

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO LOGÍSTICO DO FUTURO TRANSPORTE DE CARGAS NA FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE LESTE VIA SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Jorge Ubirajara Pedreira Júnior
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
jorgesars@gmail.com

Ademar Nogueira do Nascimento
Universidade Federal da Bahia (UFBA)
annas@ufba.br

RESUMO

A representação de sistemas ferroviários através de simulação tem se tornado cada vez mais comum. Neste estudo, a metodologia de simulação de eventos discretos foi aplicada para investigar a performance operacional de um importante vetor de crescimento econômico das regiões Nordeste e Centro-Oeste do Brasil: a Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL). Em um primeiro momento, o contexto no qual este empreendimento está inserido e suas perspectivas são detalhadas. Logo em seguida, as peculiaridades do processo do transporte de cargas no sistema ferroviário são analisadas, a fim de destacar os principais desafios para a modelagem deste tipo de sistema. Desta forma, após uma breve avaliação de algumas contribuições do estado da arte, a metodologia desenvolvida é explicada bem como os resultados advindos desta aplicação. Espera-se, assim, que esse estudo possa contribuir para o eficiente desempenho logístico da FIOL.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação de Eventos Discretos; Transporte Ferroviário; Logística de Transportes.

ABSTRACT

The representation of railroad systems in simulation tools is becoming increasingly common. This paper presents the application of a discrete-event simulation methodology to assess the operational performance of an important project for the economic growth of both Northeast and Midwest regions of Brazil: the West-East Integration Railroad (FIOL). First, the current context in which this enterprise is included and its prospects are detailed. Then, the features of the railroad transport are analyzed in order to highlight the main challenges for the modeling process of this kind of system. After a brief evaluation of some state-of-art contributions, the methodology is explained as well as the results achieved. Thus, it is expected to provide a representative model to enhance the logistics performance of FIOL in the future.

KEYWORDS: Simulation; Railroad Transport; Transport Logistics

1. INTRODUÇÃO

O atual cenário da infraestrutura brasileira dificulta enormemente o desenvolvimento do país. De acordo com o documento *The Global Competitiveness Report 2013-2014* (World Economic Forum, 2013), o Brasil ocupa a 71ª posição dentre 148 países, na categoria infraestrutura do índice de competitividade global. O documento ainda relata que a oferta de infraestrutura inadequada é identificada como o impedimento mais sério para se fazer negócios dentro de uma lista de outros problemas que incluem carga tributária, burocracia governamental ineficiente e regulações trabalhistas restritivas.

A composição da matriz de transportes brasileira, concentradamente rodoviária, pode ser uma das principais razões deste ineficiente cenário, sendo consequência de inadequadas e sucessivas políticas de governo ao longo do século XX. Isso porque esse modal de transporte é inapropriado para uso em longas distâncias e cargas muito pesadas e, logo, indesejável para um país de dimensões continentais e exportador de *commodities*, a exemplo de minério de ferro e soja, como o Brasil.

Em razão desta situação crítica, uma série de investimentos do governo federal estão sendo planejados, principalmente a construção, ampliação e melhoria de portos e ferrovias. Um importante componente nesse contexto é a construção da Ferrovia de Integração Oeste Leste (FIOL), prevista para interligar os municípios de Ilhéus (BA) e Figueirópolis (TO), onde haverá o intercâmbio com outro importante empreendimento, a Ferrovia Norte Sul. O principal objetivo da FIOL é transportar cargas de minério ferro, grãos e farelo de soja para o Porto Sul (Ilhéus, BA), em fase final de licenciamento, de onde seguem para o mercado internacional. Nesse contexto, a proposta do presente artigo é avaliar as condições operacionais do transporte de minério de ferro pela FIOL, cujo traçado pode ser observado na Figura 1.



Figura 1 – Traçado da FIOL entre a Ferrovia Norte-Sul e o Porto Sul
Fonte: BRASIL, 2010

Estima-se (BRASIL, 2010) que cerca de 70% da receita operacional da malha no início da operação terá origem no transporte de minério de ferro a ser realizado pela empresa Bahia Mineração, que terá terminal de carregamento no município Caetité, no estado da Bahia. Devido a esta relevância econômica, o minério é a principal motivação para a construção desta ferrovia.

Apesar da viabilidade do projeto já ter sido atestada em estudos preliminares (BRASIL, 2010), em um futuro próximo quando novos operadores pleitearem a utilização da ferrovia, alguns desafios se tornarão mais evidentes. Este fato está relacionado com o principal gargalo de um projeto ferroviário de linha singela (linha única), onde somente um trem pode utilizar a linha principal, enquanto os outros aguardam a sua passagem em linhas desviadas localizadas em alguns pontos ao longo da malha, com o propósito de realizar cruzamentos de trens em sentidos inversos. Estudos conduzidos pela VALEC (BRASIL, 2010), empresa pública responsável pela construção da ferrovia, mostraram que após os primeiros 5 anos de operação a capacidade de transporte ferroviária estará comprometida, devido ao aumento do número de cruzamentos de trens realizados

que conduzirão a um atraso do tempo de trânsito entre origem e o destino das composições ferroviárias (conjunto locomotiva e vagões). Caso isto se consolide, custos associados à espera de trens em filas e atrasos causados por navios aguardando por carregamento (*demurrage*) se tornarão mais prováveis de acontecerem.

Com o objetivo de contribuir para a análise de viabilidade técnica deste empreendimento, este artigo apresenta a primeira parte de um trabalho que pretende analisar a logística de transporte de cargas na FIOL. Nesse sentido, considerando-se que o sistema ferroviário possui algumas especificidades em relação ao movimento dos trens, uma regra de decisão local foi desenvolvida para resolver os possíveis conflitos ao longo dos seus itinerários. Esta é uma parte compulsória do trabalho que necessita ser implementada no modelo para torná-lo válido. Para atender a esse objetivo principal, essa uma regra de decisão de movimentação foi desenvolvida no *software* de simulação Arena®. Desta forma, a 2ª seção desse trabalho descreve algumas regras de movimentação de trens na malha, bem como a teoria subjacente neste processo e finaliza com o levantamento de alguns trabalhos importantes realizados sobre o tema. Posteriormente, o desenvolvimento do modelo e os resultados obtidos são relatados na seção 4. Por fim, a seção 5 apresenta uma análise sobre os resultados e evidencia desafios futuros para este trabalho.

