EDSON FELIPE CAPOVILLA TREVISAN

Métodos de simulação-otimização e análise de decisão multi-critério aplicados ao dimensionamento de sistemas logísticos complexos

São Paulo

2013

EDSON FELIPE CAPOVILLA TREVISAN

Métodos de simulação-otimização e análise de decisão multi-critério aplicados ao dimensionamento de sistemas logísticos complexos

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

São Paulo

2013

EDSON FELIPE CAPOVILLA TREVISAN

Métodos de simulação-otimização e análise de decisão multi-critério aplicados ao dimensionamento de sistemas logísticos complexos

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

Área de Concentração:

Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador: Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo

2013

Esse exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ... de..... de 2013

Assinatura do Autor:

Assinatura do Orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA

Trevisan, Edson Felipe Capovilla
Métodos de simulação-otimização e análise de decisão multi-critério aplicados ao dimensionamento de sistemas logísticos complexos / E.F.C. Trevisan – versão corr. -- São Paulo, 2013.
120 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Sistemas Logísticos.

1.Simulação (Estatística) 2.Otimização estocástica 3.Análise de decisão multicritério 4.Simulação de eventos discretos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

pelo amor, amizade e apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Rui Carlos Botter, pela orientação e apoio ao longo dos últimos sete anos.

Aos grandes amigos que fiz no CILIP, por propiciarem um ambiente alegre e companheiro. Em especial, ao João, MontanhA, Renata e Thiago.

Ao Medina, pelos papos sobre futebol, pela amizade e principalmente pelas dicas durante o mestrado!

À minha namorada Paloma, pela atenção e companheirismo, deixando meus dias sempre melhores.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmãos (Giu, Giulia e Pedro), que sempre me apoiaram durante minhas conquistas e tropeços.

Aos professores André Bergstein e Gilberto Montibeller, pelas valiosas conversas durante a elaboração da dissertação.

“A lição é a seguinte: nunca desista, nunca, nunca, nunca. Em nada. Grande ou pequeno, importante ou não. Nunca desista. Nunca se renda à força, nunca se renda ao poder aparentemente esmagador do inimigo.”

Winston Churchill

RESUMO

O estudo de sistemas logísticos envolve a concatenação de elementos estratégicos e operacionais, comumente compondo sistemas com múltiplas facetas, objetivos antagônicos e grande número de alternativas. Nesse contexto, o presente trabalho discute a utilização de análise de decisão multicritério (MCDA), simulação de eventos discretos (SED) e otimização para simulação. A metodologia MCDA captura, mensura e pondera os objetivos e valores dos tomadores de decisão. Por sua vez, a SED representa o sistema estudado com alto nível de detalhamento, permitindo a avaliação de diversas configurações do sistema. Por fim, métodos de "otimização para simulação" possibilitam a busca e comparação de alternativas mais eficientes. As três metodologias são avaliadas, identificando suas vantagens, desvantagens e complementaridades quando aplicadas a sistemas logísticos. Através da aplicação de um estudo de caso sobre o dimensionamento de um sistema de transporte, constatou-se que: a) a SED incorporou detalhes importantes para a avaliação mais precisa de vários indicadores de desempenho b) a metodologia MCDA possibilitou a captura de vários objetivos e valores, propiciando a realização de *tradeoffs* robustos; c) um método de busca exaustiva e técnicas de redução de variância permitiram a comparação das alternativas em tempos computacionais reduzidos. Por fim, conclui-se que a metodologia híbrida apresentada expande o potencial de aplicação da SED em sistemas logísticos complexos.

Palavras-Chave: Simulação de Eventos Discretos, Simulação-Otimização, Análise de Decisão Multi-Critério, Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos.

ABSTRACT

A logistic system study involves strategic and operational elements, commonly composing multi-faceted systems with antagonistic goals and large number of alternatives. In this context, this thesis discusses the use of multi-criteria decision analysis (MCDA), discrete event simulation (DES) and optimization for simulation. The MCDA methodology captures, measures and weighs the goals and values of decision makers. DES is useful for representing systems with high level of detail, allowing the evaluation of several system configurations. Finally, “optimization for simulation” procedures are useful for searching and comparing more efficient alternatives. These three methodologies are assessed and their advantages, disadvantages, and complementarities are identified for logistics systems applications. Through a case study of a transportation system, we conclude that: a) the SED incorporated important details for more precise evaluation of various performance indicators b) the MCDA methodology was useful to capture several goals and values, so that robust tradeoffs could be carried out c) an exhaustive search routine and variance reduction techniques allowed the comparison of several alternatives in feasible computational times. Finally, we conclude that the presented hybrid methodology expands the application of DES to complex logistics systems.

Key Words: Discrete-Event Simulation, Simulation-Optimization, Multi-Criteria Decision Analysis, Logistics systems

Lista de figuras

Figura 1 – Modelo integrado de simulação, otimização e MCDA 23

Figura 2 - Metodologia da análise de decisão (adaptado Keeney, 1982) 28

Figura 3 - Teoria e prática em otimização para simulação (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR) 42

Figura 4 - Transporte de minério Brasil – Ásia.....44

Figura 5 - Arranjo dos berços de exportação e importação 47

Figura 6 - Árvore de valor para o dimensionamento do sistema de transporte 58

Figura 7 - Função de transferência de valor para o critério "Impacto ambiental" 59

Figura 8 - Definição dos pesos pelo método *Swing Weights* 61

Figura 9 - Estoque com reabastecimento não instantâneo (SILVA, 2012) 70

Figura 10 - Regime transitório do nível de estoque – Determinístico.....72

Figura 11 – Regime transitório do nível de estoque.....73

Figura 12 – Comportamento do tempo em fila na importação – Regime transitório 73

Figura 13 - Correlograma dos tempos em fila para exportação.....74

Figura 14 - Resultados do cenário base: comportamento do nível de estoque 84

Figura 15 – Tempos em fila de exportação para 89

Figura 16 - *Tradeoff* entre custo de estoque e demurrage.....93

Figura 17 - Análise de *tradeoff* entre custos e alternativas 103

Figura 18 - Análise de sensibilidade dos critérios: resultados 107

Figura 19 – Gráfico sobre as potencialidades das metodologias SED, MCDA e Otimização para simulação (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR) 110

Lista de tabelas

Tabela 1 - Limites de capacidade de navio por classe 46

Tabela 2 - Tempos de atracação e desatracação por classe de navio (horas) – Berços de exportação 46

Tabela 3 - Quantidade de minério retirada por classe de navio.....47

Tabela 4 – Taxas brutas dos carregadores de navio 48

Tabela 5 - Taxa de correção de eficiência do CN por classe de navio 48

Tabela 6 - Capacidade dos pátios no CD 49

Tabela 7 - Tempos de fila e operação nos portos brasileiros 49

Tabela 8 - Tempos de viagem entre o CD e os portos brasileiros 49

Tabela 9 - Custos de navegação 50

Tabela 10 - Custos de pátio, estoque e equipamentos. 50

Tabela 11 - Laytime por classe de navio 51

Tabela 12 – Exemplo de possíveis combinações de frota de importação 53

Tabela 13 - Exemplo do número de configurações candidatas para o estudo de caso 53

Tabela 14 - Parâmetros da função de transferência de cada critério 60

Tabela 15 - Resumo dos atributos e pesos considerados 62

Tabela 16 - Resultados do cenário base: demanda atendida.....76

Tabela 17 - Resultados do cenário base: tempo médio em fila para exportação 76

Tabela 18 - Resultados do cenário base: tempo médio de atracação para exportação 77

Tabela 19 - Resultados do cenário base: tempo médio de espera por CN....77

Tabela 20 - Tempo médio de carregamento.....78

Tabela 21 - Resultados do cenário base: tempo médio de desatracação para exportação 78
Tabela 22 - Resultados do cenário base: tempo médio de estadia para exportação 79
Tabela 23 - Resultados do cenário base: número médio de atracações por ano 79
Tabela 24 - Resultados do cenário base: taxa média de carregamento do berço de exportação 80
Tabela 25 - Resultados do cenário base: ocupação dos recursos de exportação 81
Tabela 26 - Resultados do cenário base: composição dos tempos em porto para importação 81
Tabela 27 - Resultados do cenário base: composição dos tempos de ciclo da frota 82
Tabela 28 – Ocupação dos berços e descarregadores de navio 82
Tabela 29 – Custos com demurrage 83
Tabela 30 – Estatísticas das simulações - CRN 89
Tabela 31 - Correlação entre tempos em fila de exportação - CRN 90
Tabela 32 – Teste de hipótese para tempo médio em fila 90
Tabela 33 - Análise de sensibilidade: porcentagem da demanda empurrada 92
Tabela 34 - Análise de sensibilidade: porcentagem da demanda empurrada 93
Tabela 35 – alternativas para escolha da frota 95
Tabela 36 – Análise de sensibilidade: resultados para variação da frota 96
Tabela 37 - Análise estatística dos resultados para variação da frota 97
Tabela 38- Configurações possíveis de pátio com variação de frota 98

Tabela 39 - Análise de sensibilidade: resultados para variação do pátio.....99

Tabela 40 - Análise estatística dos resultados para variação da capacidade de pátio 99

Tabela 41 - Composição dos navios.....100

Tabela 42 - Resultados: todas variáveis de decisão.....101

Tabela 43 - Análise estatística dos resultados para todas variáveis de decisão 102

Tabela 44 - Pontuação das alternativas.....104

Tabela 45 - Estatística das pontuações 106

Tabela 46 – Potencialidades da SED, MCDA e otimização na avaliação de sistemas logísticos (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR) 109

Sumário

1. Introdução 19

1.1. Objetivos do estudo 21

1.2. Estudo de caso 21

1.3. Apresentação do método 22

1.4. Estrutura da dissertação 23

2. Caracterização das metodologias de simulação, análise de decisão e simulação-otimização 24

2.1. Simulação de eventos discretos 24

2.1.1. Qualidade em projetos com simulação 26

2.2. Análise de decisão multicritério 27

2.3. Simulação-Otimização 30

2.3.1. Comparação de dois sistemas 33

2.3.2. Procedimentos de comparações múltiplas (*Multiple Comparisons Procedures* - MCP*)* 34

2.3.3. Ranking and Selection (R&S) 35

2.3.4. *Common random numbers* (CRN) 36

2.3.5. *Response surface methodology* (RSM) 36

2.3.6. Procedimentos baseados no gradiente 37

2.3.7. Busca aleatória 37

2.3.8. Sample Path Optimization (SPO) 38

2.3.9. Meta-heurísticas 38

2.3.10. Aplicações práticas de métodos de simulação-otimização 38

2.4. Conclusões sobre as metodologias apresentadas 40

3. Estudo de caso: Sistema logístico para distribuição de minério 43

3.1. Dados do problema 45

3.1.1. Parâmetros gerais 46

3.1.2. Custos 50

3.2. Análise de alternativas candidatas 51

3.3. Critérios de avaliação das alternativas de decisão 54

3.4. Definição dos objetivos 54

3.5. Árvore de valor 55

3.5.1. Definição das funções de valor 58

3.5.2. Definição dos pesos 60

4. Modelo de simulação de eventos discretos 64

4.1. Modelo conceitual 64

4.1.1. Geração de navios 65

4.1.2. Exportação 66

4.1.3. Carregamento 67

4.1.4. Blendagem 67

4.1.5. Importação e descarregamento 68

4.1.1. Ciclo fechado 68

4.2. Implementação 70

4.3. Análise de dados 71

4.4. Verificação 71

4.5. Análise do regime transitório 72

4.6. Definição da duração das rodadas 74

4.7. Validação 75

4.8. Cenário Base 75

5. Análise de alternativas 85

5.1. Método de comparação entre duas alternativas 86

5.2. Sobre a utilização de *Common Random Numbers* (CRN) 88

5.3. Análises de sensibilidade com o método de busca proposto 91

5.3.1. Avaliação da demanda empurrada 91

5.3.2. Variação da frota de importação 94

5.3.3. Capacidade de pátio 97

5.4. Análise com todas variáveis de decisão 100

5.4.1. Resultados 100

5.4.2. Análise de sensibilidade dos critérios 106

6. Conclusões 108

6.1. SED, MCDA e Simulação-otimização aplicados a sistemas logísticos. 108

6.2. Conclusão sobre o estudo de caso 111

6.3. Conclusões gerais 111

6.4. Recomendações na área de otimização para simulação 113

6.5. Recomendações para estudos de sistemas portuários 114

7. Bibliografia 115

1. Introdução

O estudo de sistemas logísticos e cadeias de suprimentos envolve o alinhamento de elementos estratégicos e operacionais (MENTZER et al., 2001; FISHER, 1997; NARASIMHAN et al., 2008; LAPIDE, 2006), muitas vezes compondo sistemas com múltiplas facetas, objetivos antagônicos e grande número de alternativas (BRITO et al., 2012)

Em função da complexidade desses sistemas, modelos computacionais de simulação (de eventos discretos, contínua e de agentes), métodos de programação linear, inteira ou inteira-mista, modelos analíticos matemáticos e outras frentes da Pesquisa Operacional (P.O.) são constantemente aplicados, como por exemplo, nos trabalhos de Iannoni e Morabito (2006), Trevisan et al., (2010), Ono (2007), Dias (2003) e Silva (2012).

Para resolução de alguns problemas, todavia, a aplicação de mais de uma metodologia pode ser vantajosa para modelagem e/ou obtenção de resultados mais robustos. Howick e Ackermann (2011), por exemplo, discutem aplicações híbridas de P.O., apresentando trabalhos já realizados e tendências futuras.

Dentre as inúmeras necessidades e características de sistemas logísticos e de cadeias de suprimentos, podem ser destacados três aspectos importantes:

1. Dificuldade em definir critérios de avaliação de alternativas/opções: em determinados casos, há *tradeoffs* complexos entre uma alternativa e outra, além de múltiplos critérios a serem avaliados;

2. Grande complexidade e interação entre subsistemas: sistemas logísticos podem possuir aleatoriedade nos processos e interações complexas entre variáveis e recursos, resultando em sistemas de difícil avaliação com técnicas convencionais (planilhas eletrônicas, por exemplo);
3. Grande número de alternativas possíveis: é comum existir problemas combinatórios inviáveis de serem analisados individualmente e manualmente.

Nesse contexto, o presente estudo aborda o desenvolvimento de um método híbrido que tem como objetivo auxiliar estudos de sistemas logísticos complexos que possuam os três aspectos supracitados. Esse método se baseia em três metodologias: Análise de Decisão Multi-Critério (MCDA), Simulação de Eventos Discretos (SED) e Otimização[1] para Simulação (FU, 2002).

A metodologia MCDA visa capturar objetivos e valores dos tomadores de decisão e estruturar critérios para a mensuração das alternativas. Por sua vez, a simulação de eventos discretos (SED) incorpora os detalhes e a dinâmica dos elementos do problema, enquanto os métodos de "otimização"

---

[1] "Otimização para simulação" é um termo discutido pro Fu (2002) para descrever métodos de busca e comparação de alternativas em um modelo de simulação. A rigor, o termo otimização é utilizado para descrever métodos que comprovadamente encontram a solução ótima de um sistema. No entanto, a literatura aborda os termos *"simulation-optimization"* e *"optimization for simulation"* para também classificar métodos de busca e de comparação.

visam definir o conjunto de variáveis de decisão que promove o resultado “ótimo” ou um conjunto de resultados mais eficientes para o sistema.

1.1. Objetivos do estudo

Os objetivos do presente trabalho são:

- Avaliar as metodologias de simulação, simulação-otimização e análise de decisão multicritério aplicadas a sistemas logísticos;
- Desenvolver um modelo de Simulação-Otimização-MCDA aplicado a um estudo de caso;
- A partir dos experimentos com o modelo, concluir quais foram os principais benefícios da utilização de tal metodologia híbrida para o problema proposto.

1.2. Estudo de caso

O estudo de caso abordado nesse trabalho é sobre o dimensionamento de um Centro de Distribuição (CD) de minério de ferro na Ásia para movimentação de 90 milhões de toneladas por ano (MTPA). Nesse sistema logístico, deve-se dimensionar a composição da frota de navios próprios (navios da classe Chinamax e Capesize) para o transporte entre portos brasileiros, além de avaliar os sistemas de recebimento, movimentação e despacho de minério do CD. Em especial, deve-se avaliar a capacidade dos pátios de minério e nível de estoque no CD.

O estudo de caso ilustra o grande número de alternativas que um sistema logístico pode possuir e como diversos *tradeoffs* estão atrelados ao processo

decisório. Por exemplo, a frota de navios de importação pode ser composta por navios do tipo Chinamax (com capacidade de 400 mil toneladas) e Capesize (com capacidade de 150 mil toneladas). Os navios do tipo Chinamax propiciam ganhos de economia de escala, mas impactam na capacidade necessária de armazenagem no CD, uma vez que compõem grandes lotes. Além disso, eles podem ser recebidos em poucos portos ao redor do mundo, já que possuem um grande calado, representando um risco maior caso o mercado de minério tenha oscilações ou mudanças.

1.3. Apresentação do método

O método utilizado compõe um modelo de análise de decisão multi-critério (MCDA), um modelo de simulação de eventos discretos (SED) e um modelo de “otimização” para simulação, resultando em um modelo integrado, ilustrado na Figura 1.

Através do modelo MCDA, os objetivos e valores dos tomadores de decisão serão convertidos em atributos (critérios), pesos e funções de valor, possibilitando uma forma de pontuação para as alternativas. Esse sistema de pontuação é de grande relevância para a realização de *tradeoffs* em sistemas logísticos, discutidos no trabalho de Silva (2012). O modelo de simulação, por sua vez, representa os processos do sistema logístico em alto nível de detalhe, considerando as aleatoriedades e as inter-relações entre as variáveis de decisão e os resultados. Por fim, utilizam-se métodos de otimização para simulação para gerar e comparar alternativas em um processo iterativo. Esses métodos são importantes para a redução dos

tempos computacionais, fator relevante à luz do grande número de alternativas e do “custo” de uma simulação.

