RODOLFO CELESTINO DOS SANTOS SILVA

Análises de tradeoff em sistemas de transporte aquaviário com simulação de eventos discretos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:

Engenharia Naval e Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo

2012

DEDICATÓRIA

À minha mãe e minha irmã,

mulheres da minha vida e motivos de minha dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Prof. Dr. Rui Carlos Botter, pela amizade, orientação, confiança depositada no meu trabalho, e por todas as oportunidades proporcionadas nesses últimos 6 anos.

Aos mestres e amigos Newton e Medina, mentores intelectuais e profissionais.

A todos do CILIP, que compõem o melhor ambiente de trabalho possível! Em especial, aos companheiros de todas as horas: Edson, João e Thiago.

Aos amigos e colegas da Poli, que desde o início da graduação fazem deste o melhor lugar do mundo.

Aos amigos da estrada do Rock!

A toda minha família e amigos pelo apoio incondicional na dedicação a este trabalho. Sobretudo, à tia Ani e ao tio Orlando, sem os quais nunca teria chegado até aqui.

Aos meus primos e primas, tão importantes em minha vida, e provas vivas de que os verdadeiros laços não precisam ser de sangue.

À Maria, por me fazer acreditar nas coisas mais belas da vida e pelo sorriso que me estampa no rosto, maior a cada dia.

Ao Tio Dé, por me ter dito uma vez: “Faça engenharia!”.

“Se um dia tiver que escolher entre o mundo e o amor, lembre-se:
Se escolher o mundo ficará sem o amor,
mas, se escolher o amor, com ele você conquistará o mundo.”

Albert Einsten

RESUMO

O trabalho apresenta inicialmente a importância da tomada de decisão em uma sociedade com recursos limitados e muitos interesses antagônicos. Essas decisões com base em objetivos conflitantes, independente do seu grau de importância, geram ganhos em alguns aspectos e perdas em outros, e a isto se denomina *tradeoff*. Em problemas complexos, uma decisão mal tomada, ou um estudo de *tradeoff* mal conduzido podem afetar significativamente aspectos muito relevantes, como o dimensionamento de redes de transporte, por exemplo. Assim, a proposta deste trabalho é oferecer um procedimento para auxilio à tomada de decisão em sistemas de transporte aquaviário, baseado em análises com múltiplos critérios. Além disso, o estudo visa utilizar a técnica de simulação de eventos discretos para fornecer subsídio a estes estudos de *tradeoff*. É realizada também uma aplicação do método descrito juntamente com um modelo de simulação para o dimensionamento de um sistema de transporte aquaviário específico, contando com análises de sensibilidade. A aplicação realizada foi conclusiva e comprovou a eficácia do método desenvolvido para o auxílio à decisão em problemas desse porte.

Palavras Chave: *Tradeoff*, simulação de eventos discretos, sistemas logísticos.

ABSTRACT

This work primarily highlights the importance of decision making in a society with limited resources and several antagonistics interests. Decisions based on conflicting goals, regardless of their importance level, might generate positive gains associated to a certain number of variables and losses associated to others. This process is known as tradeoff. In complex problems, such as transportation networks planning, taking a bad decision or carrying out a bad tradeoff study, may affect matters of primary interests of the problem players. The proposal of this work is providing a procedure in order to support decision making process in water transportation systems based on multi-criteria analysis. In addition, the study aims at using the technique of discrete event simulation to provide subsidies to these trade-off studies. The work also presents an application of the proposed methodology, concomitantly with a simulation model for the planning of a specific maritime transportation system, including the respective sensitivity analyzes. The application was successful and conclusive about the effectiveness of the developed method helping the decision making for problems of this magnitude.

Key Words: Tradeoff, discret events simulation, logistic systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estoque com reabastecimento não instantâneo. Adaptado de Ballou (2006). 13
Figura 2: Funções de Valor comumente utilizadas (SMITH, 2006 – WYMORE, 1977)..... 24
Figura 3: Processo de estruturação e resolução da metodologia MCDA (BELTON e STEWART, 2001)..... 27
Figura 4: Aplicabilidade da simulação (CHWIF e MEDINA, 2007). 31
Figura 5: Representação da localização dos portos..... 37
Figura 6: Subsistemas e componentes do sistema de recebimento de insumos. 51
Figura 7: Fluxograma do subsistema navegação, portos e estoque de minério. 52
Figura 8: Fluxograma do subsistema usina..... 55
Figura 9: Função de valor – Paralisações da usina..... 64
Figura 10: Função de valor –VPL..... 66
Figura 11: Função de valor – Custos operacionais. 68
Figura 12: Função de valor – Tempo suportado em fila. 71
Figura 13: Função de valor – Tempo de espera para descarregar na usina. ... 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de manutenção da frota. 40
Tabela 2: Valores dos custos operacionais considerados (por navio). 44
Tabela 3: Classificação de importância dos critérios de decisão e pesos normalizados. 47
Tabela 4: Composição dos tempos de ciclo. 56
Tabela 5: Validação modelo de simulação. 57
Tabela 6: Cenários simulados. 59
Tabela 7: Principais resultados simulação. 62
Tabela 8: Pontuações - Paralisações da usina. 65
Tabela 9: Pontuações - Resultados de VPL. 67
Tabela 10: Pontuações - Custos Operacionais. 70
Tabela 11: Pontuações - Filas suportadas na origem. 72
Tabela 12: Pontuações - % Minério SE. 73
Tabela 13: Pontuações - Tempo de espera para descarga. 75
Tabela 14: Pontuações ponderadas de todos os cenários. 76
Tabela 15: Classificação das soluções iniciais. 77
Tabela 16: Primeira sensibilidade nos critérios. 79
Tabela 17: Classificação da primeira análise de sensibilidade. 80
Tabela 18: Segunda sensibilidade nos critérios. 81
Tabela 19: Classificação da segunda análise de sensibilidade. 81
Tabela 20: Descrição dos cenários adicionais. 83
Tabela 21: Resultados gerais cenários adicionais. 83
Tabela 22: Principais resultados cenários adicionais. 84
Tabela 23: Pontuações - VPL novas análises. 85
Tabela 24: Pontuações - Espera para descarga novas análises. 86
Tabela 25: Pontuações - Custos operacionais novas análises. 87
Tabela 26: Pontuações ponderadas novas análises. 88
Tabela 27: Classificação novas análises. 89
Tabela 28: Classificação sensibilidade novas análises. 90

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

1.1 DECISÕES EM SISTEMAS DE TRANSPORTE 12

1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO 16

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 16

2 ESTUDOS DE *TRADEOFF* 18

2.1 COMPONENTES BÁSICOS DE UM ESTUDO FORMAL DE *TRADEOFF* 20

2.1.1 Definição do Problema 20

2.1.2 Critérios de avaliação 21

2.1.3 Pesos de importância 21

2.1.4 Alternativas de Solução 22

2.1.5 Valores de entrada 22

2.1.6 Funções de valor e pontuações por critério 23

2.1.7 Funções de ponderação 24

2.1.8 Recomendações de alternativas 25

2.1.9 Análises de sensibilidade 25

2.2 CRITÉRIOS DE DECISÃO E METODOLOGIA MULTICRITÉRIO 25

3 A APLICABILIDADE DA SIMULAÇÃO 29

3.1 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS 30

4 APLICAÇÃO DE ESTUDO DE *TRADEOFF* A UM SISTEMA DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO COM SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS 36

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 36

4.2 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO 40

4.3 PESOS DE IMPORTÂNCIA 46

4.4 ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO 48

4.5 VALORES DE ENTRADA 49

4.5.1 Concepção do modelo de simulação..... 50

4.5.2 Implementação do modelo de simulação 55

4.5.3 Análise do modelo de simulação 58

4.6 FUNÇÕES DE VALOR E PONTUAÇÕES POR CRITÉRIO 63

4.6.1 Paralisações da usina 63

4.6.2 Valor presente líquido (VPL)..... 65

4.6.3 Custos operacionais 67

4.6.4 Tempo suportado em fila na origem 71

4.6.5 Proporção de minério de ferro SE 72

4.6.6 Tempo de espera para descarregar na usina..... 73

4.7 FUNÇÕES DE PONDERAÇÃO 75

4.8 RECOMENDAÇÃO DE ALTERNATIVAS 76

4.9 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE..... 78

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 93

REFERÊNCIAS..... 96

APÊNDICES 102

1 INTRODUÇÃO

“A cada escolha, uma renúncia”. Este dito popular tornou-se clichê, mas tem fundamento. As escolhas permeiam o cotidiano das pessoas e a cada instante decisões precisam ser tomadas. Estas decisões, em sua maioria, são pouco relevantes e sem impactos no longo prazo, como: que rota escolher para ir ao trabalho? Em outras ocasiões, são mais significativas, como: que faculdade cursar? Contudo, independente do nível de importância das decisões e de suas consequências, elas quase sempre geram ganhos em algum aspecto e perdas em outro.

Segundo Mankiw (2006), as tomadas de decisão e o gerenciamento de recursos são importantes, pois os recursos são escassos. Para se ter algo que se quer, muitas vezes deve-se abrir mão de algo que também se quer, e isto faz com que se crie um confronto de objetivos. De acordo com o autor, o custo de algo é, na verdade, tudo aquilo de que se abdica para tê-lo. Assim, em cada decisão deve-se considerar os custos e benefícios das alternativas, acarretando em que as pessoas enfrentem *tradeoffs* corriqueiramente.

Quando se trata de problemas complexos, de grande importância e impacto para muitos seres humanos, como o dimensionamento de um sistema de transporte aquaviário, estes ganhos e perdas podem ser desastrosos se mal administrados. Portanto, entende-se que existe a necessidade de um embasamento científico para realização destas análises e decisões, e este trabalho se propõe a fornecer subsídio para isto.

1.1 Decisões em sistemas de transporte

Nos sistemas de transporte em geral, existem alguns dilemas que merecem atenção especial, como, por exemplo, a questão “Frota VS. Estoque”. Por exemplo, em sistemas que lidam com produtos de alto valor agregado, pode ser vantajoso possuir uma rede de transporte com melhor desempenho operacional, ainda que mais custosa, a fim de se reduzir a necessidade de grandes estoques, e, consequentemente o alto custo de capital envolvido.

Assim, muitas vezes um analista se depara com a necessidade de fazer escolhas entre: adquirir mais caminhões ou melhorar seu armazém? Adquirir mais chatas fluviais ou aumentar o nível de seu estoque médio? Ou ainda, qual o tamanho do navio ideal para transportar um produto entre 2 portos? Dentre tantas outras decisões.

Dessa forma, dado um sistema de transporte em ciclo fechado, entende-se que decidir onde se investir mais, se em capacidade de transporte ou em capacidade de armazenagem, por exemplo, não é uma tarefa simples.

Blumenfeld et al. (1985), Blumenfeld et al. (1985) e Burns et al. (1985) concordam que para se obter a minimização do custo total de uma rede de transportes, deve haver uma determinação simultânea de rotas e lotes ótimos, por exemplo, e para isso focam em análises de *tradeoff* entre custos de armazenamento e transporte.

Com relação aos sistemas de estocagem, Lee, Nahmias (1993) e Ballou (2006) apresentam em seus trabalhos diversos modelos de controle e auxílio nas

decisões sobre políticas de estoque. Segundo os autores, mesmo em sistemas simples com um único produto e uma única localização, o número de modelos que podem ser utilizados é grande. Geralmente, pode-se definir a estrutura essencial de um modelo de controle de estoques a ser utilizado de acordo com três variáveis principais: demanda, custos e aspectos físicos do sistema (como prazos de entrega, políticas de perda de vendas, entre outros).

Lee e Nahmias (1993) apresentam ainda modelos de lotes econômicos para diversos tipos de sistemas, com demandas determinísticas e estocásticas, prazos de entrega nulo, existentes e fixos ou variáveis, dentre diversas situações. O sistema abordado no capítulo 4 do presente trabalho tem como características principais: demanda determinística, reposição com prazos de entrega seguindo distribuições estocásticas e, ainda, reabastecimento não instantâneo (Figura 1).

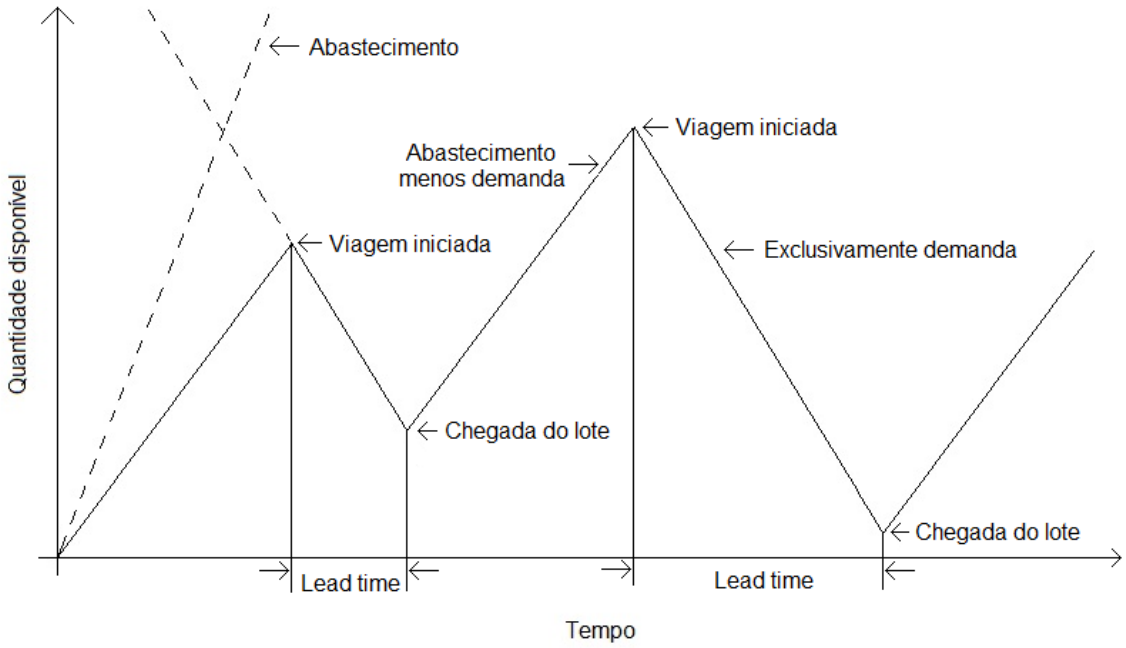


Figura 1: Estoque com reabastecimento não instantâneo. Adaptado de Ballou (2006).

Referente a redes de transporte aquaviário, Kendall (1972) discorre sobre uma teoria acerca do tamanho ótimo de um navio. Ele afirma que uma prática normalmente utilizada nestes sistemas era a de se realizar o transporte entre dois portos com os maiores navios que estes pudessem receber em suas instalações. No entanto, havia, à época, uma série de indícios e evidências que sugeriam que a demanda do produto transportado, o valor deste e a duração da viagem é que deveriam determinar o tamanho dos navios, e, consequentemente, a frequência de viagens e o número de visitas a um determinado porto.

O autor apresenta dados e formulações matemáticas, e demonstra que quanto maior um navio, menor o custo por tonelada no transporte de um determinado item, como já era esperado, pelo ganho de escala que se obtém. Entretanto, os custos portuários, e os relacionados à estocagem e movimentação (manipulação) destes itens, crescem à medida que se incrementa o tamanho do navio. Assim, em seu trabalho são realizadas diversas comparações e combinações entre custos de transporte e custos de armazenagem de acordo com o tamanho dos navios, variando a demanda, a distância entre os portos, e o valor do produto.

Ora, se há 40 anos já existia uma preocupação em se considerar diversos parâmetros ao se dimensionar um sistema de caráter complexo como este, e que possui diversos interesses conflitantes (como frota vs. estoque, por exemplo), por que não buscar uma forma de fornecer subsídio a tais análises e decisões?

Silva et al. (2009) corroboram neste sentido e demonstram, através de um modelo de simulação de eventos discretos, que para um sistema específico de transporte fluvial de etanol, ao se trabalhar com mais comboios, reduz-se a necessidade de capacidade nos tanques de armazenagem dos terminais, e que a recíproca é verdadeira. Isto é, quando se trabalha com maiores capacidades de estocagem existe a possibilidade de redução de frota. Uma simples análise operacional não é capaz de auxiliar totalmente na decisão entre as alternativas. Um julgamento puramente econômico também pode deixar a desejar em alguns aspectos, como confiabilidade do sistema, ou risco, por exemplo.

Em outro exemplo, Winston (2004) apresenta diversos casos de *tradeoff* no âmbito da pesquisa operacional e utiliza a técnica de otimização de Pareto para analisar problemas com 2 objetivos (critérios) conflitantes.

Nesta técnica, uma dada solução é ótima de Pareto, se nenhuma outra solução for pelo menos igual a esta em todos os critérios, e estritamente melhor que ela em pelo menos um critério. Segundo o autor, em situações onde há mais de 2 critérios pode ser útil analisar as curvas de *tradeoffs* existentes entre diferentes pares de objetivos.

Em suma, entende-se que se muitos aspectos são importantes a certo sistema, o ideal seria que todos fossem analisados ao mesmo tempo, levando-se em conta todas as suas interações. Entretanto, o que se observa, usualmente, é uma tendência a se analisar um dado problema e indicar as melhores opções baseado em um critério específico, geralmente econômico.

Dada a dificuldade em se considerar todos os elementos que deveriam ser observados simultaneamente, é que se busca no presente trabalho evidenciar os procedimentos, ou metodologia, a serem seguidos, de forma a auxiliar nestes estudos.

Com base nessas informações, é que também se busca verificar a aplicabilidade da técnica de simulação de eventos discretos para auxiliar em estudos de *tradeoff* realizados em sistemas de transporte aquaviário.

1.2 Objetivos do estudo

Os principais objetivos do trabalho são: Explicitar os principais componentes de um estudo de *tradeoff*, e realizar a utilização de um modelo de simulação de eventos discretos que provê os elementos necessários à realização destes estudos, em sistemas de transporte aquaviário; Realizar uma aplicação da ferramenta desenvolvida, e da metodologia estudada para se obter resultados de *tradeoff*, baseado em análises com múltiplos critérios, em um sistema de transporte aquaviário específico.

1.3 Estrutura da dissertação

O capítulo 2 determina os tipos de estudos de *tradeoff* existentes, as aplicações destes, e evidencia os componentes básicos de um estudo formal de *tradeoff*. Além disso, é elaborada uma sucinta revisão acerca da metodologia multicritério de apoio à decisão, com explicações da técnica e indicações dos benefícios que podem ser obtidos através dela.

No capítulo 3 o leitor encontrará considerações acerca da aplicabilidade da simulação, e a revisão de trabalhos que utilizam simulação de eventos discretos na resolução de problemas logísticos.

O emprego dos conceitos abordados nos capítulos 2 e 3, isto é, a elaboração de um estudo formal de *tradeoff* baseado em múltiplos critérios, aplicado a um sistema de transporte aquaviário, com o auxílio de simulação de eventos discretos, é encontrado no capítulo 4 do trabalho.

O capítulo 5 apresenta, por fim, as conclusões do presente estudo e recomendações para trabalhos futuros.

2 ESTUDOS DE *TRADEOFF*

Um estudo de *tradeoff* é uma escolha entre alternativas, na qual se torna necessário ter uma perda em um critério para se obter ganho em outro (SMITH, 2006).

O conselho internacional de engenharia de sistemas (INCOSE, 2004) descreve três tipos de estudos de *tradeoff* geralmente realizados:

- *Tradeoff* formal: utiliza uma metodologia pré-definida, com procedimentos específicos e é formalmente estudado e documentado. Usualmente aplicado a problemas relevantes e com impactos no longo prazo;
- *Tradeoff* informal: cujos estudos seguem alguma estrutura lógico-racional, mas, não há necessariamente um passo a passo a ser seguido, tampouco uma documentação do processo.
- *Tradeoff* mental: onde a decisão é tomada com todas as etapas do estudo sendo feitas de forma implícita, em situações do dia a dia, e sem o rigor e a formalidade dos supracitados.

Decisões que envolvem *tradeoffs* mentais são realizadas frequentemente no cotidiano das pessoas. Uma simples compra no supermercado, por exemplo, envolve uma série de *tradeoffs* mentais entre diversos produtos de um mesmo segmento, baseado em múltiplos critérios, como: marcas, preços, benefícios, quantidades, apresentação, dentre outros. Contudo, este é um exemplo de decisão cujos reflexos ou consequências não serão de extrema importância à vida.

No entanto, quando se trata de tomadas de decisões em grandes sistemas logísticos, como os de transportes aquaviários, estudo do presente trabalho, qualquer decisão tomada influenciará direta ou indiretamente na qualidade de vida e bem-estar de muitos envolvidos. E é por isso que se busca um embasamento científico para tais decisões.

De encontro com este pensamento, tem-se que um estudo formal de *tradeoff* é requisitado quando: uma escolha entre alternativas se faz necessária; existe um tempo limite para resolução do problema; e, a decisão pode ter consequências no longo prazo (SMITH, 2006 e LANDMAN, 1993).