2. A MOVIMENTAÇÃO DE TRENS EM UMA MALHA FERROVIÁRIA

2.1. OS CONFLITOS DE TRENS EM LINHA SINGELA

A maneira específica como os trens se movem na malha é determinada pela morfologia de um sistema ferroviário. Sendo assim, é importante analisar as operações do mesmo, principalmente no contexto dos conflitos dos trens pelo uso das vias em linha singela. A Figura 2 ilustra uma colisão iminente entre trens se movendo em sentidos contrários. Pelo processo descrito, os trens A e B concorrem por uma mesma linha para realizarem seus deslocamentos (a). Neste exemplo, o trem A precisaria acessar uma linha desviada no pátio logo à frente (b), aguardar para que o trem B possa percorrer o caminho (c), liberando a linha principal para que ele possa continuar a sua trajetória (d).

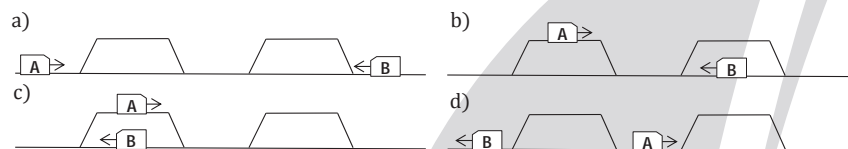


Figura 2 – Ilustração da operação para evitar a colisão frontal de trens

Neste ponto, é importante mencionar que a ferrovia em estudo (FIOL) funcionará em um sistema de sinalização baseado em bloqueio fixo (sessões de bloqueio ou SB). Isso significa que somente um trem por vez poderá ocupar cada SB e caso outro trem deseje ocupar essa mesma SB e se mover ao longo dela, só poderá fazê-lo quando o trem anterior a tiver liberado (deixado de trafegar ao longo dessa SB). A Figura 3 demonstra este sistema de sinalização nos pátios 1 e 2 e o segmento de linha que os conecta. Observa-se que existirão 2 SB's em cada seção de linha entre pátios e cada linha em um pátio (principal e desviada) representa uma SB.

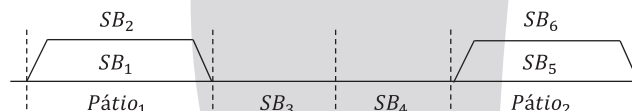


Figura 3 – Sistema de sinalização em bloqueio fixo adotado pela FIOL

A simples solução descrita na Figura 2 tende a ficar mais complexa à medida que o número de trens em ambas as direções aumenta na malha. O pior caso acontece quando dois pares de trens, movendo-se em sentidos contrários se aproximam de uma situação de conflito. Desse momento em diante, um conjunto de restrições mais rígidas deve ser atendida por cada trem para a decisão de esperar ou mover-se adiante. Quando o processo de decisão para resolver este tipo de conflito não está bem amarrado, uma situação de travamento acontece, impedindo que cada trem

possa prosseguir em seu percurso. Portanto, um planejamento rigoroso para a operação da linha deve ser estabelecido para que estes tipos de inconsistências não ocorram.

2.2. ABORDAGEM TEÓRICA DO PROBLEMA

Os problemas de resolução de conflitos em circulação de trens estão especialmente relacionados com o processo de programação dos itinerários em um sistema ferroviário. Ao longo de seus trajetos, várias composições concorrem pela utilização de linhas (principais, desviadas, de atividades), recursos humanos (maquinistas, equipes de manutenção) e recursos físicos (silos para carregamento, postos de abastecimento, viradores de vagões). Para lidar com esses objetivos conflitantes, especialistas programam diariamente os percursos de cada trem em diferentes regiões da malha permitindo um fluxo contínuo de mercadorias e, por conseguinte, o atendimento do *lead time* acordado com os clientes das operadoras. Uma característica bastante peculiar deste tipo de problema é o seu comportamento dinâmico, no qual o estado de variáveis de interesse se altera com decorrer do tempo. Neste sentido, o paradigma da Simulação Computacional é uma abordagem bastante indicada para tratar esse tipo de problema, uma vez que é capaz de representar sistemas que evoluem com o tempo. Dentro desse contexto, a Simulação de Eventos Discretos (SED) tem sido especialmente empregada, onde o estado destas variáveis permanece constante ao longo tempo, mudando somente em pontos específicos e bem definidos chamados *eventos* (Banks, 1998). Muitos sistemas de filas, onde as variáveis a serem mensuradas são quantidade de clientes/produtos em espera (ou em serviço) são avaliadas através da SED.

Muitas vantagens podem ser obtidas quando este método é utilizado segundo Sokolowski e Banks (2009). Em primeiro lugar, a capacidade de diagnóstico do problema é aumentada, uma vez que as interações entre as variáveis podem ser analisadas em muitos sistemas complexos. Outro aspecto importante é a exploração das possibilidades sem interferir no sistema real, através da avaliação de diferentes procedimentos operacionais. Como consequência deste último, aumenta-se a probabilidade de investimentos de forma mais racional, uma vez que simular o sistema custa menos que alterá-lo. Sendo assim, vale destacar a importância de algumas contribuições destas aplicações de SED no cenário ferroviário, que frequentemente vêm acompanhadas de algumas técnicas de otimização.