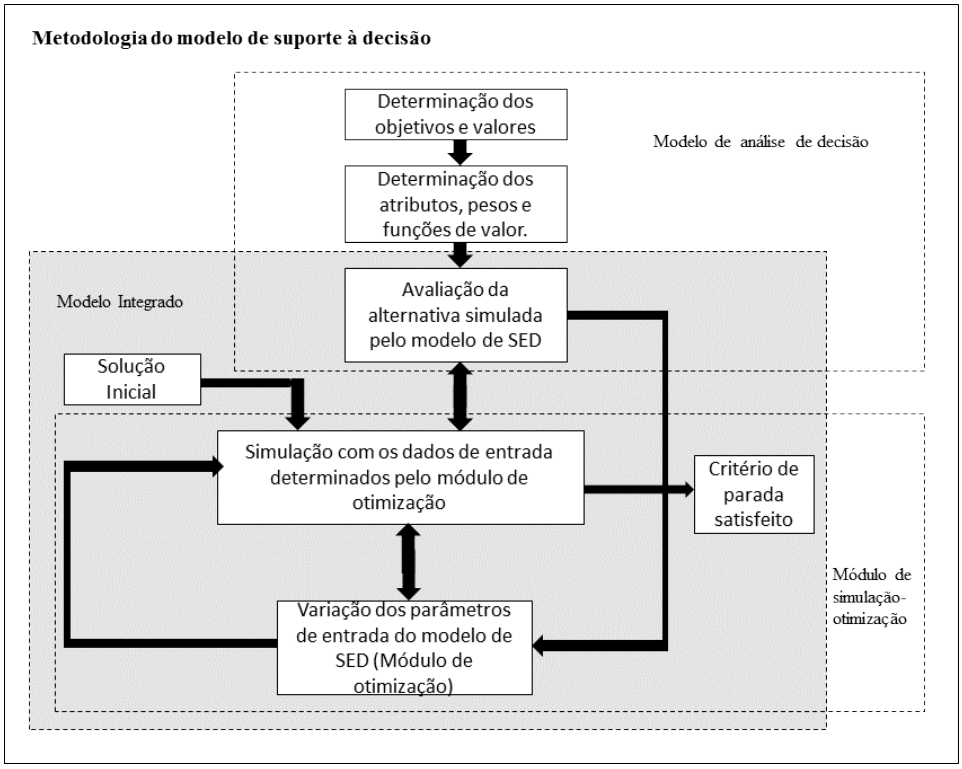

Figura 1 – Modelo integrado de simulação, otimização e MCDA

1.4. Estrutura da dissertação

O capítulo 2 apresenta as características e aplicações das metodologias que compõe o método proposto (SED, MCDA e simulação-otimização). O estudo de caso é apresentado no capítulo 3, assim como o desenvolvimento do modelo de análise multicritério. No capítulo 4, o desenvolvimento do modelo de simulação de eventos discretos é apresentado, assim como uma avaliação do cenário base. No capítulo 5, são apresentadas as análises de cenários obtidas com um método de busca exaustiva e comparação de alternativas. Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões e recomendações do trabalho.

2. Caracterização das metodologias de simulação, análise de decisão e simulação-otimização

O objetivo deste capítulo é apresentar as características e aplicações de cada elemento que compõe o método proposto: simulação, otimização para simulação e análise decisão multicritério.

2.1. Simulação de eventos discretos

A terminologia simulação refere-se a uma vasta coleção de métodos e aplicações destinadas a imitar o comportamento de sistemas reais (KELTON ET AL., 1998).

Schriber (1974) propõe que a “simulação implica na modelagem de um processo ou um sistema, de tal maneira que é capaz de reproduzir as respostas que seriam emitidas pelo sistema real através de uma sucessão de eventos durante um determinado período de tempo”, enquanto Harrel et al (2004) definem simulação como um processo de experimentação através de um modelo de um sistema real com o objetivo de determinar o comportamento desse sistema sob diferentes condições.

Por sua vez, Winston (2004) ressalta que a complexidade e o caráter aleatório tornam a simulação uma ferramenta poderosa no estudo de sistemas complexos, e define a simulação como uma técnica que imita a operação de um sistema ao longo do tempo. Ainda, o autor descreve que a simulação é um processo de experimentos e seus resultados são amostras,

de tal forma que quanto maior o número de amostras, mais precisas as estimativas sobre o sistema serão.

Brito (2011) afirma que simulação é a concatenação de dois processos:

1) A construção de um modelo representando um sistema;
2) Sua posterior experimentação objetivando a observação e compreensão do comportamento do sistema em estudo.

Ao caracterizar a simulação como a construção de um modelo de interesse e a posterior utilização do computador para observação do comportamento desse modelo do sistema sob diversas políticas, fica clara a possibilidade de o usuário realizar análises “e se” (*what-if*). Isso quer dizer que ele é capaz de responder questões pertinentes ao funcionamento do sistema no cenário atual e como ele poderia vir a funcionar em cenários hipotéticos. “O que aconteceria se...” é a frase que melhor ilustra a finalidade da simulação de um sistema e é o principal apelo do uso dessa ferramenta. A simulação computacional permite então que o sistema seja estudado sem que o sistema real sofra qualquer tipo de perturbação, caso ele exista. O analista pode supor a situação que julgar conveniente, seja ela possível ou não, e analisar o comportamento do sistema sob tais circunstâncias, expandindo a compreensão do sistema.

Dentre os paradigmas existentes de simulação (contínua, eventos discretos e agentes), o presente estudo adota a simulação de eventos discretos (SED). Tal escolha não foi arbitrária: modelos de simulação de eventos discretos (SED) têm sido aplicados de forma eficiente para a avaliação de sistemas logísticos complexos. A SED é capaz de reproduzir o comportamento de

sistemas reais em detalhe, proporcionando o tomador de decisão com informações valiosas sobre o comportamento do sistema e como ele pode ser modificado (SWEETSER, 1999).

Nesse contexto, a SED é aplicada em sistemas logísticos por possibilitar a consideração de um maior detalhamento dos processos em relação aos modelos matemáticos puros. Exemplos dessas aplicações são: análise de um sistema logístico para produção de cana de açúcar, dimensionando as frentes de corte, frota e terminais de transbordo e descarga (IANNONI; MORABITO, 2006) e a análise de terminais portuários, resultando no dimensionamento do número de equipamentos, capacidade de pátio, nível de serviço, entre outros. (TREVISAN *et al.*, 2010).

Por fim, os trabalhos de Chwif e Medina (2010), Brito, (2011), Kelton Et Al. (1998); Altiok e Melamed (2007); Sweetser, (1999) são referências úteis no aprofundamento dos conceitos de simulação de eventos discretos.

2.1.1. Qualidade em projetos com simulação

Um importante aspecto no desenvolvimento de projetos envolvendo simulação de eventos discretos é a qualidade, sendo seu significado para SED explorado por Robinson (2002).

Primeiramente, o autor destaca a simulação em dois extremos: engenharia de software e processo de mudança social. No primeiro caso, usualmente são desenvolvidas “soluções procurando por problemas”, com um grande número de modeladores, baixa participação de usuários e projetos de longa duração. A simulação como uma mudança social baseia-se em um problema,

é desenvolvida juntamente com usuários da simulação ou clientes resultando em um alto grau de envolvimento entre as partes e, por último, são projetos de curta duração usualmente contando com um único modelador.

Nesse contexto, Robinson destaca três conceitos de qualidades básicos: (i) conteúdo, (ii) processos e (iii) resultado de um estudo de simulação. A qualidade do conteúdo refere-se, em primeiro lugar, à assertividade da especificação do problema e, em segundo lugar, se o modelo em si representa o problema corretamente (considerando sua validade). A qualidade do processo diz respeito sobre como o trabalho é desenvolvido e se satisfaz as expectativas dos usuários/clientes, considerando aspectos como relacionamento entre as partes, nível de comunicação, confiança no modelador e cronograma do trabalho. Por último, a qualidade dos resultados é relacionada à utilidade da simulação no processo de tomada de decisão.

Por fim, Robinson (2002) ressalta que “a modelagem de simulação só sobreviverá enquanto for uma técnica útil para seus usuários e clientes”. Portanto, a estruturação dos critérios de avaliação de um problema decisório desempenha papel importante no desenvolvimento de um estudo envolvendo simulação, tanto na qualidade do conteúdo quanto na qualidade e utilidade dos resultados. Uma das formas de se definir esses critérios é através da metodologia de análise de decisão multicritério.

2.2. Análise de decisão multicritério

Segundo Keeney (1982), análise de decisão é “uma filosofia, articulada por um conjunto lógico de axiomas, e uma metodologia e coleção de

procedimentos sistemáticos, baseados nesses axiomas, para analisar de forma responsável as complexidades inerentes em problemas decisórios".

A metodologia clássica de análise de decisão, apresentada na Figura 2, divide em quatro passos o processo de tomada de decisão: 1-Estruturação do problema; 2-Avaliação dos possíveis impactos das alternativas; 3-Determinação da preferência dos tomadores de decisão; e 4-Avaliação e comparação das alternativas.

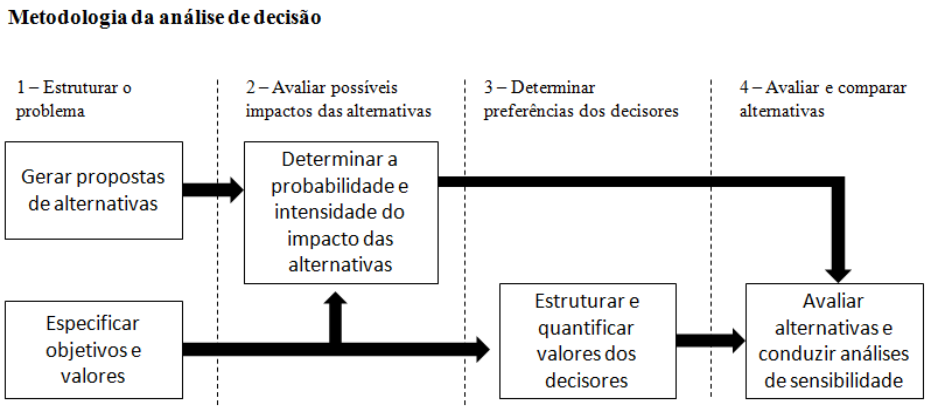

Figura 2 - Metodologia da análise de decisão (adaptado Keeney, 1982)

Segundo Montibeller e Franco (2009), os valores são o que os tomadores de decisão se importam e devem ser a força motriz para a tomada de decisão. Na cadeia de suprimentos, flexibilidade e velocidade de resposta ao mercado são exemplos de valores para algumas empresas. Por sua vez, as alternativas são os meios de atingir os valores mais fundamentais, enquanto os atributos são a forma de se mensurar as alternativas. Cada atributo está vinculado com um valor. Por exemplo, o valor "velocidade de resposta ao mercado" pode ser mensurado pelo atributo "tempo médio de entrega dos pedidos".

Dessa forma, a primeira etapa da metodologia clássica apresentada na Figura 2 aborda a determinação dos objetivos, valores, atributos e a geração de alternativas; a segunda etapa aborda o julgamento dos impactos das alternativas; a terceira etapa visa à estruturação e quantificação dos valores (em forma de atributos) e, por fim, na quarta etapa as alternativas são avaliadas e análises de sensibilidade são realizadas para avaliar a consistência das alternativas.

Goodwin e Wright (2004) enfatizam que o processo de aplicação de métodos de Análise de Decisão Multicritério não é linear ao longo dessas etapas apresentadas, e os tomadores de decisão são livres para avançar ou retroceder. No entanto, a ordem pré-estabelecida das etapas é classificada em duas categorias: *Alternative-Focused Thinking* (AFT), em que os tomadores de decisão analisam as alternativas em uma etapa anterior à definição de objetivos, e *Value-Focused Thinking* (VFT), em que os objetivos e valores são avaliados em etapa anterior a análise de alternativas.

Nesse contexto, os autores apresentam o método *Simple Multi-attribute Rating Technique* (SMART), que possuem cinco passos, ordenados segundo a abordagem VFT:

1. Reconhecer o problema de decisão/oportunidade;
2. Determinar os valores;
3. Gerar as alternativas para tomada de decisão;
4. Avaliar as alternativas;
5. Selecionar uma alternativa.

Por fim, exemplos de métodos e aplicações de Análise de Decisão Multicritério podem ser encontrados nos trabalhos de Brito (2011), e Franco

(2009), Montibeller e Franco (2010), Montibeller e Franco (2011), Silva(2012), Keeney (1996) e Goodwin e Wright (2004).

2.3. Simulação-Otimização

Segundo Chwif e Medina (2010), a simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização, mas sim uma ferramenta de análise de alternativas. Quando problemas de simulação possuem um grande número de alternativas, métodos complementares se tornam úteis na busca da alternativa mais eficiente para um dado sistema ou subsistema.

A simulação atrelada a esses métodos complementares é chamada de simulação-otimização. O termo se espalhou no meio acadêmico, inclusive sendo citado no “Encyclopedia of Operations Research and Management Science” (GASS e HARRIS, 2000) e nas seções do *Winter Simulation Conference.*

Existem algumas formas de integração entre as metodologias de otimização com simulação, destacando-se quatro:

1. Simulação para Otimização: tem como objetivo complementar modelos otimizantes através da geração de cenários, como por exemplo, o uso da simulação de Monte Carlo em modelos de otimização.
2. Otimização de subsistemas da simulação: objetiva integrar um modelo otimizante para um dado processo no modelo de simulação. Vamanan *et al.*, (2004), por exemplo, integram os softwares Arena e CPLEX para otimização de um subsistema de programação da produção em um problema integrado de produção e estoque.

3. Aplicação da simulação e otimização separadamente: em alguns casos adota-se a metodologia separadamente de forma iterativa, como no trabalho de Ono (2007).
4. Otimização para Simulação: visa à obtenção do conjunto ótimo (ou mais próximo possível do ótimo) de variáveis de decisão de um modelo de simulação, ou seja, na busca da melhor alternativa para um dado sistema.

O foco do presente estudo é relacionado ao quarto item: Otimização para simulação.

Atualmente, diversos softwares de simulação disponibilizam algum tipo de pacote de “otimização”, na maioria dos casos com aplicações de heurísticas genéricas utilizadas na otimização determinística.

A utilização desses pacotes pode ser interessante para uma primeira avaliação do problema, mas possui diversas lacunas no que se refere ao caráter estocástico da SED, principalmente na análise estatística dos resultados e comparação entre alternativas, podendo não ser possível determinar de forma conclusiva se um cenário é melhor que outro, frustrando os algoritmos otimizantes que tentam se movimentar no sentido de melhores alternativas (BANKS et al., 2005).

Dessa forma, a pesquisa na área de otimização para simulação tem se concentrado nos resultados teóricos de convergência e algoritmos específicos para tratar a natureza estocástica da simulação de eventos discretos (FU, 2002).

Ainda segundo Fu, um assunto central nessa área é a comparação de alternativas: apesar de métodos de busca serem importantes, as análises estatísticas para determinar a ordem das alternativas possuem importantes implicações na otimização.

Por exemplo, imagine dois caixas de banco com filas separadas atendendo um grande grupo de clientes. Ao observar o processo durante 3 minutos, nota-se que o caixa 1 atendeu 3 clientes, enquanto o caixa 2 atendeu 6 clientes. Na otimização determinística, seria evidente que o caixa 2 tem uma taxa de atendimento λ_2 duas vezes maior que λ_1, sendo portanto a melhor alternativa. No entanto, considerando o exemplo acima um processo estocástico, a “taxa de atendimento” seria uma variável aleatória, havendo a probabilidade $P[\lambda_{1>} \lambda_2]$ e consequentemente incerteza sobre a afirmação acerca do caixa mais rápido.

Da mesma forma, os resultados de um cenário estudado através da SED são extraídos a partir de uma média dos resultados das replicações, e pode-se indicar o nível de incerteza sobre eles, seja para saber os valores prováveis, seja para comparar alternativas.

Nesse contexto, existem técnicas de comparação que diminuem a necessidade de um grande número de replicações para a determinação de quais alternativas são promissoras. Assim, não necessariamente deve-se estimar o valor de um resultado com grande precisão:

"É geralmente mais fácil comparar soluções e encontrar uma ordem relativa entre elas do que estimá-las de forma precisa"

(FU, 2002)

Portanto, verifica-se que métodos de otimização para simulação discutidos na literatura incluem os métodos de busca (heurísticas, por exemplo) e métodos de comparação e redução de variância. Na prática, pacotes com algoritmos de busca genéricos são utilizados, considerando o modelo SED como uma "caixa preta".

As próximas seções descrevem sucintamente os principais métodos para comparação de alternativas e de algoritmos de busca.

2.3.1. Comparação de dois sistemas

Nessa seção, o conceito de comparação entre dois sistemas é introduzido.

Sendo X_{i1}, X_{i2}, ..., X_{in}, uma amostra de n observações IID (independente e igualmente distribuída) do sistema i, e sendo a resposta esperada $\mu_i = E(X_{ij})$, deseja-se construir o intervalo de confiança para $\zeta = \mu_1 - \mu_2$.

O fato de X_{1j} e X_{2j} serem ou não independentes depende de como a simulação é executada e é determinante na escolha do método de comparação (LAW e KELTON, 2000).

No teste t-pareado, define-se $Z_j = X_{1j} - X_{2j}$, para os experimentos (replicações) j = 1, 2, ..., n. Dessa forma, Z_j é IID e $\zeta = E(Z_j)$ e tem-se:

$$\bar{Z}(n) = \frac{\sum_{j=1}^{n} Z_j}{n} \tag{1}$$

$$\widehat{Var}[\bar{Z}(n)] = \frac{\sum_{j=1}^{n} [Z_j - \bar{Z}(n)]^2}{n(n-1)} \tag{2}$$

Adotando-se um intervalo de confiança percentual de 100*(1-α), tem-se:

$$\bar{Z}(n) \pm t_{n-1,1-\alpha/2}\sqrt{\widehat{Var}[\bar{Z}(n)]} \tag{3}$$

Esse método não exige que X_{1j} e X_{2j} sejam independentes, tampouco assumir que $Var(X_{1j}) = Var(X_{2j})$. Portanto, o método permite covariância positiva entre X_{1j} e X_{2j}.

Uma modificação do teste t-pareado é o método de Welch (Law e Kelton 2000), mas exige que X_{1j} e X_2 sejam independentes, sendo inviável, por exemplo, a utilização da técnica de redução de variância chamada *Common Random Numbers* (CRN).

2.3.2. Procedimentos de comparações múltiplas (*Multiple Comparisons Procedures* - MCP*)*

Suponha que existam k sistemas diferentes com médias em regime estacionário μ_i, i = 1,2,...,k. O objetivo dos procedimentos de comparação múltipla é ordenar os sistemas pelas suas médias, assumindo que quanto maior a média, melhor o sistema (para um problema de maximização). A partir da ordenação, compara-se a melhor média com as demais considerando um intervalo de confiança ou uma zona de indiferença.

O trabalho de Jacobson e Swisher (1999) apresentam os métodos de comparações múltiplas, assim como procedimentos de Ranking & Selection.

Os trabalhos de Banks et al. (2005) e Law e Kelton (2000) abordam o assunto e apresentam referências sobre trabalhos nessa área.

A grande vantagem de se utilizar métodos de comparações múltiplas é a possibilidade de se utilizar técnicas de redução de variância, como *common random numbers* (CRN). Nesse contexto, Nelson e Matejcik (1995) apresentam um método de MCB utilizando *Commom Random Numbers* com grande eficiência para problemas de políticas de estoque (s,S).

