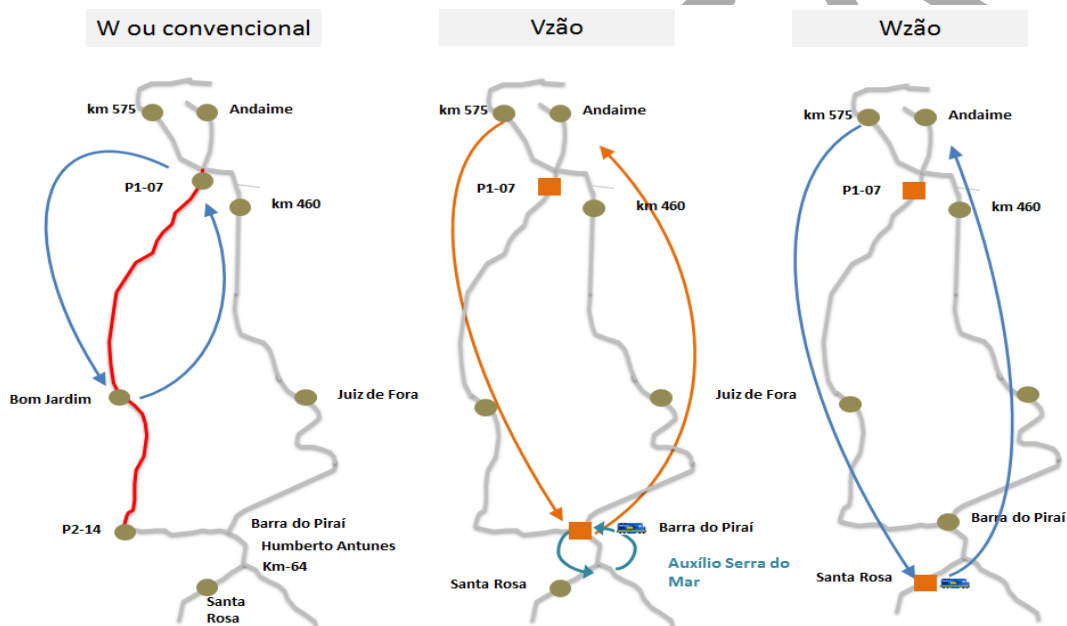


Figura 1: Os três modelos operacionais dos trens carregados

- Trens Convencionais ou trens W: saem dos terminais de carregamento com auxílio na cauda ou realizam a anexação no pátio do P1-07. Este auxílio é obrigatoriamente deixado em Bom Jardim (FOJ). As locomotivas do comando dos trens podem ser abastecidas nos pátios do P1-07 ou em Santa Rosa. Já as locomotivas do auxílio só podem ser abastecidas no P1-07 fora de trem. Este modelo tem como principal ponto positivo o curto ciclo das locomotivas do auxílio e o abastecimento destas locomotivas na oportunidade fora de trens. O ponto negativo é a circulação no contrafluxo dos trens W na Ferrovia do Aço, sendo impactados ou gerando impacto dos trens carregados.
- Trens Vzão: assim como no modelo convencional, o abastecimento das locomotivas do comando pode ser feito no P1-07 ou Santa Rosa. A diferença para o convencional é que as máquinas do auxílio são deixadas no pátio de Barra do Pirai ao invés de Bom Jardim. As máquinas do auxílio podem se abastecidas no P1-07 na cauda do trem ou em Barra do Pirai fora do trem. Em Barra do Pirai, depois de retiradas da cauda do trem carregado, as

locomotivas aguardam o trem vazio para serem anexadas no comando.

O ponto positivo deste modelo é que não há contrafluxo na ferrovia do Aço, permitindo menor tempo de circulação dos trens carregados. Como pontos negativos temos: o ciclo de locomotivas do auxílio é maior se comparado com os trens W e, para abastecer as locomotivas do auxílio em FBP, é necessário atravessá-las no pátio impedindo a entrada e saída de trens, enquanto a manobra estiver sendo realizada. Outro ponto relevante é a baixa vazão no abastecimento, cerca de 35% da capacidade da vazão do P1-07 ou FOS.

