

Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas em ciclo fechado

[An hybrid simulation-optimization model for assessing the capacity of a closed-loop rail transport system for bulk agricultural grains]

Pedro Veiga de Camargo, Claudio Barbieri da Cunha*

University of California, USA, Universidade de São Paulo (USP), Brazil

Submitted 1 Nov 2011; received in revised form 7 Dec 2011; accepted 26 Jan 2012

Resumo

Neste artigo é proposto um modelo híbrido simulação-otimização para a análise de políticas operacionais para o transporte ferroviário de grãos em um sistema fechado que possibilitem aumentar a sua capacidade global. O núcleo do modelo proposto é um sistema de simulação discreta por eventos desenvolvido em linguagem "Visual Basic for Applications" (VBA), o qual possibilita analisar regras mais flexíveis para decisões quanto ao tratamento de filas. Mais especificamente, dez decisões relacionadas às operações ferroviárias (alocação de ativos ferroviários e gestão de filas) são substituídas por regras de priorização que buscam refletir as decisões tomadas na prática. É também proposta uma heurística baseada no algoritmo de Hooke & Jeeves para determinar o melhor subconjunto de regras de priorização. O modelo foi aplicado a um problema real que corresponde ao sistema de transportes de grãos constituído pela Ferrovia Centro-Atlântica, Estrada de Ferro Vitória a Minas e pelo Porto de Tubarão. Os resultados demonstram que essas regras de priorização proporcionam maior capacidade global do sistema quando comparadas as decisões mais simples próprias de um modelo de simulação discreta por eventos.

Palavras-Chave: simulação-otimização; transporte ferroviário; grãos agrícolas; heurísticas.

Abstract

In this article we propose a hybrid simulation-optimization model to analyze alternative operational policies for the rail transport of grains in a closed loop system aiming to increase its overall capacity. The core of the proposed model is a discrete event simulation system developed in "Visual Basic for Applications" (VBA) that allows more flexible rules to be analyzed for the main decisions regarding queues. In our model ten different decisions related to rail operations (mainly rail asset allocation and queue management) are replaced by prioritization rules that aim to more closely reflect how decisions are made in practice. We also propose an optimization approach based on Hooke & Jeeves algorithm in order to determine the best subset of prioritization rules. Our model was applied to a real-world problem related to a grain transportation system composed of Centro-Atlântica and Vitória a Minas Railways and the Port of Tubarão. The results show that these prioritization rules can effectively yield to increased overall system capacity when compared to simpler decisions allowed by a discrete event simulation model.

Key words: simulation-optimization; rail transport; agriculture grains; heuristics.

* Corresponding Author. Email: cbcunha@usp.br.

Recommended Citation

Camargo, P. V. and Cunha, C. B. (2012) Um modelo híbrido simulação-otimização para análise de capacidade de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas em ciclo fechado. *Journal of Transport Literature*, vol. 6, n. 2, pp. 33-65.

■ JTL|RELIT is a fully electronic, peer-reviewed, open access, international journal focused on emerging transport markets and published by BPTS - Brazilian Transport Planning Society. Website www.transport-literature.org. ISSN 2238-1031.

This paper is downloadable at www.transport-literature.org/open-access.

1. Introdução

O objetivo desse trabalho é estudar políticas operacionais que maximizem o desempenho de um sistema ferroviário de transporte de grãos composto de duas ferrovias distintas (Ferrovia Centro-Atlântica e Estrada de Ferro Vitória a Minas) e considerando múltiplas origens, múltiplos produtos e destino ao Porto de Tubarão.

Mais especificamente, é proposto um modelo híbrido simulação-otimização como ferramenta para a análise de políticas operacionais para esse sistema com a finalidade de aumentar a sua capacidade global. O núcleo do modelo proposto é um sistema de simulação discreta por eventos desenvolvido em linguagem “Visual Basic for Applications” (VBA), o qual possibilita analisar regras mais flexíveis para decisões quanto ao tratamento das diferentes filas que ocorrem nas diversas etapas pelas quais passam os grãos, desde o seu transporte por caminhão a partir das regiões produtoras até as estações ferroviárias onde são carregados nos vagões, até a sua transferência para os navios que atracam no porto.

Processos intermediários de carregamento, despacho e descarga de vagões também estão considerados no modelo, assim como o retorno de vagões vazios às estações de carregamento, o que acontece com os vagões percorrendo o mesmo trajeto de vinda e obedecendo à mesma sequência de etapas do percurso rumo ao porto, mas na ordem inversa.

Dentre essas etapas existem algumas atividades apresentam grande variabilidade, não sendo adequada a sua descrição como apresentando um comportamento determinístico. Esses componentes, principalmente a chegada de caminhões às estações de carregamento e de navios ao porto, são condicionadores fundamentais do desempenho do sistema sendo modelado e, portanto, devem ser considerados como processos estocásticos.

No modelo proposto dez decisões relacionadas às operações ferroviárias (alocação de ativos ferroviários e gestão de filas) são substituídas por regras de priorização que buscam refletir as decisões tomadas na prática. É também proposta uma heurística baseada no algoritmo de Hooke & Jeeves para determinar o melhor subconjunto de regras de priorização.

As políticas operacionais objeto da análise proporcionada pelo modelo deverão possibilitar responder diversas perguntas, a saber:

Relativas ao despacho de vagões:

- Como deve ser feito o despacho de vagões?
- Quando existe um conjunto de vagões vazios a serem destinados para carregamento, para qual estação de carregamento se devem enviar esses vagões?
- Quando existem vagões carregados com diferentes produtos e a capacidade de tração disponível é insuficiente para levá-los todos de uma vez, quais vagões devem ser selecionados para o transporte imediato?

Relativas ao carregamento dos vagões:

- Quando existe um vagão pronto para carregamento e mais de um tipo de produto para carregá-lo, qual produto deve ser priorizado?
- Quando existem navios em fila para atracação e carregamento com produtos diferentes, qual deles deve ser priorizado? Qual o impacto no sistema decorrente de sua operação de acordo com a regra de primeiro que entra, primeiro que sai (PEPS)?

Relativas ao gerenciamento de descarga:

- Quando existem vagões carregados com diferentes produtos em fila para descarga no porto e uma única estrutura de descarga, qual a melhor ordem de descarga e, em particular, qual deles deve ser descarregado em primeiro lugar?
- Quando existe uma fila de caminhões para serem descarregados nas estações ferroviárias e uma única estrutura de descarga, qual deles deve ser descarregado primeiro e qual a melhor ordem de descarga?

Três fatores contribuem para tornar as respostas a essas perguntas não triviais. O primeiro deles é o caráter aleatório de alguns dos componentes do sistema, que torna muito difícil a sua solução de maneira analítica.

O segundo fator é a interação dos diversos elementos do sistema promovida pela circulação de vagões e locomotivas no sistema. O terceiro fator é a questão temporal, que associada aos

dois primeiros fatores, torna de muito difícil previsão a consequência de uma decisão sobre um subsistema qualquer, mesmo em um futuro próximo àquele em que se toma a decisão.

Uma vez que não existe consenso na literatura em relação à melhor forma de se modelar esse problema, torna-se um segundo objetivo desse trabalho a determinação da adequabilidade de modelos simulação-otimização ao estudo de estratégias operacionais em sistemas ferroviários operando em circuito fechado.

A necessidade de consideração dos componentes estocásticos do problema, aliada ao objetivo de estudar políticas operacionais que maximizem o desempenho do sistema, resulta na proposição de uma abordagem híbrida que incorpora regras heurísticas a um modelo de simulação que busquem a otimização do sistema sendo modelado.

A construção do modelo é dividida em duas etapas. A primeira delas consistiu da construção de um modelo de simulação estocástica convencional que representasse adequadamente o sistema real no qual se baseou o modelo. Com o modelo construído, foram enumeradas todas as decisões que poderiam ser substituídas por regras de decisão heurísticas com o objetivo de maximizar o resultado do modelo, aproximando-o, assim, da realidade decorrente das ações dos tomadores de decisões.

Nesse processo de enumeração foram consideradas passíveis de substituição por heurísticas todas aquelas regras convencionais de simulação estocástica que eventualmente não representassem os processos decisórios reais e que, de alguma forma, fornecessem respostas aos questionamentos levantados na seção anterior.

Como exemplos mais evidentes dessa questão podem ser citados a escolha de estação de destino para os vagões vazios que chegam à estação intermediária vindos do porto e o gerenciamento de filas, que não se dá no esquema de pilha (último que entra, primeiro que sai) ou fila do tipo PEPS (primeiro que entra, primeiro que sai).