Estudos formais de *tradeoff* se diferenciam de problemas de otimização principalmente pela questão da exatidão das informações. Se por um lado, modelos de otimização são regidos por formulações matemáticas que provêm valores exatos na busca de uma solução ótima (geralmente baseadas em um critério único, como minimização de custos, por exemplo), estudos de *tradeoff*, por sua vez, não têm essa característica. Ainda que sejam conhecidos os valores exatos de resposta de uma dada alternativa, os pesos de importância de cada critério analisado em um *tradeoff* podem variar de decisor para decisor, estando sujeitos à subjetividade da avaliação humana, ou até mesmo sendo de difícil determinação sem contínuas reavaliações da realidade (SMITH, 2006).

2.1 Componentes básicos de um estudo formal de *tradeoff*

Buscando a realização de tomadas de decisões bem sucedidas e embasadas, Smith (2006) apresenta uma lista de componentes básicos que dão as coordenadas para o desenvolvimento de estudos de *tradeoff:*

2.1.1 Definição do Problema

A definição do problema deve ser realizada com base nas necessidades do requisitante. Uma boa definição do problema envolve também um delineamento adequado do escopo do problema. Por exemplo: em um dado sistema de transporte aquaviário há uma determinada frota que opera em ciclo fechado entre 2 portos, porém, não se tem o controle e nenhuma possibilidade de atuação em melhorias nos equipamentos portuários para carga e descarga dos navios. Assim, o escopo do estudo deve se limitar ao dimensionamento da frota e dos estoques, não cabendo a este a análise dos portos e seus equipamentos propriamente ditos. E as necessidades do requisitante podem ser, por exemplo, transportar toda a demanda com agilidade, levando-se em conta também os custos e as emissões de poluentes, mas, sem se preocupar com melhoria nos portos. Por fim, somente com um escopo bem definido e alinhado às necessidades do estudo é que se conseguirá assegurar que as alternativas de solução analisadas venham ao encontro das expectativas dos tomadores de decisão e as escolhas sejam eficazes (KEENEY, 2002).

2.1.2 Critérios de avaliação

A determinação dos critérios de avaliação das soluções é uma etapa muito importante do estudo de *tradeoff*. Os critérios devem ser definidos de acordo com os requisitos do sistema (estabelecidos na definição do problema), de modo a auxiliar na diferenciação das alternativas analisadas, e podem ser classificados em critérios de exclusão (viabilidade) e/ou critérios de classificação. Além disso, de acordo com Rosch et al. (1976) é preferível que os critérios sejam independentes, e é importante que estes sejam organizados em níveis hierárquicos, a fim de se evitar um dos equívocos mais comuns na modelagem de sistemas: a mistura de elementos de diferentes níveis. Os critérios mais importantes geralmente são: Custo, prazo, desempenho, risco (INCOSE, 2004), além das questões sociais e ambientais. Uma revisão mais aprofundada sobre critérios de decisão e análises baseadas em múltiplos critérios é realizada na seção 2.2 desta dissertação.

2.1.3 Pesos de importância

O principal objetivo dos estudos de *tradeoff* é lidar simultaneamente com dois ou mais critérios durante a análise de um problema. Assim, cada critério deve ter seu peso de importância estabelecido para a realização de uma ponderação adequada na avaliação das alternativas. Ordens de importância dos critérios podem ser transformadas em pesos através de diversas técnicas (Stillwell et al., 1981). Um exemplo de procedimento matemático que pode ser utilizado para isto é o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) (SAATY, 1980).

2.1.4 Alternativas de Solução

Neste ponto são geradas as alternativas de solução que serão analisadas. O mais apropriado é que as alternativas de solução sejam elaboradas após a definição do problema e da determinação dos requisitos do sistema (que originam os critérios de avaliação). Além disso, os próprios pesos de importância de cada critério de avaliação podem ser definidos antes de se procurar as soluções propriamente ditas.

O principal motivo para tal abordagem é a busca por um estudo baseado nas necessidades do sistema e não em uma solução ou classe de soluções (WYMORE, 2004).

2.1.5 Valores de entrada

Os valores de entrada utilizados nos estudos de *tradeoff* são preferencialmente quantitativos e podem ser obtidos de forma empírica, ou ainda, através de modelos.

Quanto aos fatores qualitativos, deve-se mensurá-los para inclusão nos estudos. Keeney (2002) cita um exemplo interessante de necessidade de mensuração qualitativa: uma forma óbvia de se obter uma medida de desmatamento florestal seria por hectares de floresta perdidos. No entanto, um hectare de uma floresta pode ser muito diferente de um hectare em outra floresta. Uma pode ser muito mais densa do que a outra, ou ser parte de uma reserva, ou ainda, fornecer abrigo para animais em risco de extinção. Obviamente, tais considerações poderiam afetar significativamente o valor de

um hectare de cada floresta. Em situações complexas como esta, pode-se fazer necessária uma análise qualitativa de cada região envolvendo aspectos físicos e sociais, por exemplo, a fim de se determinar uma mensuração adequada para cada situação.

Segundo Smith (2006), a coleta, preparação e seleção dos valores de entrada podem estar sujeitos a imprecisões e incerteza, especialmente quando há subjetividade nas análises. Para a melhoria ou aceitação de valores de entrada incertos ou até mesmo a obtenção de valores desconhecidos, os procedimentos comumente utilizados são:

a. Suposições ou hipóteses;
b. Aproximações;
c. **Simulação;**
d. Protótipo.

2.1.6 Funções de valor e pontuações por critério

As funções de valor recebem os valores de entrada obtidos e proporcionam ao decisor as notas, ou pontuações, geralmente normalizadas (0 a 1), para cada critério estabelecido. As formas das funções de valor podem ser determinadas matematicamente, de maneira direta e objetiva, e, usualmente, envolvem em sua elaboração opiniões de especialistas de diversas áreas afetadas pelo problema. Com isso, a criação das funções de valor pode levar muito tempo. Assim, é interessante que a equipe de analistas desenvolva previamente uma série de funções de valor, e que apenas as revise e adapte a cada situação ou necessidade (WYMORE, 1993 e DANIELS et al., 2001). As formas mais

comuns de funções de valor são apresentadas por Wymore (1977), de acordo com a Figura 2.

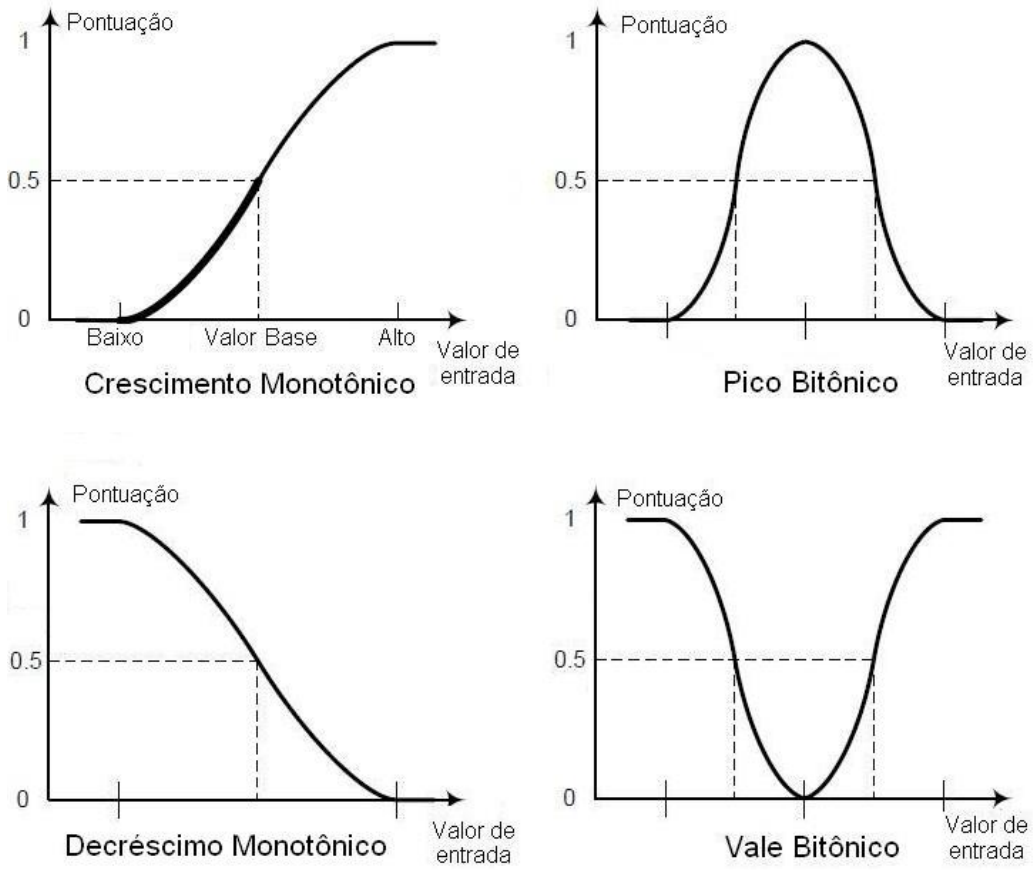


Figura 2: Funções de Valor comumente utilizadas (SMITH, 2006 – WYMORE, 1977).

Cada critério recebe, então, uma pontuação para cada alternativa analisada, através da utilização das funções de valor previamente estabelecidas.

2.1.7 Funções de ponderação

Smith (2006) apresenta funções de ponderação de diversos tipos. De acordo com estudos do autor, apesar de possuírem diversas formas, as diferentes funções de ponderação podem produzir resultados semelhantes, que diferem apenas por constantes multiplicativas, de forma muito consistente e sem

divergência. Uma opção de função citada dentre as mais comuns, e que simplifica as análises de sensibilidade é a somatória das pontuações ponderadas pelos pesos (∑ (Pesos de importância x Pontuação)).

2.1.8 Recomendações de alternativas

Após a análise de cada alternativa, estas podem ser ordenadas decrescentemente com base em suas respectivas pontuações finais, de forma a se estabelecer um ranking de preferência. Este ranking gerado não necessariamente estabelece a decisão a ser tomada, mas ajuda o decisor a focar nas alternativas com maiores pontuações.

2.1.9 Análises de sensibilidade

As análises de sensibilidade têm por objetivo apresentar as mudanças de pontuações ou do ranking das alternativas ao se alterar os valores de entrada, ou, até mesmo os pesos de importância. Ao se utilizar um modelo para obtenção dos valores de entrada, as análises de sensibilidade são importantes para aumentar a confiança e a robustez da alternativa recomendada.

2.2 Critérios de decisão e metodologia multicritério

Corroborando com os passos apresentados para a realização de estudos de *tradeoff* baseados em diversos critérios, a MCDA (sigla para metodologia multicritério de apoio à decisão, em inglês) é uma técnica estruturada para tratar esses tipos de situações e influencia na tomada de decisão (SAATY, 2001), uma vez que permite a visualização da estrutura lógico-racional do

problema, representando e quantificando a importância dos seus elementos, relacionando-os a um objetivo global.

O histórico de progresso da utilização da MCDA, e a definição dos seus critérios básicos são reunidos por Prado et al. (2009). O trabalho também destaca a definição da terminologia "critério", que em um ambiente de tomada de decisão implica na determinação de uma espécie de padrão no qual uma determinada escolha pode ser considerada mais desejável do que outras (BELTON e STEWART 2001).

A aplicação da metodologia MCDA neste trabalho pode ser realizada utilizando-se as proposições de Montibeller e Franco (2007). Os autores confirmam o uso da metodologia MCDA como um instrumento de apoio a tomadores de decisão em situações de alta complexidade e impactos potencialmente significativos e de longo prazo. Esta metodologia organiza e sintetiza informações, inclui medidas objetivas e considera julgamentos de valor dos tomadores de decisão (PRADO et al., 2009; MONTIBELLER e FRANCO, 2008), em um processo interativo e iterativo. Os julgamentos dos tomadores de decisão são retratados como compensações de preferência, criando uma ferramenta de avaliação robusta e comum a todos. Assim, não importa o quão diversificado seja o grupo de decisores, todos os seus argumentos serão considerados ao se estruturar o modelo de decisão, o que assegura a satisfação nos critérios escolhidos.

A metodologia descrita por Montibeller e Franco (2007), com a ajuda do *software* V.I.S.A. (Análise de Sensibilidade Visual Interativa, em inglês), permite

a realização de *benchmarks* e análises de sensibilidade, considerando os parâmetros adotados e tirando proveito da robustez do modelo de decisão construído.

Belton e Stewart (2001) desenvolveram uma metodologia que considera toda a peculiaridade da Teoria de Suporte de Decisão, compreendendo os passos apresentados na Figura 3.

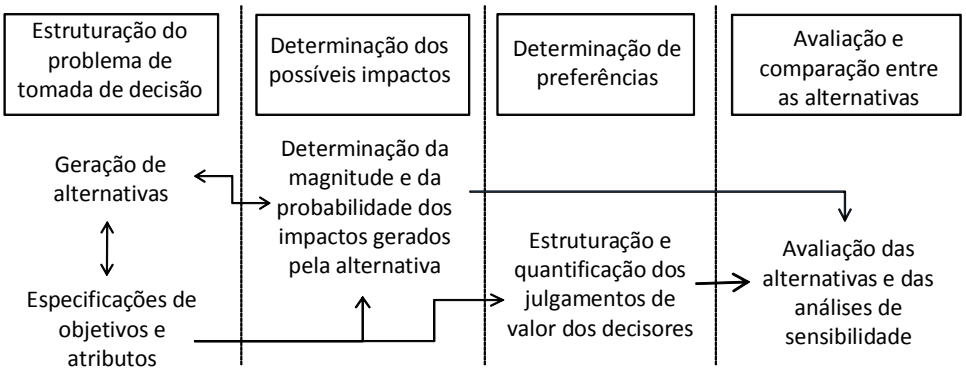


Figura 3: Processo de estruturação e resolução da metodologia MCDA (BELTON e STEWART, 2001).

Vários autores revisaram a utilização da metodologia MCDA como uma ferramenta de suporte de decisão. Os principais benefícios e contribuições da MCDA, resumidas por Saaty (2001), são: a manutenção da unidade do problema, compreensão da complexidade, representação da relação de interdependência de critérios, capacidade de medição da preferência de critérios, manutenção da consistência, síntese, avaliações de *tradeoff*, consideração dos julgamentos de valor dos tomadores de decisão e alcance de consenso.

O objetivo de uma metodologia de decisão baseada em múltiplos critérios não é prescrever a decisão "certa" a ser escolhida, mas sim, ajudar os tomadores

de decisão a identificar alternativas boas e robustas. Além disso, conceder coerência e oferecer visões de *tradeoffs* a fim de guiar a resolução do problema. Dessa forma, é mais provável que se encontre uma alternativa que melhor se ajuste à compreensão geral do problema e às necessidades de todos os tomadores de decisão envolvidos no processo.

3 A APLICABILIDADE DA SIMULAÇÃO

Após terem sido apresentados os aspectos teóricos e os procedimentos para a realização de um estudo formal de *tradeoff*, bem como os benefícios de uma análise baseada em múltiplos critérios, este capítulo visa avaliar a utilização de simulação de eventos discretos como base na obtenção dos valores de entrada (item 2.1.5 da metodologia descrita) necessários aos estudos de *tradeoff* aplicados a transportes aquaviários.

O termo simulação, no contexto deste estudo, refere-se à criação de modelos que representam um sistema real de forma simplificada e que permitem a experimentação de alternativas, ou, cenários pré-estabelecidos. As análises realizadas com os modelos de simulação possibilitam o entendimento do comportamento do sistema em diversas situações.

Brito (2008) relaciona quatro condições onde a utilização de simulação se mostra eficaz:

- Análise de um sistema antes de sua implementação;
- Aprimoramento do desempenho de um sistema já em operação;
- Compreensão do comportamento do sistema;
- Comparação de respostas das análises conduzidas.

Na abordagem sugerida pelo presente estudo, a principal função da simulação é fornecer os elementos necessários aos estudos de *tradeoff* a serem realizados. Os resultados obtidos através da simulação serão utilizados em um estudo mais amplo, de comparação entre cenários, baseado em múltiplos

critérios de avaliação. Isto porque, uma das características básicas da simulação computacional é que esta, por si só, não provê a solução ideal para um dado problema. O principal é que a simulação ajude o tomador de decisão, fornecendo informações importantes acerca do comportamento do sistema, e auxiliando no processo de escolha de soluções, por exemplo.

Nesta mesma linha, Chwif e Medina (2007) enfatizam que a simulação não é uma bola de cristal capaz de prever soluções, e, tampouco pode ser confundida com técnicas de otimização. A simulação é uma ferramenta de análise de cenários que pode vir a ser combinada com outras técnicas, como a própria otimização, ou, ainda com técnicas de análises multicriteriais, como propõe o presente trabalho. Os autores relatam que a simulação não é capaz de substituir o pensamento humano, e que as decisões finais cabem exclusivamente ao homem.

3.1 Simulação de eventos discretos

A Simulação de eventos discretos, conhecida como SED, é uma das vertentes da simulação computacional, e caracteriza-se pela existência de eventos. Eventos são acontecimentos que se dão em certos instantes do tempo da simulação que alteram o estado do sistema. Os instantes em que ocorrem esses eventos podem ser registrados e possibilitam diversas análises posteriores do sistema em estudo (KELTON et al., 1998).

Optou-se pela técnica SED para a modelagem do sistema, pois durante a investigação foi observada a eficácia da mesma no auxílio à tomada de

decisão, e no estudo e resolução de problemas em sistemas logísticos complexos, como as redes de transporte aquaviário.

Segundo Chwif e Medina (2007) a simulação pode ser utilizada para determinar políticas de estocagem e transporte. Ademais, quando o problema em questão é complexo, dinâmico e apresenta aleatoriedade, a simulação é a melhor escolha (Figura 4). Pereira (2012) destaca ainda que a SED é indicada para a análise de sistemas portuários e de transporte aquaviário em geral.

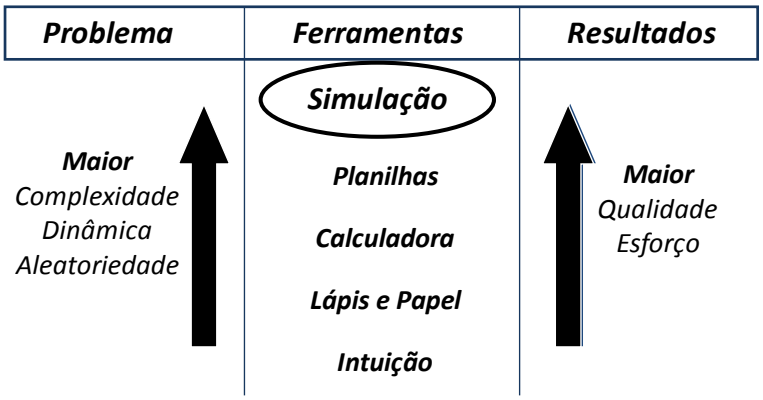


Figura 4: Aplicabilidade da simulação (CHWIF e MEDINA, 2007).

Chwif e Medina (2007) resumem a metodologia de simulação de eventos discretos em 3 etapas principais:

1. Concepção: nesta primeira etapa define-se o sistema, o escopo da simulação e seus objetivos. Ademais, os dados de entrada devem ser coletados e tratados nesta fase. Finalizada a etapa de concepção, o modelo abstrato, que está na mente do analista, deve ser representado em um modelo conceitual, através de fluxogramas, por exemplo.

2. Implementação: o modelo conceitual é convertido (codificado) em um modelo computacional através de alguma linguagem de simulação. Para este estudo será utilizado o *software* Arena®, da empresa Rockwell Software, uma divisão da Rockwell Automation.

   Além disso, é nesta etapa que se realizam a verificação e validação do modelo. Tais pontos são muito importantes no desenvolvimento para se garantir uma representação precisa da realidade, dentro dos objetivos estipulados;

3. Análise: com o modelo pronto para a realização dos experimentos, são realizadas todas as “rodadas” de simulação programadas, que geram os resultados a serem analisados e documentados. Também, nesta etapa devem ser executadas as análises de sensibilidade que se façam necessárias. Através dos resultados obtidos podem-se gerar conclusões e recomendações ao sistema, além de se alimentar os estudos de *tradeoff* aqui abordados.

Estas etapas citadas, no entanto, não devem ser interpretadas como uma sequência obrigatoriamente linear, pois podem ocorrer diversas iterações e realimentações durante o processo.

Como aplicação da SED em sistemas de transporte aquaviário, tem-se Botter et al. (1988), que elaboram um modelo de simulação para o dimensionamento do transporte de combustíveis na hidrovia Tietê-Paraná. No trabalho é feita uma sucinta descrição do modelo e são apresentadas algumas análises de diversos cenários gerados. Tais cenários são obtidos pela variação de uma

série de parâmetros de entrada, como: tipo de embarcação (autopropelida, comboio duplo ou triplo), operação com ou sem desmembramento no caso de comboio, capacidade das embarcações, tempo de operação diária das eclusas (12 ou 24 horas), capacidade de armazenamento nos terminais, número de berços por terminais, entre outros. Estas variações geram os diversos cenários, cujas respostas são analisadas, e com base em critérios econômicos o estudo propõe as melhores alternativas ao sistema.