2.3. ESTADO DA ARTE EM REPRESENTAÇÃO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO

Sabe-se que, por vezes, a programação diária realizada pelos especialistas é prejudicada por perturbações que ocorrem ao longo da operação a exemplo de condições ambientais adversas, falhas de equipamentos e acidentes. Para enfrentar esse tipo de situação onde os profissionais da central de tráfego devem reprogramar com rapidez a circulação, Cheng (1998) desenvolveu um modelo híbrido combinando SED e simulação em redes em um sistema ferroviário de fluxo intenso. A ideia principal foi aproveitar os benefícios e mitigar as deficiências de cada método para construir um algoritmo aplicável à rotina dos planejadores de tráfego. De forma experimental, os resultados do modelo proposto foram testados, permitindo concluir que o método proposto se mostrou mais eficiente e flexível do que a simulação em redes, retendo as vantagens de um modelo em SED.

Em geral, muitas representações ignoram aspectos de dinâmica ferroviária (movimento de trens) que influenciam significativamente nos custos operacionais relativos à eficiência energética (consumo de combustível). Buscando conjugar o objetivo da dinâmica ferroviária aos propósitos de programação (e reprogramação) de trens, Medanic e Dorfman (2002) desenvolveram um modelo também em SED a partir do algoritmo TAS (*Travel Advance Strategy*). Dentro deste cenário, os autores propuseram medir a eficiência do algoritmo em termos de dois critérios distintos: tempo e energia. Para o critério tempo, verificou-se o quanto o intervalo entre a partida do primeiro trem e a chegada do último trem se aproxima de um intervalo em condições ideais (sem cruzamentos de trens em sentidos contrários, como em linhas duplas, uma para cada sentido). Para o critério energia, um ajuste no cronograma é realizado, reduzindo a espera em cruzamentos através da diminuição da velocidade dos trens, mas mantendo a eficiência do critério anterior. Com isso, reduz-se diretamente o consumo energético que é, matematicamente, uma função convexa

que depende da velocidade do trem. Os resultados mostraram-se satisfatórios com uma complexidade de implementação moderada, atingindo os objetivos do critério tempo (intervalo com apenas 5% superior em relação às condições ideais) e de eficiência energética previstos.

Ainda dentro do cenário de decisões de reprogramação, Afonso e Bispo (2011) desenvolveram uma rotina para despachadores (operadores de tráfego) de ferrovias de linha singela com composição peculiarmente europeia: trens de passageiros (rápidos e lentos) e trens de carga. Após uma busca por todos os possíveis conflitos na malha, duas soluções foram propostas: uma heurística de escolha por prioridade e mínimo atraso do trem a ser parado e um algoritmo de busca em profundidade através de uma rotina *branch-and-bound* para obter a solução ótima. Neste sentido, os autores realizam alguns experimentos computacionais, concluindo que para certos limites operacionais (número trens ≤ 12 e pátios ≤ 24 , por exemplo), a busca pela otimalidade ainda vale a pena (solução ótima obtida em menos de 30 minutos). Além disso, foi possível notar que apesar do caráter guloso da heurística, as soluções encontradas não se mostraram díspares em relação à busca em profundidade, atestando a qualidade de uma alternativa de menor complexidade de implementação.

Frequentemente, os trabalhos para representação e otimização da programação de trens apresentam peculiaridades interessantes. Esse é o caso da ferramenta de apoio a decisão desenvolvida por Sajedinejad et al (2011) no sistema ferroviário iraniano (mesclado por linhas singelas e duplas) onde a restrição de paradas de trens para as orações diárias muçulmanas tradicionais se juntam às demais. Para resolver o problema de minimização de atraso no planejamento diário de trens, os autores propuseram uma ferramenta de SED integrada a um algoritmo genético para geração de um diagrama de cruzamentos ótimo. Este algoritmo, baseado na lei natural da evolução das espécies por seleção natural, geram os horários de partida (cromossomos) onde cada trem (gene) possui seu horário específico. A partir de cada simulação (geração), as mutações tendem a reduzir os atrasos buscando uma solução ótima, verificando ao final se o critério de parada foi atendido. Os resultados mostraram-se satisfatórios, onde cerca de 400 gerações foram necessárias para atingir o atraso mínimo na geração de diagramas de horizonte de 24 horas com 152 estações e 148 trens em tráfego.

No contexto nacional, vale salientar o trabalho desenvolvido por Fioroni (2008) na modelagem do sistema ferroviário da empresa MRS Logística. O estudo foi desenvolvido em três frentes com objetivos distintos. O primeiro deles propõe resolver os problemas de conflitos de trens (ultrapassagem e cruzamento) ao longo da malha. Em um segundo momento, determinar uma decisão de direcionamento ótima de carregamento para os trens de ciclo recém-descarregados no porto. Por fim, com as duas etapas anteriores consolidadas, uma análise de sensibilidade para avaliar os impactos na tonelage por produto entregue nos portos. Para o primeiro objetivo, uma regra de decisão local para a escolha de avançar/esperar de cada trem foi desenvolvida, ao passo que o segundo objetivo foi obtido a partir de uma otimização via programação inteira para escolha do melhor terminal e a terceira através de modificações no modelo em SED desenvolvido.

A Tabela 1 resume as características dos trabalhos analisados.

Tabela 1– Resumo dos trabalhos mencionados

Autor(es)	Infraestrutura Ferroviária	Método(s)
Cheng (1998)	Linhas duplas	Simulação Híbrida (SED e Redes)
Medanic e Dorfman (2002)	Linhas singelas	SED e Heurística
Afonso e Bispo (2011)	Linhas singelas	SED, Heurística e <i>Depth-First Search</i>
Sajedinejad (2011)	Linhas singelas e duplas	SED e Algoritmo Genético
Fioroni (2008)	Linhas singelas e duplas	SED, Heurística e Programação Inteira

3. SIMULAÇÃO DA LOGÍSTICA DO MINÉRIO DE FERRO NA FIOI

Como evidenciado anteriormente, o minério de ferro constitui-se na principal carga do empreendimento da FIOI. Desde o carregamento dos vagões no município de Caetité-BA, 536 km serão percorridos até a chegada no Porto Sul (Ilhéus), onde o minério será descarregado no Terminal de Uso Privativo (TUP) da Bahia Mineração (BAMIN). Os trens serão do tipo de ciclo, dedicado ao transporte de minério, entre dois terminais de carga e descarga definidos, realizando repetidamente o circuito: Carrega (Caetité) → Desloca → Descarrega (Porto Sul) → Desloca → Carrega (Caetité). A base da metodologia para representação deste sistema é similar à concebida por Banks et al (1998) - descrita em fluxograma na Figura 4 -, com o apoio do *software* comercial Arena®, onde será executada uma simulação com base em eventos discretos.