Observa-se, na operação do sistema real, que tanto a distribuição de vagões quanto o gerenciamento das filas de veículos são feitos com base na análise do sistema como um todo, cujos elementos tangíveis se tentarão representar no modelo proposto.

Esse passo gerou uma lista de sete oportunidades para implementação de regras de priorização, quais sejam: definição de destino de vagões vazios, escolha de produto para ser carregado em vagões vazios que chegam às estações carregamento, escolha de veículo em fila para descarregar (caminhão e vagão), seleção de vagões carregados para formação de trens (nas estações de carregamento e na estação intermediária) e escolha de navio (dentre aquelas em fila) para atracação e carregamento.

Como consequência dessa substituição, obtém-se um modelo de simulação cujos processos internos (distribuição de recursos e gerenciamento de filas) não dependem de distribuições probabilísticas e regras fixas do tipo PEPS, mas de regras de decisão dedicadas a cada uma dessas questões. Além disso, estas regras consideravam o estado de várias variáveis do sistema, ao invés de apenas as variáveis do ponto onde a decisão seria tomada.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: apresenta-se, na seção 2, a revisão bibliográfica, seguindo-se, na seção 3, uma descrição do sistema ferroviário objeto do estudo. A metodologia proposta é detalhada na seção 4, seguindo-se os experimentos computacionais na seção 5, e as considerações finais na seção 6.

2. Revisão Bibliográfica

Modelos de simulação-otimização caracterizam-se por ter em sua composição elementos básicos de modelos de otimização, como uma função objetivo a ser maximizada/minimizada, e elementos de problemas de simulação, como a existência de variáveis estocásticas. A combinação de modelos de otimização e simulação em uma única ferramenta pode ser feita de diversas formas, o que limita a definição de um modelo otimização-simulação apenas ao fato de que são utilizados elementos de ambos os tipos de modelo.

Assim sendo, toda a vez em que se tratar da utilização de um modelo otimização-simulação é necessário especificar de forma bastante detalhada como é feita a composição entre esses dois modelos, de forma que se possa saber exatamente qual a abordagem dada ao problema, bem como quais foram os algoritmos utilizados.

Jacobson e Schruben (1989) classificam os modelos híbridos simulação-otimização como sendo de otimização estocástica, cuja solução, segundo eles, é de reconhecida dificuldade. Já

segundo Pflug (1996), um problema de otimização estocástica é caracterizado pelo fato de que nem todos dados relevantes à decisão são exatamente conhecidos no instante em que a decisão deve ser tomada.

Ainda segundo Pflug (1996), o não-conhecimento dos valores exatos de algumas variáveis no instante da tomada de uma decisão pode ser fruto de falta de informação a respeito da variável ou de um comportamento estocástico intrínseco dessas variáveis, caso que em que se encaixa o problema tratado nesse trabalho.

Apenas um dos métodos de integração de simulação e otimização, em que a otimização é usada como método de definição de prioridade e de regras de decisão em modelos de simulação será detalhado nesse artigo, que corresponde de interesse ao desenvolvimento do modelo proposto. Para maiores detalhes sobre os demais métodos sugere-se consultar os trabalhos de Pflug (1996) e Jacobson e Schruben (1989).

Uma forma bastante singular e de uso razoavelmente restrito na literatura para a articulação entre modelos de simulação e otimização encontrada na literatura é a de substituição de regras intrínsecas dos modelos de simulação, como as de fila (PEPS, UEPS, etc.) e os sorteios sem tendência, por regras heurísticas baseadas em modelos de otimização. Apesar de menos explorada, é uma abordagem bastante adequada para problemas de sequenciamento de produção e despacho de veículos, uma vez que considera os estados do sistema no momento de cada decisão.

Essa abordagem foi proposta por Everett (2001) para o problema de sequenciamento de produção e transporte de minério de ferro com o objetivo de atingir a qualidade do minério em cada pilha formada para embarque no porto.

Segundo Everett (2001), a qualidade do minério de ferro não é definida simplesmente pela concentração de ferro metálico, mas também pela concentração de diversos outros elementos químicos, como fósforo, alumínio e sílica, e para todos esses elementos existe uma concentração média que deve ser atingida.

O sequenciamento proposto por Everett (2001) considera a existência de uma série de minas em operação, distribuídas a diferentes distâncias do porto e com diversas frentes de lavra em operação, cada uma delas fornecendo minérios com composições químicas distintas.

Nesse problema, foram identificadas quatro oportunidades de decisão de sequenciamento no sistema como um todo:

- 1°. Escolha da ordem de lavra das diversas frentes existentes em cada mina;
- 2°. Escolha da seqüência de trens a ser despachado considerando todas as origens possíveis;
- 3°. Decisão acerca da pilha de minério em que será descarregada a carga do trem que chega ao porto;
- 4°. Escolha da pilha que será utilizada para carregar o navio quando ele chega ao porto.

Apesar de terem sido identificadas quatro oportunidades de escolha, características físicas dos dois problemas tratados por ele resultaram em dois modelos diferentes, cada um com duas oportunidades de escolha.

O primeiro problema contém um conjunto de três minas e diferentes frentes de lavras por mina, mas com apenas uma pilha no porto. Essa configuração permite duas oportunidades de escolha, a 1ª e a 2ª.

O segundo problema apresenta apenas uma mina com uma única frente de lavra e um porto com espaço para múltiplas pilhas de minério, o que leva a que se tenham as oportunidades de escolha 2 e 3.

A primeira etapa para a aplicação do modelo de otimização foi a definição de uma figura de mérito para estabelecer base de comparação entre as escolhas possíveis em cada passo. Essa figura de mérito, chamada pelo autor como medida de stress, parte da hipótese de que para cada um dos elementos químicos controlados existe uma faixa de aceitação de tamanho e cujo ponto médio é o valor esperado. A partir da definição de uma função de stress, do conhecimento do tempo de transporte de cada uma das minas para o porto, da composição do minério extraído de cada uma das frentes de lavra de cada uma das minas e da composição química desejada para cada pilha de minério no porto, Everett (2001) propõe heurísticas bastante simples para substituir os procedimentos de regras de fila. Com isso, cria um modelo otimização-simulação para sequenciamento da produção, transporte e descarga no porto.

Nesse modelo, cada uma das escolhas citadas acima é feita com base na avaliação da função de stress resultante de cada uma das possibilidades imediatas. Isto é, as decisões são baseadas apenas no efeito imediato delas, e não consideram as próximas decisões que deverão ser tomadas. No caso em que se deve decidir qual das minas fornecerá minério para o próximo trem, analisa-se apenas o primeiro trem de cada uma das minas possíveis, escolhendo-se aquele que resultará em menor valor da função de stress para o volume acumulado até então.

Essa mesma regra aplica-se à decisão de qual frente de lavra será a próxima a ser minerada e para a decisão de qual pilha deverá receber o minério quando o trem chegar ao porto.

A decisão de qual pilha será utilizada para carregar o próximo navio, no entanto, é tomada com base na menor medida de stress entre todas as pilhas formadas em relação à especificação do produto demandado pelo navio.

Outro trabalho que se utiliza da mesma metodologia para articulação entre os elementos de simulação e otimização é o de Fioroni (2007), que apresenta a consolidação de uma metodologia para o desenvolvimento e validação de modelos de sistemas ferroviários de transporte de granéis por trens operando em ciclo fechado.

Apesar da semelhança, o trabalho apresentado por Fioroni (2007) restringe-se exclusivamente à ferrovia, desconsiderando aspectos de disponibilidade de carga nas estações de carregamento e de disponibilidade de espaço de armazenagem para descarga dos vagões que chegam aos seus destinos.

Além dessa diferença em relação ao presente trabalho, Fioroni (2007) propôs o acoplamento de uma ferramenta externa ao simulador para solução dos problemas de otimização, a qual teve de ser feita com a utilização de um terceiro software que estabelecesse a comunicação entre eles, ao invés de desenvolver todo o modelo de simulação em linguagem de programação com interface direta com as bibliotecas de otimização disponíveis no mercado.

A complexidade de seu trabalho, entretanto, reside no grande detalhamento da representação da malha ferroviária e da circulação de trens que, uma vez estabelecido, induz a necessidade de se representar mais realisticamente a destinação dos trens operados na ferrovia.