Mendes (1999) faz uso da técnica de simulação no desenvolvimento de um modelo técnico-econômico para o dimensionamento do transporte intermodal de cargas pela hidrovia Tietê-Paraná. De acordo com o autor, a técnica de simulação é utilizada em processos estocásticos e permite um grande detalhamento do modelo, aumentando sua similaridade ao sistema real, através da introdução de maiores detalhes operacionais do sistema e de distribuições probabilísticas. Além disso, com esta técnica pode-se verificar a reação do sistema provocada pela alteração de diversas variáveis de entrada. Com estas informações, justifica o uso de simulação de eventos discretos em seu estudo.

Fernandes (2001) elabora um modelo de simulação que considera a operação portuária como um sistema integrado, e não somente o sistema porto-navio. O autor desenvolve uma ferramenta de dimensionamento econômico-operacional de terminais de contêineres e veículos, e justifica a utilização da técnica de simulação por considerar um elevado número de variáveis, possibilitando a avaliação do terminal tanto por recursos relacionados diretamente aos navios,

como por recursos internos. Além disso, pôde contar com a presença de fatores aleatórios, o que aproxima mais o modelo à realidade.

Ono (2007) aborda em sua tese o planejamento logístico da cadeia de suprimentos do petróleo. Ele trabalha com duas técnicas para a modelagem: simulação e otimização. A primeira é utilizada em nível de planejamento estratégico, analisando a capacidade de recursos, o impacto da alteração de políticas operacionais e testando fatores limitantes do sistema, os famosos gargalos. A otimização é utilizada para uma avaliação a nível tático/operacional, ao realizar a programação ótima da frota, possibilitando o planejamento em curto prazo. O autor demonstra que a utilização da simulação de eventos discretos combinada a outras técnicas para o planejamento logístico pode ser aplicada a problemas complexos com eficácia.

Brito (2011) comenta que a aplicabilidade de simulação de eventos discretos no dimensionamento de sistemas logísticos é inegável. Em seu trabalho, é realizada uma extensa revisão bibliográfica sobre simulação, sobretudo simulação de eventos discretos, e discute-se se esta técnica pode ser utilizada de maneira combinada com outros métodos. Seu estudo de caso utiliza simulação híbrida (SED com Simulação Dinâmica) para modelar um sistema de transporte de passageiros entre duas cidades, e conclui que a utilização conjunta das técnicas é factível, e pode ser útil para resolução de problemas logísticos complexos.

Mesquita (1994) utiliza-se de métodos de modelos de fila e modelos de processos de Markov no estudo de sistemas fechados de filas em transporte

fluvial. Ele apresenta modelos Markovianos de filas para redes abertas e fechadas, elucida conceitos e aplicações de distribuições de probabilidades em modelos de fila e elabora modelos analíticos que avaliam a capacidade de transporte de ciclos fechados.

Como limitação mais importante dos modelos desenvolvidos pelo autor, está a necessidade do uso da hipótese de que os tempos de atendimento sejam parte de uma sequência previamente conhecida. No entanto, isto só é possível quando o subsistema aquaviário é totalmente independente dos subsistemas terrestres (por possuírem enorme capacidade de armazenamento, por exemplo), fato observado na realidade de poucos sistemas.

A partir destas constatações, o próximo capítulo apresenta o estudo de caso do presente trabalho.

4 APLICAÇÃO DE ESTUDO DE *TRADEOFF* A UM SISTEMA DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO COM SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

O problema abordado nesta seção trata do dimensionamento de frota e estoques em um sistema de transporte aquaviário. Na revisão bibliográfica deste trabalho foi apresentado que a questão do *tradeoff* “Capacidade de transporte (frota) VS. Capacidade de estocagem” é de extrema relevância para sistemas de transporte em ciclo fechado.

Quando se trata de um sistema influenciado por condições de muita aleatoriedade, como viagens de navios e atendimentos portuários, por exemplo, que estão sujeitos a intempéries que podem atrasar as viagens, formações de longas filas nos terminais, dentre outros fatores, estes componentes, frota e estoque, precisam ser bem dimensionados para que não afetem o desempenho operacional do sistema como um todo. Portanto, serão aplicados os conceitos abordados até aqui, de modo a promover uma análise embasada e um dimensionamento adequado ao problema proposto.

4.1 Definição do Problema

O minério de ferro é um recurso abundante na economia brasileira. Pretende-se implantar uma usina de fabricação de aço na região nordeste do país, e esta será alimentada por minério de ferro oriundo de produções nacionais.

Para isto, serão utilizados terminais marítimos exclusivos, localizados muito próximos à usina, pelos quais serão recebidos os principais insumos (carvão,

oriundo de importação, e minério de ferro, proveniente de portos brasileiros). Além disso, haverá terminais específicos para embarque das mercadorias finais (chapas de aço destinadas a exportação). Contudo, a presente aplicação foca apenas no dimensionamento de frota e estoque para o abastecimento da usina com minério de ferro, que é o cerne deste estudo.

Uma particularidade deste sistema refere-se ao fato de que o minério adquirido para o sistema tem origem de dois portos diferentes: um localizado na região Nordeste (NE) e outro na região Sudeste (SE) do Brasil (Figura 5).

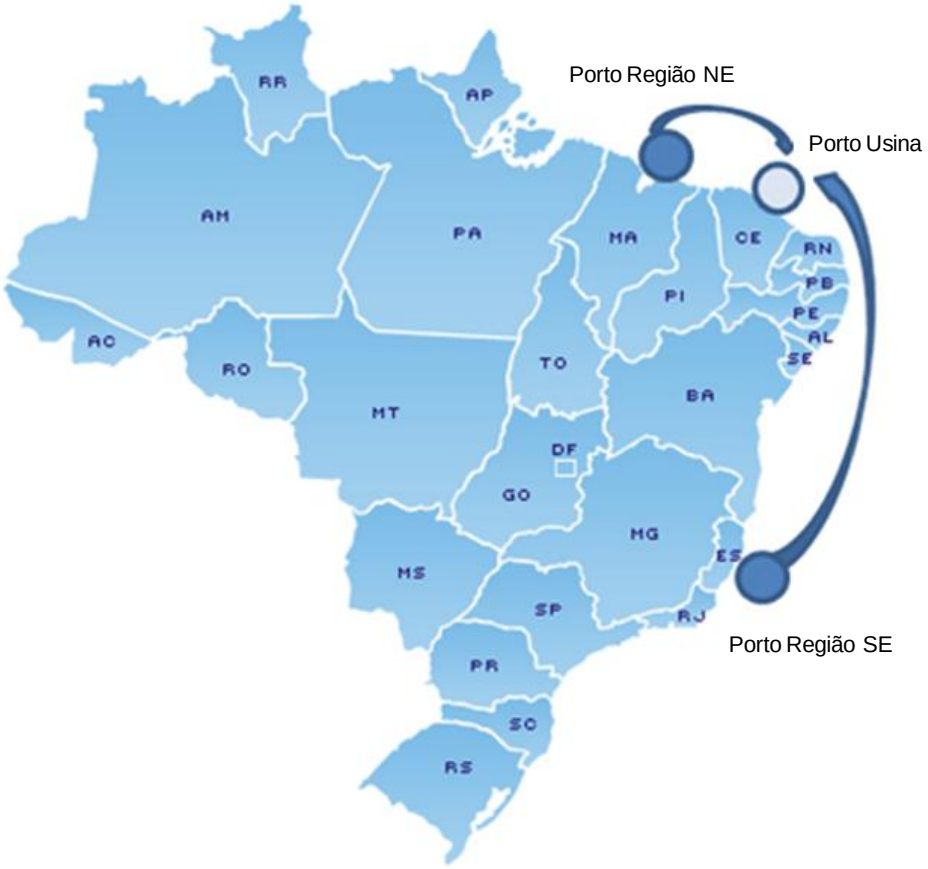


Figura 5: Representação da localização dos portos.

Esses minérios possuem características físico-químicas distintas e complementares. Isso implica na necessidade de provisão de ambos os tipos

de minério à usina. Segundo especificidades técnicas do sistema, pressupõe-se que a proporção de minério de ferro originado da Região NE pode variar entre 60% e 70% do total, sendo o restante complementado pelo minério da Região SE.

O consumo anual da usina será de cerca de 6 MTPA (milhões de toneladas por ano) de minério, no total, e a mesma frota de navios será alocada para transportar ambos os tipos de minério. A frota em questão poderá ser homogênea ou mista, composta por navios com capacidade líquida de cerca de 70 mil toneladas por viagem (classe Panamax) e/ou navios com capacidade para cerca de 150 mil toneladas por viagem (classe Capesize).

Dentre os sistemas de transporte aquaviário existentes (longo curso, cabotagem, apoio marítimo, apoio portuário e navegação interior) o problema em questão pode ser entendido como um caso particular da navegação de cabotagem, a cabotagem industrial. Aragão (2010) define este termo como uma modalidade de transporte aquaviário cuja frota de embarcações serve a uma única empresa, e transporta uma carga homogênea entre dois portos nacionais, com carga em um sentido e vazio em outro.

Quanto ao armazenamento dos insumos, a área junto à usina será utilizada pelos dois diferentes tipos de minério de ferro de forma separada, ou seja, não há compartilhamento de pátio entre os insumos. E, os recursos dimensionados (frota e áreas de estocagem) devem ser capazes de proporcionar uma operação constante e ininterrupta da usina.

Os tempos de viagem e de operação estimados são, de aproximadamente:

- 1,5 dias de viagem do porto da usina até o porto NE (cada trecho);
- 4,0 dias de viagem do porto da usina até o porto SE (cada trecho);
- 1,0 dia atracado nos portos de carregamento para navios de 70 kt (KiloToneladas) e 2,0 dias para navios de 150 kt;
- 2,5 dias atracado no porto de descarga (porto da usina) para navios de 70 kt e 5,0 dias para navios de 150 kt;
- 1 berço de atracação no terminal da usina.

As filas enfrentadas nos portos de carregamento do minério serão consideradas como valores médios aproximados aos observados em 2010 nos terminais de exportação de minério das respectivas regiões:

- 5,0 dias de fila média para o terminal do Nordeste;
- 7,0 dias de fila média para o terminal do Sudeste.

Estas filas enfrentadas nos portos de carregamento são dados de entrada e serão variadas em diversas análises, a fim de se verificar a capacidade do sistema de suportar esse tempo adicional em cada cenário simulado. Em muitos casos os tempos em fila nos terminais de carregamento são maiores que os próprios tempos de viagem.

Os demais tempos, oriundos de filas e demais esperas no porto da usina, por exemplo, serão resultados do modelo de simulação.

Na Tabela 1 pode-se observar os parâmetros de manutenção dos navios, que são considerados de acordo com a idade da frota, cuja vida útil estimada é de 25 anos. Verifica-se que existem indisponibilidades anuais para cada navio, e que ocorrem docagens em datas pré-definidas.

Tabela 1: Parâmetros de manutenção da frota.

Parâmetro	Quantidade	Unidade
Indisponibilidade por ano (0 a 10 anos)	5	Dias/navio
Indisponibilidade por ano (11 a 20 anos)	10	Dias/navio
Indisponibilidade por ano (21 a 25 anos)	15	Dias/navio
Docagem (5, 10, 15, 18, 20, 22 e 24 anos)	40	Dias/navio

Considera-se que a frota em estudo é nova e o sistema começa a operar com todos os navios disponíveis. Além disso, não se permite a realização de manutenção de mais de um navio ao mesmo tempo, e, nos períodos de docagem haverá afretamento de navios substitutos para não ocorrer um grande desfalque à frota.

A seguir, são apresentados os critérios de avaliação considerados no estudo.

4.2 Critérios de avaliação

Conforme apresentado na seção 2.2, os critérios aqui descritos são úteis aos tomadores de decisão, na medida em que serão um meio de diferenciação e

comparação entre as alternativas. Nesta aplicação, os valores de entrada para cada critério nas análises finais de *tradeoff* podem ser de três tipos:

- Dados de entrada para o modelo de simulação de eventos discretos, e portanto, caracterizador do cenário;
- Resultados originados pelo modelo de simulação em questão;
- Ou ainda, sem relação com a simulação operacional.

Foram considerados como importantes nas caracterizações e avaliações do sistema os critérios explicitados a seguir:

- **Valor Presente Líquido do investimento (VPL)**: como o sistema considerado representa uma operação logística interna, não há geração de receita nessa tarefa específica. Dessa forma, os custos de implantação estarão diretamente ligados à aquisição dos navios e à preparação e instalação dos pátios de estocagem de insumos.

  Note-se que o termo "VPL" é utilizado neste estudo apenas para facilitar o entendimento, pois, os investimentos considerados não serão analisados em fluxos de caixa, tampouco trazidos para o valor presente propriamente dito, esta é uma simplificação adotada neste critério.

  O VPL considerado na aquisição dos navios é de USD 100 mi (milhões) para navios de 70 kt e de USD 150 mi para navios de 150 kt.

  Os custos de implantação de estocagem referem-se à aquisição da área, preparação do terreno e instalação de equipamentos de movimentação dos produtos.

O custo de aquisição de terras na região da usina, com incentivos governamentais, é de aproximadamente USD 0,60/m^2 (O JORNAL DO NORDESTE, 2009), revelando que este não será um grande problema para se conseguir área ao empreendimento.

Para terraplanagem do terreno, o valor é de quase USD 5,00/m^2 (DIÁRIO DO NORDESTE, 2009). Com apenas essas considerações o custo por metro quadrado de estocagem seria de somente USD 5,60/m^2, o que não é condizente com os valores despendidos em um empreendimento desse porte. Por isso, deve-se levar em contra uma série de outros aspectos na preparação do solo, como supressão vegetal (remoção de toda vegetação, associada ao resgate da fauna, anterior à terraplanagem), compactação do solo, preparação ambiental contra infiltração de resíduos, canais de drenagem, extensão dos trilhos por onde se movimenta a empilhadeira de minério, extensão e preparação das correias transportadoras de minério, dentre muitas outras preocupações.

Dessa forma, no presente estudo será utilizado o valor total estimado de USD 1.000,00/m^2 para se obter uma área de pátio totalmente preparada para o recebimento e estocagem de minério.

Além disso, no caso estudado será utilizada a relação de 10 t/m^2 para toda a área envolvida no empilhamento e manuseio do minério. Assim, tem-se um custo de investimento aproximado de USD 100,00/t de capacidade estática de armazenamento de minério.

Será admitido, ainda, um custo de USD 25 mi para aquisição e instalação de equipamentos para movimentação de minério de ferro

(empilhadeira, pás mecânicas, moegas, entre outros). Considera-se que estes equipamentos são suficientes para conjuntos de pátios com até 600 mil toneladas de capacidade estática, ou seja, cobrem todos os cenários que serão apresentados no decorrer do estudo;

- **Custos operacionais**: este critério considera todos os custos operacionais da frota da companhia (compostos pelos custos de viagem mais *running costs*): combustível, custos de porto, *running costs* (tripulação, seguro, manutenção, custos administrativos, impostos, entre outros), docagem e afretamento de outras embarcações nos períodos de docagem da frota própria. Além disso, são considerados os custos operacionais de estocagem.

  A Tabela 2 exemplifica os principais componentes dos custos operacionais da frota, que foram estimados pelo autor, em conjunto com profissionais da área.

Tabela 2: Valores dos custos operacionais considerados (por navio).

Parâmetro	Unidade	Navio de 70 kt	Navio de 150 kt
Custo de combustível navegando	USD/dia	10.000	20.000
Custo de combustível parado	USD/dia	1.000	2.000
Running Costs	USD/dia	10.000	10.000
Custo de atracação porto da usina	USD/atrac.	40.000	60.000
Custo de atracação porto Região NE	USD/atrac.	50.000	80.000
Custo de atracação porto Região SE	USD/atrac.	50.000	80.000
Custo de docagem	USD/doca	700.000	1.000.000
Afretamento	USD/dia	25.000	40.000

Vale ressaltar que os custos operacionais são incrementados de acordo com a idade do navio. Como simplificação adotada, são considerados os valores médios e utilizados para toda a vida útil das embarcações.

Para os custos operacionais de estocagem, não se pode considerar somente o custo de capital envolvido. Os *carrying costs* levados em conta, isto é, os custos por se manter um estoque durante o período considerado (neste caso, anual), devem conter, além do custo de oportunidade, os custos de manuseio, movimentação, seguro, taxas e impostos que incidem sobre a carga, riscos de danos, dentre outros. Em geral, todos estes custos somados giram em torno de 25% do valor do produto estocado (COYLE et al., 2002), e este será o percentual adotado no presente estudo. O valor estimado para o minério será de USD 100/t (INFOMONEY, 2011), o que remete a um custo operacional de estocagem de USD 25/t ao ano.

Os resultados para os custos operacionais serão obtidos com auxílio do modelo de simulação;

- **Paralisações da usina**: refere-se ao número de dias por ano em que a usina tem sua produção paralisada devido à falta de um dos dois insumos minério de ferro. As paralisações da usina serão conhecidas por meio da simulação e cenários com mais de 15 dias de paralisação anual são considerados inviáveis;

- **Proporção de minério de ferro SE**: A proporção de minério SE é importante para o atendimento das necessidades de produção da fábrica. Operacionalmente, é preferível para a usina trabalhar com o máximo possível de minério SE (40%), devido às suas características físico-químicas. Os valores testados para este critério serão: 30%, 35% e 40%. Este é um critério cujos valores serão dados de entrada para o simulador e, assim, servirão também para caracterizar cenários;

- **Tempo suportado em fila na origem**: o tempo suportado em fila diz respeito ao tempo médio que os navios irão esperar na fila dos **portos de origem** para serem atendidos. Este é um critério que busca representar risco e incerteza, uma vez que o comportamento e a dinâmica das filas nos terminais de minério de ferro brasileiros são regidos por flutuações da demanda mundial por estes produtos. Os valores deste critério serão utilizados como dados de entrada para o modelo de simulação desenvolvido, e em cada porto três faixas com valores diferentes de espera serão testados;

- **Tempo de espera para descarregar na usina**: representa o tempo médio que cada navio da frota espera para poder descarregar na usina,

devido à falta de espaço nos pátios de estocagem e/ou pelo berço de descarga estar ocupado.

O critério pode ser entendido como a ociosidade média na descarga, por ciclo, para cada navio. E, assim como em todos os outros momentos em que o navio não está navegando, seu custo operacional é computado de acordo com os *running costs* diários e com o consumo de combustível específico de porto. Não há ocorrência de *demurrage* ou *dispatch*, dado que a operação é realizada pela própria companhia.

Os valores deste critério serão frutos do simulador.

4.3 Pesos de importância

O processo de tomada de decisão baseado em múltiplos critérios é realizado através da nomeação de relevâncias, ou pesos, aos critérios de decisão previamente enumerados (SILVA et al., 2011; BRITO et al., 2010). Conforme descrito na seção 2.1.3, uma ordem de prioridade dos critérios estudados pode ser desenvolvida em pesos de importância por diversas formas (STILLWELL et al., 1981 e SAATY, 1980).

O procedimento utilizado nesta exemplificação é descrito a seguir:

- Inicialmente, os critérios estabelecidos são classificados em ordem decrescente de importância para os decisores;
- Esta ordenação pode ser então traduzida em termos de prioridades, isto é, são estabelecidas as prioridades relativas entre os critérios;

- A partir disso, podem ser definidos os pesos de cada critério como sendo, por exemplo, o inverso das prioridades estabelecidas;
- Com os pesos calculados, determinam-se os pesos normalizados para cada critério.

A Tabela 3 apresenta a classificação de importância dos critérios de decisão e o cálculo dos pesos normalizados associados a cada um deles.

Tabela 3: Classificação de importância dos critérios de decisão e pesos normalizados.

Critério	**Prioridade**	**Peso** (1/Prioridade)	**Peso normalizado**
Paralisações da usina	1	1,00	0,36
Valor presente líquido (VPL)	2	0,50	0,18
Custos operacionais	2	0,50	0,18
Tempo suportado em fila na origem	3	0,33	0,12
Proporção de minério de ferro SE	4	0,25	0,09
Tempo de espera para descarregar na usina	5	0,20	0,07
Soma		**2,78**	**1,00**

Pode-se perceber, pela Tabela 3, que o critério considerado mais importante para o melhor funcionamento do sistema é o número de dias por ano em que a usina paralisa sua produção devido à falta de algum dos dois tipos de minério de ferro. Este é um critério extremamente crítico e recebe prioridade 1, e, consequentemente peso normalizado 0,36. Posteriormente, os critérios relacionados a custos são levados em conta como os mais importantes (VPL e custos operacionais), e sua prioridade é tida como 2, com peso normalizado de 0,18, cada.