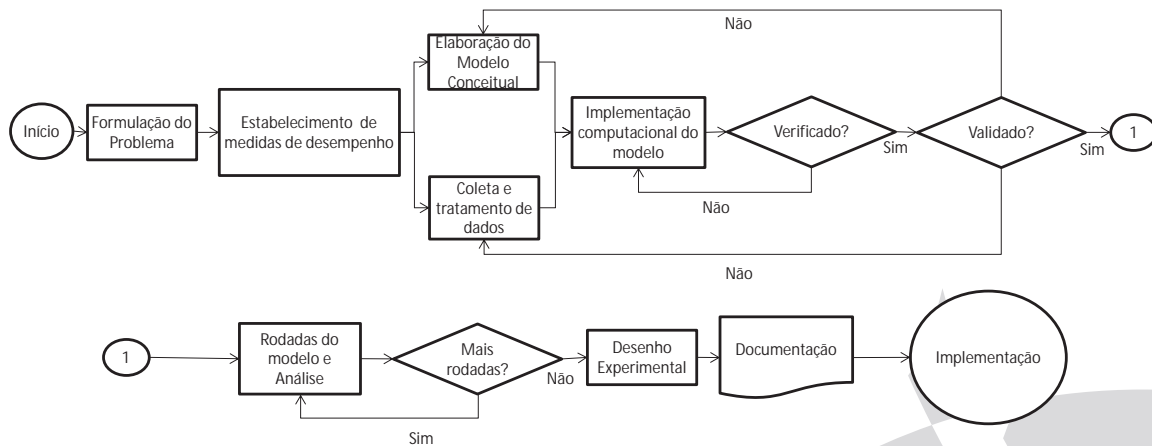


Figura 4 – Representação em fluxograma de um estudo de simulação
 Fonte: adaptado de Banks et al, 1998

A seguir, cada etapa dentro do escopo dessa metodologia será detalhada de forma a demonstrar como a simulação foi desenvolvida.

3.1. ESTABELECIMENTO DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO

A variável de saída de interesse deste estudo é o tempo de ciclo dos trens de minério. A decisão por trás desta escolha se justifica pelo papel central que o tempo de ciclo exerce no desempenho logístico da malha, uma vez que a partir desta métrica pode-se obter a quantidade de minério entregue no porto anualmente a partir da Equação 1.

$$MF_{ANO} = \frac{8760 \cdot N_T \cdot C_T}{TC} \quad (\text{Eq. 1})$$

A partir da Equação 1, pode-se observar que a quantidade de minério de ferro que o porto recebe ao longo de um ano (MF_{ANO}) é igual ao produto da quantidade de horas dentro desse período (8760 h/ano), do número de trens em circulação para atender a esse propósito (N_T) e da carga que cada trem transporta (C_T , em toneladas por trem); tudo isso sobre o tempo de ciclo (TC , medido em horas). Mais adiante, será possível entender o impacto de diversas políticas de operação (principalmente na alteração do número de trens) que acarretam incrementos no tempo em espera nos cruzamentos ou esperando carregar/descarregar em regiões adjacentes a polos de carregamento. Com isso, espera-se que os trens realizem os ciclos mais lentamente, corroborando mais uma vez para a importância da escolha dessa medida para investigação de diferentes cenários de simulação.

3.2. ELABORAÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual em um projeto de simulação consiste na descrição da lógica do funcionamento de um sistema em estudo. Para este caso em estudo, essa lógica de funcionamento

se dá pela inserção das regras de movimentação de trens ao longo da via dentro de uma estrutura de eventos discretos que represente o comportamento dinâmico deste sistema.

Como já mencionado anteriormente, as decisões de movimentação dos trens devem respeitar as condições de uma ferrovia funcionando com sinalização em bloqueio fixo (somente um trem pode ocupar cada bloco) e a anulação de travamentos na malha. Para tanto, um conjunto de questionamentos encadeados deve ser realizado para cada trem diante da decisão de mover adiante ou aguardar até uma condição ser atendida. A estrutura dessa regra de decisão pode ser observada, em resumo, na Figura 5 e, de forma mais detalhada, em Fioroni (2008).