2.3.3. Ranking and Selection (R&S)

Os objetivos dos métodos de *Ranking and Selection* (Ranqueamento e Seleção) são mais audaciosos em relação à seção anterior. Law e Kelton (2000) apresentam três métodos: o primeiro tem como objetivo a obtenção da melhor alternativa dentre k sistemas; o segundo objetiva a obtenção de um subconjunto de tamanho m contendo o melhor sistema dentre k sistemas; o terceiro visa à obtenção das m melhores alternativas dentre k.

Por outro lado, esses métodos de R&S não exploram o pareamento de réplicas e os números aleatórios comuns.

Nesse contexto, o trabalho de Wang et al. (2011) descreve o procedimento seleção do melhor subconjunto (*best subset selection procedure*), enquanto o trabalho de Weaber et al. (2010) apresenta medidas de desempenho para procedimentos de R&S.

2.3.4. *Common random numbers* (CRN)

Números aleatórios comuns (CRN) são uma das técnicas mais comuns de redução de variância (*Variance Reduction Techniques – VTR*) e são utilizados de tal forma a induzir correlação positiva na comparação de resultados.

O conceito básico é o de comparar alternativas com as mesmas “condições de experimento” (LAW e KELTON 2000), de tal forma a aumentar a confiança de que quaisquer diferenças de desempenho estão relacionadas com as diferenças dos sistemas, e não com as flutuações de tais “condições de experimento”.

De uma maneira mais formal, o CRN reduz a variância através da covariância positiva, adotando $Z_j = X_{1j} - X_{2j}$ para j = 1, 2, ..., n (em que X_{ij} é a média da replicação j para a alternativa i), sendo, portanto, Z_j IID e $\zeta = E(Z_j)$:

$$\mathrm{Var}[\bar{Z}(n)] = \frac{\mathrm{Var}(X_{1j}) + \mathrm{Var}(X_{2j}) - 2 \times \mathrm{Cov}(X_{1j,}X_{2j})}{n} \qquad (4)$$

Por fim, o uso de CRN em comparações de alternativas pode reduzir drasticamente o número de replicações necessárias para fazer uma distinção entre desempenho (FU et al., 2005).

2.3.5. *Response surface methodology* (RSM)

A metodologia de superfície de resposta (RSM) é baseada no planejamento estatístico de experimentos e seu objetivo é obter a relação aproximada entre as variáveis de decisão (*inputs*) e a função objetivo com os resultados

(chamados também de “fatores” e a “resposta”, respectivamente), resultando em um metamodelo (LAW E KELTON 2000). Para obter essa relação é comum o uso de regressão e redes neurais, e a partir do metamodelo elaborado, a otimização pode ser realizada através de procedimentos de otimização determinística (FU et al., 2005). Quando o foco é a otimização do sistema, a RSM é normalmente empregada de tal forma a guiar um algoritmo de busca.

2.3.6. Procedimentos baseados no gradiente

Segundo Fu et al. (2005), tais procedimentos usualmente estão na forma de aproximação estocástica (SA). Ao contrário do RSM, a SA pode ser comprovadamente convergente e demandam muito menos simulações por iteração. O autor ressalta que o sucesso de tal abordagem depende da qualidade do estimador de gradiente.

2.3.7. Busca aleatória

A busca aleatória é aplicada usualmente em problemas determinísticos e com variáveis discretas (FU *et al.*, 2005). Na simulação-otimização, pode-se aplicá-la em conjunto com um método construtivo e seu sucesso depende bastante da estrutura da vizinhança das variáveis. Segundo Fu et al., (2005) uma versão promissora da busca aleatória é o COMPASS (*Most-promising Area Stochastic Search*), introduzidos por Hong e Nelson (2005).

2.3.8. Sample Path Optimization (SPO)

A *sample path optimization* é um método que busca explorar o grande arsenal de métodos de otimização determinística. Fixa-se um número de replicações suficientemente grande e estima-se a média da amostra. Robinson (1996) julga que a principal vantagem da SPO é explorar os algoritmos determinísticos e parâmetros sujeitos a restrições complexas, onde outros métodos como AS podem apresentar dificuldades.

2.3.9. Meta-heurísticas

Fu et al., (2005) apresentam as quatro meta-heurísticas que vem sendo aplicadas com sucesso em simulação-otimização: simulated annealing, algoritmo genético, busca tabu e scatter search (frequentemente suplementada com redes neurais) e afirmam que a busca tabu e a scatter são de longe as mais eficientes.

2.3.10. Aplicações práticas de métodos de simulação-otimização

O trabalho de Bashyam e Fu (1998) aborda a otimização de estoques (s,S) com *lead times* aleatórios e restrição de nível de serviço. Os autores utilizam estimativa de gradiente para o procedimento de simulação-otimização e obtém resultados dentro de 5% de desvio do resultado ótimo.

O problema de seleção de fornecedor é abordado por Jaber *et al.* (2011), contendo uma função objetivo multi-critério que considera custo, qualidade e

entrega. Os autores empregam um algoritmo de alocação ótima de orçamento para escolher o melhor fornecedor.

Butler et al. (2011) desenvolvem um modelo de simulação para avaliar o risco de vazamento de óleo em um porto para operações de petroleiros. Os autores desenvolvem uma função objetivo baseada na teoria de utilidade multiatributo, permitindo avaliação de diferentes indicadores de desempenho e pontuação não linear dos valores. Os indicadores consideraram também o número esperado de acidentes, como colisões, explosões e encalhamento. Os autores ressaltam que a metodologia desenvolvida com a teoria multiatributo e R&S pode ser aplicada em qualquer sistema logístico em que o objetivo é selecionar o melhor sistema a partir de um número finito de alternativas baseadas em múltiplas medidas de desempenho.

No processo de remanufatura, Li et al., (2009) desenvolverem um modelo de simulação-otimização para determinação da melhor política de produção, estoque e alocação de recursos. Com relação à política de produção, o estudo considera diferentes regras de trocas de linhas, mas, por simplificação, foi adotada como fixa a prioridade de diferentes produtos retornados. No que diz respeito à metodologia de simulação-otimização, foi desenvolvido uma heurística híbrida entre algoritmo genético e avaliação de subespaços (*Cells Evaluatuion*).

Por sua vez, Ryzhov et al. (2011) desenvolvem um modelo de simulação-otimização para avaliar decisões de apostas do computador em jogos online. Utilizando o método de otimização chamado *knowledge gradient*, o modelo obteve resultados eficientes em casos extremos: quando o computador joga

com jogadores inexperientes e quando joga com profissionais. A maior importância deste estudo talvez esteja na aplicabilidade do método, em que o objetivo não é encontrar as melhores alternativas, mas sim a alternativa que corresponda ao valor almejado. Dessa forma, há aplicabilidade na calibração de sistemas, em que métodos de otimização podem ser utilizados para encontrar os parâmetros de entrada que representem o sistema real.

Por fim, Pasupathy et al. (2011) desenvolvem uma biblioteca de problemas de simulação-otimização, com o intuito de disseminar o desenvolvimento e comparação de diferentes métodos e algoritmos. No ano de 2011, a biblioteca contou com 50 problemas, como de roteirização estocástica de veículos e gerenciamento da cadeia de suprimentos utilizando simulação-otimização.

2.4. Conclusões sobre as metodologias apresentadas

Com relação à simulação, observa-se a sua aplicabilidade em problemas que demandam alto nível de detalhamento e/ou o caráter estocástico é importante. A simulação de eventos discretos, em particular, representa o sistema com grande precisão e fidedignidade. Além disso, a SED possibilita a realização de análises “e se” (*what if*), expandindo a compreensão do problema. É entendível, portanto, que a SED seja amplamente utilizada em sistemas logísticos complexos.

A metodologia de análise de decisão, por sua vez, auxilia os tomadores de decisão no processo de entendimento dos objetivos e valores e na mensuração da importância de cada valor em uma tomada de decisão.

Dessa forma, através da determinação das funções de valor dos atributos e de suas ponderações, é possível pontuar quaisquer alternativas. Considerando os aspectos sobre qualidade na simulação apresentados por Robinson (2002), a importância da metodologia de análise de decisão é observada em duas etapas de um estudo de simulação:

1. No entendimento dos objetivos do estudo para elaboração do modelo conceitual;
2. Na análise de resultados, possibilitando maior clareza ao tomador de decisão em problemas com *tradeoffs* complexos (como apresentado por Silva (2002)).

Com relação à Otimização para Simulação, fica clara importância de técnicas que auxiliem a comparação de alternativas e métodos de busca customizados a cada problema, explorando a relação entre variáveis de decisão e resultados. Esses assuntos são discutidos a fundo nos trabalhos de Fu (2002), Fu (2005), Law and Kelton (2000) e Banks (2005).

Pode-se, portanto, definir Otimização para Simulação como uma área de pesquisa que visa a análise de métodos de busca e de comparação de alternativas aplicados a modelos de simulação.

Destaca-se a distância entre a pesquisa e prática em Otimização para Simulação, discutida por Fu (2002). Em estudos práticos, costuma-se utilizar pacotes com métodos de busca genéricos que são aplicados em problemas determinísticos, com pouquíssimo rigor com a comparação estatística entre alternativas e sem se aproveitar de técnicas de redução de variância, que podem ser bastante vantajosas como observado em trabalhos apresentados

nesse capítulo. Por outro lado, a utilização desses pacotes traz velocidade ao estudo e auxiliam na busca de alternativas mais eficientes, como observado no trabalho de Netto (2013). A Figura 3 ilustra a discussão.

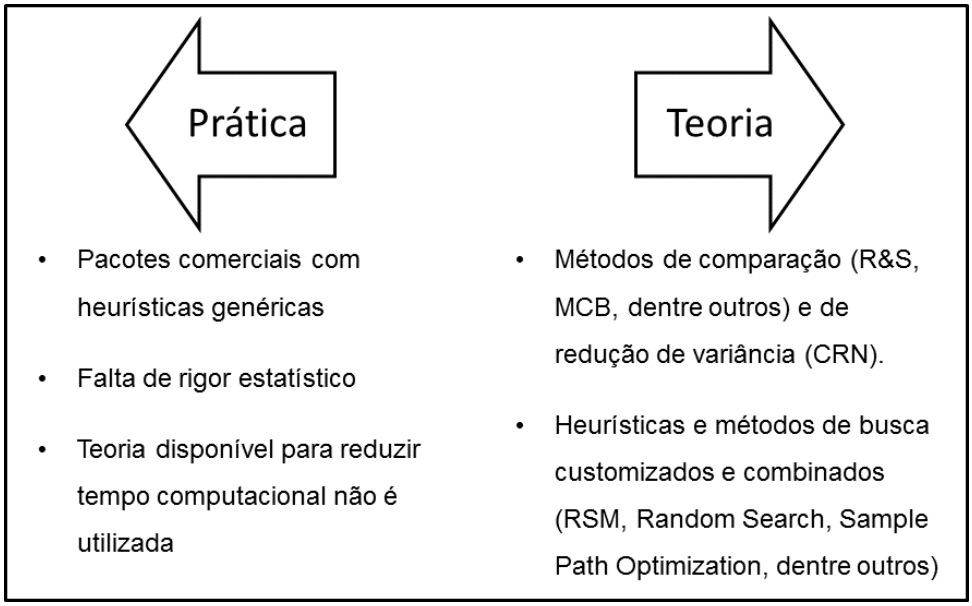

Figura 3 - Teoria e prática em otimização para simulação (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR)

3. Estudo de caso: Sistema logístico para distribuição de minério

O mercado asiático de minério cresceu vertiginosamente nas últimas décadas, representando cerca de 60% das importações de minério de ferro do mundo em meados de 2000 (FINAME e BNDSPAR, 2003), principalmente por parte da China, Japão e Coreia do Sul.

Esse crescimento foi observado por empresas brasileiras de mineração desde o fim da segunda guerra. Eliezer Batista, por exemplo, criou o conceito de “distância econômica” para a então Compania Vale do Rio Doce fechar, em 1962, longos contratos com 11 siderúrgicas japonesas para venda de minério de ferro, a preços competitivos com as minas australianas:

> *“Abrimos o mercado para um produto que podia valer pouco, mas a ideia era ganhar dinheiro com a logística, transformando uma distância física (a rota Brasil-Japão-Brasil) numa “distância econômica”.” Eliezer Batista.*

Visando a ampliação da participação nesse mercado, uma mineradora pretende instalar um Centro de Distribuição (CD) de Minério de Ferro em um país asiático. Os centros de distribuição visam diminuir o *lead time* de atendimento aos clientes e proporcionam o atendimento de embarcações de menor porte, como barcaças, Handymax e Panamax.

O CD será dimensionado para atender cerca de 90 milhões de toneladas por ano (MTPA) de minério de ferro, oriundos de três portos brasileiros. O transporte entre Brasil-Ásia conta com uma frota própria de navios Chinamax

(navios de cerca de 380 mil toneladas de porte bruto – TPB) e Capesizes (com cerca de 150 mil TPB).

O principal produto a ser exportado através do CD é o Sinter Feed (SF). No entanto, devido à discrepância de qualidade entre o minério oriundo do norte do Brasil (um dos melhores minérios do mundo) e do minério oriundo dos portos do sudeste, deve-se misturá-los para obtenção de um Sinter Feed de qualidade compatível ao mercado asiático (processo de blendagem).

Dessa forma, o sistema proposto recebe dois tipos de Sinter Feed oriundos do Brasil e produz o Sinter Feed Blendado. A Figura 4 ilustra a rota Brasil – Ásia para o transporte de minério de ferro.

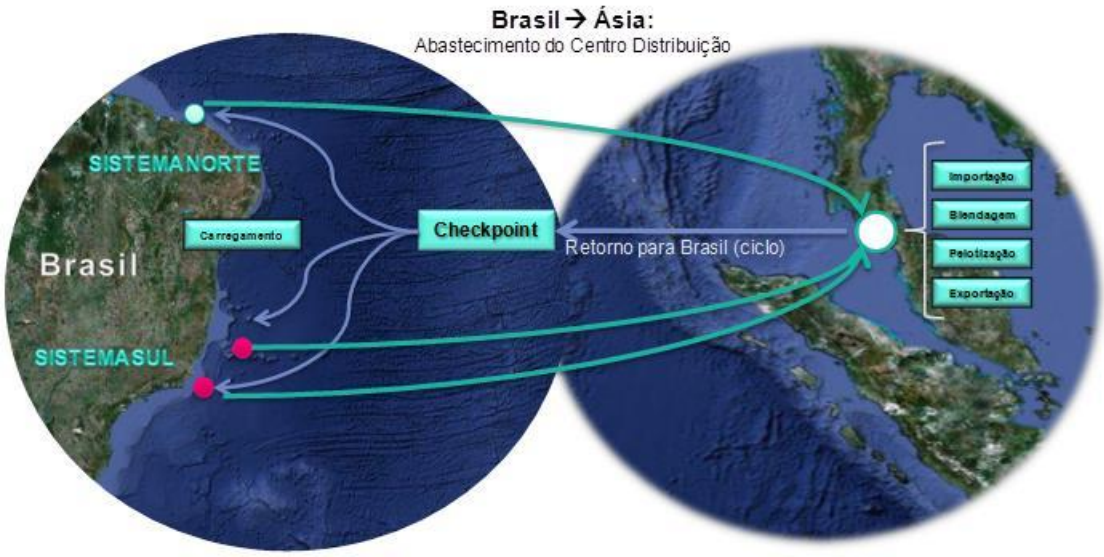

Figura 4 - Transporte de minério Brasil – Ásia

Os navios operam em ciclo fechado entre Brasil e Ásia. No trajeto de volta (sentido Brasil), os navios devem ser destinados para um dos três portos.

Dessa forma, o sistema descrito compreende desde o carregamento do minério nos terminais do Brasil, nos terminais do sistema norte e sul, até o

carregamento dos navios dos clientes finais, na Ásia. A operação dos terminais brasileiros não faz parte do escopo da análise, mas deve ser contemplada para reproduzir os tempos em fila e os tempos de operação.

Os terminais do sudeste compõe o Sistema Sul, enquanto o terminal do nordeste compõe o Sistema Norte. O Sistema Sul fornece o Sinter Feed Sul (SFS), de menor qualidade. O Sistema Norte fornece o Sinter Feed Norte (SFN), que possui maior qualidade.

Neste contexto, o objetivo do estudo de caso é dimensionar a frota que opera em sistema fechado entre Brasil e Ásia e o centro de distribuição de forma conjunta, considerando:

1. Critérios de avaliação das alternativas logísticas;
2. Composição de frota ótima para a empresa (quantidade de Chinamax, Capesizes) considerando seu impacto na capacidade de armazenagem e níveis de estoques;
3. Capacidade de pátio e nível de estoque a ser mantido no CD (estoque de segurança);
4. Custos logísticos envolvidos.

Através do estudo de caso, objetiva-se avaliar a aplicação das metodologias de simulação-otimização e análise multicritério.

3.1. Dados do problema

Os dados do problema são divididos em “Parâmetros gerais” e “Custos”.

3.1.1. Parâmetros gerais

A mineradora prevê uma demanda de 90 milhões de toneladas por ano de Sinter Feed Blendado, sendo 60 Mtpa de Sinter Norte e 30 Mtpa de Sinter Sul.

Os navios que retiram carga no CD são chamados de “navios de exportação”, e estão divididos em 6 classes, de acordo com sua capacidade. A Tabela 1 apresenta as capacidades dos navios (comumente chamadas de DWT), a Tabela 2 apresenta os tempos de atracação e desatracação por classe de navio.

Tabela 1 - Limites de capacidade de navio por classe

	Barcaça	Handy	Handymax	Panamax	Baby Cape	Capesize	Chinamax
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
DWT min	6,000	12,001	30,001	60,001	80,001	120,001	360,001
DWT max	12,000	30,000	60,000	80,000	120,000	180,000	400,000

Tabela 2 - Tempos de atracação e desatracação por classe de navio (horas) – Berços de exportação

Barcaça	Handy	Handymax	Panamax	Baby Cape	Capesize
Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
1.00	1.00	3.00	3.00	4.50	4.50

A Tabela 3 apresenta a quantidade de minério retirada por classe de navio. A quantidade transportada por navios da classe 6 (Capesize) é equivalente a 55% da demanda.

Tabela 3 - Quantidade de minério retirada por classe de navio

Classe do navio	1	2	3	4	5	6
Quantidade retirada (MTPA)	4.5	4.5	4.5	9.0	18.0	49.5

O projeto dos berços de atracação para importação e exportação é apresentado na Figura 14. Na importação, são disponibilizados 3 berços; na exportação, 10 berços são disponibilizados respeitando as seguintes regras de atracação:

- Berço principal (1): apenas disponível para navios do tipo Capesize;
- Berços opostos ao berço principal (2): disponíveis para navios do tipo Baby Cape, Panamax, Handymax;
- Demais berços (3): apenas para atracação de barcaças.