Fioroni (2007) argumenta que o mecanismo de destinação normalmente utilizado em modelos de simulação, sorteio sem tendência, era inadequado ao modelo pretendido, uma vez que não representa o problema real, preocupação fundamental no trabalho por ele apresentado.

A utilização de regras heurísticas, portanto, é apresentada apenas como uma forma de representação de processos decisórios reais em modelos de simulação, e não com o objetivo de analisar diferentes estratégias operacionais e seu impacto no desempenho do sistema.

3. O sistema FCA/EFVM/Tubarão de transporte de grãos

Nesta seção são apresentadas as principais características físico-operacionais do sistema em estudo, bem como do processo de planejamento, de forma que se permita o entendimento das hipóteses realizadas nas etapas de caracterização do problema e de proposição do modelo.

O sistema em estudo compreende a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e o Porto de Tubarão, conforme mostrado na Figura 1. Esse sistema, por exceção da quase totalidade dos terminais de carregamento, é operado pela Vale (antiga Companhia Vale do Rio Doce).

3.1 Ferrovia Centro-Atlântica (FCA)

A malha da FCA tem uma extensão de mais de 6.500 km operacionais (há inúmeros trechos atualmente desativados) representados em azul na Figura 1, e é destinada principalmente ao transporte de carga geral.

Grande parte dessa malha foi construída nos séculos 19 e 20, não tendo sofrido grandes intervenções para melhoria de seus padrões físico-operacionais. Por esse motivo, a maioria da extensão da sua malha suporta apenas locomotivas de pequena potência, vagões de menor peso total e composições com menor número de vagões.



Figura 1: Sistema FCA-EFVM-Tubarão

Diversos são os fatores que limitam a capacidade operacional da via, como raios de curvatura muito pequenos, trilhos de perfil muito delgado, altas taxas de dormentação podre, pátios de cruzamento muito curtos e pontes sem o reforço estrutural necessário. Por esses motivos, em grande parte da malha, a carga admissível por eixo não passa de 20 toneladas, sendo de 15 a 17,5 toneladas em diversos trechos. No principal corredor de exportação de grãos, que liga a região do triângulo mineiro à Estrada de Ferro Vitória-a-Minas, a carga admissível por eixo foi elevada para 25 toneladas após a realização de diversas obras, o que permite utilizar vagões com melhor desempenho operacional (isto é, melhor relação entre carga transportada e tara do vagão) e locomotivas de maior porte.

Outra característica operacional importante é a relação peso/potência dos trens. Na mesma rota de transporte de grãos citada acima, esse indicador varia de 1,03 ton/CV até 0,42 ton/CV. Nos piores trechos da malha da FCA, no entanto, esse valor chega a meros 0,076 ton/CV.

Apenas a título de ilustração, um caminhão bi-trem com 74 toneladas de peso bruto e um cavalo mecânico de 420 CV de potência (maior composição rodoviária para grãos em atividade no Brasil) teria uma relação peso/potência de 0,18 ton/CV, superior a muitos trechos da malha da FCA.

Como último fator limitante da capacidade da FCA, pode ser citada a baixa velocidade máxima dos trens, que gira em torno de 40 km/h em grande parte da malha, velocidade que raramente é mantida por longos trechos, uma vez que a ferrovia corta diversos municípios em toda a sua extensão, os quais tem que ser atravessados com velocidades bastante reduzidas por

questões de segurança ao tráfego de carros e pedestres que cruzam a via em mesmo nível em diversos pontos.

3.2 Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)

A EFVM é uma ferrovia com mais de 900 km de extensão, ilustrada em ver na figura 3.1 e tem aproximadamente 570 km de sua linha tronco em via dupla. Além disso, é uma ferrovia com excelente relação peso/potência (aproximadamente 1,92 ton/CV no sentido do porto de Tubarão), peso admissível por eixo na casa de 25 ton e velocidades máximas de 60 km/h em quase toda a malha.

Essas características atendem à função principal da ferrovia que é a de transporte de grandes quantidades de minério de ferro, e a coloca na categoria das ferrovias heavy-haul, que são aquelas capacitadas para o transporte de cargas pesadas e em grande quantidade.

3.3 O Porto de Tubarão

O Porto de Tubarão localiza-se no litoral do Espírito Santo, na região metropolitana de Vitória. Segundo a Agência Nacional De Transportes Aquaviários, ANTAQ, foi o porto com maior movimentação de carga no ano de 2007, ultrapassando a barreira dos 104 milhões de toneladas.

Esse volume divide-se entre os terminais dedicados a operações de minério de ferro e ao terminal dedicado à operações de produtos diversos (TPD), o qual é dividido em um terminal dedicado à importação de fertilizantes e um segundo dedicado à exportação de grãos agrícolas. O TPD conta ainda com dois berços de atracação, um destinado à importação de fertilizantes e o outro à exportação de grãos agrícolas.

Os vagões de grãos que chegam ao porto de Tubarão pela EFVM são descarregados em duas moegas com capacidade para 19 vagões por vez. Cada um desses lotes consome cerca de 190 minutos de uma moega, dos quais cerca de 98 minutos referem-se à efetiva descarga, e os outros 92 minutos são relativos a atrasos provocados pela operação da moega e do posicionamento de vagões pela ferrovia (taxa de utilização de 51,6%).

Esses valores resultam em uma taxa média de descarga de 260 mil toneladas por mês por moega, num total de 520 mil toneladas por mês, de acordo com valores fornecidos pela Vale.

No que tange à armazenagem dos grãos, o porto de Tubarão conta com 9 armazéns com capacidades que variam entre 43 e 51 mil toneladas cada, totalizando 444 mil toneladas. A administração desses silos é, possivelmente, uma das maiores dificuldades encontradas pelos analistas de planejamento/programação do porto, uma vez que alguns deles são de propriedade de donos de carga (grandes traders de grãos agrícolas) e outros são de propriedade da Vale, mas os detalhes dessa questão não serão abordados nesse trabalho. Dessa forma, considerou-se que todos os armazéns estão disponíveis para utilização.

No tocante à atracação e carregamento de navios, a primeira etapa do recebimento de um navio por um porto é o que se chama nomeação do mesmo, que consiste em especificar qual o navio deverá chegar e quando, ou seja, em qual janela de tempo. A nomeação normalmente ocorre com antecedência de quinze a trinta dias antes da sua chegada, não sendo possível sua alteração.

Após a nomeação, as equipes de planejamento e programação do porto e da ferrovia já sabem qual produto deve ser disponibilizado para embarque no navio, o que permite verificar a disponibilidade desse produto no porto e, eventualmente, tornar prioritário o seu transporte ao longo de todo o trajeto desde o embarque na carga na ferrovia até a descarga dos vagões no porto.

Com a chegada do navio ao porto, segue-se com a emissão de uma ordem de atracação, após a qual seguem a atracação propriamente dita e o carregamento do produto. Conforme visto na seção anterior, ao final do processo de simulação das solicitações de voos para cada dia de operação dentro de um horizonte de planejamento, tem-se como dados de entrada para a otimização uma lista de voos de um dia originada na simulação. Os voos têm rotas com origem e destino conhecidos, horário de partida, tempo de viagem e tipo de aeronave. Todos os voos devem obrigatoriamente ser realizados e as aeronaves podem ser deslocadas de qualquer uma das bases, contanto que retornem para a mesma base no final do dia de operação.

Para o modelo matemático, as bases de operação devem ser definidas antes da otimização. Também deve ser pré-definida a frota de aeronaves alocada em cada base de forma que, no início da otimização, sejam conhecidos quantas aeronaves (e de quais aeroportos) estão disponíveis para atender à lista de voos. Deve-se dimensionar a quantidade de aeronaves para que o número de aeronaves em cada base seja suficientemente grande para assegurar que sejam utilizadas tantas aeronaves quanto necessário em cada dia de modo a obter a solução de mínimo custo. Exceção deve ser feita no caso de alguma base possuir alguma limitação de tamanho que restrinja a quantidade de aeronaves disponíveis para operação.

3.4. *Processo de planejamento do sistema*

O processo de planejamento de transporte de grãos é feito com base em diversos horizontes de tempo, com graus de detalhamento e de incerteza compatíveis com a finalidade de cada um desses horizontes de planejamento. Essa seqüência de etapas é conduzida com o objetivo de se fazer um detalhamento maior a cada etapa cumprida, até a efetiva realização do transporte.

Assim, entende-se que a etapa de planejamento plurianual possui o objetivo de manter o plano de transportes dentro das expectativas da companhia operadora do sistema, no caso a Vale, e que seu detalhamento em orçamento, planejamentos mensal e semanal e, finalmente, programação e emissão de ordens de serviço, tenha como resultado a realização do transporte de um conjunto de fluxos que estão alinhados com os objetivos estratégicos da companhia.