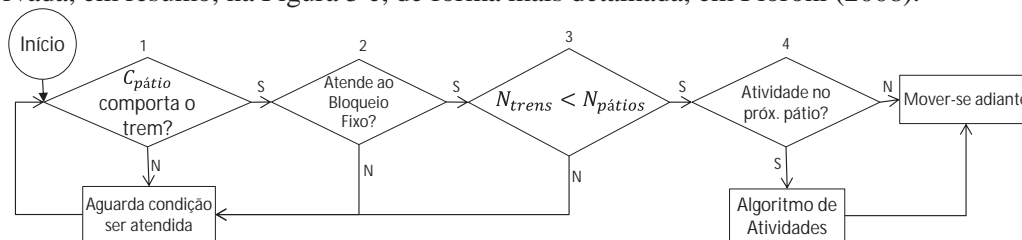


Figura 5 – Fluxograma da regra de decisão para resolução de conflitos

A primeira decisão diz respeito à capacidade do próximo pátio ao qual o trem deve se dirigir. O pátio de cruzamento seguinte só comportará o trem caso ele esteja vazio em ambas as linhas (desviada e principal) ou se houver somente um trem no sentido contrário (dois trens no mesmo sentido não são permitidos em um mesmo ponto de cruzamento, visto que há somente duas linhas). A segunda decisão torna evidente a existência de sinalização por bloqueio fixo, não permitido que mais de um trem ocupe o mesmo bloco, além de identificar o sentido da linha ao qual o trem pretende trafegar. Deste modo, a composição avança se a próxima sessão de bloqueio estiver livre e se o segmento de linha entre pátios que contém essa sessão de bloqueio estiver sem reserva de sentido ou reservada no mesmo sentido desta composição. Na terceira, por sua vez, o trem atual verifica se no espaço compreendido entre ele mesmo e o próximo trecho reservado no sentido oposto, o número de trens no mesmo sentido (contando com ele próprio) é menor que o número de pátios de cruzamento. Este critério garante que não ocorra um travamento que impeça a passagem dos trens em ambos os sentidos na malha. Por fim, a quarta decisão verifica se o trem realizará alguma atividade no pátio seguinte, devendo proceder de acordo com o tipo de algoritmo específico para cada atividade (abastecimento, carregamento ou descarregamento, dentre outras).

Para esclarecer melhor como a resolução destes conflitos será obtida, alguns casos serão a seguir analisados. O primeiro caso é mais simples, onde o primeiro trem a acessar o pátio deverá se deslocar ao longo da linha enquanto o outro aguarda a sua passagem. Essa premissa é válida para o caso de todos os trens na malha possuírem a mesma prioridade. Pode-se notar na Figura 6 que o trem B alcança o pátio 2 após o trem C ter alcançado o pátio 3. Desta forma, o trem B aguarda o trem C passar, livrando a linha para que ele prossiga. Nesse ínterim, o trem A ocupa a linha desviada do pátio 2 que estava reservada ao trem B, liberando o espaço para o trem C prosseguir sua viagem e acabando por resolver, assim, todos os conflitos nesta região de pátios (Figura 8).

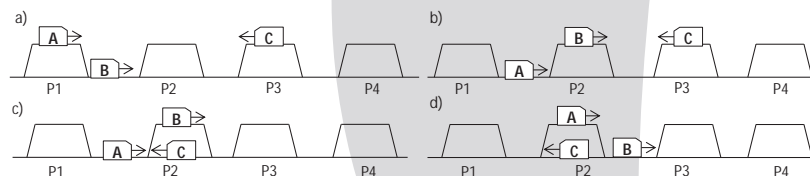


Figura 6 – Resolução do conflito Tipo 2

Em uma outra circunstância, pode ocorrer o cruzamento de dois pares de trens em sentidos contrários, provocando um aumento da complexidade na decisão, uma vez que o travamento na malha se tornam iminentes. A Figura 7 ilustra como esse processo se desenvolve:

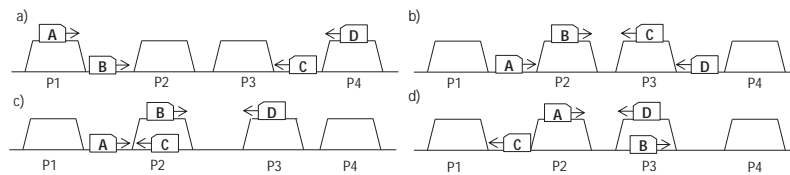


Figura 7 – Resolução do Conflito Tipo 3

Observa-se na Figura 7c que o trem D não atende à terceira condição. Isto ocorre porque o número de trens no mesmo sentido entre o pátio em que este se encontra (P3) até o próximo pátio reservado no sentido contrário (P2) não é menor que o número de pátios dentro desta região (de fato, $N_{trens} = N_{pátios} = 2$). Desta forma, o trem D deve aguardar o trem B fazer o seu deslocamento, liberando espaço no pátio 2 para o trem A, o que ocasiona um caminho livre para este último, não permitindo o travamento do fluxo.

3.3. COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Tratando-se de um sistema ainda em fase de projeto, a modelagem tomou como base parâmetros fornecidos pelos órgãos competentes envolvidos no empreendimento, a exemplo dos resultados de simulações iniciais de desempenho da VALEC (BRASIL, 2010) e dos relatórios e estudos de impacto ambiental desenvolvidos para fins de licitação do Porto Sul (BAHIA, 2011). Esses dados consistem nos tempos de rotas entre pátios, de carregamento e descarregamento e de circulação no interior destas áreas (que estão fora do domínio da FIOLE). Tais estimativas encontram-se disponibilizadas de forma determinística nos relatórios supracitados.

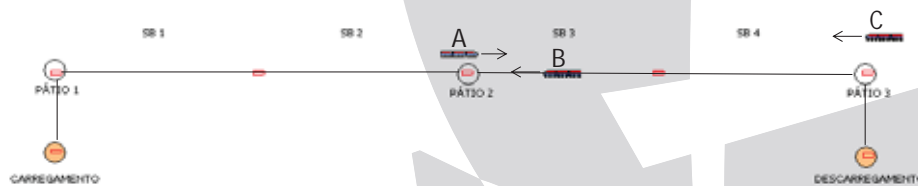
De forma a possibilitar uma investigação de forma estocástica do modelo, as estimativas pontuais de tempo de rota de trens entre pátios foram transformadas em distribuições triangulares, onde os parâmetros valor mínimo e máximo foram calculados como 10% para menos e para mais, respectivamente, destas estimativas pontuais. O parâmetro moda, por sua vez, foi tomado como a própria estimativa pontual. É possível encontrar essa mesma aplicação do critério de transformação de estimativas pontuais em distribuições triangulares no trabalho desenvolvido por Fioroni (2008).

Comprovando conceitualmente que a regra de decisão corresponde às necessidades de resolução de conflitos locais de trens e que existem estimativas válidas dos valores necessários para o estudo, é necessário observar se essa estrutura funcionará de forma apropriada no ambiente da simulação de eventos discretos realizada no *software* de simulação Arena[®]. A esse processo de correspondência entre o modelo conceitual e o operacional (computacional) dá-se o nome de verificação.