- Trens Wzão: Como nos outros modelos, o comando também pode ser abastecido nos pátios de FJC ou FOS. Já as máquinas do auxílio, podem ser abastecidas nos P1-07 na cauda dos trens ou em Santa Rosa fora do trem. Após o abastecimento elas são colocadas nas linhas destinadas à circulação dos trens vazios e anexadas na frente destes, tornando-se comando.

O positivo deste modelo é que há uma diminuição das atividades no pátio de Barra do Piraí, que é crítico para operação, além de reduzir a quantidade de viagens de locomotivas de auxílio entre Humberto Antunes e Barra do Piraí. Já o ponto negativo é o aumento do ciclo das locomotivas e ao realizar o abastecimento simultâneo de dois trens, há perda de vazão, aumentando o tempo de abastecimento.

4.3 Custos do diesel e custo do THP

O fator mais relevante na escolha do local de abastecimento dos trens é o custo do diesel. Entre os três postos avaliados, aquele que apresenta maior custo do diesel é o P1-07, a diferença dele para os outros dois de R\$0,12 por litro de diesel.

Para definir qual o custo do trem hora parado foi levado em consideração o consumo de diesel da locomotiva parada, custo do diesel, custo de equipagem e remuneração de capital das locomotivas e vagões, para um trem tipo de 2 locomotivas GE AC44 e 134 vagões GDT. No cálculo do THP não foi considerado a perda de volume transportado, pois não podemos afirmar através deste estudo que o aumento na fila do pátio tem impacto no atendimento à demanda, uma vez que no modelo de atendimento da MRS aos seus clientes do circuito do minério, é comum a formação de filas nas regiões de carga e descarga.

1.3. Circulação dos trens e características operacionais

No ciclo dos trens de minério exportação, os trens saem da região de carregamento próxima a Belo Horizonte, passam pelo pátio do P1-07, primeiro ponto possível de abastecimento, com a formação de duas locomotivas no comando do trem e uma ou duas na cauda como auxílio complementando tração. Já no P1-07 é possível abastecer as máquinas do comando e ou da cauda do trem. A partir de Bom Jardim, não é mais necessário locomotivas na cauda do trem, isto permite o retorno das locomotivas para o P1-07 em um trem W (formado apenas por locomotivas). A alternativa é continuar no trem e seguir para Barra do Piraí ou Santa Rosa, trem Vzão ou Wzão respectivamente.

Atualmente os trens chegando em FBP, precisam receber o auxílio fixo para vencer a serra do trecho entre Barra do Piraí a Humberto Antunes (FHA), com isso se o trem estiver com máquinas na cauda, elas são retiradas e colocadas nas linhas dos trens vazios ou se os trens não tiverem máquinas na cauda basta receber as locos do auxílio. Embora não seja praticado atualmente, existe a possibilidade dos trens passarem direto por Barra do Piraí, contudo esta operação depende do peso do trem e do tipo de locomotivas presente no trem.

Se o modelo for Vzão, as máquinas retiradas permanecem no pátio de FBP aguardando a chegada dos trens vazios para serem anexadas na frente destes trens e seguirem com destino a

região de carga. Na espera dos trens vazios as máquinas podem ser abastecidas.

Os trens que passam em Barra sem trocar auxílio são chamados de Wzão, estes necessariamente param em Santa Rosa para retirar as locomotivas da cauda. Eles podem abastecer o comando e as locomotivas da cauda fora do trem, porém ambos ocorrem na mesma linha e o abastecimento da cauda é iniciado após o término do abastecimento do comando. Assim como em Barra do Piraí, as locomotivas que eram auxílio na cauda dos trens, vão para a linha destinada pra a circulação dos trens vazio aguardar o trem para serem anexadas no comando do trem.

5. RESULTADOS

Foi decidido pela não alocação de abastecimento das locomotivas dos trens de minério exportação no posto de Barra do Piraí, pois este posto já é usado para abastecimento das locomotivas do auxílio fixo de Barra a Humberto Antunes e o conflito gerado pelo aumento na quantidade de abastecimento no pátio pode afetar a capacidade do mesmo. Desta forma, cresce significativamente o risco de não atendimento à demanda.