Logo em seguida, têm-se o critério: tempo médio suportado em fila nos terminais de carregamento de minério de ferro, pertinente à incerteza desse aspecto e que possui prioridade 3 e peso 0,12.

Após estes critérios, a prioridade seguinte é da proporção de entrada de minério de ferro SE, com prioridade 4 e peso 0,09.

Por fim, o tempo de espera para descarregar na usina aparece na classificação com prioridade 5, e peso normalizado de 0,07.

4.4 Alternativas de Solução

As alternativas de solução são geradas após a definição do problema, dos critérios de decisão e seus respectivos pesos de importância. Obviamente, após a análise final dos cenários definidos neste passo, análises de sensibilidade poderão requisitar a geração de novas alternativas de solução.

A fim de possibilitar análises básicas para o sistema em estudo, foram elaboradas alternativas de solução, aqui denominadas cenários, que abrangem algumas variações das possíveis configurações.

Os cenários iniciais serão compostos por:

- 2 tipos de frota homogênea: classe Panamax e classe Capesize;
- 3 faixas de porcentagem de Minério SE: 30%, 35% e 40%;

- 3 faixas de fila enfrentada nos terminais de origem: 50% da fila de 2010 (otimista), 100% da fila de 2010 (neutro) e 150% da fila de 2010 (pessimista).

Todas as análises iniciais contarão com frota homogênea e afretamento de navio no período de docagem dos navios da frota própria. Simulações adicionais, com frota heterogênea serão propostas nas análises de sensibilidade.

4.5 Valores de entrada

Os valores de entrada para cada critério nestas análises de *tradeoff* podem ser utilizados diretamente nas funções de valor ou de forma normalizada, ou seja, variando apenas de 0 a 1. Além disso, esses valores de entrada podem ser resultados da simulação ou dados de caracterização dos cenários.

Os que são caracterizações de cenário entram direto nas etapas de funções de valor, e, por conseguinte na pontuação dos critérios (ambas descritas no próximo tópico). Por sua vez, os valores que são esperados como resultados do modelo de simulação, por não serem conhecidos, exigem a realização da simulação operacional do sistema. Isto também vem ao encontro de Pedgen et al. (1995) e Botter (2002), pois ambos discorrem que, ao se elaborar ou projetar um sistema, deve-se utilizar modelos simplificados, com os quais, assumindo-se algumas premissas e hipóteses, um determinado comportamento pode ser explicado e projetado também no futuro. Assim, a

partir deste ponto é abordada a realização das simulações da presente aplicação.

4.5.1 Concepção do modelo de simulação

No que concerne à definição do sistema, escopo e objetivos, o modelo segue o que foi apresentado na seção 4.1 do presente trabalho.

No que diz respeito à modelagem, a utilização da técnica de simulação de eventos discretos possibilita a elaboração de um modelo que considera o sistema de forma integrada, isto é, o sistema pode ser modelado através de subsistemas que interagem entre si. Caso as partes que o compõem fossem consideradas sem suas respectivas influências, os resultados finais poderiam ser afetados. Gualda (1995) elabora uma extensa revisão bibliográfica sobre o tema de enfoque sistêmico, e utiliza esta abordagem sistêmica para a caracterização de terminais e sistemas de transportes como um todo.

Seguindo este método, o presente caso pode ser definido nos seguintes subsistemas, cujos componentes e entidades são apresentados também na Figura 6:

- Subsistema usina: Somente o consumo de minério é retratado neste subsistema;
- Subsistema estoque de minério: é o subsistema que regula as interações entre todos os subsistemas. Recebe o minério do subsistema porto de descarga e o armazena para o consumo da usina;

- Subsistema porto de descarga: recebe os navios carregados oriundos do subsistema navegação, descarrega o navio e direciona o minério para o subsistema estoque de minério. O navio, agora vazio, é encaminhado novamente para o subsistema navegação;
- Subsistema navegação: subsistema por onde transitam os navios vazios e carregados até seus respectivos destinos;
- Subsistema portos de origem (carregamento): recebe os navios vazios do subsistema navegação e realiza o carregamento de minério nos mesmos. Após isto, os navios, agora carregados, são novamente direcionados ao subsistema navegação.

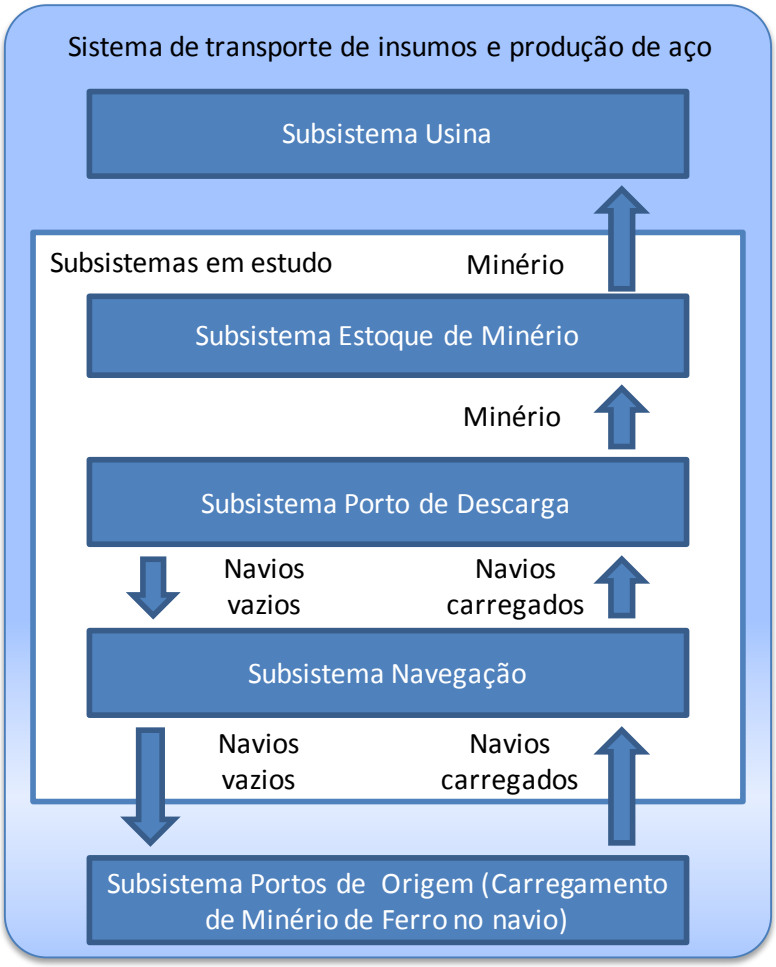


Figura 6: Subsistemas e componentes do sistema de recebimento de insumos.

Além disso, o modelo conceitual pode ser composto por subsistemas concebidos através de fluxogramas. A Figura 7 apresenta o fluxograma dos subsistemas navegação, portos de carga e descarga, e estoque de minério, análogos para ambos os tipos de minério.

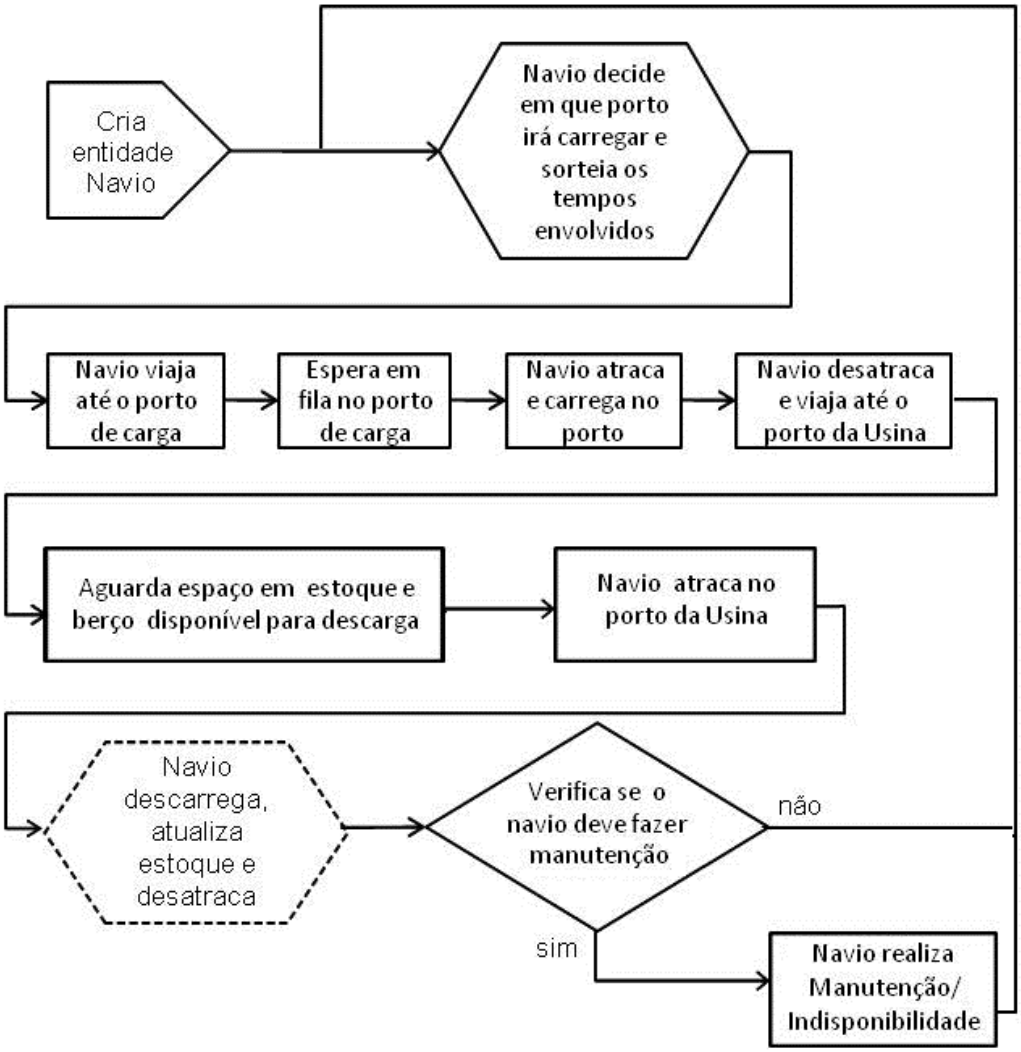


Figura 7: Fluxograma do subsistema navegação, portos e estoque de minério.

Através da Figura 7, pode-se perceber que os subsistemas estão representados apenas pelos fatores lógicos que os condicionam. A coleta de dados estatísticos do modelo ocorre entre cada evento, como viagens, tempos em fila, ou na descarga, por exemplo.

A decisão mencionada sobre o porto em que o navio irá carregar é realizada da seguinte maneira: o tipo de minério que teve um menor percentual proporcional de demanda atendida (recebida + em trânsito) até o momento da decisão é o escolhido para a nova missão. No momento em que é nomeado o porto para onde o navio se deslocará, a carga atribuída a este já passa a ser contada como carga em trânsito, pois já foi designada para o transporte.

O polígono tracejado da Figura 7 representa uma operação que deve ser discretizada no modelo de simulação. Isto porque o lote de um navio leva dias para ser descarregado. Dessa forma, a atualização do estoque deve ser realizada em períodos menores, por exemplo, de hora em hora. Além disso, é exatamente nesse ponto que ocorre a integração e as interações entre os subsistemas com o subsistema usina, pois o estoque é quem regula e condiciona a todos.

A fila para descarga na usina é do tipo FIFO (*First In First Out*), porém, em uma situação esta regra pode ser quebrada: quando o navio que chegou primeiro na fila não pode descarregar por falta de espaço no pátio, e há um navio atrás, de outro produto, com espaço disponível para descarga. Isto precisou ser implementado, pois, há situações em que pode ocorrer a falta de um dos insumos para a usina, e esta irá parar a produção. Consequentemente, o outro insumo também deixará de ser consumido, e não abrirá mais espaço no pátio. Supondo que o insumo esgotado foi o minério SE, pode acontecer que não haja mais espaço suficiente no pátio para a descarga de um navio de minério NE, e seja justamente esse o produto do primeiro navio da fila. Nesta situação, o sistema somente volta a funcionar normalmente quando um navio de minério

SE chega, "fura a fila", descarrega no pátio e a usina volta a operar, consumindo ambos os insumos e liberando espaço no pátio, novamente.

O espaço disponível no pátio, necessário para que um navio possa atracar, é calculado da seguinte maneira:

- Espaço livre necessário (t) = (Taxa de descarga do navio (t/dia) - Taxa de consumo da usina (t/dia)) x (Tempo de descarga do navio (dias)).

Por exemplo, se a taxa de descarga do navio é de 28 kt/dia (70 kt em 2,5 dias) e a usina consome o minério SE a uma taxa de 4,9 kt/dia (1,8 MTPA em 365 dias), um navio de 70 kt, que demora 2,5 dias na descarga, só poderá atracar caso haja uma capacidade livre no pátio de minério SE de, pelo menos, 57,67 kt. (Espaço livre necessário (kt) = (28 - 4,9) kt/dia x (2,5) dias = 57,67 kt).

Além disso, menciona-se o fato de que após realizar a descarga, e antes de iniciar uma nova viagem, o navio verifica se deve realizar manutenção, os chamados períodos de *offhire*. Em caso positivo, o navio fica indisponível pelo período determinado, caso não haja necessidade, o navio segue normalmente.

Para o subsistema usina, a discretização do consumo de minério também é considerada horária, e o polígono destacado na Figura 8 novamente representa o ponto de convergência entre os subsistemas, que é o estoque dos insumos.

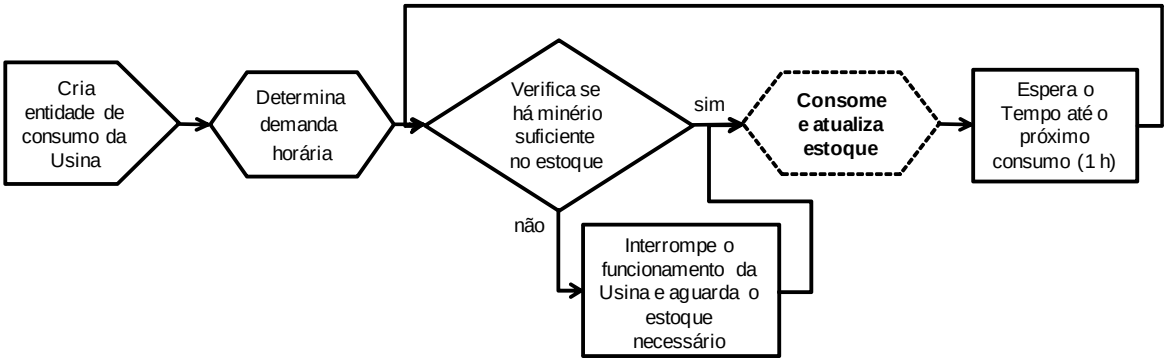


Figura 8: Fluxograma do subsistema usina.

4.5.2 Implementação do modelo de simulação

A implementação do modelo de simulação foi desenvolvida no software Arena®, como descrito anteriormente, e de acordo com as premissas e modelos conceituais apresentados.

Para verificação e validação do modelo, utilizou-se a comparação com o cálculo racional da frota, explicado a seguir.

Supõe-se o seguinte cenário inicial:

- 30% da carga oriunda do SE;
- Frota com 3 navios da classe Panamax (70 kt);
- Sem restrição de estoque para armazenagem de minério;
- Filas nos terminais de carregamento iguais às de 2010 (5 dias NE e 7 dias SE);
- Filas no terminal de carregamento igual a zero;
- Tempos de viagem de 1,5 dias do porto da usina até o porto NE (cada trecho) e 4,0 dias da usina até o porto SE (cada trecho);

- 1,0 dia atracado nos portos de carregamento e 2,5 dias atracado no porto de descarga;
- Não há tempos de indisponibilidade (offhire), tampouco docagem.

A partir desta descrição, e desconsiderando-se qualquer fila no terminal de descarga, tem-se os tempos de ciclo de acordo com os apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Composição dos tempos de ciclo.

Tempo em dias	Ida Vazio	Fila Carga	Carga	Volta Carregado	Fila Descarga	Descarga	Tempo de Ciclo
NE	1,50	5,00	1,00	1,50	0,00	2,50	**11,50**
SE	4,00	7,00	1,00	4,00	0,00	2,50	**18,50**

Como a disponibilidade dos navios neste cálculo é de 100%, tem-se 365 dias por navio, que, em 25 anos, significam 9.125 dias operacionais por navio. Dados os tempos de ciclo apresentados na Tabela 4, e mantendo-se a proporção de minério SE em 30%, tem-se os seguintes cálculos:

- 11,5 dias/ciclo x 70% x Nº ciclos + 18,5 dias/ciclo x 30% x Nº ciclos = 9.125 dias. Assim, o Nº ciclos total (viagens redondas) por navio é de 670, ou seja, 469 ciclos até o porto do NE e 201 ciclos até o SE.

Através destes cálculos, define-se que nestas condições (filas zeradas na descarga, por exemplo), e com 3 navios, seria possível realizar 2010 ciclos em 25 anos, totalizando 140,7 milhões de toneladas, ou, 5,628 MTPA.

Para 2010 ciclos, em 25 anos, com 2,5 dias de ocupação do berço de descarga para cada ciclo, tem-se uma ocupação 5.025 dias em 9.125 disponíveis, o que corresponde a uma ocupação do berço de 55%.

A partir destes cálculos, inseriu-se no modelo de simulação as mesmas condições apresentadas no cálculo racional, a fim de se validar o mesmo. Para essa validação, utilizou-se uma única replicação de 25 anos com todos os tempos determinísticos. Os resultados obtidos com a simulação são apresentados na Tabela 5, juntamente com os resultados do cálculo racional.

Tabela 5: Validação modelo de simulação.

Descrição	Nº de Ciclos 25 anos	Demanda Atendida (MT)	Ocupação do berço
Cálculo Racional	2.010	140,70	55%
Modelo de Simulação	1.961	137,25	54%
Aderência	98%	98%	98%

A aderência do modelo de simulação nestes 3 parâmetros analisados (98%) pode ser considerada satisfatória. Porém, este valor deveria ser 100%, visto que não há variação probabilística, e os dados considerados são exatamente os mesmos. O que explica essa diferença é a fila no porto de descarga, considerada nula no cálculo racional, mas, com resultado de 8,38 horas por ciclo no modelo de simulação. Essa fila de 8,38 horas, se computada em todos os 1.961 ciclos resultantes do modelo de simulação, somam cerca de 695 dias, tempo exatamente suficiente para se realizar os cerca de 50 ciclos faltantes, confirmando, assim, a validade do modelo de simulação.

4.5.3 Análise do modelo de simulação

Com o modelo devidamente verificado e validado, foram gerados todos os cenários citados na seção 4.4. Para tal, configurou-se também as distribuições probabilísticas responsáveis pelas aleatoriedades do sistema.

As distribuições escolhidas foram do tipo triangular. Isto porque, este tipo de distribuição é comumente aplicado em situações onde não se conhece a forma exata da distribuição, mas, têm-se estimativas para o menor valor, o valor mais provável de ocorrência (moda), e o valor máximo (KELTON et al. 1998). Além disso, foram utilizados sempre triângulos equiláteros, ou seja, com desvios da moda para o mínimo iguais aos desvios da moda para o máximo (Mínimo = Moda x (1-desvio); Máximo = Moda x (1+desvio)), isto para que a média seja igual à moda inserida em cada caso. Estes desvios considerados são descritos a seguir:

- Tempos de viagem: 15%;
- Tempos de fila nos terminais de carregamento de minério: 50%;
- Tempos de carga/descarga: 30% (busca representar possíveis problemas nas operações, quebras de equipamentos, perdas de maré, dentre outros imprevistos).

Na geração dos cenários, foi necessária a realização da calibração do modelo para cada situação. Isto porque, buscou-se obter somente cenários viáveis para as análises de *tradeoff*. Esta calibração envolveu diversos testes para se definir inclusive a capacidade de estoque mínima a ser utilizada para a composição de frota analisada. Por exemplo, na situação com 4 navios de 70

kt, a capacidade de estoque necessária é muito inferior à do cenário com 2 navios de 150 kt. A descrição dos 18 cenários iniciais, já calibrados, é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Cenários simulados.

Cenário	Classe do Navio	Frota	% Min. SE	% Fila 2010 Carga	Capacidade Estoque NE (kt)	Capacidade Estoque SE (kt)
1	Panamax	3	30%	50%	115	100
2	Panamax	3	35%	50%	105	135
3	Panamax	3	40%	50%	100	165
4	Panamax	4	30%	100%	80	100
5	Panamax	4	35%	100%	75	115
6	Panamax	4	40%	100%	70	130
7	Panamax	5	30%	150%	80	100
8	Panamax	5	35%	150%	75	130
9	Panamax	5	40%	150%	70	160
10	Capesize	2	30%	50%	200	170
11	Capesize	2	35%	50%	220	170
12	Capesize	2	40%	50%	240	170
13	Capesize	2	30%	100%	340	200
14	Capesize	2	35%	100%	320	200
15	Capesize	3	40%	100%	150	150
16	Capesize	3	30%	150%	230	150
17	Capesize	3	35%	150%	230	170
18	Capesize	3	40%	150%	240	180

Para o *warm-up* do modelo de simulação considera-se que o estoque inicial é de 50% da capacidade estática considerada, e que os navios estão localizados inicialmente no porto da usina.