3.4. PROCESSO DE VERIFICAÇÃO NO ARENA[®]

O Arena[®] é uma ferramenta computacional para simulação de eventos discretos que converte o modelo conceitual e informações estatísticas sobre o processo (dados coletados e tratados) em um modelo computacional de um projeto de simulação. Cada bloco representado no fluxograma tem uma função específica que é identificada com um comando na linguagem de programação SIMAN, que descreve em forma de algoritmo o modelo conceitual.

As diversas ocasiões foram testadas dentro do modelo considerando-se uma geração de trens em uma estação de carregamento percorrendo 3 pátios de cruzamento até alcançar a estação de descarregamento, como pode ser visto na Figura 8, extraída da animação no Arena[®]. Cada trem no programa representa uma “entidade”, que são os recursos a serem transformados na simulação.


 Figura 8 – Reprodução da animação do Arena[®] com a situação de conflitos

No cenário acima os trens A, B e C são criados na estação de carregamento e desenvolvem o seguinte itinerário: Carregamento → Pátio 1 → SB1 → SB2 → Pátio 2 → SB3 → SB4 → Descarregamento. Ao fim desse percurso, realizam o caminho inverso formando um ciclo nesse pequeno trecho de malha que se repete sucessivas vezes até o fim da simulação. Logo acima pode-se observar o trem C aguardando em fila devido ao não atendimento da condição do terceiro critério de decisão ($N_{trens} < N_{pátios}$) e o trem A aguardando devido ao não atendimento do segundo critério (SB à frente ocupada e reservada com sentido inverso). O trem B, por sua vez, está permitido seguir até o Pátio 2, uma vez que este só tem uma linha ocupada (com o trem A) no sentido contrário. É importante frisar que a resolução também atende completamente aos casos relativos ao primeiro ponto de decisão (pátio permite ou não a entrada do trem) e da ocasião de atividades ao longo do percurso (como pôde ser observado com a saída e entrada de trens das regiões de carregamento e descarregamento).

3.5. VALIDAÇÃO DO MODELO

Um bom projeto de simulação requer que o modelo construído possa representar satisfatoriamente o sistema em estudo. Para tanto, um processo chamado validação deve ser conduzido, identificando se os valores de algumas variáveis de saída de interesse e as interações entre as entidades e recursos correspondem com a lógica esperada de funcionamento.

A consistência do modelo pôde ser comprovada com a observação de duas medidas anteriormente mencionadas: tempo de ciclo dos trens de minério e quantidade de minério entregue no porto pelos trens da Bahia Mineração. A simulação com uma única replicação de 365 dias no modelo resultou em um desvio máximo de 1% em relação ao ciclo planejado do trem de minério de ferro (38h) e um desvio inferior a 6% em relação à quantidade total de minério previsto para ser entregue no porto anualmente (20 milhões de toneladas por ano). Deste modo, pode-se atestar a razoabilidade da consistência do cenário básico modelado com o previsto pelos estudos de planejamento da ferrovia (BRASIL, 2010; BAHIA 2011).

3.6. DIMENSIONAMENTO DOS CICLOS DE SIMULAÇÃO DO MODELO E ANÁLISE

Cada ciclo de simulação (comumente chamado de rodadas ou corridas) de um cenário a ser analisado consiste na execução de uma ou mais replicações. Estas replicações, por sua vez, dão origem a diferentes valores de variáveis relativas aos eventos modelados a partir de sementes de números aleatórios distintas. É importante mencionar que estes valores variam, obviamente, de acordo com as distribuições de probabilidades de cada evento fornecidas inicialmente no processo de modelagem. Como cada replicação é fruto de sementes de números aleatórios diferentes elas podem ser julgadas independente e identicamente distribuídas entre si e, logo, o teorema do limite central (HINES et al, 2006) pode ser aplicado para inferir que a distribuição da variável de saída (tempo de ciclo) se aproxima de uma normal com o aumento do número de replicações executadas.

Este resultado teórico é importante por fornecer ao analista uma estimativa do intervalo de confiança (IC) desta variável, que pode ser observado na expressão: $\bar{X}_n \pm t_{n-1, \alpha/2} \cdot S_n(X)/\sqrt{n}$, onde \bar{X}_n representa a média amostral de uma variável qualquer em n observações (replicações), $t_{n-1, \alpha/2}$ o valor da estatística da distribuição *t* de Student, com $n - 1$ graus de liberdade e nível de significância $\alpha/2$, e $S_n(X)$ o desvio-padrão amostral. Desta forma, ao fim de um ciclo de simulação obtém-se uma estimativa desse IC com uma certa precisão (amplitude do intervalo) a uma certa confiabilidade arbitrada. Para o estudo em questão, foi estabelecida uma precisão de metade do IC para o tempo de ciclo dos trens em 15 minutos (ou 0,25 horas) a 95% de probabilidade ($\alpha = 5\%$). Esta meta foi atingida executando-se uma corrida com 10 replicações.

Vale salientar ainda que o sistema apresenta uma característica não-terminal, ou seja, não se pode precisar um período para o fim da replicação (como em um sistema de atendimento bancário, onde o sistema funciona entre às 10:00 e 16:00, por exemplo). Desta maneira, no dimensionamento do tempo das replicações foi tomado o devido cuidado para fazê-las longas o suficiente para capturar o estado permanente deste sistema (neste caso, 180 dias). Além disso,

eliminou-se o período transiente inicial através da escolha de um tempo apropriado de *warm-up* (aquecimento), escolhido como 100 horas a partir da observação gráfica dos valores do tempo de ciclo em relação ao tempo de simulação de cada replicação.

3.7. DESENHO EXPERIMENTAL

Nesta etapa 4 cenários foram simulados. O primeiro deles é o cenário básico da modelagem contendo somente os trens da Bahia Mineração circulando na malha. Posteriormente, o segundo cenário adiciona o transporte de carga geral (representado por soja, farelo de soja, etanol e açúcar) que estão previstas para carregar em pátios a montante de Caetité (BA), como nos municípios de Barreiras e Correntina (na Bahia) e Taipas (em Tocantins). Em um terceiro momento, outro cenário é modelado a partir das intenções de lavra de minério pelas mineradoras Cabral Resources e Santa Fé Mining na região de Brumado (BA), 138 km a jusante de Caetité (BA), que juntas somam cerca de 35 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. Finalmente, o quarto cenário incorpora ao cenário básico as cargas dos cenários 2 e 3.