A seguir procede-se a uma breve explanação sobre o processo de planejamento anual, de programações mensal e semanal e de emissão de ordens de serviço. É importante destacar, porém, que os processos de planejamento e programação de transportes não são perfeitamente compartimentados como apresentados a seguir, mas o número e natureza das interferências de um processo de planejamento nos demais são muitos e irrelevantes para o entendimento do problema e do modelo propostos nesse trabalho, assim como também não é escopo desse trabalho o processo de planejamento plurianual.

3.4.1 Planejamento Anual

Feito anualmente, o planejamento anual considera, para o ano seguinte, um cenário de demanda com maior probabilidade de acerto, e baseia-se prioritariamente na realização de transportes previstos em contrato entre o operador da ferrovia e donos de cargas.

Nesse horizonte de planejamento algumas informações ainda não estão disponíveis, como previsão do dia/semana de carregamento (conhece-se apenas o valor para cada mês do ano) e especificação de produto (sabe-se apenas que o produto a ser transportado é soja, mas se desconhece o tipo – orgânica, transgênica, comum).

A maior diferença em relação ao planejamento plurianual do ponto de vista prático, entretanto, é a impossibilidade de se fazer aquisição de vagões e locomotivas ou mesmo intervenções de maior porte na via com apenas um ano de antecedência.

Por isso, enquanto o planejamento plurianual concentra-se em mensurar as aquisições e intervenções necessárias para a realização de todos os fluxos de transporte (definido por uma carga, de um determinado cliente e com uma origem e um destino conhecidos) que se mostrarem financeira e economicamente viáveis, o planejamento anual concentra-se em selecionar, dentre os fluxos presentes no planejamento plurianual, aqueles que tragam a maior margem líquida de contribuição possível, limitada pela frota existente de vagões e locomotivas, pela capacidade de circulação de trens em cada trecho, a capacidade de carga e descarga dos terminais e do porto e outras características da ferrovia e do porto.

3.4.2 Programação mensal

A etapa de programação mensal é aquela em que primeiro se tem conhecimento de todas as características dos produtos a serem transportados e a semana em que eles estarão disponíveis para carregamento nas estações de origem.

Com o objetivo de tentar atender os fluxos de transporte previstos no Planejamento Anual (resultado da etapa anterior na cadeia de planejamento e programação de transporte), essa etapa tem a tarefa de acomodar as alterações ocorridas na demanda e na oferta de transporte previstas pelo planejamento anual à disponibilidade de vagões e locomotivas, à capacidade de tráfego na via permanente e às capacidades dos terminais de carregamento e do pátio ferroviário no porto.

Essa acomodação de alterações se faz importante pois é a última oportunidade de modificações no conjunto de transportes a ser realizado, não sendo possível, em teoria, a inclusão de nenhum outro fluxo de transporte nas etapas subsequentes de programação de transporte da ferrovia.

A verificação de quais fluxos de transporte é possível atender não conta, atualmente, com ferramentas muito sofisticadas, o que torna o processo totalmente dependente da experiência dos analistas da Vale responsáveis pela tarefa. Esses mesmos analistas, em conjunto com representantes das áreas comercial e de operações de pátios, tomam a decisão, em caso de inexistência de ativos ferroviários (isto é, vagões e locomotivas) suficientes para atendimento de toda a demanda, sobre quais fluxos serão atendidos e quais serão preteridos.

Além disso, os critérios atuais para decisão são intangíveis, pois são frutos de uma negociação feita com base não apenas em informações técnicas dos fluxos e da quantidade de recursos (vagões, locomotivas, moegas, etc) necessários à realização do transporte, mas também em negociações comerciais informais e na experiência dos analistas.

3.4.3 Programação semanal

A característica mais operacional dessa etapa de planejamento também é definida pela forte interação com os setores operacionais da ferrovia, tais como o Centro de Controle Operacional (CCO), que é responsável pelo controle de tráfego e licenciamento dos trens, e as áreas responsáveis pela manutenção de vagões e locomotivas, que são aquelas que garantirão a disponibilidade desses ativos para a realização do transporte. Maiores detalhes sobre as operações de licenciamento e sinalização ferroviários podem ser encontradas em Pachtl (2002).

De forma simplificada, essa etapa da programação de transporte tem por objetivo fazer uma última verificação das informações e planejamento realizado na etapa de programação mensal, antes que recursos da ferrovia sejam efetivamente alocados, o que se entende como a movimentação de locomotivas e vagões, carregados ou não, entre duas estações quaisquer.

Com base em informações dos agentes de cargas, fornecidas às suas contrapartes da área comercial da ferrovia, a equipe responsável pela programação semanal tem a tarefa de calcular o número de vagões necessários (isto é, determinando a frota operacional) em cada estação de carregamento, o que é feito com o auxílio de ferramenta especializada cujas especificidades fogem ao escopo desse trabalho.

3.4.4 Programação diária – Emissão de ordens de serviço

A programação diária tem por finalidade dar autorização para que se inicie o carregamento de vagões e que se emitam os documentos fiscais necessários; entretanto não se deve, nesta etapa, proceder a uma nova priorização dos produtos a serem carregados.

Verifica-se, porém, que os analistas responsáveis pela programação diária alteram a programação de carregamento prevista na etapa de programação semanal através de um processo de priorização de fluxos semelhante àquele da fase de programação mensal, o que sugere que a definição dos produtos que devem ser carregados em cada estação e em cada semana não é tão rígida como o processo de planejamento e programação informado pela companhia faz parecer.

Outras atividades eventuais, como cancelamento de carregamento por problemas quaisquer do agente de carga ou da ferrovia, e ajustes marginais nas quantidades a serem carregadas também podem ocorrer nessa etapa de planejamento, o que não será considerado explicitamente nas etapas posteriores desse trabalho, uma vez que se pode admitir que todos esse fatores estão implicitamente considerados na formulação da chegada de produtos às estações como processos aleatórios.

4. Estratégia de solução proposta

A análise do problema de transporte de grãos agrícolas pelo sistema ferroviário descrito, indica que, para a sua correta modelagem e a fim de assegurar uma representação adequada da realidade da operação, requer uma abordagem que considere simulação e otimização de forma integrada.

A escolha de um modelo híbrido otimização-simulação deve-se, basicamente, ao fato de que a utilização de apenas uma abordagem, otimização ou simulação, resultaria em um modelo que não atenderia alguns dos objetivos dessa pesquisa, em particular a correta avaliação de políticas operacionais que maximizem o desempenho de um sistema ferroviário de transporte de grãos composto duas ferrovias distintas e considerando múltiplas origens, múltiplos produtos e destino a um único porto

Um modelo de otimização puro não seria capaz de tratar adequadamente as características fortemente estocásticas do sistema, as quais teriam de ser deixadas de lado em um modelo desse tipo. Vale frisar que esse componente estocástico é muito mais forte na chegada de grãos aos pátios de carregamento e chegada de navios ao porto, processos que não se encontram sob o domínio do operador ferroviário.

Por outro lado, o desenvolvimento de um modelo de simulação puro se destinaria exclusivamente a representar o sistema da forma como ele opera, e não um modelo que pudesse responder às indagações da melhor forma de operar o sistema. Mais especificamente, um modelo de simulação puro considera regras de decisão baseadas em ordem de chegadas, ponderadas por algum critério de prioridade, não permitindo uma avaliação baseada em uma análise global do sistema. Por exemplo, a decisão de qual navio em fila para atracação deve ser priorizado para embarque pode depender de uma análise mais complexa que assegure a minimização do tempo total de espera e carregamento.

Dessa forma, o modelo que se julgou ideal para esse problema deve representar as características estocásticas do problema real e permitir que o modelo seja orientado à maximização de uma função objetivo (definida para fins desse trabalho como maximização do volume transportado), o que permite, juntamente com resultados clássicos de modelo de simulação como filas, taxas de ocupação e tempos de espera, avaliar as estratégias operacionais que serão discutidas adiante.

A forma encontrada para a união dessas duas vertentes em um único modelo foi a utilização de um modelo de simulação cujas regras de tratamento de filas e distribuição de recursos fossem mais sofisticadas do que aquelas normalmente utilizadas (fila, pilha, proporcional a um determinado fator, etc.), em consonância com o proposto por Everett (2001) e por Fioroni (2007).