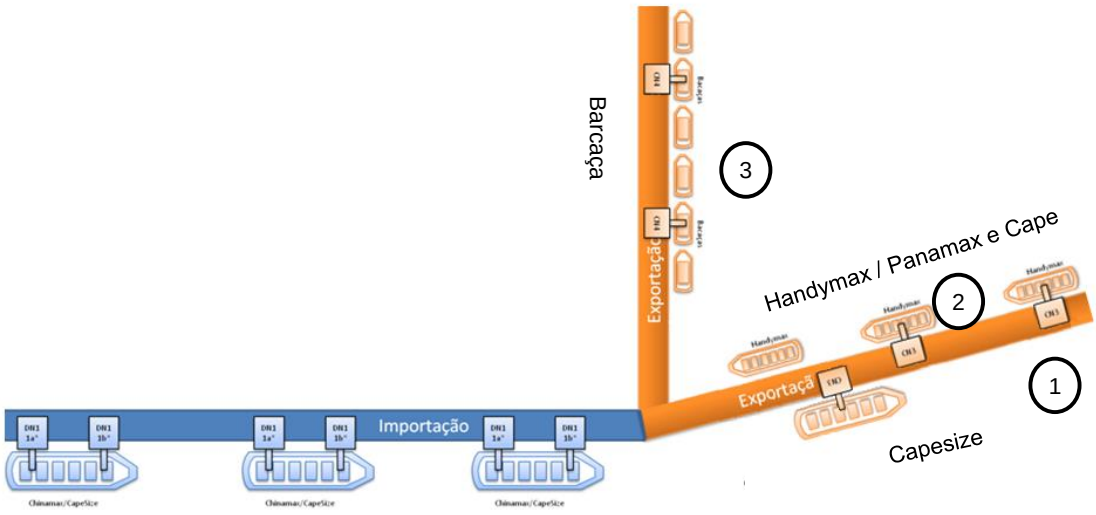

Figura 5 - Arranjo dos berços de exportação e importação

Com relação aos equipamentos de carga e descarga de navios, considerou-se:

- Um conjunto de descarregadores de navio (DN) por berço de importação;
- Quatro carregadores de navios (CN) para os berços de exportação, sendo:
    - 1 CN exclusivo para Capesize;
    - 2 CN's para os 3 berços de Handy, Panamax e Capesize;
    - 1 CN para os 6 berços de barcaças.

A Tabela 4 apresenta as taxas brutas (considerando quebras e paradas operacionais) dos carregadores de navio.

Tabela 4 – Taxas brutas dos carregadores de navio

	CN1	CN2	CN3	CN4
Taxa Bruta (tph)	5,927	3,427	3,140	3,140

Em alguns casos, o carregador de navio opera em uma taxa bruta inferior a sua capacidade, dependendo da classe de navio. A Tabela 5 apresenta esses limites de taxa bruta por classe de navio.

Tabela 5 - Taxa de correção de eficiência do CN por classe de navio

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Limite Taxa Comercial (tph)	2,600	3,200	4,000	4,000	5,500	10,000

O descarregador de navio (i.e. o conjunto de carregadores de navio), por sua vez, tem taxa bruta equivalente a 5,060 tph para navios tipo Chinamax e uma queda de eficiência de 85% para navios tipo Capesize, resultando em aproximadamente 4,300 tph.

A blendagem é realizada pelos equipamentos de pátio a uma taxa média de 12,000 tph e os pátios são segregados por tipo de produto e suas capacidades são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Capacidade dos pátios no CD

Capacidade estoque	Produto	Capacidade
Sinter Norte	1	3,500,000
Sinter Sul	2	1,750,000
Blendado	3	5,250,000

Os tempos de ciclo são calculados pelo modelo de simulação e variam de acordo com as alternativas. No entanto, eles podem ser estimados de forma determinística com base na Tabela 7 e na Tabela 8:

- Chinamax: tempo de ciclo de aproximadamente 69 dias
- Capesize: tempo de ciclo de aproximadamente 65 dias.

Tabela 7 - Tempos de fila e operação nos portos brasileiros

	Tempos em fila (h)		Operação + Atracação + Desatracação(h)	
Portos Brasileiros	Capesize	Chinamax	Capesize	Chinamax
Porto 1	170	170	38	86
Porto 2	114	114	34	76
Porto 3	186	186	47	109

Tabela 8 - Tempos de viagem entre o CD e os portos brasileiros

Tempos de Viagem (h)			
CD - CheckPoint	442		
	Porto 1	Porto 2	Porto 3
CheckPoint	236	168	168
CD	710	642	642

3.1.2. Custos

O sistema logístico em questão possui uma complexa estrutura de custo. Os principais custos que impactam nas variáveis do processo decisório descrito acima são apresentados a seguir.

A Tabela 9 apresenta os custos de navegação e operação, estimados pelo o autor com auxílio de profissionais da área.

Tabela 9 - Custos de navegação

	CAPEX		OPEX	
	Investimento	Valor equivalente anual (USD/ano)	Custo Mar USD/dia	Custo porto USD/Dia
Chinamax	150,000,000	7,500,000	30,000	20,000
Capesize	100,000,000	5,000,000	20,000	15,000

Os custos de área de pátio, equipamentos de pátio e estoque foram estimados com base no trabalho de Silva (2002) e Coyle et al (2002).

Tabela 10 - Custos de pátio, estoque e equipamentos.

Valores anualizados		
Custos de área de pátio	10.89	USD/t
Equipamentos de pátio	3.91	USD/t
Custo de estoque	25.00	USD/t

Com relação ao *demurrage* e *dispatch* (multas ou bônus contratuais relativos ao desempenho do terminal), foram consideradas as seguintes premissas:

— Cada classe de navio possui uma prancha de produtividade acordada com o terminal;

— Caso o terminal ultrapasse o tempo de estadia acordado (por filas e outras ineficiências), uma multa é incidida de acordo com a seguinte expressão:

$$Demurrage = 0.8666 * DWT + (Estadia - Laytime\ Acordado) * \frac{0.1 * DWT}{24}$$

— Caso o terminal seja mais eficiente que o acordado, o armador paga um bônus chamado dispatch, cuja expressão é:

$$Dispatch = \frac{0.8666 * DWT + (Laytime\ Acordado - Estadia) * \frac{0.1 * DWT}{24}}{2}$$

Por fim, a Tabela 11 apresenta o *Laytime* (tempo acordado para o carregamento ou descarregamento do navio) utilizado por classe de navio.

Tabela 11 - Laytime por classe de navio

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
Laytime (h)	25	30	39	42	45	47

Os valores de *demurrage* supracitados foram estimados pelo autor e por especialistas da área de portos.

3.2. Análise de alternativas candidatas

O sistema logístico apresentado possui diversos sistemas e variáveis que interagem entre si, na maioria das vezes sob a presença de aleatoriedade. Por exemplo, a composição da frota de navios de importação impacta na dinâmica de estoque (o tamanho do navio pode ser entendido como um “lote”

em um problema de estoque) que, por sua vez, impacta no nível de serviço dos navios de exportação.

Além do complexo relacionamento entre as variáveis de decisão e os resultados, o sistema apresenta um grande número de alternativas (configurações) possíveis: podem ser variados os navios de importação (Chinamax e Capesize), capacidade de estoque, nível médio de estoque a ser mantidos no pátio, berços de exportação, regras de prioridade de atracação, entre outros.

Em especial, três variáveis de decisão podem ser analisadas:

- Composição da frota de importação: a frota de importação pode ser composta variando a quantidade de navios Chinamax e Capesize. Considerando os tempos de ciclo estimados, a frota pode variar desde 48 navios Chinamax e nenhum Capesize até nenhum navio Chinamax e 118 navios Capesize. A Tabela 12 apresenta 50 possíveis composições, considerando também opções de frota com maior capacidade de transporte (composições 26 a 50).
- Capacidade estática de pátio: seis combinações de pátios com capacidades variando de 6.0 a 10.5 milhões de toneladas podem ser avaliadas.
- Nível de estoque no CD: pode-se variar a quantidade da demanda a ser empurrada para o CD: desde 1% até 10% da demanda total (i.e., de 900 mil a 9 milhões de toneladas). Níveis mais altos de estoque no CD podem mitigar o efeito da aleatoriedade de chegada dos navios, melhorando o nível de serviço.

Tabela 12 – Exemplo de possíveis combinações de frota de importação

	Capesize	Chinamax		Capesize	Chinamax
Composição 1	0	47	Composição 26	0	48
Composição 2	4	45	Composição 27	4	46
Composição 3	9	43	Composição 28	9	44
Composição 4	14	41	Composição 29	14	42
Composição 5	19	39	Composição 30	19	40
Composição 6	24	37	Composição 31	24	38
Composição 7	29	35	Composição 32	29	36
Composição 8	34	33	Composição 33	34	34
Composição 9	39	31	Composição 34	39	32
Composição 10	44	29	Composição 35	44	30
Composição 11	49	27	Composição 36	49	28
Composição 12	54	25	Composição 37	54	26
Composição 13	59	23	Composição 38	59	24
Composição 14	64	21	Composição 39	64	22
Composição 15	70	19	Composição 40	72	19
Composição 16	75	17	Composição 41	77	17
Composição 17	80	15	Composição 42	82	15
Composição 18	85	13	Composição 43	87	13
Composição 19	90	11	Composição 44	92	11
Composição 20	95	9	Composição 45	97	9
Composição 21	100	7	Composição 46	102	7
Composição 22	105	5	Composição 47	107	5
Composição 23	110	3	Composição 48	112	3
Composição 24	115	1	Composição 49	117	1
Composição 25	118	0	Composição 50	120	0

Considerando apenas as variáveis apresentadas, verifica-se que são possíveis três mil configurações logísticas (Tabela 13).

Tabela 13 - Exemplo do número de configurações candidatas para o estudo de caso

Opções de frota	Opções de pátio	Níveis de estoque	**Total**
50	6	10	**3,000**

Por fim, observa-se que o grande número de alternativas possíveis justifica o uso de métodos e técnicas de otimização para simulação, especialmente os métodos que auxiliem na comparação de alternativas.

3.3. Critérios de avaliação das alternativas de decisão

Os critérios para análise das alternativas descritos a seguir foram elaborados a partir de dados extraídos de uma empresa mineradora e de conversas informais com especialistas e tomadores de decisão das áreas de operação portuária e navegação.

Para definição dos critérios, utilizou-se o método SMART (*Simple Multi-attribute Rating Technique*), descrito no trabalho de Goodwin e Write (2004), considerando a abordagem *Value-Focused Thinking (VFT*). Os cinco passos desse método são apresentados a seguir:

1. Reconhecer o problema de decisão;
2. Determinar a árvore de valor (critérios);
3. Gerar as alternativas para tomada de decisão;
4. Avaliar as alternativas;
5. Selecionar uma alternativa.

Dada a complexidade do sistema em análise e do grande número de alternativas, observa-se que os passos 3, 4 e 5 são dependentes da metodologia de SED e de métodos de otimização para simulação

3.4. Definição dos objetivos

Keeney e Raiffa (1977) definem “objetivo” como uma indicação da direção preferida de movimento, utilizando-se termos como “minimizar” e “maximizar”.

Dessa forma, os objetivos considerados pertinentes ao estudo de caso são apresentados a seguir:

- Minimizar custos de capital e operacional;
- Minimizar riscos de investimentos;
- Maximizar a flexibilidade do terminal portuário (CD);
- Minimizar o impacto ambiental do terminal, especialmente a quantidade de CO_{2e} em decorrência das filas de navios.

Com base nos objetivos, os critérios são criados e representados em uma árvore de valor.

3.5. Árvore de valor

Segundo Silva (2012), os critérios são úteis na tomada de decisão à medida que são um meio de comparação e diferenciação das alternativas. Nessa aplicação, os critérios podem ser mensurados por três tipos de valores de entrada:

- Dados de entrada para o modelo de simulação (variáveis de decisão para o modelo de simulação);
- Resultados originados pelo modelo de simulação;
- Dados e parâmetros que não tenham relação com o modelo de simulação.

Os seguintes critérios foram considerados importantes para o problema decisório apresentado:

- Custos de capital e operacional:

- Custos de aquisição dos navios (importação): são mensurados a partir do capital anualizado investido na aquisição dos navios (CAPEX). Dependem dos dados de entrada da simulação.
- Custos de operação dos navios (importação): são mensurados a partir dos tempos navegando e em porto dos navios (OPEX). Dessa forma, dependem dos resultados da simulação.
- Custos de obras nos pátios: são calculados a partir da capacidade de pátio de cada alternativa. Dependem dos dados de entrada da simulação.
- Custos de equipamentos de pátio: também são calculados a partir da capacidade de pátio de cada alternativa. Dependem dos dados de entrada da simulação.
- Custos de estoque: são mensurados considerando o nível médio de estoque a ser mantido no CD. Dependem dos dados de entrada da simulação.
- Custos de demurrage: são calculados a partir da formulação apresentada na seção 3.1.2. Dependem dos resultados do modelo de simulação.

- Riscos:
  - Proporção de navios Chinamax no sistema: O Chinamax é um navio com grande capacidade carregamento (400,000 DWT). Em função do seu calado (23 metros), poucos portos no mundo são capazes de recebê-lo, tornando-o um ativo pouco volátil e flexível caso o mercado de minério tenha alguma mudança significativa.

- Benefícios:
    - Flexibilidade dos berços importação: a flexibilidade dos berços é medida pelas suas taxas de ocupação. Quanto maior a taxa de ocupação, menor a flexibilidade de operação em caso de manutenção corretiva e preventiva.
    - Flexibilidade dos berços exportação: segue a mesma lógica descrita acima.
    - Flexibilidade dos carregadores de navio: assim como os berços, é desejável que os carregadores de navio tenham taxas de ocupação que propiciem flexibilidade em casos de quebras e manutenção preventiva.
    - Impacto ambiental da fila de navios: além de impactar no custo de *demurrage* (já medido através do critério “Custos de *demurrage*”), o tempo em fila dos navios impacta na emissão de CO2 equivalente na região portuária.

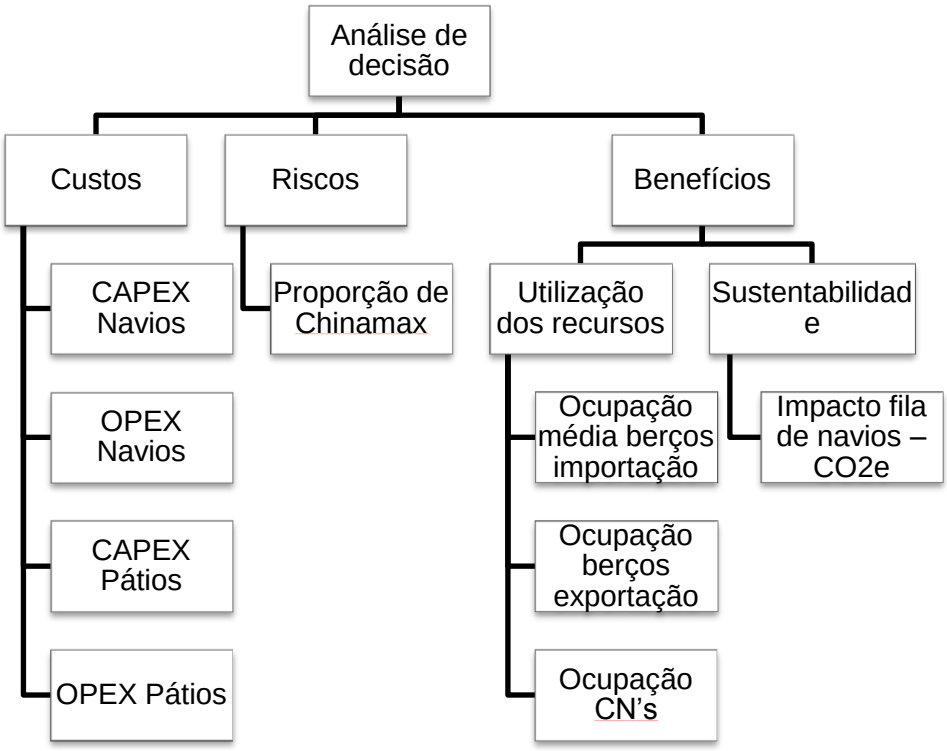

Figura 6 - Árvore de valor para o dimensionamento do sistema de transporte

A Figura 6 ilustra a árvore de valor que representa os critérios acima descritos.

3.5.1. Definição das funções de valor

As funções de transferência de valor recebem os valores de entrada obtidos através de parâmetros das alternativas e fornecem pontuações normalizadas, usualmente entre 0 e 100.

As formas das funções de valor podem ser obtidas através de opiniões de especialistas e tomadores de decisão. Para o presente estudo, considerou-se o *Direct Rating Approach* (Belton e Stweert 2001), em que as escalas de cada atributo e os valores das funções de transferências de valor são

determinadas através de um julgamento direto dos valores. A Figura 7 ilustra a função de transferência de valor para o critério “Impacto ambiental”.

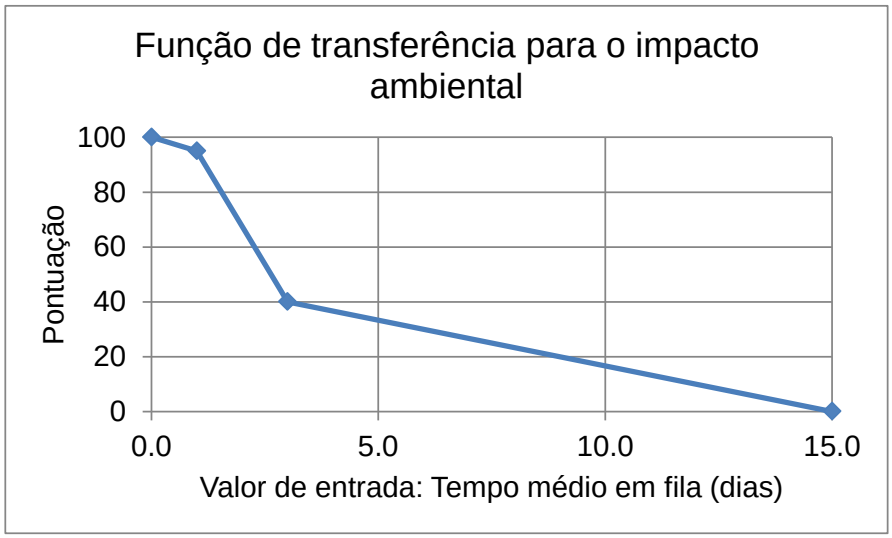

Figura 7 - Função de transferência de valor para o critério "Impacto ambiental"

As curvas de valor são linearizadas em três faixas. A Tabela 14 apresenta os parâmetros necessários para o cálculo das funções de valores linearizadas.