Na composição dos cenários calibrados (Tabela 6), verifica-se que os nove primeiros são compostos por frota de navios Panamax: os três primeiros com filas de 50% dos patamares de 2010, os três seguintes 100%, e os últimos três com tempos de fila de 150% dos observados em 2010. Em cada um destes subgrupos de 3 cenários, o que é variado é a proporção de minério SE, na seguinte ordem: 30%, 35% e 40%. Para os nove últimos cenários o procedimento é análogo, porém com frotas formadas por navios da classe Capesize.

Ainda com o auxílio da Tabela 6, pode-se verificar que na calibração dos cenários, os estoques necessários variam muito para cada grupo. Um exemplo muito claro está na comparação dos casos de 4 a 6 com os cenários de 13 a 15. Os 2 grupos são similares, diferenciando-se apenas na classe de navios e quantidade. Percebe-se claramente nesta comparação, que nas simulações com menos navios, porém de maior porte, os estoques necessários são mais altos. Isto está de acordo com o clássico *tradeoff* existente entre frota vs. estoque, abordado na revisão da literatura do presente estudo.

O cenário 15, em especial, necessitou de 3 navios, e não 2, como os cenários de seu mesmo grupo. Isto porque 2 navios não eram suficientes para atender à condição de menos de 15 dias de paralisações da usina por ano, independente da capacidade de estoque considerada.

Todos os demais dados de entrada são comuns a todos os cenários e são novamente resumidos em:

- 1,5 dias de viagem do porto da usina até o porto NE (cada trecho);

- 4,0 dias de viagem do porto da usina até o porto SE (cada trecho);
- 1,0 dia atracado nos portos de carregamento para navios de 70 kt e 2,0 dias para navios de 150 kt;
- 2,5 dias atracado no porto de descarga (porto da usina) para navios de 70 kt e 5,0 dias para navios de 150 kt.
- Filas 2010 = 5,0 dias para o terminal do Nordeste e 7,0 dias para o terminal do Sudeste;
- Indisponibilidade dos navios, de acordo com a idade da frota:
    - de 0 a 10 anos: 5 dias/ano;
    - de 11 a 20 anos: 10 dias/ano;
    - de 21 a 25 anos: 15 dias/ano.

Com isto, todos os cenários descritos foram simulados com 10 replicações de 25 anos. A Tabela 7 apresenta os principais resultados obtidos com o modelo de simulação, e que serão utilizados na classificação das soluções.

O item paralisações da usina é definido em dias por ano e será introduzido diretamente em sua respectiva função de valor. O tempo de espera para descarregar é expresso em dias por ciclo e ainda será normalizado para ingresso em sua função de valor.

Os cinco parâmetros restantes da Tabela 7 estão apresentados como **somatória para todos os navios considerados, ao longo dos 25 anos de simulação**. Estes valores serão utilizados nos cálculos de custo de todos os cenários.

Tabela 7: Principais resultados simulação.

Cenário	Paralisações da Usina (dias/ano)	Tempo de espera para descarregar na Usina (dias/ciclo)	Nº total de Viagens NE	Nº total de Viagens SE	Tempo total navegação (dias)	Tempo total parado (dias)	Tempo total Indisponível (dias)
1	2,2	1,72	1.492	639	9.599	17.093	675
2	2,9	1,45	1.382	744	10.105	16.584	675
3	3,5	1,17	1.274	849	10.620	16.072	675
4	2,0	3,05	1.492	640	9.603	25.945	900
5	3,3	2,79	1.381	743	10.099	25.455	900
6	4,3	2,50	1.271	848	10.602	24.976	900
7	1,3	4,39	1.495	641	9.624	34.807	1.125
8	1,6	4,04	1.387	747	10.150	34.305	1.125
9	1,6	3,62	1.280	854	10.683	33.776	1.125
10	1,3	3,23	698	299	4.494	13.297	450
11	1,0	2,91	649	349	4.747	13.047	450
12	1,6	2,63	598	399	4.987	12.807	450
13	9,6	0,89	681	292	4.385	13.407	450
14	15,0	0,90	619	333	4.534	13.258	450
15	0,8	8,59	599	399	5.002	21.682	675
16	0,5	6,43	700	300	4.506	22.167	675
17	0,5	6,05	650	350	4.755	21.922	675
18	1,2	5,72	599	399	4.999	21.674	675

Pela análise da Tabela 7, verifica-se que os cenários de 1 a 9 que apresentam as mesmas proporções de minério SE (1, 4 e 7, por exemplo), têm como resultado, basicamente, os mesmos números de viagem NE e SE, e mesmo tempo total de navegação, como já era esperado. O tempo total parado aumenta de grupo em grupo, principalmente porque cada um deles apresenta um valor diferente para as filas nos portos de carga. Além disso, o tempo total de indisponibilidade dos navios aumenta, pois o número de navios também é

maior a cada grupo. Para os cenários de 10 a 18 (Capesizes), o raciocínio e os resultados são equivalentes.

A partir destes resultados, podem-se aplicar as funções de valor de cada critério, descritas na próxima seção.

4.6 Funções de valor e pontuações por critério

As funções de valor são utilizadas para se obter as pontuações para cada critério através de seus respectivos valores de entrada. Neste tópico serão apresentadas as funções de valor utilizadas.

4.6.1 Paralisações da usina

A função de valor deste critério é dada como segue: quando nenhuma paralisação ocorre na operação da usina (0 dias da interrupção), o cenário adquire pontuação máxima (1). Havendo apenas 1 dia de paralisação, o cenário adquire pontuação de 0,50. 3 dias de paralisação correspondem à pontuação de 0,25 e 5 dias à pontuação de 0,125. A partir disso, a função varia linearmente até o cenário com mais dias de paralisação obtido (desde que respeite o limite máximo de 15 dias), que receberá a pontuação 0. Nos intervalos entre os pontos citados, a função é linear. Este é um parâmetro muito crítico a este sistema e esta função de valor almeja representar os problemas existentes para retomada da produção após qualquer interrupção.

A Figura 9 apresenta a função de valor para as paralisações da usina.

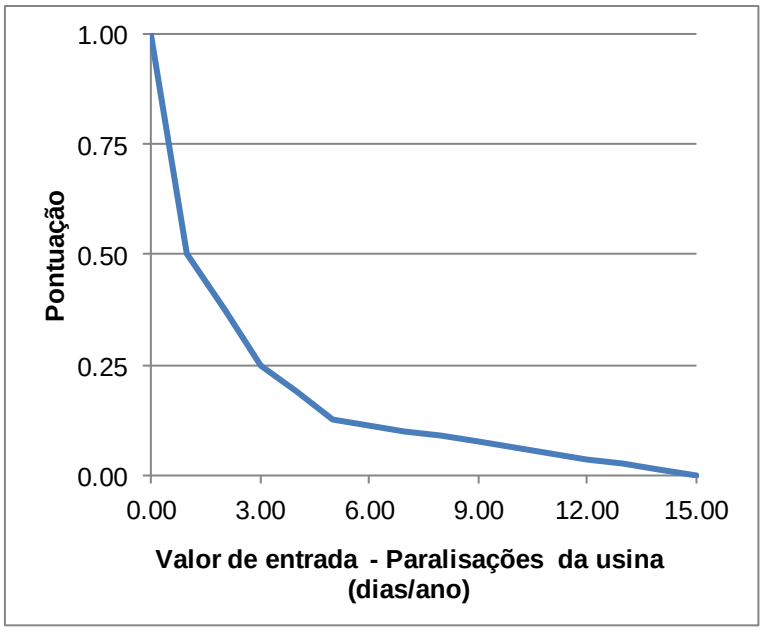


Figura 9: Função de valor – Paralisações da usina.

A Tabela 8 apresenta a aplicação desta função de valor aos 18 cenários simulados. Pode-se verificar que nenhum cenário recebeu pontuação igual a 1,0. Isto devido ao fato de que nenhum cenário obteve 0 dias de paralisação na usina. E, além disso, apenas o caso 14 recebeu a pontuação mínima, com nota igual a 0,00.

Tabela 8: Pontuações - Paralisações da usina.

Cenário	Paralisações da Usina (dias/ano)	Pontuação obtida
1	2,2	0,35
2	2,9	0,26
3	3,5	0,22
4	2,0	0,37
5	3,3	0,23
6	4,3	0,17
7	1,3	0,46
8	1,6	0,43
9	1,6	0,42
10	1,3	0,46
11	1,0	0,51
12	1,6	0,43
13	9,6	0,07
14	15,0	0,00
15	0,8	0,59
16	0,5	0,75
17	0,5	0,75
18	1,2	0,48

4.6.2 Valor presente líquido (VPL)

O VPL deste sistema está somente relacionado aos investimentos realizados, portanto, é um critério considerado como custo. Dessa forma, admite-se que a função de valor deste tem comportamento linear, com pontuação máxima (1) designada ao cenário de menor VPL total e pontuação mínima (0) para o VPL mais alto obtido dentre todas as alternativas. Os valores de entrada para o VPL são normalizados, isto é, variam de 0 a 1.

A Figura 10 ilustra a função de valor para o VPL.

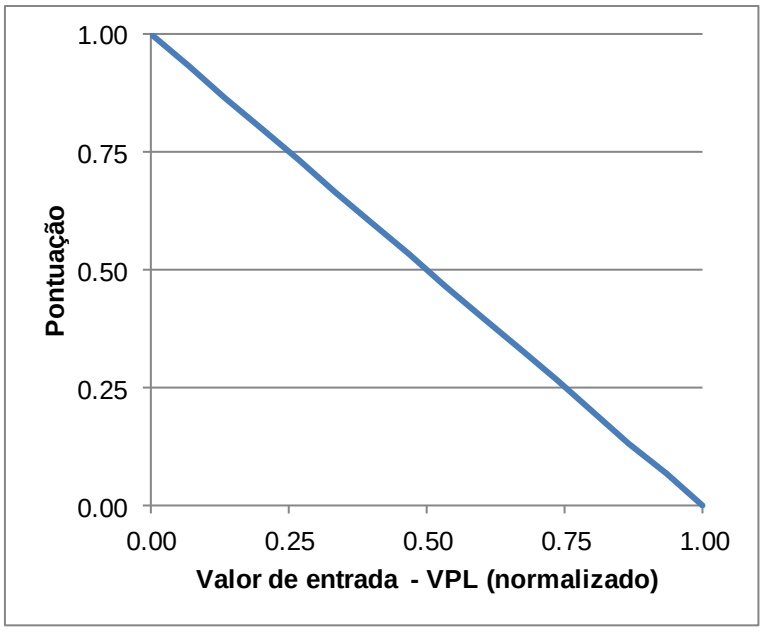


Figura 10: Função de valor –VPL.

Para se obter os resultados do VPL, é necessário o cálculo de investimento em frotas e estoque, de acordo com as premissas estabelecidas na seção 4.2 do presente estudo. A Tabela 9 apresenta os resultados de VPL para cada cenário com suas respectivas pontuações recebidas.

A Tabela 9 é composta pelos custos de aquisição dos navios e os custos de implantação dos estoques. Percebe-se, através da mesma, que os custos mandatórios são os referentes à aquisição da frota. Isto porque, os valores considerados para a aquisição e preparação das áreas de estocagem são relativamente baixos. Assim, os cenários com as melhores pontuações são aqueles que apresentam apenas 3 navios Panamax ou 2 navios Capesize na frota, ou seja, os cenários de 1 a 3 e de 10 a 14. As piores notas ficam com as simulações de número 7 a 9, cuja frota é de 5 navios da classe Panamax.

Tabela 9: Pontuações - Resultados de VPL.

Cenário	Núm. Navios	Custo Navios (10^6 USD)	Custo fixo estoque (10^6 USD)	Capac. total estoques (kt)	Custo variável estoques (10^6 USD)	VPL Total (10^6 USD)	VPL Norma-lizado	Pontuação Recebida
1	3 Pana.	300	25	215	22	**347**	**0,00**	**1,00**
2	3 Pana.	300	25	240	24	**349**	**0,01**	**0,99**
3	3 Pana.	300	25	265	27	**352**	**0,02**	**0,98**
4	4 Pana.	400	25	180	18	**443**	**0,48**	**0,52**
5	4 Pana.	400	25	190	19	**444**	**0,48**	**0,52**
6	4 Pana.	400	25	200	20	**445**	**0,49**	**0,51**
7	5 Pana.	500	25	180	18	**543**	**0,98**	**0,02**
8	5 Pana.	500	25	205	21	**546**	**0,99**	**0,01**
9	5 Pana.	500	25	230	23	**548**	**1,00**	**0,00**
10	2 Cape.	300	25	370	37	**362**	**0,08**	**0,92**
11	2 Cape.	300	25	390	39	**364**	**0,09**	**0,91**
12	2 Cape.	300	25	410	41	**366**	**0,10**	**0,90**
13	2 Cape.	300	25	540	54	**379**	**0,16**	**0,84**
14	2 Cape.	300	25	520	52	**377**	**0,15**	**0,85**
15	3 Cape.	450	25	300	30	**505**	**0,79**	**0,21**
16	3 Cape.	450	25	380	38	**513**	**0,83**	**0,17**
17	3 Cape.	450	25	400	40	**515**	**0,84**	**0,16**
18	3 Cape.	450	25	420	42	**517**	**0,85**	**0,15**

4.6.3 Custos operacionais

Por também se tratar de um critério de custo, assim como o VPL, a função de valor deste critério é linear, com a pontuação máxima (1) destinada ao cenário com os custos operacionais totais mais baixos e pontuação mínima (0) aplicada aos custos operacionais mais altos. Os valores de entrada para os custos operacionais também são normalizados, variando de 0 a 1.

Através da Figura 11, pode-se observar o comportamento desta função.

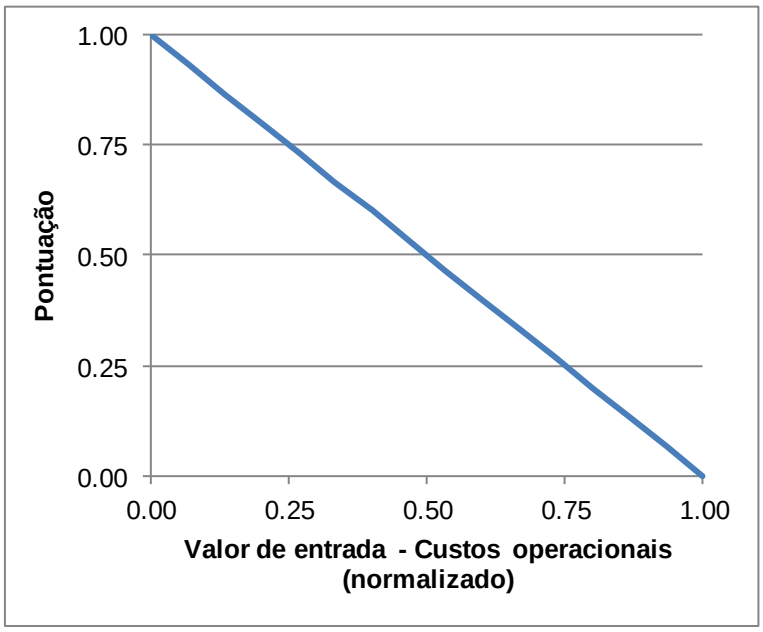


Figura 11: Função de valor – Custos operacionais.

Para se obter os custos operacionais totais do sistema, também faz-se necessário a utilização das premissas explicitadas na seção 4.2 (Tabela 2). Os valores obtidos e suas respectivas pontuações recebidas podem ser observados na Tabela 10. A composição desta tabela é dada da seguinte forma:

- Custo de combustível navegação;
- Custo de combustível parado;
- *Running costs* (tripulação, seguro, manutenção, custos administrativos, impostos, entre outros): Aplicado a todas as embarcações da frota, 365 dias por ano, pois, esteja o navio navegando, em espera, ou, indisponível, nenhum destes valores deixa de ser pago;
- Custo docas: é o custo das docagens realizadas no período analisado;

- Custo afretamento: refere-se ao custo de afretamento de embarcações substitutas nos períodos de docagem dos navios próprios;
- Custo Portuário: diz respeito aos custos de atracação nos três portos considerados (NE, SE e o porto de descarga);
- *Carrying costs*: são os custos operacionais de estocagem. Calculados a partir do estoque médio mantido em cada situação.

A análise da Tabela 10 permite a visualização de que o custo operacional mais impactante é o de tripulação e afins (*running costs*) em todas as simulações. Em seguida, para os cenários com navios Panamax, tem-se o custo portuário como o segundo mais elevado, devido ao alto número de atracações realizadas. Em terceiro lugar vem o custo de combustível em navegação, e, em quarto lugar aparecem os custos operacionais de estocagem.

Já para os cenários de 10 a 18 (navios Capesize), o segundo custo mais elevado é o de manutenção do estoque, em 7 das 9 situaçoes, devido aos altos estoques médios observados. Este custo é seguido de perto pelo custo portuário, e somente em quarto lugar aparece o custo de combustível em navegação.

Em todos os cenários simulados, os custos de combustível com a embarcação parada, afretamento e docagem são os menos relevantes ao sistema.

Tabela 10: Pontuações - Custos Operacionais.

Cen.	Núm. Dias Naveg.	Custo Comb. Naveg. (10^6 USD)	Núm. Dias Parado	Custo Comb. Parado (10^6 USD)	*Running Costs* (10^6 USD)	Núm. Docas	Custo Docas (10^6 USD)	Núm. Dias Afret.	Custo Afret. (10^6 USD)	Núm. Atrac. NE	Núm. Atrac. SE	Núm. Atrac. Usina	Custo Portos (10^6 USD)	Estoque médio (kt)	*Carryng Costs* Estoque (10^6 USD)	Custo Operac. Total (10^6 USD)	Custo Operac. Norma-lizado	Pontuação Recebida
1	9.599	**96,0**	17.093	**17,1**	**273,8**	21	**14,7**	840	**21,0**	1.492	639	2.131	**191,8**	141	**88,3**	**702,6**	**0,34**	**0,66**
2	10.105	**101,1**	16.584	**16,6**	**273,8**	21	**14,7**	840	**21,0**	1.382	744	2.127	**191,4**	139	**86,8**	**705,3**	**0,34**	**0,66**
3	10.620	**106,2**	16.072	**16,1**	**273,8**	21	**14,7**	840	**21,0**	1.274	849	2.123	**191,0**	136	**85,0**	**707,8**	**0,35**	**0,65**
4	9.603	**96,0**	25.945	**25,9**	**365,0**	28	**19,6**	1.120	**28,0**	1.492	640	2.132	**191,8**	109	**68,3**	**794,7**	**0,61**	**0,39**
5	10.099	**101,0**	25.455	**25,5**	**365,0**	28	**19,6**	1.120	**28,0**	1.381	743	2.124	**191,2**	108	**67,6**	**797,8**	**0,62**	**0,38**
6	10.602	**106,0**	24.976	**25,0**	**365,0**	28	**19,6**	1.120	**28,0**	1.271	848	2.118	**190,7**	108	**67,7**	**801,9**	**0,63**	**0,37**
7	9.624	**96,2**	34.807	**34,8**	**456,3**	35	**24,5**	1.400	**35,0**	1.495	641	2.136	**192,2**	116	**72,6**	**911,7**	**0,96**	**0,04**
8	10.150	**101,5**	34.305	**34,3**	**456,3**	35	**24,5**	1.400	**35,0**	1.387	747	2.134	**192,1**	116	**72,8**	**916,5**	**0,98**	**0,02**
9	10.683	**106,8**	33.776	**33,8**	**456,3**	35	**24,5**	1.400	**35,0**	1.280	854	2.134	**192,0**	120	**74,9**	**923,3**	**1,00**	**0,00**
10	4.494	**89,9**	13.297	**26,6**	**182,5**	14	**14,0**	560	**22,4**	698	299	997	**139,6**	239	**149,4**	**624,3**	**0,10**	**0,90**
11	4.747	**94,9**	13.047	**26,1**	**182,5**	14	**14,0**	560	**22,4**	649	349	998	**139,7**	255	**159,5**	**639,1**	**0,15**	**0,85**
12	4.987	**99,7**	12.807	**25,6**	**182,5**	14	**14,0**	560	**22,4**	598	399	997	**139,5**	265	**165,9**	**649,7**	**0,18**	**0,82**
13	4.385	**87,7**	13.407	**26,8**	**182,5**	14	**14,0**	560	**22,4**	681	292	974	**136,3**	229	**143,2**	**612,9**	**0,07**	**0,93**
14	4.534	**90,7**	13.258	**26,5**	**182,5**	14	**14,0**	560	**22,4**	619	333	953	**133,4**	194	**121,3**	**590,7**	**0,00**	**1,00**
15	5.002	**100,0**	21.682	**43,4**	**273,8**	21	**21,0**	840	**33,6**	599	399	998	**139,8**	196	**122,2**	**733,8**	**0,43**	**0,57**
16	4.506	**90,1**	22.167	**44,3**	**273,8**	21	**21,0**	840	**33,6**	700	300	1.000	**140,0**	255	**159,1**	**761,9**	**0,51**	**0,49**
17	4.755	**95,1**	21.922	**43,8**	**273,8**	21	**21,0**	840	**33,6**	650	350	1.000	**139,9**	278	**173,5**	**780,7**	**0,57**	**0,43**
18	4.999	**100,0**	21.674	**43,3**	**273,8**	21	**21,0**	840	**33,6**	599	399	998	**139,7**	276	**172,6**	**784,0**	**0,58**	**0,42**

4.6.4 Tempo suportado em fila na origem

O tempo suportado em fila refere-se ao tempo médio que os navios são obrigados a esperar na fila nos terminais de origem do minério de ferro. Trata-se de um parâmetro de incerteza e risco, uma vez que um cenário que suporta filas mais baixas é mais arriscado do que aquele que suporta altos níveis de fila. As alternativas que suportarem filas iguais a 150% de 2010 receberão pontuação 1,00 (máximo), 100% de 2010 terão pontuação 0,50 e 50% de 2010 ganharão pontuação 0,00 (mínimo). A Figura 12 representa esta função de valor.