3.7.1. Cenário Básico: Trens Bahia Mineração somente

O cenário básico tem como referência o projeto da mineradora que possui zona de carregamento em Caetité e utiliza 6 trens (cada trem compreende o conjunto de 2 locomotivas tracionando 140 vagões) trafegando com 15.540 toneladas de minério cada. Para este cenário, o intervalo de confiança com 95% de confiabilidade do tempo de ciclo medido em horas é dado por [38,5; 38,8], com um valor médio de 38,65 h. A partir da Equação 1, pode-se então inferir que o intervalo de confiança, a 95%, do total de minério de ferro entregue anualmente no porto (em milhões de toneladas por ano) é dado por [21,215; 21,051], atendendo ao requisito do previsto em projeto de 20 milhões de toneladas por ano. Pode-se ainda mencionar que o IC para o tempo total de espera em filas diário nos pátios de cruzamento (medido em horas) foi de [6,38; 6,48].

3.7.2. Cenário 2: Trens Bahia Mineração + Carga Geral

A partir da inclusão dos trens carregados em cada polo anteriormente mencionado, pode-se observar alterações tanto no tempo de ciclo das composições da Bahia Mineração quanto no tempo de espera em filas diário, os quais resultaram em IC (a 95% de confiabilidade) de [39,5; 39,8] e [14,2; 14,5], respectivamente. Observa-se neste caso, a partir de um teste de hipótese *t* de *Student* para duas médias, que a adição dos trens de carga geral permite inferir que houve uma alteração estatística significativa, a um nível de significância de 5%, uma vez que os IC para as médias das diferenças entre os dois cenários em cada variável (tempo de ciclo e tempo de espera em filas diário) não incluem o valor 0.

3.7.3. Cenários 3 e 4: Trens Bahia Mineração + Trens Cabral Resources e Santa Fé Mining (com e sem trens Carga Geral)

Neste ponto, é importante mencionar que duas premissas foram assumidas como verdadeiras para estes últimos cenários desenvolvidos. A primeira delas diz que ambas mineradoras utilizarão um mesmo terminal de carregamento em Brumado, já que localizam-se nesta mesma região. A segunda arbitra que o terminal de carregamento funcionará nos mesmos moldes do previsto para o da Bahia Mineração em Caetité. Estas premissas podem ser consideradas razoáveis, uma vez que ainda não existe um projeto definido para a logística de transporte do minério dessas companhias, havendo somente a intenção de utilizar a infraestrutura da FIOL e Porto Sul.

Para ilustrar como a inclusão dos trens destas duas mineradoras influencia nos tempos de ciclo de minério como um todo, uma análise de sensibilidade foi desenvolvida considerando variações unitárias do número de trens carregados em Brumado (entre 1 e 12 trens), como pode ser observada no gráfico da Figura 9. Estas alterações com e sem a presença dos trens de carga geral foi demonstrada com linhas contínuas e tracejadas, respectivamente.

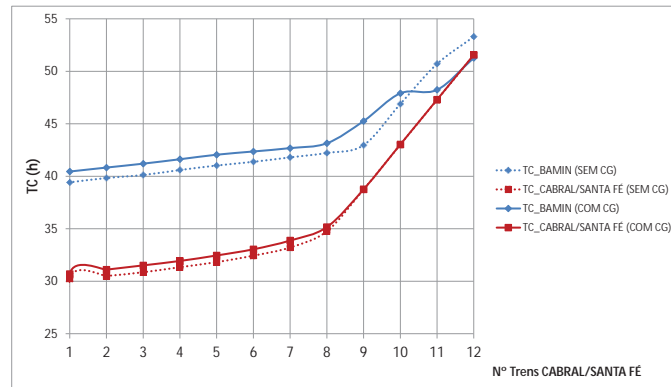


Figura 9 – Variação do tempo de ciclo com incremento de trens de outras mineradoras

Pela observação destes 2 cenários no modelo, pode-se inferir que esse aumento no tempo de ciclo foi ocasionado pela elevação considerável no tempo de espera em filas para cruzamento diário. Analisando-se ainda mais detalhadamente, foi possível notar que estas filas são consequência de um acréscimo no tempo de espera dos trens de outras mineradoras aguardando o carregamento na região de Brumado. De fato, no processo de animação do modelo foi possível observar que esse congestionamento local acaba por propagar filas nas regiões adjacentes da FIOL, comprometendo significativamente os tempos de ciclo

A partir deste ponto, é importante notar que, com as atuais configurações de infraestrutura, o máximo possível de minério entregue no porto, somando as contribuições dos trens das três mineradoras, acontece com 14 trens (sendo 6 trens da Bahia Mineração e 8 da Cabral Resources e Santa Fé Mining juntas). Essa conclusão pode ser evidenciada na Figura 10, onde atinge-se a quantidade de 49.905.027 e 50.671.227 de toneladas por ano, com e sem as perspectivas de cargas gerais trafegando (linhas contínuas e tracejadas, respectivamente).