Tabela 14 - Parâmetros da função de transferência de cada critério

Valor de entrada (x)	Função de valor						
	Faixa	xmin	xmax	m	y_eixo	y0	y1
Proporção de navios Chinamax	Faixa 1	0.00	0.50	-60.0	100.0	100	70.00
	Faixa 2	0.50	0.80	-312.0	254.0	98	20.00
	Faixa 3	0.80	1.00	-100.0	100.0	20	0.00
Ocupação máxima dos berços de importação	Faixa 1	0.00	0.80	-6.3	100.0	100	95.00
	Faixa 2	0.80	0.90	-900.0	815.0	95	5.00
	Faixa 3	0.90	1.00	-100.0	100.0	5	0.00
Ocupação máxima dos berços de exportação	Faixa 1	0.00	0.80	-6.3	100.0	100	95.00
	Faixa 2	0.80	0.90	-900.0	815.0	95	5.00
	Faixa 3	0.90	1.00	-100.0	100.0	5	0.00
Ocupação máxima dos carregadores de navio	Faixa 1	0.00	0.80	-6.3	100.0	100	95.00
	Faixa 2	0.80	0.90	-900.0	815.0	95	5.00
	Faixa 3	0.90	1.00	-100.0	100.0	5	0.00
Tempo em fila de navios (Dias)	Faixa 1	0.00	1.00	-5.0	100.0	100	95.00
	Faixa 2	1.00	3.00	-27.5	122.5	95	40.00
	Faixa 3	3.00	15.00	-3.3	50.0	40	0.00

3.5.2. Definição dos pesos

A definição dos pesos poderia ser feita com todos os critérios mencionados (custos, riscos e benefícios). No entanto, a diferenciação entre os custos e os riscos e benefícios é difícil de ser realizada para esse sistema, uma vez que os tomadores de decisão são normalmente bastante tendenciosos à minimização do custo total. Goodwin e Wright (2004) ressalta que, nesses casos, é preferível realizar *tradeoffs* entre os custos e os riscos e benefícios, diminuindo a chance dos custos serem superestimados ou subestimados.

Dessa forma, optou-se por ponderar os riscos e benefícios do presente estudo de maneira separada.

Os pesos relativos aos critérios pertencentes aos grupos “Riscos” e “Benefícios” foram definidos através do método *Swing Weights* (GOODWIN e WRIGHT, 2004). O método sugere o seguinte: considerando uma alternativa em que todas as pontuações dos critérios sejam as menores possíveis, o tomador de decisão deve indicar qual critério deve ser melhorado primeiro. A escolha dos demais critérios segue o mesmo raciocínio. Além disso, deve-se comparar cada critério escolhido com o primeiro critério escolhido, determinando o percentual de importância de cada um em relação ao primeiro. A Figura 8 ilustra o procedimento para os critérios do estudo de caso.

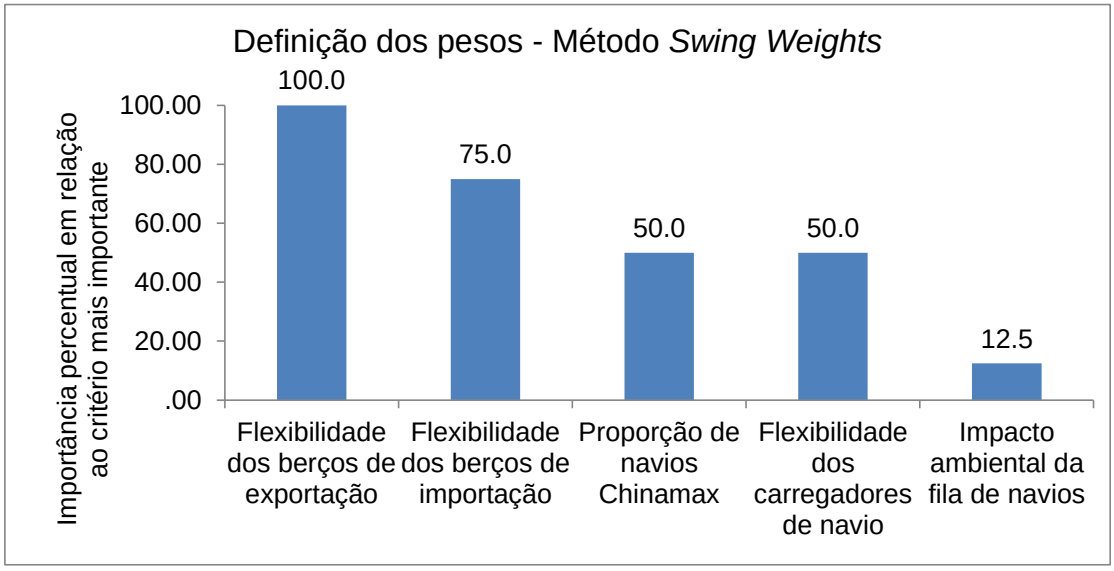

Figura 8 - Definição dos pesos pelo método *Swing Weights*

Por fim, a Tabela 15 apresenta um resumo dos critérios, funções de valor e pesos considerados.

Tabela 15 - Resumo dos atributos e pesos considerados

Critério	Notação	Avaliação	Nível Max	Descrição do nível máximo	Nível min	Descrição do nível mínimo	Pesos	
Riscos: Proporção de navios Chinamax	$A_1(a_j)$	Avaliação holística variando de 100% a 0% para mensurar a aversão ao risco dos tomadores de decisão sobre a composição da frota.	0%	Nenhum navio Chinamax	100%	Todos os navios Chinamax	W_{A1}	0.18
Função de transferência	$V_{A1}(A_1(a_j))$		100		0			
Flexibilidade dos berços de importação	$A_2(a_j)$	Ocupação máxima dos berços de importação, calculada pela relação entre o número de dias operando e o número de dias do ano.	50%	Ocupaçao equivalente a 50%	96%	Ocupaçao equivalente a 96%	W_{A2}	0.26
Função de transferência	$V_{A2}(A_2(a_j))$		100		0			
Flexibilidade dos berços de exportação	$A_3(a_j)$	Ocupação máxima dos berços de exportação, calculada pela relação entre o número de dias operando e o número de dias do ano.	50%	Ocupaçao equivalente a 50%	96%	Ocupaçao equivalente a 96%	W_{A3}	0.35
Função de transferência	$V_{A3}(A_3(a_j))$		100		0			
Flexibilidade dos carregadores de navio	$A_4(a_j)$	Ocupação máxima dos carregadores de navio, calculada pela relação entre o número de dias operando e o número de dias do ano.	50%	Ocupaçao equivalente a 50%	96%	Ocupaçao equivalente a 96%	W_{A4}	0.17
Função de transferência	$V_{A4}(A_4(a_j))$		100		0			
Impacto ambiental da fila de navios	$A_5(a_j)$	Calculado a partir do tempo médio em fila dos navios.	0	Tempo despendido em fila igual zero	15 dias	Tempo despendido em fila igual a 15 dias	W_{A5}	0.04
Value for Transfer	$V_{A5}(A_5(a_j))$		100		0			

Portanto, a pontuação total de uma alternativa é dada pela seguinte equação:

$$P(a_j) = \sum_{i=1}^{5} V_{Ai}\left(A_i(a_j)\right) \times w_{Ai}\ , \forall\ k\ \in C$$

Onde:

- C: conjunto de alternativas candidatas
- $P(a_j)$:pontuação da alternativa j
- $V_{Ai:}$ Valor da função de transferência da do critério i;

- $A_i(a_j)$: Valor de entrada da função de transferência do critério i para a alternativa j;
- W_{Ai}: Peso dado ao critério i.

4. Modelo de simulação de eventos discretos

A construção do modelo de SED segue três passos principais (CHWIF e MEDINA, 2010):

1. Concepção, onde a coleta de dados, a definição do sistema e dos seus objetivos e o modelo conceitual são desenvolvidos;
2. Execução: a preparação do modelo de computador em si, verificação e validação;
3. Análise: simulações, sensibilidade e análise dos resultados.

A definição do sistema e seus objetivos foi cumprida no capítulo 3 com auxílio da metodologia de Análise de Decisão Multicritério. Neste capítulo, portanto, serão apresentadas as etapas de desenvolvimento do modelo conceitual, implementação, verificação e validação. No capítulo 5, análises de alternativas e de sensibilidade serão realizadas com auxílio de métodos de otimização para simulação.

4.1. Modelo conceitual

O modelo conceitual é um modelo abstrato que visa determinar os aspectos importantes que devem ser trazidos do sistema real para o modelo computacional, com base nos objetivos do estudo. Com base nas informações contidas no capítulo 3, o modelo conceitual pode ser representado por 3 subsistemas:

- Subsistema de exportação: contempla a geração de navios que retiram minério do centro de distribuição (navios de exportação), os procedimentos de atracação e o carregamento das embarcações.
- Subsistema de movimentação de pátio: contempla o recebimento, a movimentação e processamento de insumos e o processo de blendagem e armazenagem.
- Subsistema de importação: contempla o transporte entre o Brasil e o CD na Ásia, as decisões de suprimento do CD e o sistema de recebimento de navios no CD através dos berços de importação.

4.1.1. Geração de navios

Com relação à modelagem desse subsistema, considerou-se que o terminal é apto a receber sete classes de navios. Cada classe possui um limite inferior e superior para a capacidade dos navios e cada navio possui uma capacidade que é sorteada uniformemente entre os limites inferiores e superiores.

Além disso, cada classe de navio é responsável por retirar uma porcentagem da demanda determinada pelo usuário. Outro aspecto importante é a cobrança do *demurrage*, que possui diferentes regras de acordo com a classe do navio.

Os instantes de chegada de cada navio são gerados por uma rotina e gravados em um arquivo texto, assim como as seguintes informações:

— Capacidade (comumente chamada por “DWT”);

— Produtos a serem retirados;

— Quantidade a ser retirada;

- Instante de chegada ao terminal;
- Replicação;
- Classe.

Uma vez que a carga dos navios é sorteada dentro de limites inferiores e superiores de cada classe, a rotina faz uma calibração da capacidade de cada navio para cada ano da simulação, visando garantir o balanço de massa do sistema (isto é, garantir que a soma da carga dos navios gerados no período de um ano seja exatamente a demanda anual prevista).

4.1.2. Exportação

O sistema de exportação representa a chegada de navios ao porto, atracação, carregamento e desatracação. Uma entidade de controle verifica se há navios em fila; caso positivo, ela procura um berço disponível e verifica se há produto disponível no pátio. Caso uma das duas condições não seja respeitada, a entidade de controle reserva a carga para o navio e verifica se o próximo navio em fila respeita as condições. Isso evita que um navio de pequeno porte (como uma barcaça) quebre a regra FIFO quando a quantidade de produto é suficiente para ele, mas não para o navio em sua frente (como um Capesize).

Com relação às regras de prioridade para atracação, cada classe de navio possui um conjunto de berços que podem ser utilizados para atracação. Esses conjuntos são organizados em prioridades através de um vetor para cada classe de navio. A entidade de controle verifica os berços para

atracação a partir do berço com maior prioridade até o berço com menor prioridade, até encontrar um berço livre.

Uma vez respeitadas às condições supracitadas, a entidade de controle retira o navio da fila e o aloca em um berço disponível. O navio, por sua vez, inicia o processo de atracação e, em seguida, o processo de carregamento.

4.1.3. Carregamento

Após o processo de atracação, o navio aguarda um carregador de navio (CN) disponível para início do carregamento. Nesse caso, também é respeitada a regra FIFO.

Cada carregador de navio pode atuar em um conjunto pré-definido de berços ou em apenas um berço específico, dependendo da configuração realizada pelo usuário. As barcaças, por exemplo, podem atracar em 5 berços diferentes, mas há apenas um CN disponível para esses 5 berços.

O tempo de carregamento do navio é sorteado respeitando as taxas de carregamento do berço, do CN e das próprias limitações do navio informadas na interface. O carregamento é feito discretizando a quantidade demandada pelo navio em lotes de 15 mil toneladas. Após o carregamento, inicia-se o processo de desatracação e, por fim, todas as estatísticas do navio são coletadas em variáveis e em um log.

4.1.4. Blendagem

O processo de blendagem considera a taxa média de blendagem (tph) (assim como sua distribuição de probabilidade e desvio padrão), a disponibilidade de

produtos em pátio (insumos) e a disponibilidade de espaço no pátio de produto blendado. A carga blendada é discretizada em lotes de 15 mil toneladas.

4.1.5. Importação e descarregamento

Os módulos de importação e descarregamento são análogos ao de exportação e carregamento. No caso da importação, há possibilidade de quebra de FIFO caso não haja espaço para descarga de um navio com um determinado produto (produto “A”, por exemplo), mas haja espaço para descarga de um navio com outro produto (produto “B”, por exemplo). Nesse caso, o navio que estiver atrás com o produto “B” poderá quebrar a regra FIFO.

4.1.1. Ciclo fechado

Os navios do Chinamax e Capesize fazem o transporte de minério entre o Brasil e o CD na Ásia. No início da simulação, os navios são gerados e enviados diretamente ao CD, onde são descarregados. Em seguida, seguem para um ponto de tomada de decisão (Checkpoint) para definir o produto a ser retirado e o porto de destino.

No checkpoint, o navio toma decisões baseadas na diferença entre a quantidade de produto que deveria ter sido enviada para o CD até aquele instante e a quantidade de produto que foi efetivamente enviada até aquele dado instante. Essa diferença é denominada “Gap” e é calculada proporcionalmente à demanda de cada produto através da fórmula:

$$Gap(i) = \left[DEH(i) \times \left(TNOW + LTGap(i,C)\right) - DCheck(i)\right] + [DemEmp * OfBR(i)]$$

Onde:

- DEH(i): é a demanda horária do produto “i”;
- TNOW: é o instante em que o navio passa no checkpoint (em horas);
- LTGap(i,C): é a diferença de tempo entre o checkpoint e o CD na Ásia (considerando os tempos de carregamento no Brasil) para a classe C e produto “i”.
- DCheck: é a quantidade virtual e real do produto “i” que já foi enviada para o CD a partir do checkpoint (isso inclui os navios que saíram do checkpoint para um porto brasileiro, os navios já carregados a caminho do CD e a quantidade de produto que já foi descarregada no CD).
- DemEmp: é a porcentagem da demanda empurrada para o terminal;
- OfBR(i): é a oferta anual do produto “i”;

Dessa forma, a primeira parcela da equação representa um modelo de reabastecimento determinístico, em que se calcula a quantidade de produto que deve estar no pátio do centro de distribuição num dado instante.

Por sua vez, a segunda parcela (demanda empurrada) representa uma quantidade adicional de estoque a ser mantida no CD. Essa quantidade pode ser interpretada como estoque de segurança, visando mitigar os efeitos da aleatoriedade do suprimento e da chegada de navios de exportação.

A Figura 9 ilustra o estoque com reabastecimento não instantâneo.

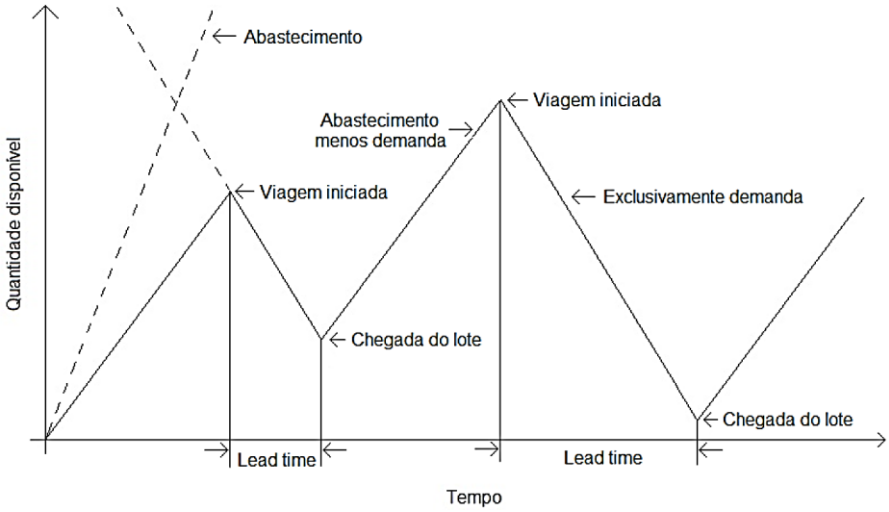

Figura 9 - Estoque com reabastecimento não instantâneo (SILVA, 2012)

Dessa forma, um “Gap(i)” positivo indica que o navio poderia ir para o Brasil retirar o produto “i”, enquanto um Gap(i) negativo indica que o navio não deve ir ao Brasil retirar o produto “i”. Quando os Gaps de mais de um produto são positivos, escolhe-se o produto mais “atrasado” proporcionalmente; quando ambos os Gaps são negativos, o navio calcula o tempo de espera previsto e aguarda no checkpoint. Esse tempo de espera no checkpoint é uma abstração sobre a “folga” da frota de navios, uma vez que no sistema real o navio reduziria de velocidade.

4.2. Implementação

O modelo foi implementado no software Arena®, utilizando a integração com o Visual Basic no próprio Arena®. Além disso, uma interface de dados foi utilizada para facilitar preenchimento de dados e análise de resultados.

4.3. Análise de dados

A análise dos dados de entrada foi realizada com base em portos de minério em operação e em dados sobre navegação de navios de minério. Utilizou-se o *Input Analyzer* para avaliação das distribuições de probabilidade de diversos processos, dentre eles:

- Intervalo de tempo entre chegadas de navios: para navios de minério, conclui-se que o intervalo entre chegadas respeita a distribuição exponencial.
- Tempos de carregamento, manobras de atracação e desatracação e tempos de viagem: considerando a cadeia logística do minério de ferro, verificou-se que esses processos respeitam distribuições de probabilidade próximas à distribuição normal. Com o intuito de evitar os efeitos das caudas da normal, optou-se por utilizar a distribuição triangular.

4.4. Verificação

O processo de verificação do modelo de simulação foi conduzido através de análises de animações dos processos (como a chegada de navios, comportamento do estoque, ciclo das embarcações, entre outros) e análise de resultados com dados de entrada determinísticos.

Um dos importantes aspectos de um modelo de simulação de regime permanente é a garantia de balanço de massa. Isso se torna mais importante quando as replicações são muito longas (como apresentado na sessão 4.6).

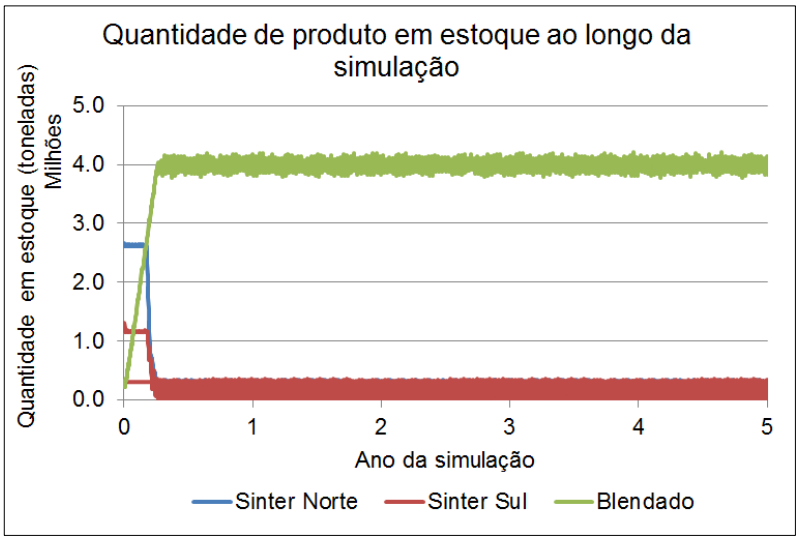

Figura 10 - Regime transitório do nível de estoque – Determinístico

A Figura 10 ilustra uma das análises do comportamento de estoque para verificação do balanço de massa durante 5 anos, considerando dados de entrada determinísticos.