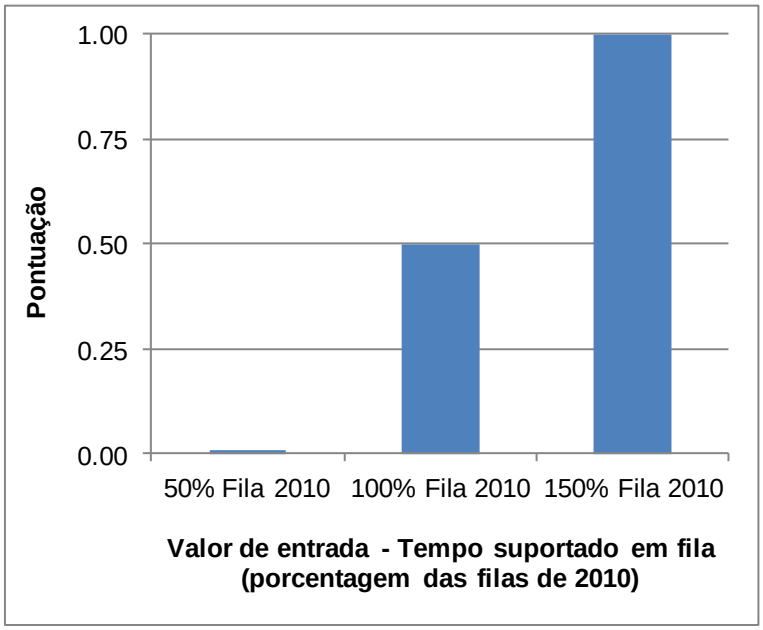


Figura 12: Função de valor – Tempo suportado em fila.

A Tabela 11 apresenta os valores recebidos em cada cenário, de acordo com as definições supracitadas.

Tabela 11: Pontuações - Filas suportadas na origem.

Cenário	Filas consideradas (% das filas de 2010)	Pontuação obtida
1	50%	0,00
2	50%	0,00
3	50%	0,00
4	100%	0,50
5	100%	0,50
6	100%	0,50
7	150%	1,00
8	150%	1,00
9	150%	1,00
10	50%	0,00
11	50%	0,00
12	50%	0,00
13	100%	0,50
14	100%	0,50
15	100%	0,50
16	150%	1,00
17	150%	1,00
18	150%	1,00

4.6.5 Proporção de minério de ferro SE

Logisticamente, a preferência deveria ser dada ao minério oriundo do NE, devido à menor distância entre os portos. No entanto, dadas as características distintas de cada insumo, para a usina é preferível trabalhar com o máximo possível do minério SE, no caso 40%. Como o sistema de transporte é que deve atender às expectativas de produção da fábrica, a preferência é dada para este caso de 40%.

Os cenários são simulados com essa proporção variando de forma discreta, em: 30%, 35% e 40% de minério SE. Dessa forma, a função de valor retornará pontuação 1,00 para 40%; 0,50 para 35%; e a condição de 30% de minério SE será avaliada com pontuação mínima (0,00). De acordo com estas condições, tem-se, na Tabela 12, as pontuações obtidas por cada cenário neste critério.

Tabela 12: Pontuações - % Minério SE.

Cenário	% Minério SE	Pontuação obtida
1	30%	0,00
2	35%	0,50
3	40%	1,00
4	30%	0,00
5	35%	0,50
6	40%	1,00
7	30%	0,00
8	35%	0,50
9	40%	1,00
10	30%	0,00
11	35%	0,50
12	40%	1,00
13	30%	0,00
14	35%	0,50
15	40%	1,00
16	30%	0,00
17	35%	0,50
18	40%	1,00

4.6.6 Tempo de espera para descarregar na usina

Este aspecto representa o tempo médio, que cada navio da frota espera para descarregar no porto da usina, e pode ser entendido como ociosidade da frota na descarga. Esta função retorna a pontuação máxima (1,00) para o valor de

entrada de tempo de espera mais baixo obtido, e mínima (0,00) para os maiores tempos de espera. A função é considerada linear e os valores de entrada são normalizados, isto é, variam de 0 a 1.

A Figura 13 ilustra a função de valor para o tempo de espera para descarregar na usina.

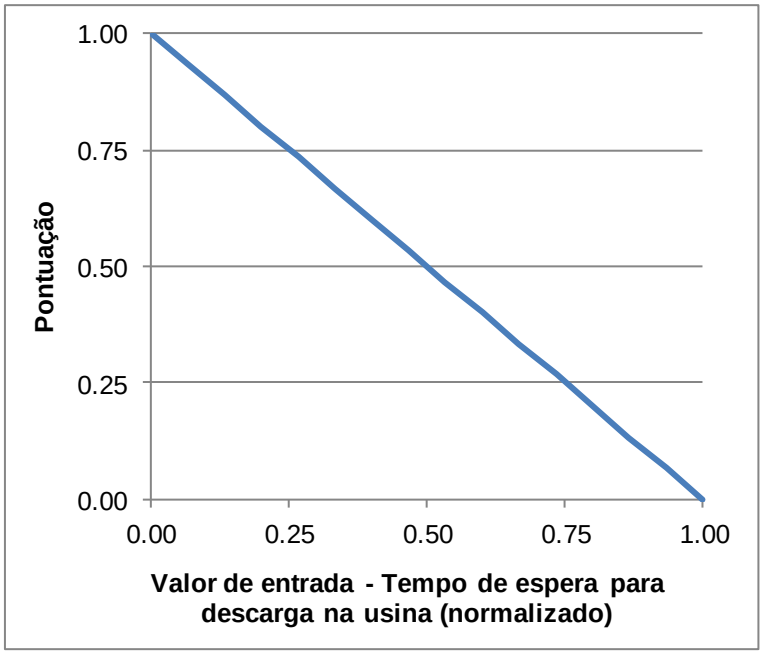


Figura 13: Função de valor – Tempo de espera para descarregar na usina.

Com a aplicação da função de valor aqui descrita, obteve-se as pontuações referentes a este critério (Tabela 13). Percebe-se que as pontuações mais altas estão relacionadas aos cenários com menor número de navios, tanto nos casos com navios da classe Panamax, como para as simulações com navios Capesize.

Tabela 13: Pontuações - Tempo de espera para descarga.

Cenário	Tempo de espera para descarregar na Usina (dias/ciclo)	Tempo de espera Normalizado	Pontuação obtida
1	1,72	0,11	0,89
2	1,45	0,07	0,93
3	1,17	0,04	0,96
4	3,05	0,28	0,72
5	2,79	0,25	0,75
6	2,50	0,21	0,79
7	4,39	0,45	0,55
8	4,04	0,41	0,59
9	3,62	0,35	0,65
10	3,23	0,30	0,70
11	2,91	0,26	0,74
12	2,63	0,23	0,77
13	0,89	0,00	1,00
14	0,90	0,00	1,00
15	8,59	1,00	0,00
16	6,43	0,72	0,28
17	6,05	0,67	0,33
18	5,72	0,63	0,37

4.7 Funções de ponderação

Será utilizada como função de ponderação no caso estudado uma das mais comuns, dentre inúmeras possíveis, que é a somatória das multiplicações da pontuação de cada critério pelo seu respectivo peso normalizado. Além do fácil entendimento e utilização deste tipo de função, ela ainda simplifica análises de sensibilidade que podem ser realizadas posteriormente.

A Tabela 14 apresenta a reunião de todas as pontuações recebidas nos 6 critérios considerados, para os 18 cenários analisados. Pode-se verificar que os cenários de 7 a 9 (5 navios Panamax) correspondem ao grupo de soluções menos interessantes. Já os cenários 12, 11 e 17 receberam, nesta ordem, as maiores notas dentre os 18 analisados.

Tabela 14: Pontuações ponderadas de todos os cenários.

Cenário/ Peso Critério	Paralisações Usina	VPL	Custos Operac.	Filas suportadas	% Minério SE	Tempo de espera desc.	Pontuação Ponderada
	(0,36)	(0,18)	(0,18)	(0,12)	(0,09)	(0,07)	
1	0,35	1,00	0,66	0,00	0,00	0,89	**0,49**
2	0,26	0,99	0,66	0,00	0,50	0,93	**0,50**
3	0,22	0,98	0,65	0,00	1,00	0,96	**0,53**
4	0,37	0,52	0,39	0,50	0,00	0,72	**0,41**
5	0,23	0,52	0,38	0,50	0,50	0,75	**0,40**
6	0,17	0,51	0,37	0,50	1,00	0,79	**0,42**
7	0,46	0,02	0,04	1,00	0,00	0,55	**0,34**
8	0,43	0,01	0,02	1,00	0,50	0,59	**0,37**
9	0,42	0,00	0,00	1,00	1,00	0,65	**0,41**
10	0,46	0,92	0,90	0,00	0,00	0,70	**0,54**
11	0,51	0,91	0,85	0,00	0,50	0,74	**0,60**
12	0,43	0,90	0,82	0,00	1,00	0,77	**0,61**
13	0,07	0,84	0,93	0,50	0,00	1,00	**0,47**
14	0,00	0,85	1,00	0,50	0,50	1,00	**0,51**
15	0,59	0,21	0,57	0,50	1,00	0,00	**0,50**
16	0,75	0,17	0,49	1,00	0,00	0,28	**0,53**
17	0,75	0,16	0,43	1,00	0,50	0,33	**0,56**
18	0,48	0,15	0,42	1,00	1,00	0,37	**0,51**

4.8 Recomendação de alternativas

Baseado nos valores obtidos pelas funções de ponderação, as alternativas estudadas podem ser ordenadas pela pontuação final obtida por cada uma. Isto

não significa que necessariamente a primeira colocada deverá ser a alternativa recomendada.

O decisor deve estar atento à recomendação da melhor alternativa caso haja mais alternativas com pontuações semelhantes, nas primeiras colocações. Somente o aprofundamento nestas soluções, realizado através de análises de sensibilidade é que poderá garantir a credibilidade, robustez e segurança da alternativa proposta.

A Tabela 15 elucida o *ranking* dos melhores cenários simulados.

Tabela 15: Classificação das soluções iniciais.

Posição no Ranking	Núm. do cenário	Nota Final
1ª	12	0,61
2ª	11	0,60
3ª	17	0,56
4ª	10	0,54
5ª	3	0,53
6ª	16	0,53
7ª	18	0,51
8ª	14	0,51
9ª	15	0,50
10ª	2	0,50
11ª	1	0,49
12ª	13	0,47
13ª	6	0,42
14ª	4	0,41
15ª	9	0,41
16ª	5	0,40
17ª	8	0,37
18ª	7	0,34

Pela análise da Tabela 15, verifica-se que o cenário que recebeu a maior pontuação foi o cenário 12, seguido muito próximo pelo cenário 11. O cenário 17 vem na sequência, em terceiro lugar.

É muito importante ressaltar, que dos 9 primeiros colocados na classificação geral, 8 são cenários que contam com navios Capesize. Além disso, dos 4 primeiros colocados, 3 possuem uma frota de 2 navios, e, apenas 1 possui frota com 3 navios Capesize (cenário 17).

Ademais, deve-se atentar ao fato de que os cenários 10, 11 e 12 suportam apenas 50% das filas de 2010 no carregamento, enquanto que, os cenários 16, 17 e 18 suportam 150% destes mesmos valores.

Todas essas constatações são importantíssimas para nortear a sequência do trabalho, que são as análises de sensibilidade, descritas a seguir.

4.9 Análises de sensibilidade

Após a obtenção dos resultados das alternativas recomendadas inicialmente, são realizadas análises de sensibilidade através da alteração dos pesos e prioridades dos critérios, e, também, por meio geração de novas alternativas de solução.

Propõe-se no presente estudo que inicialmente ocorra a variação dos pesos de importância dos critérios, de modo a se verificar dentre as soluções existentes quais são as mais bem classificadas em diferentes situações, e, portanto, mais promissoras.

Como primeira análise de sensibilidade, serão alteradas as prioridades dos critérios: tempo suportado em fila na origem, % de minério SE e o tempo de espera para descarga, como mostra a Tabela 16.

Tabela 16: Primeira sensibilidade nos critérios.

Critério	**Prioridade**	**Peso** (1/Prioridade)	**Peso normalizado**
Paralisações da usina	1	1,00	0,32
Valor presente líquido (VPL)	2	0,50	0,16
Custos operacionais	2	0,50	0,16
Tempo suportado em fila na origem	2	0,50	0,16
Proporção de minério de ferro SE	3	0,33	0,11
Tempo de espera para descarregar na usina	3	0,33	0,11
Soma		**3,17**	**1,00**

Na Tabela 16, elevou-se a prioridade do tempo suportado em fila na origem para as mesmas dos critérios de custo, e, igualou-se os 2 últimos critérios com prioridade 3. Optou-se por essa primeira variação, pois o critério paralisações da usina deve possuir destaque sempre, permanecendo como único com prioridade 1. Além disso, buscou-se enfatizar a questão do tempo de fila na origem, que é um fator de risco e incertezas do sistema.

A nova classificação geral obtida é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17: Classificação da primeira análise de sensibilidade.

Posição no Ranking	Núm. do cenário	Nota Final
1ª	12	0,60
2ª	17	0,58
3ª	11	0,57
4ª	18	0,54
5ª	3	0,53
6ª	16	0,53
7ª	14	0,53
8ª	10	0,51
9ª	15	0,49
10ª	2	0,49
11ª	13	0,49
12ª	1	0,47
13ª	9	0,46
14ª	6	0,46
15ª	5	0,43
16ª	4	0,41
17ª	8	0,41
18ª	7	0,37

Com o auxílio da Tabela 17, percebe-se que o cenário 12 continua na primeira posição, e que os cenários 17 e 11 trocaram suas classificações, com o cenário 18 agora aparecendo na 4ª posição.

Novamente, dos 9 primeiros colocados na classificação geral, 8 são cenários com navios Capesize. E, dos 4 primeiros colocados, agora 2 possuem frota de 2 navios (cenários 12 e 11) e 2 têm frota com 3 embarcações Capesize (cenários 17 e 18).

Além destas verificações, propõe-se outra análise de sensibilidade, eliminando-se os 2 últimos critérios, como mostra a Tabela 18.

Tabela 18: Segunda sensibilidade nos critérios.

Critério	Prioridade	Peso (1/Prioridade)	Peso normalizado
Paralisações da usina	1	1,00	0,40
Valor presente líquido (VPL)	2	0,50	0,20
Custos operacionais	2	0,50	0,20
Tempo suportado em fila na origem	2	0,50	0,20
Soma		**2,50**	**1,00**

E com a exclusão destes 2 últimos critérios, a classificação geral dos cenários fica como apresentado pela Tabela 19.

Tabela 19: Classificação da segunda análise de sensibilidade.

Posição no Ranking	Núm. do cenário	Nota Final
1ª	16	0,63
2ª	17	0,62
3ª	11	0,56
4ª	10	0,55
5ª	12	0,52
6ª	18	0,51
7ª	15	0,49
8ª	13	0,48
9ª	1	0,47
10ª	14	0,47
11ª	2	0,44
12ª	4	0,43
13ª	3	0,42
14ª	7	0,40
15ª	8	0,38
16ª	5	0,37
17ª	9	0,37
18ª	6	0,35

Verifica-se na Tabela 19, que os cenários 17 e 11 continuam entre os 3 primeiros colocados, porém, o cenário 12 cai para a quinta posição, pois um de seus pontos fortes (% de Minério SE) não é mais considerado nas análises, e o cenário 16 passa então a encabeçar a lista classificatória de cenários. Vale ressaltar que, mais uma vez, 8 dos 9 primeiros colocados são simulações utilizando navios Capesize.

A partir destas análises, fica evidente que a solução escolhida deverá girar em torno das que possuem navios Capesize na composição da frota. No entanto, ao se variar os pesos dos critérios pode haver ainda alguma indefinição quanto ao melhor cenário dentre estes. Pensando nisso, foram geradas algumas novas alternativas de solução, baseadas em variações daquelas que alcançaram os melhores resultados.

Dessa forma, foram criados mais seis cenários a serem analisados variando-se a frota para composições heterogêneas (Panamax com Capesize). Estes novos cenários foram calibrados quanto ao estoque necessário à operação, e são descritos na Tabela 20.

Tabela 20: Descrição dos cenários adicionais.

Cenário	Frota	% Min. SE	% Fila 2010 Carga	Est. NE (kt)	Est. SE (kt)
19	2 Panamax + 1 Cape	30%	100%	290	200
20	2 Panamax + 1 Cape	35%	100%	270	230
21	2 Panamax + 1 Cape	40%	100%	250	260
22	1 Panamax + 2 Cape	30%	150%	280	180
23	1 Panamax + 2 Cape	35%	150%	265	225
24	1 Panamax + 2 Cape	40%	150%	250	270

Os principais resultados obtidos nas simulações deste novos cenários, e comuns a ambos os tipos de navio, são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Resultados gerais cenários adicionais.

Cenário	Paralisações da Usina (dias/ano)	Tempo de espera para descarregar na Usina (dias/ciclo)
19	1,6	1,76
20	1,2	1,57
21	0,4	1,21
22	0,6	2,62
23	0,5	2,25
24	1,1	1,96

Os resultados diferenciados para navios Panamax e Capesize são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Principais resultados cenários adicionais.

Cen.	Panamax					Capesize				
	Nº total de Viagens NE	Nº total de Viagens SE	Tempo total navegação (dias)	Tempo total parado (dias)	Tempo total Indisponível (dias)	Nº total de Viagens NE	Nº total de Viagens SE	Tempo total navegação (dias)	Tempo total parado (dias)	Tempo total Indisponível (dias)
19	1.057	218	4.912	12.888	450	204	198	2.194	6.706	225
20	1.011	243	4.973	12.827	450	176	236	2.420	6.480	225
21	814	374	5.432	12.368	450	220	226	2.470	6.430	225
22	382	101	1.950	6.950	225	522	253	3.591	14.209	450
23	341	129	2.056	6.844	225	491	290	3.794	14.006	450
24	312	150	2.134	6.766	225	453	330	3.995	13.805	450

Estas novas alternativas serão então analisadas e comparadas somente com os cenários 10, 11, 12, 16, 17 e 18. Isto porque, em todas as sensibilidades realizadas os grupos de cenários com navios Capesize tiveram desempenho visivelmente superior. Além disso, os cenários 13, 14 e 15 são eliminados, pois este bloco sempre permaneceu entre as últimas colocações dentre os cenários Capesize, em todas as análises, e, portanto, não é um grupo promissor para ser incluído nas etapas finais do estudo.

As pontuações recebidas pelos novos cenários nos critérios de paralisações da usina, fila suportada nos portos de carga e % de minério SE, podem entrar direto na comparação geral. Já os cálculos para os critérios de custos (VPL e operacionais) e o tempo de espera para descarga na usina, necessitam ser recalculados com todos os cenários envolvidos, pois, tratam-se de valores que necessitam ser normalizados.

Dessa forma, a Tabela 23 apresenta os novos cálculos de VPL para todos os cenários pertinentes à análise. Pela mesma tabela, nota-se que as melhores

pontuações foram recebidas pelos cenários 10 a 12 (frota de 2 Capesizes) e as piores do 16 ao 18 (frota de 3 Capesizes). Os cenários com frotas mistas (19 a 24) são intermediários a esses grupos.

Tabela 23: Pontuações - VPL novas análises.