Do modelo de simulação, duas respostas foram usadas para o modelo de otimização. A primeira resposta é a capacidade dos pátios e a figura 2, mostra o aumento da permanência mais a fila (THP) no pátio devido ao incremento na quantidade de abastecimento de cauda dos trens. É notável que o efeito da demanda no THP tem um crescimento acentuado a partir do momento que o pátio atinge a sua capacidade.

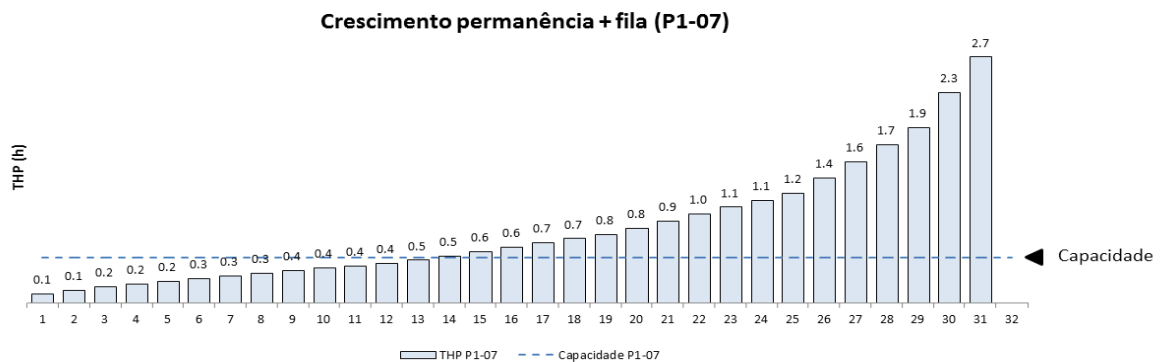


Figura 2: Capacidade do pátio do P1-07 e permanência mais fila

Com a simulação foi definida a capacidade dos pátios para cada tipo de abastecimento conforme tabela 1.

Tabela 1: Capacidade dos pátios de acordo com a posição da locomotiva

Pátios	Tipos de Abastecimentos		
	Comando de trem	Cauda de trem	Locomotivas fora do trem
FJC	40	13	26
FBP	0	0	0
FOS	26	0	13

Conforme mencionado anteriormente, desconsiderou-se alocar demanda de abastecimento em

Barra do Pirai, motivo pelo qual as capacidades estão zeradas. Em Santa Rosa, a capacidade de abastecimento de cauda de trem é igual a zero porque, caso seja necessário abastecer as locomotivas da cauda, ele será feito com as locomotivas fora do trem.

Outra resposta dada pela simulação foi o THP, resultante da combinação entre modelo operacional, demanda, percentual de abastecimento de comando e percentual de abastecimento de cauda. Se fossem executados todos os cenários variando 1% cada indicador citado acima, e a demanda variando de zero a quarenta trens, seria necessário executar 40 milhões de cenários só para o pátio do P1-07.

Reduzindo a quantidade de cenários possíveis, foram executadas as demandas pares de 0 a 40 trens e para as outras variáveis foram usados os patamares de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Com esta redução foram executados 2625 cenários para o P1-07 e 525 cenários para Santa Rosa. Foram executadas para cada cenário, 10 replicações de 300 dias com aquecimento de 30 dias para o pátio do P1-07, já para o pátio de Santa Rosa foram executados 5 replicações de 300 dias com aquecimento de 30 dias.

Com a construção destes cenários foi possível criar uma tabela comparando o comportamento do pátio com diferentes níveis de demanda, modelo operacional e tipo de abastecimento. A figura 3 mostra o comparativo do incremento nos THP para a atividade de abastecimento de comando de trem no pátio do P1-07 e Santa Rosa. Percebe-se que o THP para abastecer o comando dos trens no pátio de P1-07 é menor que no de Santa Rosa.