4.5. Análise do regime transitório

As replicações em um modelo de simulação são usualmente iniciadas com parâmetros pré-definidos pelo usuário. Durante o início de uma replicação, existe um regime transitório que pode ser definido como o período em que o desempenho do sistema é influenciado pelas condições iniciais do modelo. A partir do instante que a influência dos parâmetros iniciais é mínima, diz-se que a simulação atingiu o regime permanente.

O sistema logístico modelado possui um conjunto de navios que operam em ciclo fechado e um estoque no centro de distribuição. Ambos os sistemas possuem forte influência das condições iniciais de operação e, portanto, o período de pré-aquecimento deve ser estimado.

A Figura 11 ilustra o regime transitório desde o instante zero da simulação até no máximo 6 meses de simulação.

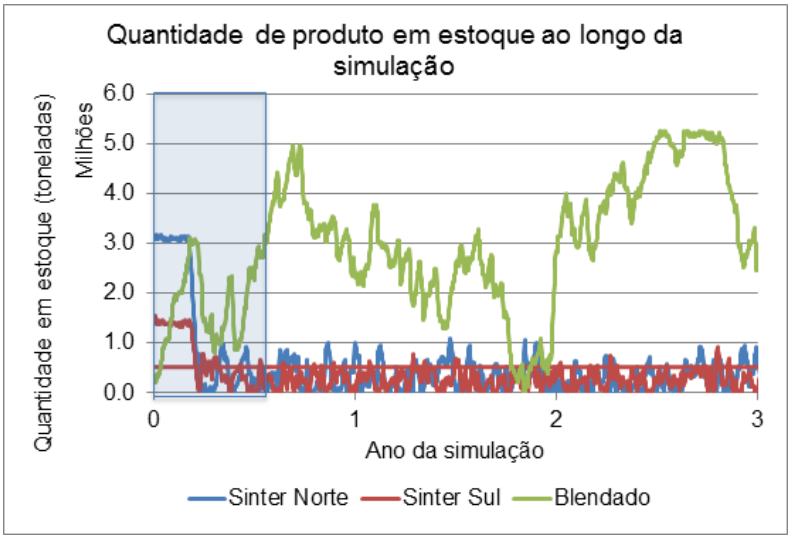

Figura 11 – Regime transitório do nível de estoque

A Figura 12, por sua vez, apresenta o comportamento dos tempos em fila dos navios de importação.

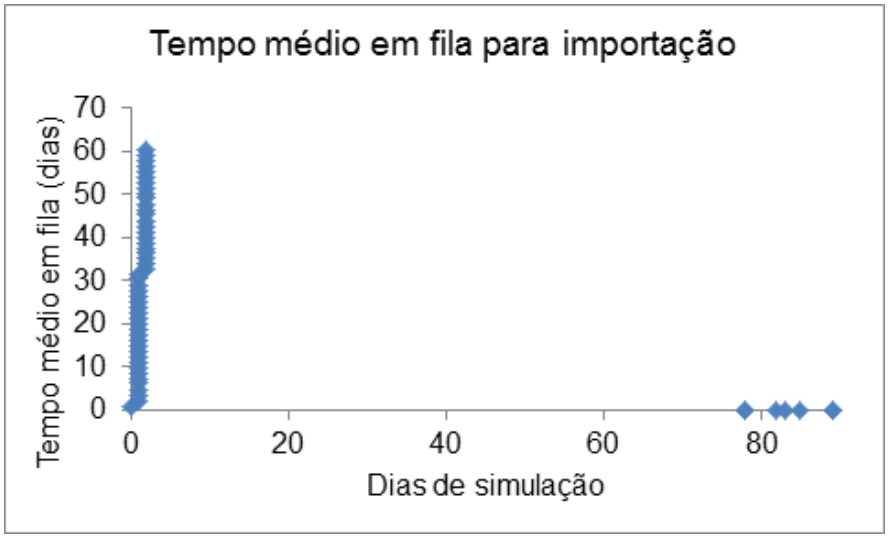

Figura 12 – Comportamento do tempo em fila na importação – Regime transitório

Nos primeiros dias de simulação, os navios são gerados praticamente no mesmo instante de tempo, resultando em filas de até 60 dias e, após cerca

de 70 dias de simulação, o sistema começa a se estabilizar. Além disso, verificou-se através da análise da animação do modelo que o comportamento da frota de importação e dos navios de exportação é homogêneo e estável após aproximadamente 1 ano de simulação.

Dessa forma, optou-se por um tempo de pré-aquecimento de 2 anos, em favor da segurança.

4.6. Definição da duração das rodadas

Tendo em vista a importância de eficiência computacional para métodos de busca para simulação, optou-se por simular replicações muito longas e quebra-las em “lotes” (replicações menores) que devem ser independentes entre si. Para garantir a independência entre os lotes, cria-se um correlograma (Chwif e Medina, 2010).

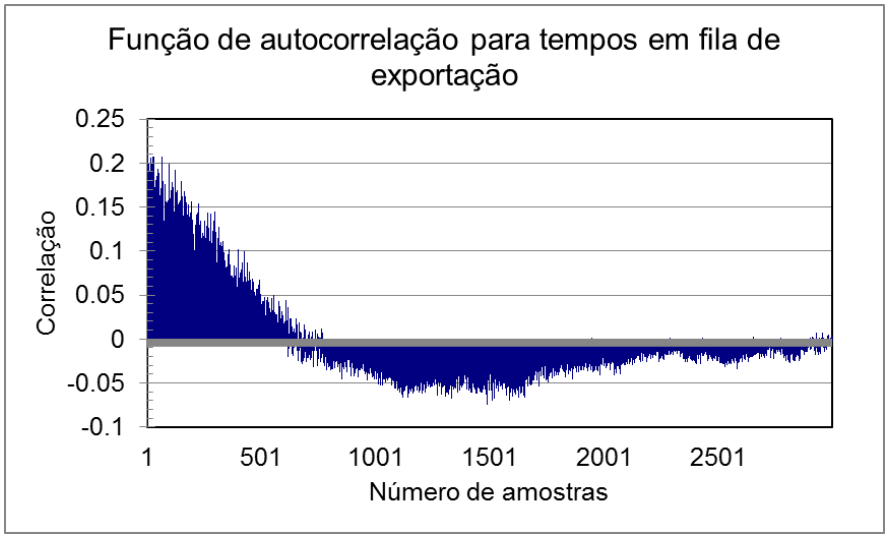

Figura 13 - Correlograma dos tempos em fila para exportação

Considerando cerca de 3 mil amostras de tempos em fila apresentadas na Figura 13 (aproximadamente 3 anos de simulação), observa-se que a partir

de cerca de 2.3 mil amostras (2 anos e 4 meses) a correlação estabiliza e fica próxima a zero. Tendo em vista o horizonte anual de análise, a duração de uma replicação a ser considerada é de 3 anos.

4.7. Validação

A validação de modelos de simulação pode ser conduzida de algumas formas, como comparação com sistemas existentes, análise de especialistas, comparação com modelos computacionais válidos existentes e por teoria de filas.

O modelo em questão foi validado através da comparação com um modelo validado de simulação portuária, análise de especialistas e análises de sensibilidade (variação da demanda, frota, recursos, etc.). Os resultados do cenário base são apresentados a seguir, assim como comentários sobre sua validade.

4.8. Cenário Base

As premissas do cenário base são descritas na seção 3.1.1. A porcentagem da demanda empurrada considerada foi de 4% (esse valor é justificado na seção 5.3.1). Os resultados foram obtidos através da simulação de 15 replicações de 3 anos.

Através dos resultados da Tabela 16, conclui-se que a demanda no terminal foi 100% atendida (90 MTPA).

Tabela 16 - Resultados do cenário base: demanda atendida

Demanda atendida	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Demanda Carregada - Produto 3	Mtpa	90,005,778	120,923
Demanda Descarregada - Produto 1	Mtpa	59,998,860	22,864
Demanda Descarregada - Produto 2	Mtpa	30,005,926	61,887

Os resultados de tempo médio em fila são apresentados na Tabela 17. Os navios do tipo Capesize (classe 6) obtiveram um tempo em fila de 113 horas (4.7 dias), significantemente maior que a média das outras classes.

Tabela 17 - Resultados do cenário base: tempo médio em fila para exportação

Tempo médio em fila	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Tempo médio em fila dos navios exportação - Classe 1	Horas	0.4	0.4
Tempo médio em fila dos navios exportação - Classe 2	Horas	9.9	2.1
Tempo médio em fila dos navios exportação - Classe 3	Horas	10.5	3.4
Tempo médio em fila dos navios exportação - Classe 4	Horas	10.5	2.8
Tempo médio em fila dos navios exportação - Classe 5	Horas	10.4	3.1
Tempo médio em fila dos navios exportação - Classe 6	Horas	113.5	14.8
Tempo médio em fila dos navios exportação - Todas as classes	Horas	30.3	3.4

Os resultados para os tempos médio de atracação são apresentados na Tabela 18. Observa-se que eles estão condizentes com os valores de dado de entrada.

Tabela 18 - Resultados do cenário base: tempo médio de atracação para exportação

Tempo médio de atracação	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Tempo médio de atracação dos navios exportação - Classe 1	Horas	1.0	0.0
Tempo médio de atracação dos navios exportação - Classe 2	Horas	1.0	0.0
Tempo médio de atracação dos navios exportação - Classe 3	Horas	3.0	0.0
Tempo médio de atracação dos navios exportação - Classe 4	Horas	3.0	0.0
Tempo médio de atracação dos navios exportação - Classe 5	Horas	4.5	0.0
Tempo médio de atracação dos navios exportação - Classe 6	Horas	4.5	0.0

A Tabela 19 apresenta os tempos médios de espera por carregador de navio (uma vez que este recurso é compartilhado entre berços). A classe 6 (Capesize) apresenta tempo médio de espera igual a zero, uma vez que há um berço exclusivo e um CN exclusivo para essa classe.

Tabela 19 - Resultados do cenário base: tempo médio de espera por CN

Tempo médio de espera por CN	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Tempo médio em espera por CN dos navios exportação - Classe 1	Horas	10.2	0.5
Tempo médio em espera por CN dos navios exportação - Classe 2	Horas	9.1	1.1
Tempo médio em espera por CN dos navios exportação - Classe 3	Horas	8.3	2.5
Tempo médio em espera por CN dos navios exportação - Classe 4	Horas	8.5	1.3
Tempo médio em espera por CN dos navios exportação - Classe 5	Horas	8.1	1.7
Tempo médio em espera por CN dos navios exportação - Classe 6	Horas	0.0	0.0

Os tempos médios de carregamento são apresentados na Tabela 20. Observa-se que as classes 4 e 5 demoram em média mais tempo para

carregar do que a classe 6. Isso se deve ao fato delas possuírem um tempo de espera por CN elevado (Tabela 19).

Tabela 20 - Tempo médio de carregamento

Tempo médio de carregamento	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Tempo médio carregando dos navios exportação - Classe 1	Horas	3.5	0.01
Tempo médio carregando dos navios exportação - Classe 2	Horas	6.6	0.00
Tempo médio carregando dos navios exportação - Classe 3	Horas	11.3	0.00
Tempo médio carregando dos navios exportação - Classe 4	Horas	17.4	0.01
Tempo médio carregando dos navios exportação - Classe 5	Horas	18.2	0.01
Tempo médio carregando dos navios exportação - Classe 6	Horas	15.0	0.00

A Tabela 21 apresenta os resultados da simulação para o tempo médio de desatracação por classes. Conclui-se que esses tempos estão condizentes com os dados de entrada.

Tabela 21 - Resultados do cenário base: tempo médio de desatracação para exportação

Tempo médio de desatracação	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Tempo médio de desatracação dos navios exportação - Classe 1	Horas	1.0	0.0
Tempo médio de desatracação dos navios exportação - Classe 2	Horas	1.0	0.0
Tempo médio de desatracação dos navios exportação - Classe 3	Horas	3.0	0.0
Tempo médio de desatracação dos navios exportação - Classe 4	Horas	3.0	0.0
Tempo médio de desatracação dos navios exportação - Classe 5	Horas	4.5	0.0
Tempo médio de desatracação dos navios exportação - Classe 6	Horas	4.5	0.0

Os resultados do modelo para tempos médios de estadia dos navios são apresentados na Tabela 22 e conferem com a somatória dos tempos supracitados.

Tabela 22 - Resultados do cenário base: tempo médio de estadia para exportação

Tempo médio de estadia	**Unid.**	**Valor**	**I.C. (α=5%)**
Estadia média dos navios exportação - Classe 1	Horas	16.1	0.7
Estadia média dos navios exportação - Classe 2	Horas	27.6	2.0
Estadia média dos navios exportação - Classe 3	Horas	36.1	3.7
Estadia média dos navios exportação - Classe 4	Horas	42.4	2.8
Estadia média dos navios exportação - Classe 5	Horas	45.7	4.4
Estadia média dos navios exportação - Classe 6	Horas	137.5	14.8

Tabela 23 - Resultados do cenário base: número médio de atracações por ano

Número médio de atracações	**Unid.**	**Valor**	**I.C. (α=5%)**
Número de atracações dos navios exportação - Classe 1	#	500	0.3
Número de atracações dos navios exportação - Classe 2	#	214	0.1
Número de atracações dos navios exportação - Classe 3	#	100	0.2
Número de atracações dos navios exportação - Classe 4	#	129	0.1
Número de atracações dos navios exportação - Classe 5	#	180	0.2
Número de atracações dos navios exportação - Classe 6	#	330	0.9

A Tabela 23 apresenta os resultados do modelo para o número de atracações por classe de navio, que conferem com os dados de entrada. Por exemplo, multiplicando-se a capacidade média da classe 1 (9 mil toneladas) pelo seu número de atracações por ano (500), obtém-se os 4.5 milhões de toneladas ano informados na seção 3.1.1.

Por sua vez, a Tabela 24 apresenta os resultados sobre a taxa média de carregamento por classe de navio. Confrontando os tempos de estadia (com exceção das filas) e a capacidade média de cada classe, observa-se que os resultados são coerentes.

Tabela 24 - Resultados do cenário base: taxa média de carregamento do berço de exportação

Taxa média de carregamento	**Unid.**	**Valor**	**I.C. (α=5%)**
Taxa de carregamento do berço para navios exportação - Classe 1	tph	573	48
Taxa de carregamento do berço para navios exportação - Classe 2	tph	1,186	91
Taxa de carregamento do berço para navios exportação - Classe 3	tph	1,758	127
Taxa de carregamento do berço para navios exportação - Classe 4	tph	2,194	133
Taxa de carregamento do berço para navios exportação - Classe 5	tph	2,833	141
Taxa de carregamento do berço para navios exportação - Classe 6	tph	6,250	39

A Tabela 25 apresenta as ocupações dos carregadores de navio e berços de atracação. A ocupação do berço 1 (exclusivo para Capesize) de 90% é considerada alta, mas aceitável. Ela justifica os tempos em fila mais altos dessa classe em comparação às demais classes (Tabela 17).

Tabela 25 - Resultados do cenário base: ocupação dos recursos de exportação

Ocupação dos berços e CN	Valor	I.C. (α=5%)
Ocupação CN 1	57%	0.1%
Ocupação CN 2	54%	0.3%
Ocupação CN 3	37%	0.3%
Ocupação CN 4	21%	0.2%
Ocupação Berço 1	90%	0.2%
Ocupação Berço 2	72%	1.1%
Ocupação Berço 3	62%	0.6%
Ocupação Berço 4	60%	1.7%
Ocupação Berço 5	30%	0.9%
Ocupação Berço 6	32%	1.4%
Ocupação Berço 7	19%	1.3%
Ocupação Berço 8	5%	1.5%
Ocupação Berço 9	2%	0.5%
Ocupação Berço 10	1%	0.4%

Com relação ao sistema de importação, a Tabela 26 apresenta os valores de fila, atracação, descarregamento, desatracação e estadia para a classe 7 (Chinamax). Os resultados são coerentes com o esperado.

Tabela 26 - Resultados do cenário base: composição dos tempos em porto para importação

Composição dos tempos em porto	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Tempo médio em fila - Classe 7	Horas	8.93	0.01
Tempo médio de atracação - Classe 7	Horas	5.00	0.00
Tempo médio de descarregamento - Classe 7	Horas	75.10	0.00
Tempo médio de desatracação - Classe 7	Horas	5.00	0.00
Tempo médio de estadia - Classe 7	Horas	94.03	0.01

A composição do ciclo das embarcações é apresentada na Tabela 27. Observa-se que os tempos de viagem representam 76% do tempo total em operação.

Tabela 27 - Resultados do cenário base: composição dos tempos de ciclo da frota

Composição do tempo de ciclo	Unid.	Valor	I.C. (α=5%)
Número de ciclos	#	237	1
Tempo em fila	Dias	0.4	0.0
Tempo em atracação	Dias	0.2	0.0
Tempo em descarga	Dias	3.1	0.0
Tempo em desatracação	Dias	0.2	0.0
Tempo em viagem entre Ásia e o Checkpoint	Dias	18.4	0.1
Tempo de espera em checkpoint	Dias	3.6	0.0
Tempo de viagem entre checkpoint e Brasil	Dias	8.9	0.0
Tempo de operação no Brasil (carregamento e filas)	Dias	10.5	0.0
Tempo viagem entre Brasil e Ásia	Dias	28.6	0.1
Ciclo total	Dias	73.9	0.1

Tabela 28 – Ocupação dos berços e descarregadores de navio

Importação	Valor	I.C. (α=5%)
Ocupação DN 1	68%	0.1%
Ocupação DN 2	68%	0.1%
Ocupação DN 3	68%	0.1%
Ocupação Berço 1	77%	0.1%
Ocupação Berço 2	77%	0.2%
Ocupação Berço 3	77%	0.1%

A Tabela 28 apresenta as ocupações dos berços e descarregadores de navio. Considerando a taxa de descarga de 5,060 tph por DN, 8760 horas

disponíveis por ano e 68% de ocupação, conclui-se que cada DN descarregou aproximadamente 30 MTPA (90 MTPA no total).