Cenário	Núm. Navios	Custo Navios (10^6 USD)	Custo fixo estoque (10^6 USD)	Capac. total estoques (kt)	Custo variável estoques (10^6 USD)	VPL Total (10^6 USD)	VPL Norma-lizado	Pontuação Recebida
10	2	300	25	370	37	362	0,00	1,00
11	2	300	25	390	39	364	0,01	0,99
12	2	300	25	410	41	366	0,03	0,97
16	3	450	25	380	38	513	0,97	0,03
17	3	450	25	400	40	515	0,99	0,01
18	3	450	25	420	42	517	1,00	0,00
19	3	350	25	490	49	424	0,40	0,60
20	3	350	25	500	50	425	0,41	0,59
21	3	350	25	510	51	426	0,41	0,59
22	3	400	25	460	46	471	0,70	0,30
23	3	400	25	490	49	474	0,72	0,28
24	3	400	25	520	52	477	0,74	0,26

Para o critério de tempo de espera para descarga na usina, pode-se observar os resultados por meio da Tabela 24. Nota-se que as pontuações mais altas estão no grupo dos cenários de 19 a 21, e as piores no grupo de 16 a 18.

Tabela 24: Pontuações - Espera para descarga novas análises.

Cenário	Tempo de espera para descarregar na Usina (dias/ciclo)	Tempo de espera Normalizado	Pontuação obtida
10	3,23	0,39	0,61
11	2,91	0,32	0,68
12	2,63	0,27	0,73
16	6,43	1,00	0,00
17	6,05	0,93	0,07
18	5,72	0,86	0,14
19	1,76	0,10	0,90
20	1,57	0,07	0,93
21	1,21	0,00	1,00
22	2,62	0,27	0,73
23	2,25	0,20	0,80
24	1,96	0,14	0,86

Para o cálculo dos custos operacionais, dividiu-se as simulações de 19 a 24 em duas categorias diferentes, de acordo com o tipo de navio, pois são sistemas com frotas mistas. Assim, nas linhas "P" estão os custos para os navios Panamax, e nas linhas "C" estão os custos para os navios Capesize (Tabela 25).

Pela Tabela 25, nota-se claramente que os navios do tipo Panamax afetam muito os custos operacionais do sistema, e os cenários com mais embarcações desta classe recebem as piores pontuações. Já os 3 primeiros cenários, que contam com apenas 2 Capesizes na frota, apresentam as maiores pontuações neste quesito.

Tabela 25: Pontuações - Custos operacionais novas análises.

Cen.	Núm. Dias Naveg.	Custo Comb. Naveg. (10^6 USD)	Núm. Dias Parado	Custo Comb. Parado (10^6 USD)	*Running Costs* (10^6 USD)	Núm. Docas	Custo Docas (10^6 USD)	Núm. Dias Afret.	Custo Afret. (10^6 USD)	Núm. Atrac. NE	Núm. Atrac. SE	Núm. Atrac. Usina	Custo Portos (10^6 USD)	Estoque médio (kt)	*Carryng Costs* Estoque (10^6 USD)	Custo Operac. TOTAL (10^6 USD)	Custo Operac. Norma-lizado	Pontuação Recebida
10	4.494	89,9	13.297	26,6	182,5	14	14,0	560	22,4	698	299	997	139,6	239	149,4	**624,3**	**0,00**	**1,00**
11	4.747	94,9	13.047	26,1	182,5	14	14,0	560	22,4	649	349	998	139,7	255	159,5	**639,1**	**0,06**	**0,94**
12	4.987	99,7	12.807	25,6	182,5	14	14,0	560	22,4	598	399	997	139,5	265	165,9	**649,7**	**0,11**	**0,89**
16	4.506	90,1	22.167	44,3	273,8	21	21,0	840	33,6	700	300	1.000	140,0	255	159,1	**761,9**	**0,57**	**0,43**
17	4.755	95,1	21.922	43,8	273,8	21	21,0	840	33,6	650	350	1.000	139,9	278	173,5	**780,7**	**0,65**	**0,35**
18	4.999	100,0	21.674	43,3	273,8	21	21,0	840	33,6	599	399	998	139,7	276	172,6	**784,0**	**0,66**	**0,34**
19 P	4.912	49,1	12.888	12,9	182,5	14	9,8	560	14,0	1.057	218	1.274	114,7	141	88,3	**843,7**	**0,91**	**0,09**
19 C	2.194	43,9	6.706	13,4	91,3	7	7,0	280	11,2	204	198	402	56,3	239	149,4			
20 P	4.973	49,7	12.827	12,8	182,5	14	9,8	560	14,0	1.011	243	1.254	112,8	139	86,8	**856,6**	**0,96**	**0,04**
20 C	2.420	48,4	6.480	13,0	91,3	7	7,0	280	11,2	176	236	413	57,8	255	159,5			
21 P	5.432	54,3	12.368	12,4	182,5	14	9,8	560	14,0	814	374	1.188	106,9	136	85,0	**865,0**	**1,00**	**0,00**
21 C	2.470	49,4	6.430	12,9	91,3	7	7,0	280	11,2	220	226	447	62,5	265	165,9			
22 P	1.950	19,5	6.950	6,9	91,3	7	4,9	280	7,0	382	101	482	43,4	109	68,3	**812,1**	**0,78**	**0,22**
22 C	3.591	71,8	14.209	28,4	182,5	14	14,0	560	22,4	522	253	775	108,5	229	143,2			
23 P	2.056	20,6	6.844	6,8	91,3	7	4,9	280	7,0	341	129	470	42,3	108	67,6	**793,9**	**0,70**	**0,30**
23 C	3.794	75,9	14.006	28,0	182,5	14	14,0	560	22,4	491	290	781	109,4	194	121,3			
24 P	2.134	21,3	6.766	6,8	91,3	7	4,9	280	7,0	312	150	462	41,6	108	67,7	**798,7**	**0,72**	**0,28**
24 C	3.995	79,9	13.805	27,6	182,5	14	14,0	560	22,4	453	330	783	109,6	196	122,2			

Com todos os itens necessários devidamente calculados, passa-se para a próxima etapa, a da ponderação dos critérios através de seus respectivos pesos normalizados. A Tabela 26 elucida estes cálculos para os pesos determinados originalmente neste estudo (Tabela 3).

Tabela 26: Pontuações ponderadas novas análises.

Cenário/ Peso Critério	Paralis. na Usina	VPL	Custos Operacionais	Filas suportadas	% Minério SE	Espera p/ descarga	Pontuação Ponderada
	0,36	**0,18**	**0,18**	**0,12**	**0,09**	**0,07**	
10	0,46	1,00	1,00	0,00	0,00	0,61	**0,57**
11	0,51	0,99	0,94	0,00	0,50	0,68	**0,62**
12	0,43	0,97	0,89	0,00	1,00	0,73	**0,63**
16	0,75	0,03	0,43	1,00	0,00	0,00	**0,47**
17	0,75	0,01	0,35	1,00	0,50	0,07	**0,50**
18	0,48	0,00	0,34	1,00	1,00	0,14	**0,45**
19	0,42	0,60	0,09	0,50	0,00	0,90	**0,40**
20	0,47	0,59	0,04	0,50	0,50	0,93	**0,45**
21	0,82	0,59	0,00	0,50	1,00	1,00	**0,62**
22	0,68	0,30	0,22	1,00	0,00	0,73	**0,51**
23	0,74	0,28	0,30	1,00	0,50	0,80	**0,59**
24	0,48	0,26	0,28	1,00	1,00	0,86	**0,54**

Com estas ponderações efetuadas, novamente elabora-se uma classificação dos cenários de acordo com suas notas, visualizada na Tabela 27.

Tabela 27: Classificação novas análises

Posição no Ranking	Núm. do cenário	Nota Final
1ª	12	0,63
2ª	11	0,62
3ª	21	0,62
4ª	23	0,59
5ª	10	0,57
6ª	24	0,54
7ª	22	0,51
8ª	17	0,50
9ª	16	0,47
10ª	20	0,45
11ª	18	0,45
12ª	19	0,40

Através da Tabela 27, verifica-se que o cenário 12 é novamente o primeiro colocado, assim como na primeira classificação realizada, porém, nota-se também que dos 6 primeiros colocados, 3 são cenários adicionados posteriormente. Outra constatação importante, é que não há nenhuma solução com 3 Capesizes na frota dentre os primeiros colocados, e que 5 dos 6 primeiros apresentam 2 Capesizes na frota.

Além disso, deve-se atentar ao fato de que apesar do cenário 21 aparecer na terceira posição, este é o único entre os 6 primeiros com 2 navios Panamax. Somado a isso, as soluções do mesmo grupo de 2 Panamax aparecerem na última e antepenúltima posição, nos cenários 19 e 20, respectivamente.

A partir destes resultados pode-se realizar novas análises de sensibilidade para se comprovar a robustez das soluções com 2 Capesizes na frota. Para isto,

atualizou-se as prioridades e os pesos dos critérios de acordo com a primeira análise de sensibilidade realizada, e descrita na Tabela 16.

Os resultados dessa nova análise de sensibilidade são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Classificação sensibilidade novas análises.

Posição no Ranking	Núm. do cenário	Nota Final
1ª	21	0,64
2ª	23	0,62
3ª	12	0,61
4ª	11	0,59
5ª	24	0,59
6ª	22	0,53
7ª	10	0,53
8ª	17	0,51
9ª	18	0,48
10ª	20	0,48
11ª	16	0,47
12ª	19	0,42

Nota-se pela Tabela 28 que o cenário 21 é o primeiro classificado. No entanto, percebe-se, mais uma vez, que este é o único com 2 Panamax entre os 9 primeiros colocados. Isto caracteriza uma solução sem robustez, pois caso as condições estabelecidas (filas, % de minério, tempos, entre outras) não sejam exatamente cumpridas, esta pode se tornar uma das piores soluções dentre as 12 simulações finalistas.

Em contrapartida, os cenários com 2 Capesizes na frota aparecem na sequência, ocupando todos os lugares, da 2ª à 7ª posição, diferenciando-se

apenas pelo fato dos cenários 22, 23 e 24 contarem com 1 Panamax adicional na frota (com relação aos cenários 10, 11 e 12), e, por isso, suportarem filas de 150% das encontradas em 2010 nos portos de origem.

Com uma leitura aprofundada do problema, e uma interpretação correta destes dados, o decisor pode eliminar as opções com 3 Capesizes na frota, e também qualquer uma que tenha 2 Panamax ou mais como solução. Isso já é de grande valia para o auxílio à decisão.

Uma solução que pode se adequar muito bem ao problema proposto é a aquisição de 2 navios Capesize (soluções 10, 11 e 12). Pois, estes cenários foram bem classificados em todas as análises realizadas. Deve-se levar em conta que o caso estudado foi simplificado, e que na realidade o empreendimento deve ser iniciado de forma gradativa. Caso seja notado, neste início gradual, que as filas nos terminais de origem de minério são maiores do que o esperado e que os 2 navios da frota não serão suficientes para atender à demanda, a solução ainda é muito boa e robusta, pois, basta adicionar um único Panamax a esta frota que o sistema atenderá a todos os requisitos mais pessimistas que foram testados, e ainda terá um desempenho entre os 6 primeiros colocados de 24 cenários testados (Cenários 22, 23 e 24). Além disso, todos estes 6 cenários citados necessitam de 400 a 500 kt de capacidade estática de estocagem para minério de ferro, o que os torna compatíveis, inclusive neste aspecto.

Um decisor afoito, ou que não acompanhou todo o processo de tomada de decisão, poderia, ao analisar a Tabela 28, tomar alguma medida que não fosse a mais indicada nesse caso.

É por isso que se ratifica, ao fim dessa aplicação, que o método proposto no presente trabalho não é algo exato, que indica necessariamente a melhor decisão em único passo. As análises de *tradeoff* propostas precisam ser estudadas profundamente, e, levando-se em conta todos os detalhes envolvidos durante o desenvolvimento do trabalho como um todo, para que não se cometa erros na fase final.

Ao seguir estes passos exemplificados, a ferramenta certamente norteia e orienta a tomada de decisão com embasamento técnico e prático, e, além disso, é uma metodologia que pode envolver uma equipe de vários especialistas, na definição de critérios e pesos, por exemplo, corroborando com a credibilidade das decisões realizadas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como principal conclusão e contribuição do presente estudo, tem-se a comprovação da eficácia do uso de simulação de eventos discretos em um ambiente mais amplo e complexo do que pura e simplesmente o desenvolvimento e aplicação de um modelo. Concluiu-se que a combinação das metodologias de estudos de *tradeoff* com a SED, no dimensionamento de sistemas de transporte aquaviário, é eficaz como uma ferramenta de suporte à tomada de decisão. Ademais, esta pode ser de grande valia para analistas envolvidos nesta área, uma vez que é notória a quantidade de problemas complexos e de objetivos conflitantes enfrentados normalmente.

Além disso, a ferramenta descrita e aplicada no presente estudo pode ser adaptada para outros problemas de transporte aquaviário em ciclo fechado, através da re-leitura de premissas, critérios e do próprio modelo de simulação em si.

Outra contribuição observada é a possibilidade de se basear a escolha por alternativas em diversos critérios relevantes, e muitas vezes antagônicos. Geralmente, isto não é observado em um estudo convencional de simulação, onde, muitas vezes, as avaliações operacionais são apenas eliminatórias, isto é, separam os cenários em viáveis ou inviáveis, e a classificação dos viáveis é feita com base em único critério. Isto acontece porque a maioria dos estudos que se observa nesta área levam em conta apenas os custos ou os lucros de uma determinada solução. Ao se observar e trabalhar um problema de forma mais ampla e completa, inclusive com a participação de diversos especialistas

na definição de critérios e prioridades, fomenta-se uma tomada de decisão muito mais abrangente e com mais credibilidade.

No que se refere ao estudo de caso trabalhado, obteve-se, através da aplicação do método proposto, uma solução concreta para o dimensionamento da frota em questão: a aquisição de 2 navios Capesize com capacidade líquida de 150 kt. As análises de sensibilidade mostraram que, caso haja algum problema com as premissas utilizadas, como tempos de fila maiores que os considerados, necessidade de alteração do % de minério de ferro SE, ou situações similares, a simples inclusão de um navio Panamax com capacidade de 70 kt é suficiente para suprir essas incertezas e riscos, pois, inclusive as capacidades estáticas de estocagem necessárias são relativamente próximas (de 400 a 500 kt). Isso vem ao encontro da proposta de se obter soluções robustas e confiáveis para problemas logísticos complexos como este.

Uma dificuldade enfrentada foi a característica discreta do problema, pois, em se tratando de navios, muitas vezes uma determinada frota não é suficiente para se atender a toda demanda, porém, a adição de um único navio extra já pode ocasionar uma grande ociosidade no sistema de transportes, devido aos grandes lotes com que se trabalha. Neste ponto, uma recomendação de aplicação seria a variação de tamanhos de frota mais discretizada, com mais classes de navio, por exemplo.

Além disso, análises de sensibilidade em outros aspectos, como nas funções de valor, por exemplo, podem ser realizadas para se observar o comportamento e as respostas do sistema como um todo à variação dos dados

de entrada. Outro ponto a se considerar é a participação de diversos especialistas para a determinação dos critérios e, principalmente, seus respectivos pesos de importância, pois isto concede mais credibilidade ao estudo.

E, por fim, sugere-se que a metodologia proposta (estudos de *tradeoff* com simulação de eventos discretos) e a ferramenta desenvolvida sejam adaptadas e utilizadas em problemas logísticos complexos como um todo, seja na área de transportes, produção, ou qualquer outra em que se julgue necessário e adequado, de forma que se teste sua eficácia em diversos âmbitos. Para trabalhos futuros, recomenda-se fortemente que outra variedade de critérios, como ambientais e sociais, por exemplo, sejam incluídos nos estudos, pois são de extrema relevância e estão cada vez mais presentes em tomadas de decisões de grande parte.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, M.M.C., (2009). **Caracterização e dimensionamento de um sistema de cabotagem industrial**. 168 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Engenharia de Sistemas Logísticos. São Paulo, 2009.

BALLOU, R.H., (2006). Decisões sobre Políticas de Estoques. In:_____ **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial**. 5. ed. cap. 9, p. 271-331.

BELTON, V., STEWART, J.T., (2001). **Multiple criteria decision analysis – An integrated approach**. Kluwer Academic Publishers, London.

BLUMENFELD, D.E., BURNS, L.D., DILTT, J.D., DAGANZO, C.F. (1985). **Analyzing tradeoffs between transportation, inventory and production costs on freight networks**. Transportation Research, 19B (5), 361-380.

BLUMENFELD, D.E., HALL, R.W., JORDAN, W.C. (1985). **Tradeoff between freight expediting and safetty stock inventory costs**. Journal of Business Logistics. 6 (1) , 79-100.

BOTTER, R.C. (2002). **Vantagens e Desvantagens da Aplicação de Técnicas de Simulação versus a Teoria de Filas no planejamento portuário: Uma Discussão Conceitual e uma Aplicação Prática**. 19º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, Rio de Janeiro.

BOTTER, R.C., BRINATI, M.A., ROQUE, J.R.R., (1988). **Dimensionamento de um sistema integrado de transporte de álcool e óleo diesel na região de influência da hidrovia Tietê-Paraná**. XII Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro, RJ. XXI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional em Conjunto com o VI Congresso Latino-Ibero-

Americano de Pesquisa Operacional e Engenharia de Sistemas, Engenharia Naval e Oceânica, p. 13-44.

BRITO, T.B. (2008). **Modelagem e simulação de um terminal regulador de contêineres**. 202 p. Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção. São Paulo, 2011.

BRITO, T.B., (2011). **Aplicabilidade da Simulação Híbrida em Sistemas Logísticos**. 212 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Engenharia de Sistemas Logísticos. São Paulo, 2011.

BRITO, T.B., SILVA, R.C.S., BOTTER, R.C. (2010). **Discrete Event Simulation Combined with Multi-Criteria Decision Analysis Applied to Steel Plant Logistics System Planning**. Anais da 28ª Winter Simulation Conference, 5-8 de Dezembro de 2010, Maryland, USA.

BURNS, L.D., HALL, R.W., BLUMENFELD, D.E., DAGANZO, C.F. (1985). **Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs**. Operations Research, 33 (3), 469-490.

CHWIF, L., MEDINA, A.C. (2007). **Modelagem e simulação de eventos discretos: Teoria e Aplicações**. Editora do Autor, 2ª Edição, São Paulo.

COYLE, J.J., BARDI, E.J., LANGLEY JR., C.J. (2002). **The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective**, 7th ed. South-Western Publishing, Mason, Ohio.

DANIELS, J., WERNER, P.W., BAHILL, A.T. (2001). **Quantitative methods for tradeoff analyses**. Systems Engineering 4 (3), 190-212.

DIÁRIO DO NORDESTE (2009). **R$ 80 mi para Terraplanagem**. Disponível em: <http://www.metalica.com.br/rs-80-mi-para-terraplanagem>. Acesso em: novembro/2011.

FERNANDES, M.G., (2001). **Modelo econômico-operacional para para análise e dimensionamento de terminais de contêineres e veículo**. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2001.

GUALDA, N.D.F. (1995). **Terminais de Transporte: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional**. Tese de Livre Docência – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 1995.

INCOSE (2004). **International Council on Systems Engineering**. INCOSE Systems Engineering handbook v2a.

INFOMONEY (2011). **Tonelada de minério de ferro deverá manter-se acima dos US$ 100, diz corretora. 05 de outubro de 2011**. Disponível em: <http://www.infomoney.com.br/mmxmineracao/noticia/2226260-tonelada+minerio+ferro+devera+manter+acima+dos+100+diz+corretora>. Acesso em: dezembro/2011.

KELTON, W.D., SADOWSKI, R.P., SADOWSKI, D.A., (1998). **Simulation with ARENA**, McGraw Hill, Boston, MA.

KENDALL, P.M.H. (1972). **A theory of optimum ship size**. Journal of transport economics policy. May 1972, Vol. 6, No. 2, P. 128.

KEENEY, R.L. (2002). **Common mistakes in making value trade-offs**. Operations Research Vol. 50, No. 6, November–December 2002, pp. 935–945.

LANDMAN, J.R., (1993). **The persistence of the possible**. Oxford University Press, New York, NY.

LEE, H.L., NAHMIAS, S., (1993). Single-product, single-location models. In: GRAVES, D.P.S.C., RINNOOY KAN, A.H.G., ZIPKIN, P.H. **Logistics of production and inventory**. Eds., Handbooks in OR & MS, Vol. 4. cap. 1, p. 1-51.

MANKIW, N.G. (2006). **Principles of Economics**, 4th ed. South-Western College Pub.

MENDES, A.B., (1999). **Modelo econômico-operacional para o dimensionamento do transporte intermodal de cargas pela hidrovia Tietê-Paraná**. 212 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 1999.

MESQUITA, M.A., (1994). **Estudo de sistemas fechados de filas em transporte fluvial**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 1994.

MONTIBELLER, G., FRANCO, L.A., (2007). **Decision and Risk Analysis for the evaluation of strateg-ic options**. Supporting Strategy: Frameworks, Methods and Models. ed. F.A. O'Brien, and R.G. Dyson. 251-284. Wiley, Chichester.