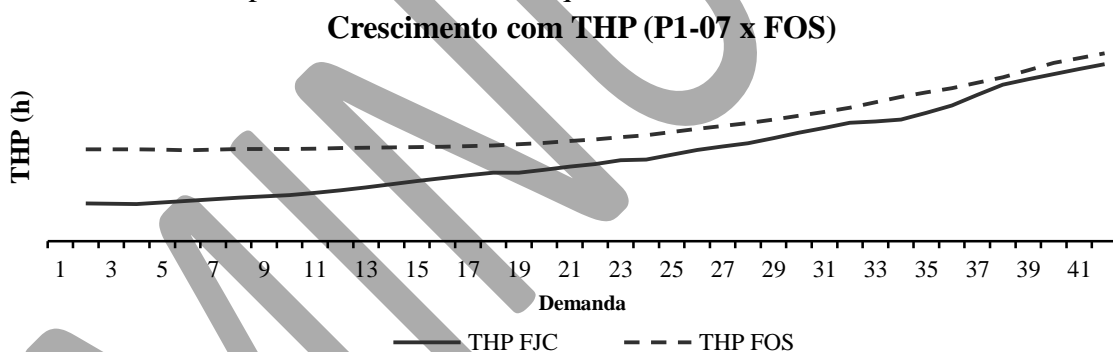


Figura 3: Comparativo do THP para abastecimento das locomotivas do comando dos trens nos pátio do P1-07 e do Santa Rosa

5.1 Cenário avaliado

Para execução do modelo no solver é necessário definir alguns parâmetros como, demanda de minério exportação e o percentual de trens que seguem o modelo W, Vzão e Wzão. Para esse estudo foi usada a demanda de 26,0 trens/dia sendo destes 75% dos trens W e 25% dos trens Vzão e 0% de Wzão. Neste cenário não foram usados os trens Wzão por serem menos econômicos, e não serem usados atualmente pela empresa. Esta solução está desenhada para cenários futuros onde haveria restrições operacionais na Serra do Mar.

Para resolver o problema não linear com o solver, inicialmente foi usado do método de Gradação Reduzida Generalizada (GRG não linear), porém este não conseguiu encontrar resposta viável em todos cenários avaliados. Desta forma foi usado o método de solução Evolucionário, mais robusto que resolve o problema através do algoritmo genético. O tempo de processamento em um notebook com processador Intel Core I3 e 2 GB de memória RAM foi de aproximadamente 37 segundos.

Quando implementadas as restrições citadas no item 3.2, se transformaram em 32 restrições e todas foram atendidas conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2: Restrições usadas no Solver e os resultados

Descrição da Restrição	Restrição	FJC	FOS	FBP	Resultados	Sinal	Valor
Capacidade abastecer comando P1-07	R1	1	0	0	0	<=	40
Capacidade abastecer comando FOS	R2	0	1	0	26	<=	26
Capacidade abastecer comando FBP	R3	0	0	1	0	<=	0
Capacidade abastecimento cauda P1-07	R4	1	0	0	7	<=	13
Capacidade abastecimento cauda FOS	R5	0	1	0	0	<=	0
Capacidade abastecimento cauda FBP	R6	0	0	1	0	<=	0
Capacidade abastecimento locos fora trem P1-07	R7	1	0	0	19	<=	26
Capacidade abastecimento locos fora trem FOS	R8	0	1	0	0	<=	13
Capacidade abastecimento locos fora trem FBP	R9	0	0	1	0	<=	0
Limitação de abastecimento posto P1-07	R10	1	0	0	206028	<=	570000
Limitação de abastecimento posto FOS	R11	0	1	0	392340	<=	600000
Limitação de abastecimento posto FBP	R12	0	0	1	0	<=	90000
Abastecer todos os comandos	R13	1	1	1	26	=	26
Abastecer todas as caudas	R14	1	1	1	7	<=	11
Abastecer todas as locos fora de trem	R15	1	1	1	19	<=	15
Restrição abastecimento de comando W	R16	0	0	1	0	=	0
Restrição abastecimento de comando Vzão	R17	0	0	1	0	=	0
Restrição abastecimento de comando Wzão	R18	0	0	1	0	=	0
Restrição abastecimento de cauda W	R19	0	0	1	0	=	0
Restrição abastecimento de cauda Vzão	R20	0	0	1	0	=	0
Restrição abastecimento de cauda Wzão	R21	0	0	1	0	=	0
Restrição abastecimento de loco fora trem W	R22	0	1	1	0	=	0
Restrição abastecimento de loco fora trem Vzão	R23	1	1	0	0	=	0