Uma vez que os pacotes de simulação estocástica a que se teve acesso (Arena e ProModel), além de implicarem montantes elevados para sua aquisição, exigiriam um esforço muito grande e também número muito grande de alterações no modelo a cada nova regra de priorização que se deseje implementar, decidiu-se que o modelo implementado diretamente na linguagem de programação “Visual Basic for Applications” (VBA), o que proporciona maior flexibilidade e facilidade para considerar, incorporar e avaliar diferentes regras de priorização.

4.1. O modelo de simulação de eventos discretos

O submodelo de simulação foi elaborado para servir de base ao modelo simulação-otimização que se construiu a seguir e fornecer uma base de comparação para os resultados do modelo final. Por conta da necessidade de inclusão das regras de decisão nesse modelo, buscou-se definir um esquema simples o suficiente para permitir a análise do efeito de cada regra implementada. A seguir procede-se a uma breve descrição dos diversos elementos incluídos no modelo de simulação.

4.1.1 Estações de carregamento

São quatro os processos associados às estações de carregamento: Descarga de caminhões, carregamento de vagões, montagens de trens e desmontagem de trens. Entretanto, alguns outros relevantes aspectos de modelagem merecem ser discutidos, como parâmetros numéricos utilizados para tratar esses quatro processos, e as hipóteses simplificadoras adotadas, o que se faz a seguir.

A descarga de caminhões que chegam às estações de carregamento é modelada como ocorrendo em uma única estrutura de descarga, e uma vez que não se dispõe de dados sobre os tempos de descarga para elas, foi arbitrado um tempo de descarga que resultasse em uma taxa de ocupação da estrutura de 75% no período pico de demanda.

Quanto à formação de filas de caminhões para descarga, considera-se um tempo limite de 36 horas após o qual o caminhão é retirado da fila e é considerado “demanda perdida”. Essa hipótese se faz necessária por não ter sido considerado razoável assumir que os caminhões ficariam em fila indefinidamente. Esse artifício tem como objetivo refletir a hipótese de que existe um nível de serviço mínimo que deve ser oferecido aos caminhões que chegam carregados de grão de forma a evitar que eles sejam direcionados a outras estações de transbordo/porto pelo dono da carga.

A armazenagem de grãos é modelada como feita em silos com alocação a produtos específicos e capacidade fixos durante todo o período simulado. Além disso, por não se dispor de informações da capacidade total de armazenagem das estações de carregamento, considera-

se que a soma das capacidades de armazenagem nas estações carregamento seja igual à do porto e distribuída entre as estações de carregamento de acordo com a demanda de cada um.

O carregamento de vagões também é modelado como feito em uma única estrutura com desempenho regido por uma distribuição triangular e sem consideração de tempo adicional para que se troque do carregamento de um produto para o carregamento de outro (*setup* do equipamento). Uma vez que não se dispunha de dados de tempo de duração para esse processo, adotou-se um tempo de carregamento que resulte em uma taxa de ocupação da estrutura de 75% no período pico de demanda.

Quanto à configuração de linhas ferroviárias, considera-se que todas as estações possuem espaço ilimitado para recebimento, formação de filas e composição de trens para partida.

4.1.2 Malha e transporte ferroviário

A malha ferroviária considerada nesse trabalho é composta por um conjunto de trechos de via singela entre estações, sem restrições de capacidade e aos quais estão associadas distribuições de probabilidades de tempo de percurso cujos valores médios foram fornecidos pela Vale. Cada um desses trechos ferroviários foi definido pela união dos pontos de interesse para o modelo, que são as quatro estações de carregamento (uma das quais também é o ponto de intercâmbio entre as ferrovias) e o porto, critério que resultou na definição de três trechos na FCA e apenas um na EFVM.

O transporte ferroviário foi modelado como um processo bastante simples, uma vez que alguns componentes desse processo não foram considerados relevantes para os objetivos desse trabalho.

Essa simplificação da representação da operação dos trens, embora significativa, está de acordo com a forma atualmente utilizada pela companhia operadora do sistema para dimensionamento de material rodante na ferrovia, e foi considerada suficientemente boa para as análises propostas.

Os processos de desmontagem e recomposição de trens na estação intermediária, para reclassificação de vagões de acordo com o destino, foram mantidos, pois os modelos operacionais das duas ferrovias são distintos.

Quanto à estação intermediária, entende-se que a transferência de vagões e locomotivas entre as duas estações de intercâmbio em operação (Eldorado e Capitão Eduardo), bem como a sua proximidade (40,8km), podem ser representados, sem prejuízos à representatividade do modelo, por uma operação equivalente à de uma única estação representada pela estação de Belo Horizonte.

4.1.3 Processamento de grãos no porto

O processamento de grãos no porto compreende as etapas de chegada de composição de vagões carregados, descarga dos vagões em moegas ferroviárias, armazenagem de grãos em silos e transferência dos mesmos para os navios.

Assim como nas demais estações ferroviárias do sistema, os tempos para formação e desmontagem de trens também foram considerados no pátio ferroviário do porto, incluídos atrasos relacionados aos processos não considerados explicitamente no modelo.

Quanto às dimensões do pátio ferroviário no porto, considerou-se que ele tem tamanho suficiente para todas as operações necessárias, mesma hipótese adotada para o pátio da estação intermediária única representando as duas existentes, e para os pátios das estações de carregamento.

Quanto ao processo de descarga de vagões, considerou-se um modelo de moega única. Uma vez que a demanda (e a quantidade de soja transportada pelo sistema real) apresentada é bastante superior à capacidade informada para as moegas ferroviárias, arbitrou-se uma capacidade de descarga de 754 mil toneladas/mês (contra os cerca de 520.000 toneladas/mês informados como sendo a capacidade), o que corresponde a uma taxa de utilização de 75%, valor considerado suficientemente adequado pelos analistas que forneceram os valores reais, mas que assim como os demais valores arbitrados, também será sujeito a uma análise de sensibilidade na etapa de experimentos computacionais. Além disso, considerou-se que essa moega única simulada tem capacidade para um único lote de 10 vagões, de forma a atender especificamente o tamanho do lote definido para a ferrovia; assim, todo o sistema opera com base em um único lote de.

Quanto aos silos de armazenagem, a associação das 444 mil toneladas de capacidade estática de armazenagem aos produtos considerados no modelo é considerada fixa, e a

capacidade alocada a cada produto também fixa ao longo do tempo e proporcional à demanda de cada um deles no trimestre de maior demanda.

4.1.4 Carregamento de navios

O carregamento de navios foi modelado como um processo simples a ocorrer em um único berço de atracação e utilizando um único equipamento de carregamento.

Todos os tempos necessários às manobras de atracação e desatracação foram adicionados ao tempo necessário para carregamento do navio, de forma que puderam ser omitidos no modelo matemático. Considerou-se tamanho único de navio igual a 42 mil toneladas e que equivale ao tamanho médio dos navios que atracam no porto de Tubarão para carregamento dos grãos.

Considerou-se, também, um berço de atracação com uma capacidade de carga que correspondesse àquela do píer dedicado às operações de granéis agrícolas, adicionada da capacidade referente aos períodos em que o píer dedicado à operação de fertilizantes é disponibilizado para carregamento de granéis agrícolas. Isso resultou na capacidade de carregamento informada pela operadora do sistema, o que resultou em uma capacidade máxima de atracação/carregamento equivalente a 57 navios de 42.000 toneladas por mês (2,4 milhões de toneladas), ou 72% de ocupação durante o período de pico de demanda.

Sabe-se que, na operação real, o porto não aceita a nomeação de um navio caso esteja previsto atraso na chegada ao porto de produtos a serem embarcados, ou em caso de haver grande fila de navios para atracação. Entretanto, a inclusão de uma regra de decisão para aceitação ou não da nomeação de um navio foi descartada por não estar diretamente relacionada à operação ferroviária, mas por ter o potencial de impactar negativamente seu desempenho quando alguma decisão não ótima de não nomeação de um navio seja tomada.

Para contornar esse problema estabeleceu-se um tempo máximo para que um navio ficasse em fila no porto (72 horas), tempo após o qual ele “desistiria” da carga, sendo considerado “demanda perdida”. A interpretação desse resultado, no entanto, não é a de que certos navios chegariam ao porto e sairiam após certo tempo sem ter conseguido carregar, mas que a nomeação desse conjunto de navios não deveria ter sido aceita pelo porto, tendo em vista tanto a indisponibilidade da carga a embarcar quanto a espera excessiva para atracar.