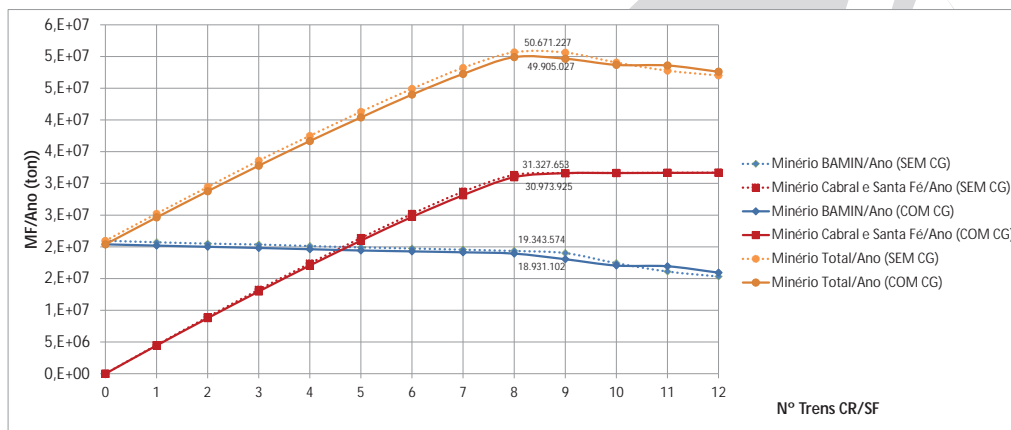


Figura 10 – Variação da quantidade de minério/ano aumentando-se trens de outras mineradoras

Observa-se claramente a presença de um rendimento decrescente de escala, ou seja, a quantidade de minério de ferro por trem decresce à medida em que se aumenta o número de trens carregando na região de Brumado. A partir de 8 trens Cabral Resources e Santa Fé Mining, então, esses rendimentos se tornam negativos, o que acaba por configurar a decisão anterior de 14 trens como ótima para o cenário modelado, em relação ao minério entregue anualmente no porto.

4. CONCLUSÃO E FUTUROS DESAFIOS

Os trabalhos em modelagem ferroviária envolvem grandes desafios devido a característica morfológica peculiar destes sistemas. Para contornar esses desafios e construir uma representação satisfatória de uma malha, é necessário que as regras de tráfego sejam inseridas de forma correta. Isso acontece com o emprego de algoritmos que reproduzem o comportamento

cotidiano dos centros de comando operacional das operadoras ferroviárias, buscando resolver estes conflitos para atender os objetivos de seus clientes. A execução destas regras aliada à simulação de eventos discretos permite que o problema seja tratado de forma dinâmica, representando o comportamento de um sistema ferroviário real de acordo com um horizonte de tempo desejado.

Sustentado nessas premissas, este trabalho desenvolveu um modelo para a Ferrovia de Integração Oeste Leste, destacado projeto de infraestrutura para o Centro Oeste e o Nordeste brasileiro. Para atestar a validade deste modelo, variáveis de interesse importantes foram comparadas entre a simulação executada e os valores de projeto, além de verificações do projeto conceitual de circulação de trens no modelo computacional. Os resultados se mostraram satisfatórios, apresentando baixa variação percentual na confrontação dos valores de projeto com os simulados.

Foi possível observar também que com a entrada de novos operadores no sistema, as restrições de capacidades se tornaram prementes. De fato, observa-se que os objetivos das mineradoras não conseguem ser atingidos com as perspectivas de circulação atuais (sendo inferior a 20 milhões de toneladas por ano, para a Bahia Mineração, e menor que 35 milhões de toneladas por ano para as outras mineradoras), o que abre uma janela de oportunidade para investigar as consequências de algumas alterações estruturais no desempenho logístico do sistema.

Imbuído nesse propósito e motivado pelo recente cenário negativo do mercado mundial do minério de ferro, trabalhos futuros terão o principal desafio de avaliar quais serão as intervenções mais proveitosas considerando-se aspectos de viabilidade técnica e econômica do projeto. Espera-se, desta forma, contribuir de forma significativa para a consolidação da FIOLE no cenário da logística nacional de transportes.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, P.A. e Bispo, C.F.**, Railway Traffic Management: Meet and Pass Problem. *Journal of System and Management Sciences*. Vol 1., n. 1, pp. 1-26, 2011.
- Bahia (Estado). Secretaria de Infraestrutura.** *Estudo de Impacto Ambiental Porto Sul, Tomo I: Caracterização do empreendimento*. Salvador, 2011, 460 p.
- Banks, J.**, *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*, 1ª edição, Ed. Jerry Banks, New York: John Wiley and Sons. 1998.
- Brasil. Ministério dos Transportes. VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias.** *Volume I - Estudo Operacional da Ferrovia de Integração Oeste Leste EF-334*. 2010. Disponível em: <<http://bit.ly/1AxJLid>>. Acesso em: 12/12/2014.
- Cheng, Y.**, Hybrid Simulation for Resolving Conflicts in Train Traffic Rescheduling. *Computers in Industry*. 35, pp. 233-246, 1998.
- Confederação Nacional do Transporte-CNT.**, *Atlas do Transporte*. Disponível em: <<http://bit.ly/1ugCVLI>>. 2006. Acesso em: 20/11/2013.
- Confederação Nacional do Transporte-CNT.**, *Plano CNT de Transporte e Logística 2014*. Disponível em: <<http://bit.ly/1v2UycS>>. 2014. Acesso em: 15/12/2014.
- Fioroni, M.M.**, *Simulação em Ciclo Fechado de Malhas Ferroviárias e suas Aplicações no Brasil: Avaliação de Alternativas para o Direcionamento de Composições*. 216 p. Tese (Doutorado em Eng. Naval e Oceânica), Poli-USP, São Paulo, 2008.
- Hines, et al**, *Probabilidade e Estatística na Engenharia*, 4ª edição, Ed. LTC. Rio de Janeiro. 2006
- Medanic, J. e Dorfman, M.J.**, Efficient Scheduling of Traffic on a Railway Line. *Journal of Optimization Theory and Applications*. Vol. 115, n. 3, pp. 587-602, 2002.
- Sajedinejad, A. et al.**, SIMRAIL: Simulation Based Optimization Software for Scheduling Railway Network. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*. pp. 3735-3746, 2011.
- Sokolowski, J. A. e Banks, C. M.**, *Principles of Modeling and Simulation: a Multidisciplinary Approach*, Hoboken: John Wiley and Sons, 2009.
- World Economic Forum**, *The Global Competitiveness Report 2013-2014*. Geneva, 2013.