MONTIBELLER, G., FRANCO, L.A., (2008). **Multi-criteria Decision Analysis for Strategic Decision Making**. Handbook of Multicriteria Analysis, Volume 103, Part 1, p. 25-48, Springer, 1st Edition, Gainesville.

O JORNAL DO NORDESTE (2009). **A Companhia Siderúrgica do Pecém autorizada para começar a terraplanagem**. 04 de dezembro de 2009. Sergio de Sousa. Disponível em: <http://www.onordeste.com/blogs/index.php?titulo=A%20Companhia%20Sider%C3%BArgica%20do%20Pec%C3%A9m%20autorizada%20para%20come%C3%A7ar%20a%20terraplanagem&notid=4143&id_user=11>. Acesso em: novembro/2011.

ONO, R.T. (2007). **Modelagem Sistêmica e Planejamento Logístico da Cadeia de Suprimento de Petróleo**. 213 p. Tese (Doutorado) – Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2007.

PEDGEN, C.D, SHANON, R.E., SADOWSKY, R. (1995). **Introduction to Simulation Using SIMAN**. 2ª ed., New York, McGraw-Hill.

PEREIRA, N.N., (2012). **Um estudo sobre água de lastro aplicado a terminais de minério de ferro***.* 349 p. Doutorado (Tese) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2012.

PRADO, A.A.A., SOUZA, K., YOSHIZAKI, H., (2009). **Seleção de fornecedores de transporte utilizando análise de decisão multi-critério***.* XXIII ANPET. p. 194. Novembro 9-13, Vitória – ES.

ROSCH, E., MERVIS, C.B., GRAY, W.D., JOHNSON, D.M., BOYES-BRAEM, P. (1976). **Basic objects in natural categories***,* Cognitive Psychology 8, 382-439.

SAATY, T.L., (1980). **The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation***.* McGraw-Hill, New York, NY.

SAATY, T.L., (2001). **Decision making for leaders**. RWS Publications. Pittsburgh.

SILVA, R.C.S., ARAGÃO, M.M.C., BOTTER, R.C., (2009). **Avaliação operacional e econômica de trade-off no dimensionamento e investimento em frota e tancagem para o escoamento de etanol pela hidrovia Tietê-Paraná***.* 1er. Congreso de diseño e ingeniería naval. Março de 2009, Cartagena de Indias, Colômbia.

SILVA, R.C.S., BRITO, T.B., BOTTER, R.C., PEREIRA, N.N., (2011). **Modeling of a Closed-Loop Maritime Transportation System with Discrete Event Simulation and Multi-Criteria Decision Analysis***.* International Conference on

Modeling, Simulation and Control (ICMSC). Campus de Berkeley – UC. Berkeley, CA.

SMITH, E.D. (2006). **Tradeoff studies and cognitive biases**. 225 p. Doutorado (Tese) – Department of Systems and Industrial Engineering. University of Arizona. Arizona, 2006.

STILLWELL, W.G., SEAVER, D.A., EDWARDS, W., (1981). **A comparison of weight approximation techniques in multiattribute utility decision making**. Organizational Behavior and Human Performance 28, p. 62-77.

WINSTON, W.L., (2004). **Operations Research Applications and Algorithms**. 4th ed., Thomson Brooks/Cole, Belmont, CA.

WYMORE, A.W., (1977). **A mathematical theory of systems engineering: The elements**. Robert E. Krieger, Huntington, NY.

WYMORE, A.W., (1993). **Model-Based Systems Engineering**. CRC Press, Boca Raton, FL.

WYMORE, A.W., (1997). **Subsystems optimization implies system suboptimization: Not!**. Disponível em: http://www.sie.arizona.edu/sysengr/wymore/optimal.html. Acesso em: março/2011.

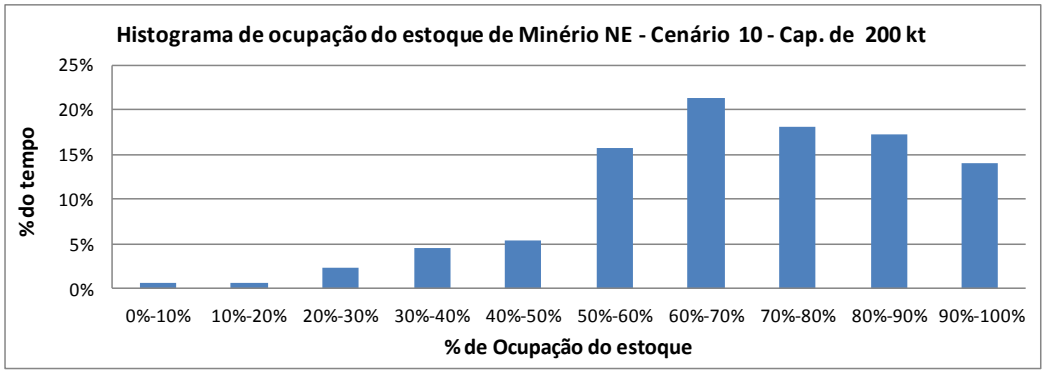
WYMORE, A.W., (2004). **The nature of research in systems engineering**. Conference on Systems Engineering Research.

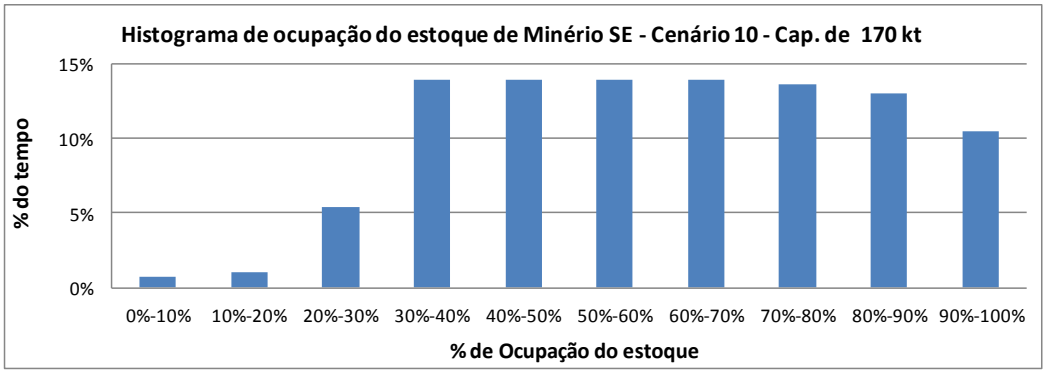
APÊNDICES

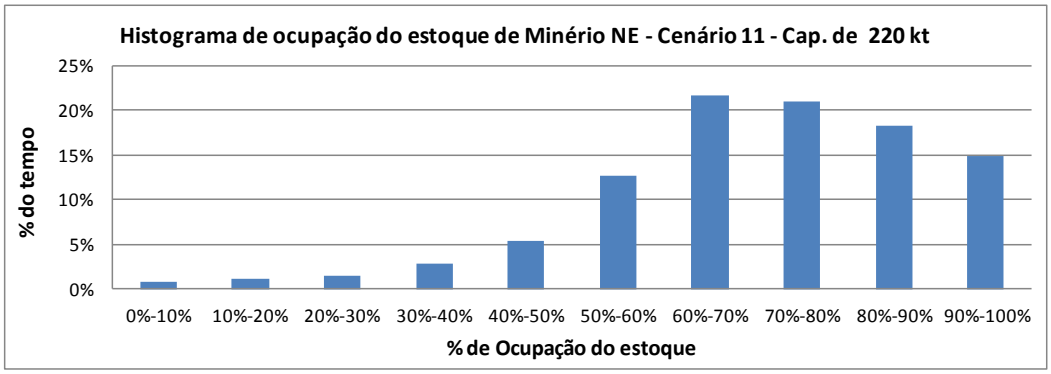
APÊNDICE A - Modelo de simulação desenvolvido em Arena®.

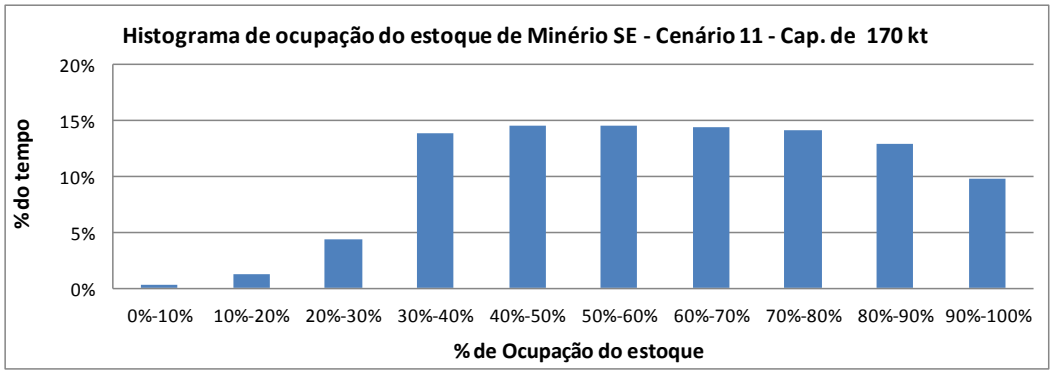
APÊNDICE B - Histogramas de estoque.

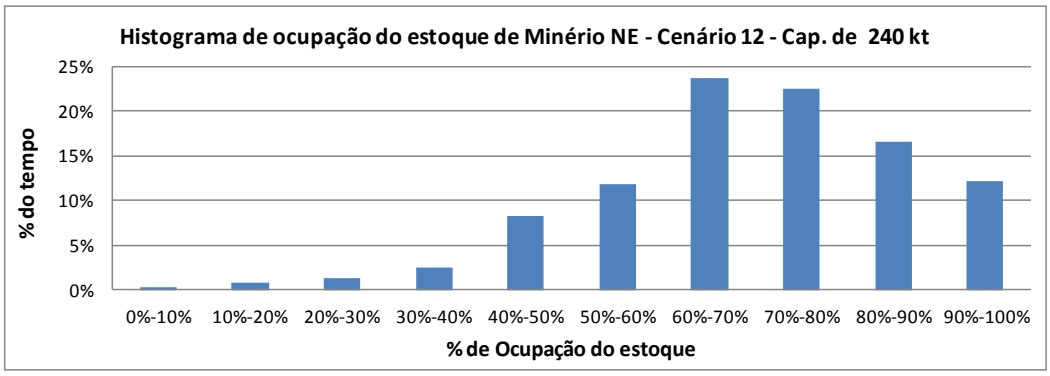
São apresentados, para os 6 cenários mais promissores (10, 11, 12, 22, 23 e 24), histogramas que contemplam o comportamento da ocupação de cada estoque ao longo das 10 replicações de 25 anos.

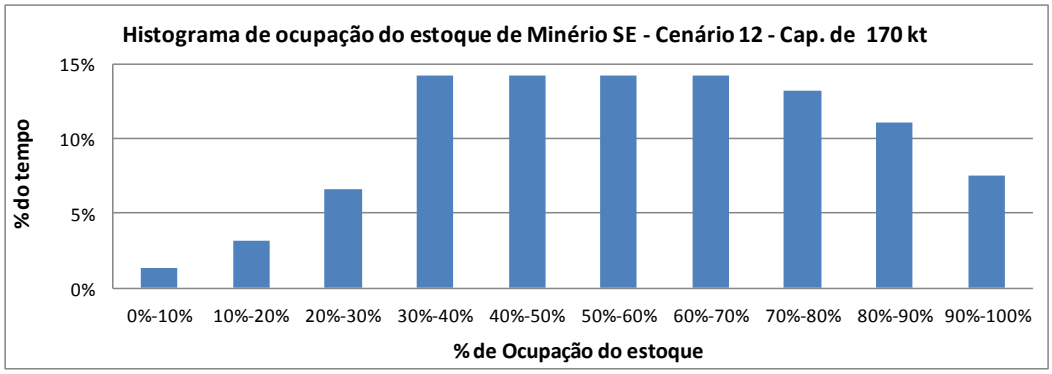


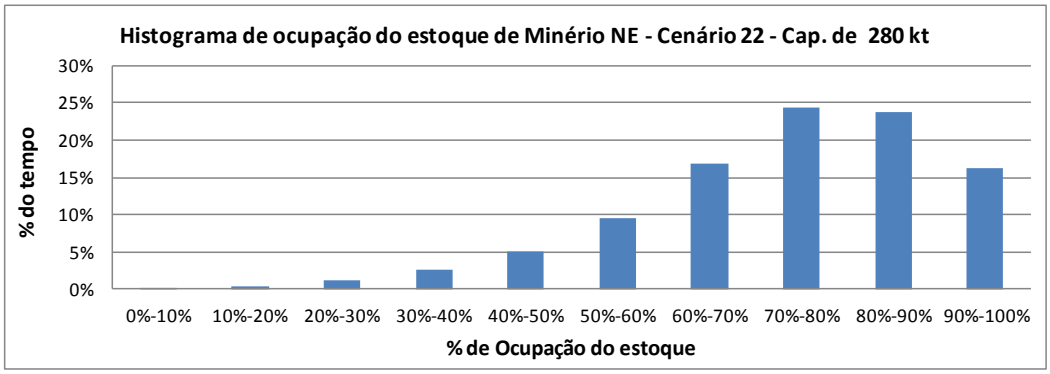


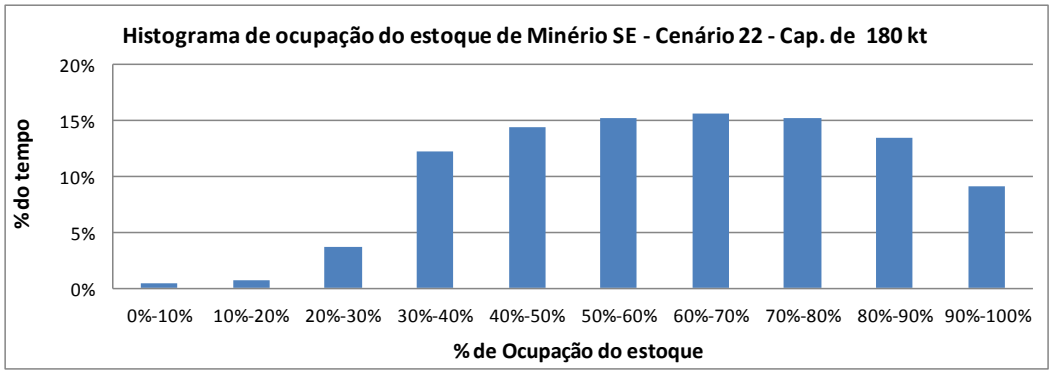

Histograma de ocupação do estoque de Minério NE - Cenário 11 - Cap. de 220 kt
% do tempo
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque

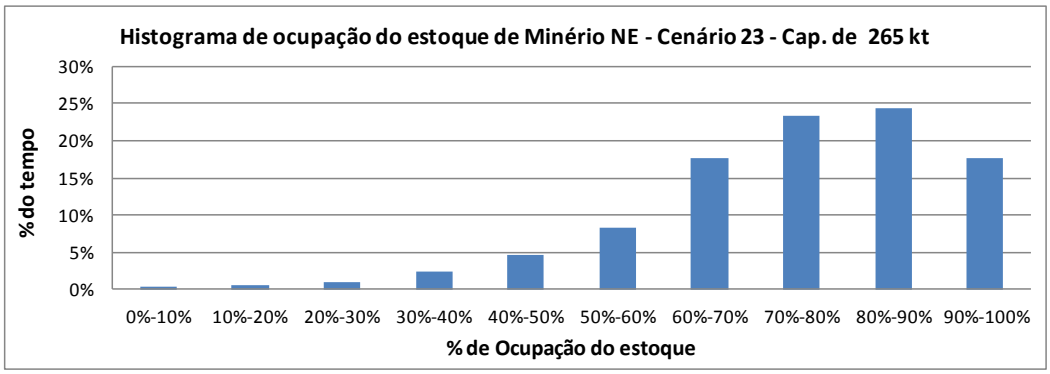

Histograma de ocupação do estoque de Minério SE - Cenário 11 - Cap. de 170 kt
% do tempo
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque

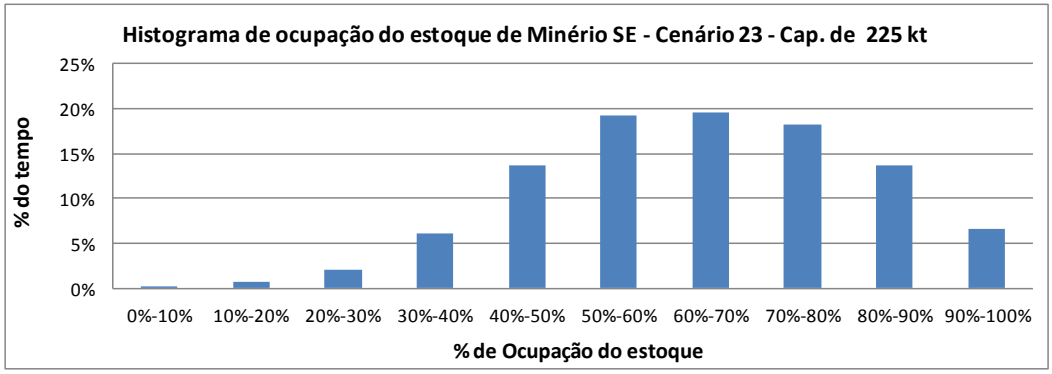

Histograma de ocupação do estoque de Minério NE - Cenário 12 - Cap. de 240 kt
% do tempo
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque

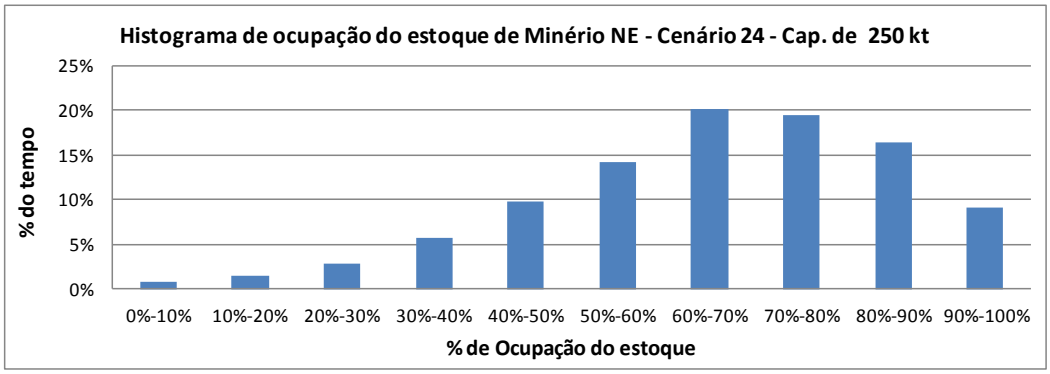

Histograma de ocupação do estoque de Minério SE - Cenário 12 - Cap. de 170 kt
% do tempo
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque

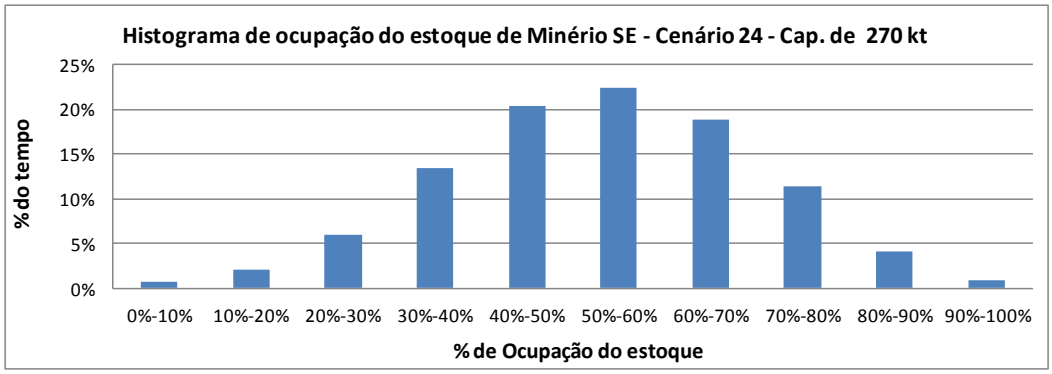

Histograma de ocupação do estoque de Minério NE - Cenário 22 - Cap. de 280 kt
% do tempo
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque


Histograma de ocupação do estoque de Minério SE - Cenário 22 - Cap. de 180 kt
% do tempo
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque


Histograma de ocupação do estoque de Minério NE - Cenário 23 - Cap. de 265 kt
% do tempo
30%
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque


Histograma de ocupação do estoque de Minério SE - Cenário 23 - Cap. de 225 kt
% do tempo
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque


Histograma de ocupação do estoque de Minério NE - Cenário 24 - Cap. de 250 kt
% do tempo
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque


Histograma de ocupação do estoque de Minério SE - Cenário 24 - Cap. de 270 kt
% do tempo
25%
20%
15%
10%
5%
0%
0%-10%
10%-20%
20%-30%
30%-40%
40%-50%
50%-60%
60%-70%
70%-80%
80%-90%
90%-100%
% de Ocupação do estoque