Os custos de *demurrage* e *dispatch* são apresentados na Tabela 29. Uma vez que a classe 6 apresentou tempo em fila bem superior em relação às outras classes, seu custo de *demurrage* é coerente. O custo total foi de USD 0.25 /t.

Tabela 29 – Custos com demurrage

Custos de demurrage	**Unid.**	**Valor**	**I.C. (α=5%)**
Demurrage Classe 1	USD	201,997	14,918
Demurrage Classe 2	USD	329,217	38,909
Demurrage Classe 3	USD	304,977	72,387
Demurrage Classe 4	USD	670,617	115,999
Demurrage Classe 5	USD	1,291,450	345,976
Demurrage Classe 6	USD	22,729,980	3,060,066
Dispatch Classe 1	USD	287,025	4,648
Dispatch Classe 2	USD	254,347	6,679
Dispatch Classe 3	USD	272,378	11,408
Dispatch Classe 4	USD	487,093	15,832
Dispatch Classe 5	USD	1,001,790	44,598
Dispatch Classe 6	USD	726,272	73,354
Demurrage - Dispatch Total	USD	22,499,332	3,061,806
Total USD / t	USD/t	0.25	0.03

Com relação ao comportamento dos estoques (Figura 14), observa-se que os níveis de estoque apresentam fortes oscilações, resultado da alta aleatoriedade de chegadas de navios (distribuição exponencial).

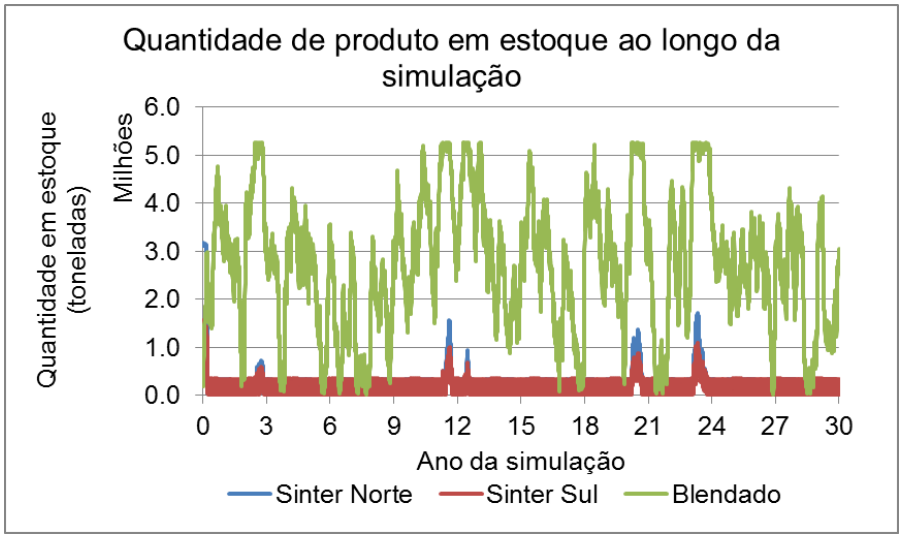

Figura 14 - Resultados do cenário base: comportamento do nível de estoque

Por fim, conclui-se que os resultados do modelo de simulação são coerentes e válidos para o propósito do estudo de caso. A configuração proposta no cenário base foi capaz de atender a demanda prevista, mas não há indícios de que ela seja a melhor configuração possível.

5. Análise de alternativas

Esta seção tem como objetivo apresentar análises sobre diferentes configurações do sistema que minimizem custos e maximizem a pontuação de uma alternativa, considerando a integração do modelo de simulação de eventos discretos, do modelo de análise de decisão multicritério e de um método de busca exaustiva e de comparação.

Com relação aos métodos e técnicas de otimização para simulação, destacam-se dois tipos básicos:

- Métodos puramente de comparação que consideram um número finito de alternativas possíveis (busca exaustiva);
- Métodos de busca que focam em percorrer parte do espaço de solução do problema para encontrar alternativas eficientes.

No presente estudo de caso, optou-se pela utilização do método de comparação entre duas alternativas, descrito por Law and Kelton (2000), e da exploração do o impacto da utilização de *Common Random Numbers* (CRN). Em especial, a utilização de CRN é de interesse uma vez que alguns dos indicadores de desempenho são bastante suscetíveis à aleatoriedade da chegada de navios (como *demurrage* e tempos em fila), fazendo com que os resultados da simulação apenas convirjam após várias replicações.

A busca exaustiva foi realizada através de uma lógica para reinicialização da simulação e alteração das variáveis de entrada automaticamente. À medida que a simulação é conduzida, a lógica verifica indicadores que apontam para inviabilidade da alternativa, como tempo em fila excessivo. Uma vez

identificados, a simulação é interrompida e uma nova alternativa é analisada, economizando tempo de processamento. Destaca-se que uma das vantagens de se utilizar a busca exaustiva no presente estudo é a possibilidade de se analisar os custos, riscos e benefícios (seção 3.5) de uma forma mais aprofundada após a simulação dos cenários, uma vez que os resultados de todas alternativas são disponibilizados. Evidente que outros métodos de busca poderiam ser aplicados ao problema, como os apresentados na seção 2.3.

Para análise das alternativas, três variáveis de decisão foram consideradas: composição da frota, capacidade de estoque e porcentagem da demanda empurrada.

5.1. Método de comparação entre duas alternativas

O método considerado é descrito na seção 2.3.1, em que objetiva-se determinar se uma alternativa é superior a outra dado certo nível de confiança.

Dessa forma, as análises apresentadas nesse capítulo são realizadas da seguinte forma:

- As alternativas são ordenadas de acordo com suas médias;
- Comparam-se as alternativas duas a duas, através do método de comparação ente duas alternativas.

As comparações são realizadas de duas formas: entre uma alternativa e sua sucessora; e entre a melhor alternativa e suas sucessoras, duas a duas. Nessas comparações, apresenta-se o p-Value (ou nível descritivo), que

representa o menor nível de significância (α) que pode ser assumido para se rejeitar uma hipótese de aderência. Dessa forma, tem-se:

- H_0: Alternativa “i” equivalente à alternativa “j”;
- H_1: Alternativa “i” melhor que alternativa “j”
- Se p-Value ≤ α, a hipótese H_0 é rejeitada;
- Se p-Value > α, a hipótese H_0 é aceita.

Dessa forma, quanto menor o valor do p-Value, maior o nível de confiança que pode ser assumido em uma comparação de alternativas.

Por fim, destaca-se que o objetivo do método de comparação é fornecer um indicador estatístico para avaliar a utilização da técnica de CRN e para avaliar *tradeoffs* entre duas alternativas, propiciando maior rigor no processo de comparação. Dessa forma, o tomador de decisão pode visualizar o conjunto de alternativas com seus respectivos custos e benefícios e, através dos critérios estabelecidos, realizar *tradeoffs* mais robustos, como descrito por Goodwin e Write (2004).

Outros métodos de comparação (como o de comparações múltiplas e ordenamento e seleção) poderiam ser utilizados no estudo de caso, como por exemplo, para se concluir estatisticamente qual alternativa é a “melhor” dentre todas as outras. Esse tipo de comparação pode ser interessante em problemas cujo objetivo é minimizar ou maximizar um único critério (como custos, por exemplo).

5.2. Sobre a utilização de *Common Random Numbers* (CRN)

Segundo FU (2002), técnicas de redução de variância podem fazer uma grande diferença na aplicação de métodos de busca para simulação. Considerando que o intervalo de chegada de navios de minério respeita uma distribuição exponencial e que, durante simulações com o modelo, mostrou-se o fator mais impactante na convergência dos resultados, adotou-se a técnica de geração de números aleatórios comuns (CRN) para o processo de chegada de navios de exportação.

Banks et al. (2000) ressaltam algumas precauções ao se utilizar CRN. A primeira delas diz respeito ao fato da distribuição de probabilidade das amostras (resultados das replicações) da simulação ter de ser normal. A segunda se refere à sincronia da geração dos números aleatórios comuns para diferentes cenários. Ambas as precauções foram tomadas ao longo dos experimentos.

Para avaliar o impacto da CRN no sistema apresentado, são apresentadas três alternativas que variam de acordo com a porcentagem da demanda empurrada (2%, 3%, e 3.5%). A Figura 15 ilustra o comportamento dos tempos médio em fila de exportação a cada replicação, considerando a técnica mencionada.

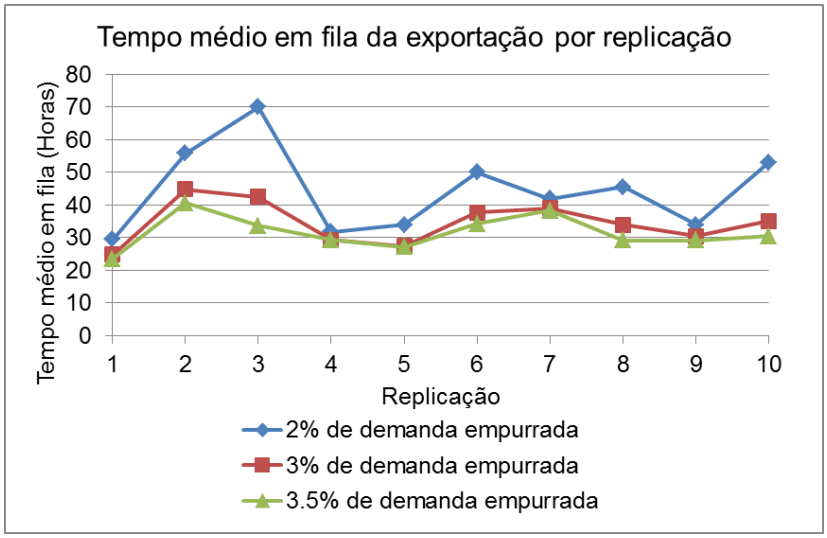

Figura 15 – Tempos em fila de exportação para

Primeiramente, quanto menor a demanda empurrada maior é o tempo médio em fila. Isso se deve ao fato da demanda empurrada ser diretamente proporcional ao nível de estoque de segurança no CD. Em outras palavras, quanto maior a demanda empurrada, maior o estoque de segurança e menor a espera dos navios de exportação por produto em pátio. A Tabela 30 apresenta as estatísticas das simulações.

Tabela 30 – Estatísticas das simulações - CRN

	Porcentagem da demanda empurrada		
	2%	3%	3.5%
Tempo médio em fila (horas)	44.6	34.5	31.6
Número de replicações	10	10	10
Intervalo de confiança (alfa = 5%)	9.4	4.8	3.8

Em segundo lugar, observa-se que os tempos médios em fila de cada alternativa (2%, 3% e 3.5%) apresentam comportamentos similares ao longo das replicações. Isso ocorre pela utilização de números aleatórios comuns

para intervalo entre chegadas de navios de exportação nas três simulações. A Tabela 31 apresenta a correlação positiva entre os resultados obtidos.

Tabela 31 - Correlação entre tempos em fila de exportação - CRN

Comparação	Correlação – Tempo em fila
2% e 3% da demanda empurrada	0.86
2% e 3.5% da demanda empurrada	0.61
3% e 3.5% da demanda empurrada	0.92

Como as três alternativas foram simuladas considerando números aleatórios comuns, os tempos médios em fila podem ser analisados estatisticamente de forma pareada. Aplicando-se um teste t-student, obtêm-se os resultados para o p-value na Tabela 32.

Tabela 32 – Teste de hipótese para tempo médio em fila

	p-Value Teste-t Pareado	p-Value Teste-t Não Pareado
Comparação entre 3.5% e 2%	0.2%	0.4%
Comparação entre 3.5% e 3%	0.4%	14.3%

Para a demanda empurrada de 3.5% e de 3% e nível de nível de significância α = 5%, pode-se aceitar a hipótese de que o tempo médio em fila é maior no primeiro caso do que no segundo pelo teste-t pareado, enquanto que a mesma hipótese é rejeitada pelo teste-t não pareado.

Por fim, com a utilização de CRN foi possível realizar as simulações das alternativas com 10 replicações e, ainda sim, obter intervalos de confiança aceitáveis. Para a simulação de cada alternativa, gastaram-se em média 12 segundos em um computador Intel Core i5, 4G de memória RAM.

5.3. Análises de sensibilidade com o método de busca proposto

As análises de sensibilidade apresentadas a seguir são realizadas considerando as premissas do cenário base e têm como objetivos:

- Avaliar e validar o método proposto;
- Entender o impacto das variáveis de decisão nos custos totais do sistema.

Os critérios desenvolvidos na seção 3.3 são explorados logo após as análises de sensibilidade, em que todas as variáveis de decisão são analisadas em conjunto.

Por fim, cada alternativa foi simulada durante 10 replicações de 3 anos.

5.3.1. Avaliação da demanda empurrada

Dez cenários foram elaborados variando a porcentagem da demanda total de 1% até 10%, com o passo de 1%. Os resultados da análise são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Análise de sensibilidade: porcentagem da demanda empurrada

Custos anuais (USD / t)								
Alt.	CAPEX Importação	OPEX Importação		Pátio			Sistema Exportação	Total (USD/t)
	Chinamax	Chinamax Mar	Chinamax Porto	CAPEX Pátio	CAPEX Eqpto Pátio	OPEX Estoque	Demurrage	
4	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.33	0.78	12.20
5	4.00	4.41	0.95	1.27	0.46	0.42	0.73	12.24
6	4.00	4.41	0.95	1.27	0.46	0.50	0.70	12.29
3	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.25	1.00	12.35
7	4.00	4.41	0.95	1.27	0.46	0.58	0.68	12.35
8	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.67	0.68	12.44
9	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.75	0.68	12.52
10	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.83	0.68	12.61
2	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.17	1.41	12.67
1	4.00	4.42	0.95	1.27	0.46	0.08	2.15	13.33

A alternativa que apresentou menor custo é a número 4 (4% de demanda empurrada), com custo total de USD 12.20 / t. Observa-se que a variável de decisão (porcentagem da demanda empurrada) tem impacto diretamente proporcional no OPEX do estoque e inversamente proporcional ao *demurrage* (pelos mesmos motivos citados na seção anterior). A Figura 16 ilustra o *tradeoff* mencionado.

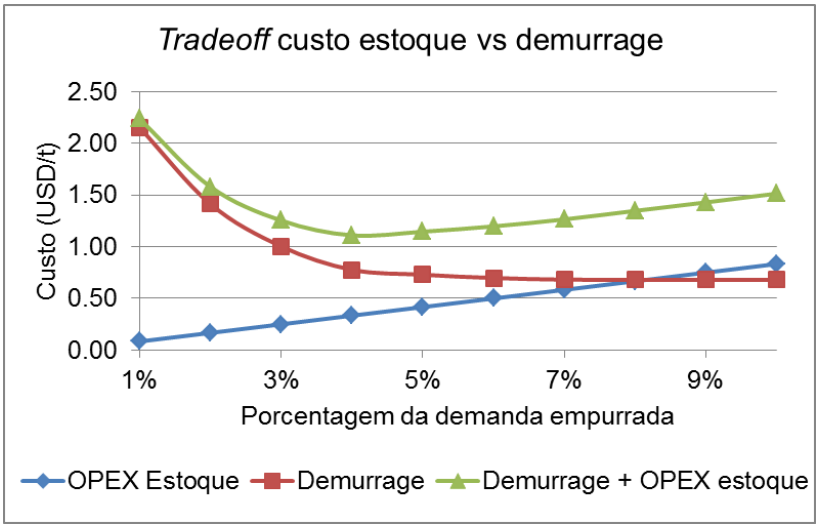

Figura 16 - *Tradeoff* entre custo de estoque e demurrage

Com relação à significância dos resultados acima, dois testes são apresentados na Tabela 34: o primeiro compara o valor do *p-value* entre duas alternativas subsequentes enquanto o segundo compara o *p-value* da melhor alternativa em relação às demais.

Tabela 34 - Análise de sensibilidade: porcentagem da demanda empurrada

i	Alt.	Total (USD/t)	p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo i < Custo i+1 Compara com subsequente		p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo 1 < Custo i+1 Compara a melhor com as demais	
			Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total	Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total
1	4	12.20	-	-	-	-
2	5	12.24	11.51%	49.43%	11.51%	49.43%
3	6	12.29	0.23%	49.23%	2.17%	48.65%
4	3	12.35	28.10%	49.12%	3.37%	47.78%
5	7	12.35	47.43%	49.90%	0.23%	47.68%
6	8	12.44	0.06%	48.65%	0.06%	46.33%
7	9	12.52	0.06%	48.78%	0.01%	45.12%
8	10	12.61	0.03%	48.75%	0.01%	43.88%
9	2	12.67	35.64%	49.07%	0.70%	42.98%
10	1	13.33	0.04%	40.62%	0.12%	33.98%

Observa-se que o teste-t pareado apresentou valores consideravelmente superiores em relação ao teste-t não pareado, corroborando a hipótese de que o uso de CRN é uma técnica eficiente de redução da variância para o problema apresentado.

Considerando o teste-t pareado com um nível de significância α = 5%, não é possível concluir que a alternativa 4 é melhor que a alternativa 5. Logo, se aceita que as duas alternativas são estatisticamente equivalentes com relação a custos.

No entanto, comparando a melhor alternativa com as demais (2 a 2), observa-se que há maior confiança estatística quanto aos resultados. Considerando um nível de significância α = 5%, pode-se aceitar, por exemplo, a hipótese de que a alternativa 4 é melhor do que a alternativa 6.

Por fim, considerando o mesmo nível de significância com o teste-t não pareado, observa-se que não é possível diferenciar as alternativas através do teste de hipótese.

5.3.2. Variação da frota de importação

A análise de sensibilidade da composição da frota de importação tem como objetivo avaliar o impacto da quantidade de navios Chinamax e Capesize no sistema. Para estimar o número de navios necessários para o atendimento da demanda, a fórmula a seguir é utilizada:

$$NumNavios(Classe) = \frac{Demanda\ (Classe)}{Capacidade\ do\ navio\ (Classe)} \times \frac{Tempo\ de\ ciclo\ (Classe)}{365} \quad (5)$$

Considerando uma frota composta somente por Chinamax e um tempo de ciclo de aproximadamente 70.5 dias, obtém-se uma frota estimada em 47 navios, considerando um navio adicional para folga.

Com base nessa formulação, as composições de frota variando Chinamax e Capesize foram calculadas, considerando um e dois navios de folga. O número de Chinamax foi variado a um passo de duas unidades.