Restrição abastecimento de loco fora trem Wzão	R24	1	0	1	0	=	0
Abastecimentos de cauda e locos fora de trem	R25	1	1	1	26	=	26
Abastecimentos de comando de W	R26	1	1	1	19	=	15
Abastecimentos de comando de Vzão	R27	1	1	1	7	=	11
Abastecimentos de comando de Wzão	R28	1	1	1	0	=	0
Restringe o abastecimento locos fora trem no P1-07 ao % W	R29	1	0	0	19	<=	15
Garante o abastecimento de cauda e auxílio dos W	R30	1	1	1	19	<=	15
Garante o abastecimento de cauda e auxílio dos trens Vzão	R31	1	1	1	7	<=	11
Garante o abastecimento de cauda e auxílio dos trens Wzão	R32	1	1	1	0	<=	0

A solução encontrada de menor custo operacional está na tabela 3, onde o comando dos trens são abastecidos em Santa Rosa e os auxílio dos trens serão abastecidos no P1-07, na cauda de trem ou fora dos trens.

Tabela 3: Resultado da alocação da demanda nos postos

F.O. (Minimizar o gasto com abastecimento de diesel)	Comando			Cauda no trem			Loco fora trem		
	P1-07	Santa Rosa	Barra do Pirá	P1-07	Santa Rosa	Barra do Pirá	P1-07	Santa Rosa	Barra do Pirá
% Trens W	0	19	0	0	0	0	19	0	0
% Trens Vzão	0	7	0	7	0	0	0	0	0
% Trens Wzão	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.2 Cenário alternativo

Para avaliar o comportamento do modelo com diferentes parâmetros, foi realizado um cenário onde o percentual dos trens W foi de 20%, 40% de Vzão e 40% de Wzão, Os resultados estão na tabela 4 e difere do resultado mostrado no exemplo anterior, no qual todo o comando seria abastecido em Santa Rosa. Para esta configuração o mais indicado é uma mescla de abastecimento de comando e cauda nos dois postos.

Tabela 4: Resultado da alocação da demanda nos postos para o cenário alternativo onde o modelo Wzão está ativo.

F.O. (Mimizar)	Comando	Cauda no trem	Loco fora trem
----------------	---------	---------------	----------------

o gasto com abastecimento de diesel)	P1-07	Santa Rosa	Barra do Pirai	P1-07	Santa Rosa	Barra do Pirai	P1-07	Santa Rosa	Barra do Pirai
% Trens W	0	5	0	0	0	0	5	0	0
% Trens Vzão	0	11	0	11	0	0	0	0	0
% Trens Wzão	10	0	0	0	0	0	0	10	0

6. CONCLUSÃO

O modelo desenvolvido é de fácil configuração, possui capacidade de avaliar cenários com diferente demanda e modelo operacional em poucos segundos.

O resultado da tabela 3, com os parâmetros de 25% de trens W, 75% de trens Vzão e 0% dos trens Wzão, aponta como a melhor solução direcionar o abastecimento do comando dos trens de minério exportação para FOS e deixar para o pátio do P1-07 o abastecimento dos auxílios, seja na cauda dos trens ou escoteira. A decisão do modelo está em linha com a diretriz atual da companhia que é direcionar o máximo de abastecimento para Santa Rosa.

A resposta do cenário alternativo onde 20% dos trens são W, 40% Vzão e 40% Wzão, é a tabela 4 e diferente do cenário representado pela tabela 3. Neste novo cenário não foi usada toda a capacidade de Santa Rosa, posto com menor custo de diesel. Esta decisão comprova que o THP tem impacto na decisão na alocação do abastecimento e que a melhor decisão nem sempre é abastecer os trens nos postos de menor custo de diesel, existem outros custos que devem ser considerados.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

- HILLIER, F. S. e LIEBERMAN, G. J. (2006) Introdução à pesquisa operacional. Editora McGraw-Hill, São Paulo, SP
- TAHA, H. A. (2008) Pesquisa operacional: uma visão geral. Editora Pearson Prentice Hall, São Paulo, SP
- BANKS, J.; CARSON, J. S. (2004) Discrete-event system simulation. 4ª. Ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- DOS SANTOS, T. (2014) Simulação e avaliação de desempenho de ramal ferroviário para trens de carga, Revista Militar de Ciência e Tecnologia.