4.1.5 Produtos transportados

A demanda considerada para esse trabalho corresponde à projetada, no final de 2008, para ser transportada durante o ano de 2009, ocasião em que foram levantados todos os dados, e é composta por cerca de 20 diferentes produtos num total de 5,12 milhões de toneladas.

De forma a simplificar a modelagem do problema, a demanda foi agrupada em quatro produtos diferentes, desconsiderando-se os clientes da ferrovia como fator determinante para distinção entre produtos, e utilizando a descrição do produto como único critério.

Essa consideração garante a manutenção do caráter multi-produto do modelo, ao mesmo tempo em que elimina um nível de discretização da demanda incompatível com o modelo proposto nessa pesquisa. Na prática, isso corresponde à consideração de que todos os donos de carga fazem operação em pool, que nada mais é do que a operação conjunta de diversos donos de carga na qual cada um é dono de uma porcentagem da carga total.

4.2. Regras de priorização

O modelo híbrido proposto considera a substituição das regras estocásticas do modelo de simulação (PEPS, sorteios sem tendência, etc) por regras de priorização, as quais podem ser interpretadas como estratégias operacionais. Essas regras de priorização foram formuladas com a utilização de diversos indicadores do sistema, detalhados a seguir, e que adotam a seguinte nomenclatura:

p – Índice que identifica o tipo de produto;

E – Estação de carregamento;

CN – Carga nominal dos navios;

CC – Carga nominal dos caminhões;

CV – Carga nominal dos vagões;

VT_i^p – Lista dos vagões em trânsito, onde p é o produto transportado;

CAP_p^E – Capacidade de silagem em cada estação E para cada produto p ;

S_p^E – Quantidade de produto p armazenado em cada estação E ;

${}_iFC_p^E$ – Filas de caminhões i nas estações E , carregados com produto p ;

${}_iFN_p$ – Filas de navios i , a serem carregados com produto p ;

4.2.1 Ocupação percentual de silos nas estações de carregamento

No caso da priorização de produtos para o carregamento de vagões, pode-se utilizar essa figura de mérito para realizar o carregamento daquele produto que ocupar a **maior** porção de seu silo na origem. Dessa forma, busca-se garantir disponibilidade de espaço para a descarga de qualquer caminhão que chegue à estação de carregamento. A priorização de produtos deve ser feita de acordo com a seguinte expressão (1).

$$\max \frac{S_p^E}{CAP_p^E} \quad (1)$$

4.2.2 Ocupação percentual de silos nas estações de carregamento

Considerando-se prioritário aquele produto que tiver a **menor** ocupação percentual de seu silo quando da escolha do caminhão que será descarregado, descarrega-se o produto com maior chance de se esgotar no sistema, o que poderia resultar na formação de filas de navios. A priorização de produtos nesse caso deve ser feita de acordo com a expressão (2).

$$\min \frac{S_p^E}{CAP_p^E} \quad (2)$$

4.2.3 Ocupação de silos no porto

Considerando-se prioritário aquele produto que tiver a **menor** ocupação percentual de seu silo no porto quando da escolha do caminhão que será descarregado, de qual produto será carregado no próximo vagão, qual lote de vagões será transportado e qual será descarregado no porto, prioriza-se o produto que é mais necessário no porto. A priorização de produtos nesse caso deve ser feita de acordo com a expressão (3). Alternativamente, pode-se considerar o mesmo critério em termos absolutos e não relativos, o que corresponde à expressão (4):

$$\min \frac{Silo_p^{porto}}{CAP_p^{porto}} \quad (3)$$

$$\max(Silo_p^{porto} - CAP_p^{porto}) \quad (4)$$

4.2.4 Ocupação de espaço no porto: Silos e navios

Uma evolução natural do critério de priorização anterior é a consideração da capacidade dos porões de navios nomeados ou já em fila quando se analisa o volume total de armazenagem no porto. Caso se considere o critério em termos relativos, encontra-se a expressão (5). Caso considere-se o critério em termos absolutos chega-se à expressão (6).

$$\min \frac{S_p^{porto}}{CAP_p^{porto} + CN * \left(\sum_{i=1}^n i FP_p \right)} \quad (5)$$

$$\max \left\{ CAP_p^{porto} + CN * \left(\sum_{i=1}^n i FP_p \right) - S_p^{porto} \right\} \quad (6)$$

4.2.5 Ocupação de espaço no porto: Vagões, silos e navios

A próxima evolução do critério de priorização anterior é a consideração adicional da carga dos vagões já carregados (em qualquer ponto do sistema), considerando-os como “carga com chegada iminente ao porto”, o que se considerado em termos relativos, resulta na expressão matemática (7); alternativamente, a expressão (8) considera a disponibilidade de espaço em termos absolutos.

$$\min \frac{S_p^{porto} + CV * \left(\sum_{i=1}^n i VT_i^p \right)}{CAP_p^{porto} + CN * \left(\sum_{i=1}^n i FP_p \right)} \quad (1)$$

$$\max CAP_p^{porto} + CN * \left(\sum_{i=1}^n i FP_p \right) - \left(S_p^{porto} + CV * \left(\sum_{i=1}^n i VT_i^p \right) \right) \quad (2)$$

4.2.6 Número de navios em fila

Um critério bastante simples de priorização de produtos é fazê-lo de acordo com o número de navios com demanda para cada produto que estejam nomeados/em fila, tornando prioritário aquele produto que for demandado pelo maior número de navios aguardando em fila, o que matematicamente pode ser representado pela expressão (9).

$$\max \left(\sum_{i=1}^n i FN_p \right) \quad (3)$$

4.3 Processos decisórios

Em um modelo de simulação estocástica convencional estão embutidas diversas decisões que representam decisões operacionais reais, como gerenciamento de filas e distribuição de recursos. Nos modelos tradicionais, entretanto, essas decisões costumam ser representadas por regras bastante simples (PEPS ou UEPS para o tratamento de filas) ou por princípios derivados de teoria de probabilidades (distribuição de recursos de acordo com a demanda média, por exemplo), o que não representa necessariamente os processos reais, uma vez que os operadores do sistema tomam decisões relacionadas a gerenciamento de filas e distribuição de recursos com base no estado do sistema no momento de cada decisão, e não simplesmente com base nos valores médios ou distribuição de probabilidades associados a cada decisão.

De forma a entender quais dessas decisões tem maior impacto sobre o resultado do modelo quando da aplicação das diversas regras de priorização apresentadas, foram mapeados todos os processos decisórios existentes no modelo proposto, os quais são apresentados a seguir.

4.3.1 Carregamento de vagões – Programação na estação intermediária

A definição de qual produto será carregado em cada lote de vagões vazios despachados da estação intermediária é, certamente, um dos processos decisórios com relação mais direta com as atividades desenvolvidas na operação real da ferrovia.

Uma vez que cada estação de carregamento da ferrovia opera mais de um produto, é necessário decidir qual o produto que será carregado nos vagões que partem da estação intermediária com destino a qualquer uma dessas estações.

4.3.2 Carregamento de vagões – Programação no carregamento

Uma variação bastante simples do processo decisório anterior é a definição do produto a ser carregado nos vagões vazios apenas na hora do próprio carregamento, ao invés de tomar essa decisão no momento de despacho dos vagões na estação intermediária.

Essa alternativa tem a vantagem de evitar que se forme uma fila de vagões para carregamento de um produto que pode, momentaneamente, não estar disponível para carregamento.

Entretanto, a sua utilização reflete um menor grau de planejamento da ferrovia no processo de programação de carregamento, e pode não corresponder tão adequadamente à situação real quanto a programação do carregamento durante o despacho na estação intermediária.

4.3.3 Carregamento de navios

No caso do carregamento de navios, aos quais produtos já estão associados por sorteio quando gerados no modelo, a decisão que deve ser feita é de qual navio deve ser carregado. Essa decisão aplica-se à situação em que existem dois ou mais navios em fila aguardando para serem carregados com produtos distintos.

Não foram encontradas operações reais em que o porto não opere de acordo com a ordem de chegada (PEPS), o que parece ser um “padrão de mercado”. Entretanto, a avaliação do potencial impacto que uma política operacional desse tipo teria sobre o sistema permite estimar adequadamente o custo que a operação PEPS impõe ao sistema como um todo em termos de volume total carregado.

4.3.4 Montagem de trens carregados nas estações de carregamento

A montagem de trens nas três estações de carregamento também é um processo decisório relacionado com o gerenciamento de filas, e a substituição de uma regra do tipo PEPS por um critério de priorização tem por objetivo selecionar, dentre os lotes carregados e prontos para transporte, aqueles que transportam os produtos com maior grau de prioridade de acordo com a regra de priorização selecionada.

4.3.5 Montagem de trens carregados na estação intermediária

Igualmente à decisão anterior, essa se destina a formar um trem composto pelos lotes que transportam os produtos com maior grau de prioridade dentre todos os lotes carregados disponíveis, com as diferenças de que pela estação intermediária passam todos os vagões carregados no sistema, e são formados trens com oito lotes de dez vagões carregados, ao invés de quatro lotes.

4.3.6 Descarga de caminhões

A descarga de caminhões que chegam às estações de carregamento está condicionada exclusivamente à disponibilidade da moega e à existência de espaço vazio nos silos de armazenamento, qualquer que seja a regra operacional de gerenciamento de filas adotada.

Dessa forma, toda vez que a moega de descarga estiver ociosa, existir espaço disponível em silos e existirem caminhões aguardando para serem descarregados, é possível substituir a regra tradicional de gerenciamento de filas (PEPS) e selecionar para descarga um caminhão que contenha um produto com maior grau de prioridade em detrimento daquele que se encontra no primeiro lugar da fila.

4.3.7 Descarga de vagões no porto

A descarga de vagões no porto é análoga à descarga de caminhões nas estações de carregamento, sendo necessárias à sua inicialização a disponibilidade da moega ferroviária e de espaço nos silos de armazenagem. Apesar da similaridade entre as duas operações, é necessário fazer a hipótese adicional de que sempre existirá espaço disponível para a manobra de vagões no pátio ferroviário no porto.

4.3.8 Distribuição de vagões

A distribuição de vagões é o processo decisório mais complexo dentre os existentes na operação do sistema real e, talvez por isso, seja aquele de mais inadequada representação em modelos de simulação estocástica convencional.

Em um modelo puramente estocástico quando aplicado ao modelo proposto, a distribuição de vagões vazios seria realizada de forma proporcional à demanda por vagões de cada ponto de carga. A alternativa estudada nesse trabalho, por outro lado, propõe o envio dos vagões vazios para aquela estação que tiver disponibilidade do produto prioritário e que se encontrar mais próximo à estação intermediária.

De forma a garantir a eficácia do procedimento, entretanto, é necessário verificar a disponibilidade de caminhões carregados para descarga e o número de vagões já disponibilizados para carregamento em cada estação, de forma que evite a formação de filas

de vagões vazios à espera de produto para carregamento nas estações mais próximas enquanto as estações mais distantes da estação intermediária ficam ociosas.

5. Experimentos computacionais

Inicialmente foi simulado o cenário que não considera nenhuma regra de priorização para as filas, e que serve de base de comparação para as demais configurações do modelo avaliadas. Esse cenário resultou em um total de 4,02 milhões de toneladas transportadas e 1,1 milhão de toneladas que não puderam ser transportadas e, por isso, foram consideradas demanda perdida.

O processo de simulação das possíveis associações de regras de priorização a processos decisórios iniciou-se pela associação uma-a-uma de regras de priorização a processos decisórios, 53 combinações, a fim de buscar quais as melhores combinações possíveis.

Uma vez que a simulação de todas as combinações possíveis resultaria em mais de 10 milhões de configurações, decidiu-se utilizar um procedimento similar ao de Hooke-and-Jeeves para combinar as alternativas que apresentaram melhor desempenho nas simulações uma-a-uma.

Como ponto de partida para esse procedimento escolheu-se a combinação da melhor regra de priorização com resultado positivo para cada um dos processos decisórios. Em seguida iniciou-se um processo iterativo testando a melhor configuração encontrada para o modelo com apenas uma regra de priorização de produtos diferente para um dos processos decisórios.

Após testar todas as regras de priorização para o processo decisório sendo analisado, escolhia-se aquela regra que tivesse resultado em melhor desempenho do sistema e passava-se a analisar um novo processo decisório da mesma forma que a anterior.

Esse procedimento resultou em dezenas de combinações que resultaram no transporte de 4,55 a 4,57 milhões de toneladas, o que corresponde a 13,7% de incremento do total transportado no cenário de referência, ou ainda o transporte adicional de cerca de 50% da demanda perdida por aquele modelo.

Numa análise mais detalhada dos resultados das combinações de melhor desempenho, entretanto, percebe-se que o atendimento à demanda por transporte não foi de forma alguma

uniforme. Se analisados os gráficos das Figuras 2 e 3, por exemplo, percebe-se que quanto maior a demanda de um determinado produto ou de uma determinada estação, menor é a proporção dessa demanda que não é atendida.

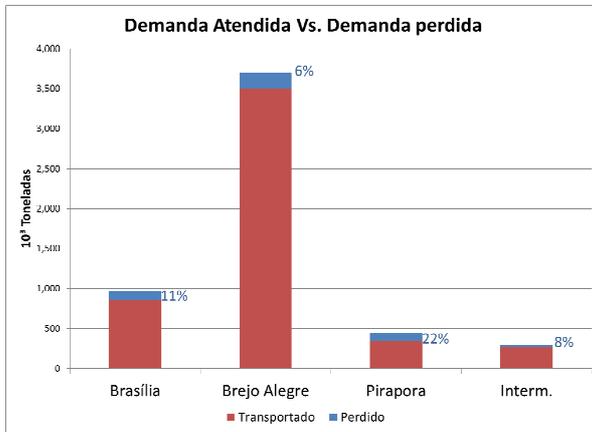


Figura 2: Atendimento por estação

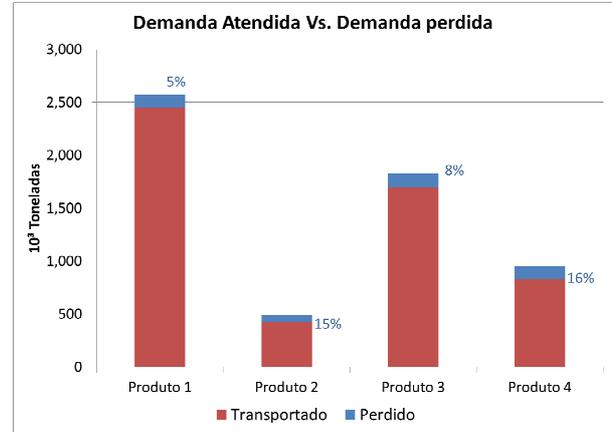


Figura 3: Atendimento por produto

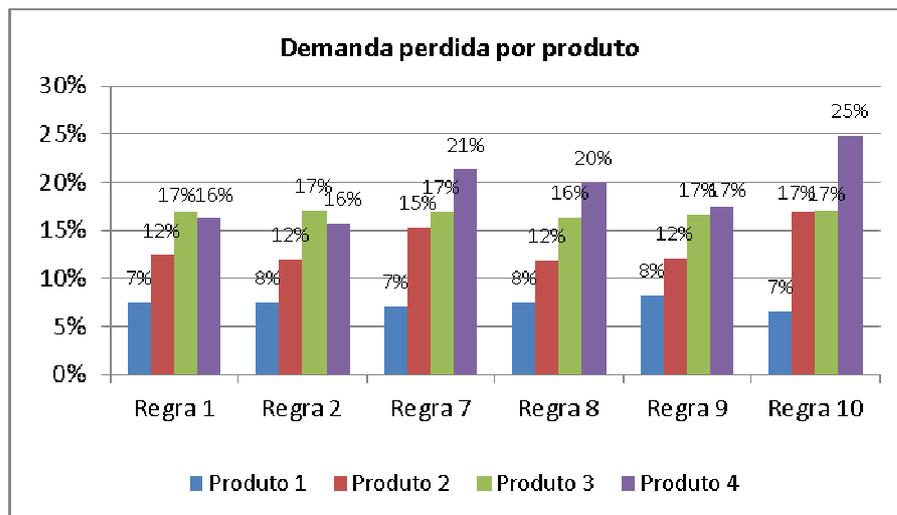


Figura 4: Comparação de regras de priorização relativas e absolutas

Apesar da diferença, pode-se verificar no gráfico da Figura 4 que as regras de priorização proporcionais (1, 2 e 9) resultaram em atendimento mais homogêneo da demanda quando aplicadas a todos os processos decisórios, enquanto que as regras absolutas resultaram em diferenças muito maiores no atendimento da demanda, principalmente dos produtos 3 e 4.

O outro resultado relevante constatado após a análise dos modelos de melhor desempenho é a verificação de que o gargalo do sistema é o porto.

Como pode ser facilmente verificado na Figura 5, o porto apresenta uma alta frequência para filas bastante longas de vagões carregados. Esse fato, aliado à baixa frequência de fila de vagões carregados nas estações de carregamento, indica que os vagões carregados estão sendo movimentados de maneira eficiente a partir das estações de carregamento, mas não estão sendo movimentados adequadamente a partir da estação intermediária, ficando parados em longas filas no Porto de Tubarão.

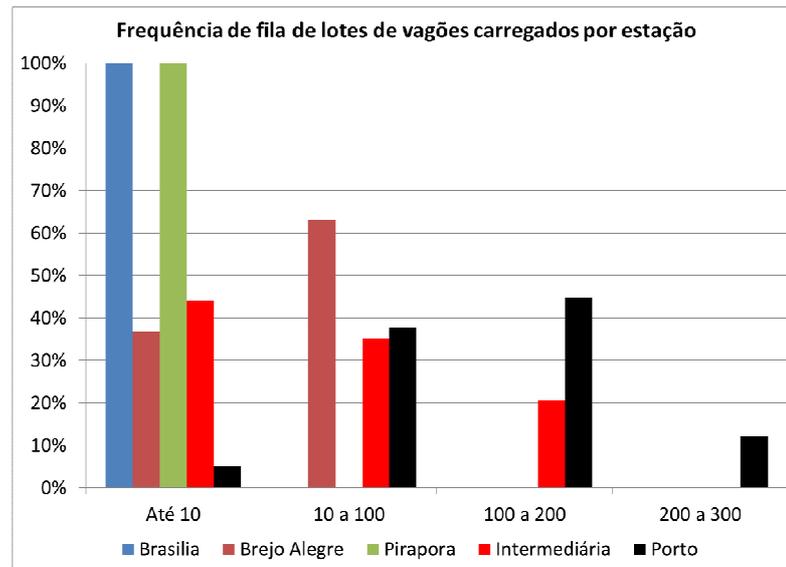


Figura 5: Frequência de filas de lotes de vagões carregados por estação de origem

O último resultado que merece ser citado com destaque é o perfil da demanda perdida na forma de caminhões que desistiram de descarregar nas estações ferroviárias e dos navios que desistiram de atracar no porto.

O último resultado que merece ser citado com destaque é o perfil da demanda perdida na forma de caminhões que desistiram de descarregar nas estações ferroviárias e dos navios que desistiram de atracar no porto.

Conforme pode ser verificado no gráfico da Figura 6, foram perdidas quantidades distintas de produtos pelas interfaces rodoviária e ferroviária do sistema, o que provoca um desbalanceamento do sistema. Essa verificação permite concluir que não é razoável a utilização de distribuições independentes de chegada de navios e caminhões ao sistema, devendo ser considerada a utilização de outros tipos de distribuições.

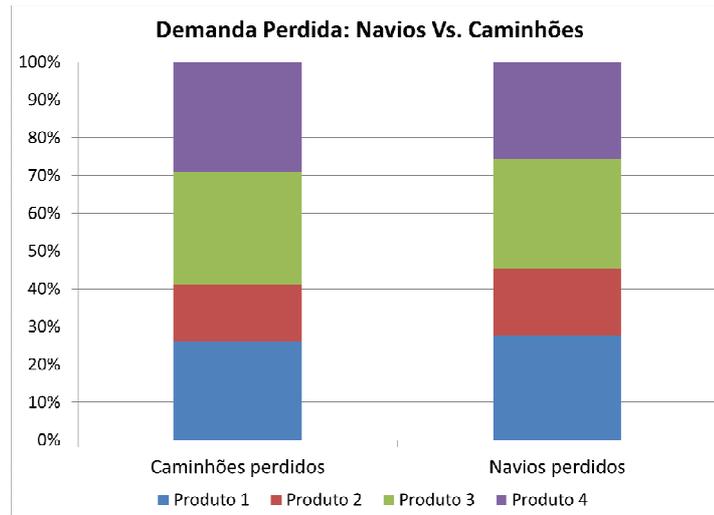


Figura 6: Demandas perdidas nas interfaces rodo-ferroviária e ferro-marítima

6. Considerações finais

Esta pesquisa tratou da modelagem de um sistema ferroviário fechado de transporte de granéis agrícolas envolvendo múltiplos pontos de carregamento, um único porto de destino e duas ferrovias operando em regime de tráfego mútuo.

A primeira e mais importante conclusão que pode ser traçada a partir dos resultados obtidos nesse trabalho é que regras de priorização se mostraram substitutas adequadas às regras comumente utilizadas em modelos de simulação estocástica e baseadas em sorteios aleatórios.

Como resultado da introdução das regras de priorização no modelo de referência, obteve-se um modelo mais fiel à operação real, uma vez que representa melhor as estratégias operacionais utilizadas e que permite o estudo de estratégias operacionais alternativas.

Uma vez que a introdução das regras de priorização tornou possível o desenvolvimento de um modelo próximo à operação real e que diversas estratégias operacionais puderam ser testadas, determinaram-se as melhores estratégias de gerenciamento das filas de caminhões à espera de descarga, de navios à espera de atracação, e das filas de vagões vazios e carregados nas estações ferroviárias e no porto, bem como as melhores estratégias para distribuição de vagões vazios para as diversas estações de carregamento consideradas no modelo.

Embora tenha sido possível encontrar um conjunto de melhores estratégias para gerenciamento de filas e distribuição de vagões vazios, não foram obtidos resultados conclusivos em relação à melhor regra de priorização a ser aplicada a cada processo decisório.

A segunda conclusão desse trabalho é que a abordagem híbrida otimização-simulação possibilitou representar o sistema real de maneira mais realista. Apesar disso, é necessário que futuras análises desse tipo de modelo explorem os demais resultados do modelo, como formação de filas, atendimento dos diversos produtos em intervalos de tempo menores, etc, para que se possam determinar exatamente os efeitos.

No modelo apresentado nesse trabalho os processos de chegada de navios e caminhões foram modelados como processos independentes, e apesar de apresentarem resultados compatíveis para cada um dos produtos operados e em cada um dos trimestres simulados, a possibilidade de perda de demanda resultou diferença entre as perdas de demanda entre esses dois elementos, presumivelmente reduzindo o desempenho do sistema.

Por conta desse resultado, futuros desenvolvimentos desse modelo devem, também, incluir a consideração de que existe uma relação entre chegada de caminhões às estações de carregamento e de navios ao porto, o que é explicitamente planejado pelos donos de carga transportada pelo sistema modelado.

Essa alteração, apesar de parecer razoavelmente complexa, pode ser alcançada com a introdução de um dispositivo de ajuste da distribuição de probabilidades para os diversos produtos à medida que a demanda for perdida (caminhões desistirem de descarregar) pelas estações de carregamento e que verificar-se que os grãos já carregados em silos das estações de carregamento ou do porto ou em vagões são um volume demasiado grande para os navios já nomeados para atracação, quando se deverá determinar que o próximo navio a ser nomeado se destine a carregar tal produto que se encontra em “excesso” no sistema.

Um possível aprimoramento desse modelo seria a incorporação de um algoritmo específico para a geração de números aleatórios, tal como, por exemplo, o algoritmo Mersenne Twister (Matsumoto e Nishimura, 1998), em substituição à função de geração de números aleatórios do VBA. Tal algoritmo proporciona um período mais longo, de $2^{19937}-1$, diminuindo a probabilidade dos números sorteados se repetirem.

Referências

- Everett, J. (2001) Iron ore production scheduling to improve product quality. *European Journal of Operational Research*, n. 129, p 355-361.
- Fioroni, M. M. (2007) Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: Avaliação de alternativas para direcionamento de composições. 216p, Tese de Doutorado, POLI-USP, São Paulo, SP
- Jacobson, S. H., Schruben, L. W. (1989) Techniques for simulation response optimization. *Operation Research Letters*, n. 8, p 1-9.
- Matsumoto, M. e Nishimura, T. (1998) Mersenne Twister: A 623-Dimensionally EquidistributedUniform Pseudo-Random Number Generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, v.8, n.1, p. 3-30.
- Pachl, J. (2002) *Railway operation and control*, EUA: VTD Rail Publishing, 239 p.
- Pflug, G. (2008) *Optimization of Stochastic Models: The Interface between Simulation and Optimization*. Massachusetts, EUA: Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2008. 400p.