Tabela 35 – alternativas para escolha da frota

	Capesize	Chinamax		Capesize	Chinamax
Composição 1	0	47	Composição 26	0	48
Composição 2	4	45	Composição 27	4	46
Composição 3	9	43	Composição 28	9	44
Composição 4	14	41	Composição 29	14	42
Composição 5	19	39	Composição 30	19	40
Composição 6	24	37	Composição 31	24	38
Composição 7	29	35	Composição 32	29	36
Composição 8	34	33	Composição 33	34	34
Composição 9	39	31	Composição 34	39	32
Composição 10	44	29	Composição 35	44	30
Composição 11	49	27	Composição 36	49	28
Composição 12	54	25	Composição 37	54	26
Composição 13	59	23	Composição 38	59	24
Composição 14	64	21	Composição 39	64	22
Composição 15	70	19	Composição 40	72	19
Composição 16	75	17	Composição 41	77	17
Composição 17	80	15	Composição 42	82	15
Composição 18	85	13	Composição 43	87	13
Composição 19	90	11	Composição 44	92	11
Composição 20	95	9	Composição 45	97	9
Composição 21	100	7	Composição 46	102	7
Composição 22	105	5	Composição 47	107	5
Composição 23	110	3	Composição 48	112	3
Composição 24	115	1	Composição 49	117	1
Composição 25	118	0	Composição 50	120	0

A Tabela 36 apresenta os resultados. Observa-se que as alternativas de menor custo possuem a frota majoritariamente com navios Chinamax (alternativas 1 e 26). Isso corrobora o ganho em custo que esses navios oferecem com economia de escala.

Tabela 36 – Análise de sensibilidade: resultados para variação da frota

i	Alt.	CAPEX Importação		OPEX Importação				Pátio			Sistema Exportação	Total (USD/t)
		Chinamax	Capesize	Chinamax Mar	Chinamax Porto	Capesize Mar	Capesize Porto	CAPEX Pátio	CAPEX Eqpto Pátio	OPEX Estoque	Demurrage	
1	1	3.92	0.00	4.42	0.87	0.00	0.00	1.27	0.46	0.33	0.79	12.06
2	26	4.00	0.00	4.42	0.95	0.00	0.00	1.27	0.46	0.33	0.78	12.20
3	2	3.75	0.22	4.27	0.81	0.26	0.05	1.27	0.46	0.33	0.84	12.25
4	27	3.83	0.22	4.27	0.88	0.25	0.05	1.27	0.46	0.33	0.79	12.37
5	3	3.58	0.50	4.07	0.77	0.58	0.11	1.27	0.46	0.33	0.81	12.49
6	28	3.67	0.50	4.08	0.85	0.57	0.12	1.27	0.46	0.33	0.78	12.63
7	4	3.42	0.78	3.88	0.74	0.91	0.17	1.27	0.46	0.33	0.84	12.79
8	29	3.50	0.78	3.89	0.81	0.89	0.19	1.27	0.46	0.33	0.79	12.91
9	5	3.25	1.06	3.68	0.71	1.23	0.23	1.27	0.46	0.33	0.80	13.02
10	30	3.33	1.06	3.71	0.77	1.20	0.25	1.27	0.46	0.33	0.80	13.19
11	6	3.08	1.33	3.49	0.67	1.55	0.29	1.27	0.46	0.33	0.82	13.31
12	31	3.17	1.33	3.52	0.73	1.52	0.32	1.27	0.46	0.33	0.82	13.47
13	7	2.92	1.61	3.31	0.63	1.88	0.35	1.27	0.46	0.33	0.81	13.57
14	32	3.00	1.61	3.33	0.70	1.84	0.39	1.27	0.46	0.33	0.81	13.74
15	8	2.75	1.89	3.11	0.60	2.20	0.42	1.27	0.46	0.33	0.83	13.87

A Tabela 37, por sua vez, apresenta os resultados estatísticos. Com relação ao impacto do teste-t pareado, observa-se que os p-Values continuam muito mais baixos em relação aos p-Values do teste não pareado.

Considerando nível de significância $\alpha = 5\%$, pode-se aceitar que a alternativa 1 possui menor custo que as demais alternativas, comparando-as 2 a 2.

Tabela 37 - Análise estatística dos resultados para variação da frota

i	Alt.	Total (USD/t)	p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo i < Custo i+1 Compara com subsequente		p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo 1 < Custo i+1 Compara a melhor com as demais	
			Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total	Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total
1	1	12.06	-	-	-	-
2	26	12.20	0.02%	47.76%	0.02%	47.76%
3	2	12.25	3.88%	49.22%	0.02%	46.98%
4	27	12.37	0.22%	48.26%	0.00%	45.25%
5	3	12.49	0.01%	48.18%	0.00%	43.45%
6	28	12.63	0.03%	47.91%	0.00%	41.41%
7	4	12.79	0.02%	47.65%	0.00%	39.14%
8	29	12.91	0.03%	48.22%	0.00%	37.44%
9	5	13.02	0.28%	48.39%	0.00%	35.94%
10	30	13.19	0.01%	47.65%	0.00%	33.78%
11	6	13.31	0.06%	48.26%	0.00%	32.22%
12	31	13.47	0.03%	47.72%	0.00%	30.23%
13	7	13.57	0.03%	48.71%	0.00%	29.13%
14	32	13.74	0.02%	47.66%	0.00%	27.19%
15	8	13.87	0.02%	48.27%	0.00%	25.81%

5.3.3. Capacidade de pátio

A capacidade de pátio é analisada conforme apresentado na Tabela 38. Considerou-se 6 opções de pátio, com capacidades estáticas que variam entre 6 milhões de toneladas até 10.5 milhões de toneladas. A frota de navios Chinamax também foi variada entre 47 e 48 unidades, possibilitando uma frota alternativa com maior capacidade de transporte.

Tabela 38- Configurações possíveis de pátio com variação de frota

Alt	Capacidade pátio 1	Capacidade pátio 2	Capacidade pátio 3	%demanda empurrada	Frota Cape	Frota Valemax
1	3,500,000	1,750,000	5,250,000	4%	0	47
2	3,500,000	1,750,000	5,250,000	4%	0	48
3	3,250,000	1,625,000	4,875,000	4%	0	47
4	3,250,000	1,625,000	4,875,000	4%	0	48
5	3,000,000	1,500,000	4,500,000	4%	0	47
6	3,000,000	1,500,000	4,500,000	4%	0	48
7	2,750,000	1,375,000	4,125,000	4%	0	47
8	2,750,000	1,375,000	4,125,000	4%	0	48
9	2,500,000	1,250,000	3,750,000	4%	0	47
10	2,500,000	1,250,000	3,750,000	4%	0	48
11	2,250,000	1,125,000	3,375,000	4%	0	47
12	2,250,000	1,125,000	3,375,000	4%	0	48
13	2,000,000	1,000,000	3,000,000	4%	0	47
14	2,000,000	1,000,000	3,000,000	4%	0	48

Os resultados são apresentados na Tabela 39. As melhores alternativas em termos de custo são as que possuem menor capacidade de pátio (13, 11, 14 e 9). Com relação à análise estatística dos resultados (Tabela 40), pode-se aceitar que a alternativa 13 apresenta o menor custo em relação às outras considerando nível de significância $\alpha = 5\%$ e comparando-as duas a duas.

Tabela 39 - Análise de sensibilidade: resultados para variação do pátio

Custos anuais (USD / t)												
i	Alt.	CAPEX Importação		OPEX Importação				Pátio			Sistema Exportação	Total (USD/t)
		Chinamax	Capesize	Chinamax Mar	Chinamax Porto	Capesize Mar	Capesize Porto	CAPEX Pátio	CAPEX Eqpto Pátio	OPEX Estoque	Demurrage	
1	13	3.92	0.00	4.41	0.87	0.00	0.00	0.73	0.26	0.33	0.80	11.31
2	11	3.92	0.00	4.42	0.87	0.00	0.00	0.82	0.29	0.33	0.81	11.45
3	14	4.00	0.00	4.42	0.95	0.00	0.00	0.73	0.26	0.33	0.79	11.47
4	9	3.92	0.00	4.41	0.87	0.00	0.00	0.91	0.33	0.33	0.80	11.56
5	12	4.00	0.00	4.42	0.95	0.00	0.00	0.82	0.29	0.33	0.79	11.59
6	7	3.92	0.00	4.42	0.86	0.00	0.00	1.00	0.36	0.33	0.78	11.67
7	10	4.00	0.00	4.42	0.94	0.00	0.00	0.91	0.33	0.33	0.76	11.70
8	5	3.92	0.00	4.41	0.87	0.00	0.00	1.09	0.39	0.33	0.79	11.81
9	8	4.00	0.00	4.42	0.95	0.00	0.00	1.00	0.36	0.33	0.77	11.83
10	3	3.92	0.00	4.41	0.87	0.00	0.00	1.18	0.42	0.33	0.79	11.92
11	6	4.00	0.00	4.41	0.95	0.00	0.00	1.09	0.39	0.33	0.80	11.97
12	1	3.92	0.00	4.42	0.87	0.00	0.00	1.27	0.46	0.33	0.79	12.06
13	4	4.00	0.00	4.42	0.95	0.00	0.00	1.18	0.42	0.33	0.78	12.09
14	2	4.00	0.00	4.42	0.95	0.00	0.00	1.27	0.46	0.33	0.78	12.20

Tabela 40 - Análise estatística dos resultados para variação da capacidade de pátio

i	Alt.	Total (USD/t)	p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo i < Custo i+1 Compara com subsequente		p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo 1 < Custo i+1 Compara a melhor com as demais	
			Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total	Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total
1	13	11.31	-	-	-	-
2	11	11.45	0.01%	47.75%	0.01%	47.75%
3	14	11.47	17.81%	49.67%	0.01%	47.42%
4	9	11.56	0.08%	48.54%	0.00%	45.97%
5	12	11.59	0.08%	49.44%	0.00%	45.42%
6	7	11.67	0.19%	48.72%	0.00%	44.15%
7	10	11.70	13.92%	49.60%	0.00%	43.75%
8	5	11.81	0.11%	48.26%	0.00%	42.05%
9	8	11.83	11.80%	49.64%	0.00%	41.70%
10	3	11.92	0.07%	48.53%	0.00%	40.27%
11	6	11.97	2.05%	49.25%	0.00%	39.55%
12	1	12.06	0.11%	48.72%	0.00%	38.32%
13	4	12.09	4.76%	49.50%	0.00%	37.85%
14	2	12.20	0.05%	48.25%	0.00%	36.20%

5.4. Análise com todas variáveis de decisão

Uma vez analisadas as principais variáveis de decisão individualmente, aplicou-se o método de busca exaustiva para analisar a melhor alternativa. As variáveis de decisão consideradas são:

- Demanda empurrada: 3 opções de demanda empurrada foram avaliadas: 4%, 5% e 6%.
- Frota de importação: 18 composições de frotas foram elaboradas, conforme a Tabela 41.

Tabela 41 - Composição dos navios

# Valemax	47	45	43	41	39	37
#Capesizes	0	4	9	14	19	24
# Valemax	48	46	44	42	40	38
#Capesizes	0	4	9	14	19	24
# Valemax	49	47	45	43	41	39
#Capesizes	0	4	9	14	19	24

- Configurações de pátio: as 6 configurações de pátio apresentadas na seção 5.3.3 foram consideradas.

5.4.1. Resultados

A Tabela 42 apresenta os resultados da simulação para o custo final total da alternativa. Nota-se que as três alternativas que obtiveram menor custo total possuem capacidade estática de pátio de 6 milhões de toneladas e frota composta por 100% de navios Chinamax, diferindo apenas na porcentagem da demanda empurrada.

A alternativa de menor custo que possui composição de frota com navios Capesize está em oitavo lugar, apresentando um custo USD 11.51 /t contra USD 11.31 / t da melhor alternativa.

Tabela 42 - Resultados: todas variáveis de decisão

i	Alt	Capacidade pátio 1	Capacidade pátio 2	Capacidade pátio 3	%demanda empurrada	# Capesize	# Valemax	Custo total (USD/t)
1	7	2,000,000	1,000,000	3,000,000	4%	0	47	11.31
2	14	2,000,000	1,000,000	3,000,000	5%	0	47	11.32
3	21	2,000,000	1,000,000	3,000,000	6%	0	47	11.39
4	13	2,250,000	1,125,000	3,375,000	5%	0	47	11.43
5	6	2,250,000	1,125,000	3,375,000	4%	0	47	11.45
6	133	2,000,000	1,000,000	3,000,000	4%	0	48	11.47
7	140	2,000,000	1,000,000	3,000,000	5%	0	48	11.48
8	35	2,000,000	1,000,000	3,000,000	5%	4	45	11.51
9	28	2,000,000	1,000,000	3,000,000	4%	4	45	11.51
10	20	2,250,000	1,125,000	3,375,000	6%	0	47	11.52
11	147	2,000,000	1,000,000	3,000,000	6%	0	48	11.54
12	5	2,500,000	1,250,000	3,750,000	4%	0	47	11.56
13	12	2,500,000	1,250,000	3,750,000	5%	0	47	11.56
14	42	2,000,000	1,000,000	3,000,000	6%	4	45	11.57
15	132	2,250,000	1,125,000	3,375,000	4%	0	48	11.59
16	27	2,250,000	1,125,000	3,375,000	4%	4	45	11.61
17	139	2,250,000	1,125,000	3,375,000	5%	0	48	11.62
18	34	2,250,000	1,125,000	3,375,000	5%	4	45	11.62
19	19	2,500,000	1,250,000	3,750,000	6%	0	47	11.63
20	161	2,000,000	1,000,000	3,000,000	5%	4	46	11.63

A Tabela 43 apresenta a análise estatística das alternativas apresentadas. Observa-se que, mesmo no teste t-pareado, o valor de p-Value não é suficiente para um teste de hipótese sobre qual das duas melhores alternativas é menos custosa, considerando um nível de significância $\alpha = 5\%$. Isso é entendível tendo em vista que a diferença entre as duas é de USD 0.01/t.

Por outro lado, considerando um nível de significância $\alpha = 5\%$, pode-se aceitar que a alternativa 7 possui menor custo que as demais alternativas, comparando-as 2 a 2.

Tabela 43 - Análise estatística dos resultados para todas variáveis de decisão

i	Alt.	Total (USD/t)	p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo i < Custo i+1 Compara com subsequente		p-Value p/ teste de hipótese H1: Custo 1 < Custo i+1 Compara a melhor com as demais	
			Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total	Pareado Custo Total	Não Pareado Custo Total
1	7	11.31	-	-	-	-
2	14	11.32	36.63%	49.80%	36.63%	49.80%
3	21	11.39	0.14%	48.86%	1.68%	48.67%
4	13	11.43	4.63%	49.47%	0.32%	48.14%
5	6	11.45	23.88%	49.61%	0.01%	47.75%
6	133	11.47	17.81%	49.67%	0.01%	47.42%
7	140	11.48	41.29%	49.92%	0.05%	47.34%
8	35	11.51	6.24%	49.44%	0.04%	46.78%
9	28	11.51	48.55%	49.98%	0.01%	46.76%
10	20	11.52	39.12%	49.78%	0.11%	46.54%
11	147	11.54	24.94%	49.68%	0.06%	46.23%
12	5	11.56	35.09%	49.74%	0.00%	45.97%
13	12	11.56	48.60%	49.98%	0.02%	45.95%
14	42	11.57	42.25%	49.93%	0.04%	45.88%
15	132	11.59	25.79%	49.54%	0.00%	45.42%
16	27	11.61	15.95%	49.70%	0.00%	45.12%
17	139	11.62	44.32%	49.93%	0.02%	45.05%
18	34	11.62	45.60%	49.96%	0.01%	45.01%
19	19	11.63	39.58%	49.91%	0.02%	44.92%
20	161	11.63	34.98%	49.89%	0.02%	44.81%

As alternativas apresentadas acima são ordenadas em função dos seus desempenhos em custo. Para uma avaliação mais robusta dos *tradeoffs* envolvidos, a Figura 17 ilustra todas as alternativas, representadas por pontos, e seus respectivos custos e pontuações. Pelo gráfico, é possível observar três faixas de alternativas, com pontuações aparentemente equivalentes. A primeira faixa mais abaixo (com pontuações menores) representa as alternativas que contém frotas compostas apenas por navios Chinamax.

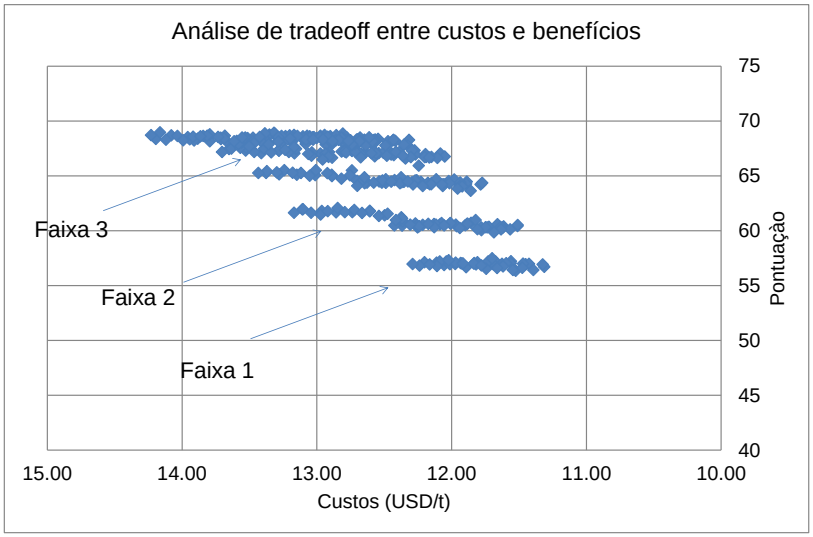

Figura 17 - Análise de *tradeoff* entre custos e alternativas

O fato de essas alternativas possuírem baixos custos por tonelada é discutido na seção 5.3.2, em que se destaca o ganho com economia de escala desses navios. Por sua vez, as suas pontuações baixas são influenciadas pelo critério “Risco”, medido em função da proporção de navios Chinamax no sistema.

A Tabela 44 apresenta as pontuações para as 30 alternativas com menor custo. A oitava alternativa (i=8; alternativa 35) é a que possui maior benefício dentre as 30 (60.5 pontos). Os critérios “Flexibilidade dos berços de importação”, “Flexibilidade dos Berços de Exportação” e “Flexibilidade dos CN” apresentam poucas variações, uma vez que:

- A “Flexibilidade dos berços de importação” é apenas influenciada pela frota de navios: quanto maior o número de navios Capesize na frota, maior a ocupação dos berços, já que a taxa de descarga do Capesize é menor e o número de atracações aumenta.

- A “Flexibilidade dos berços de exportação” e a “Flexibilidade dos CNs” dependem bastante do arranjo dos berços e regras de prioridades, que não estão sendo avaliadas.

Tendo em vista a diferença de custo de 1.7% entre a alternativa 35 (oitava colocada em custo) com a alternativa 7 (primeira colocada em custo), o tomador de decisão pode optar pela alternativa 35, que soma 60.5 pontos em benefícios contra 56.7 pontos da alternativa 7 (diferença de 6.7%).

Tabela 44 - Pontuação das alternativas

		Critérios qualitativos					Total
		Riscos	Utilização dos recursos			Sustentabilidade	
i	Alt.	Proporção de Valemax	Ocupação média dos berços de importação	Ocupação dos berços de exportação	Ocupação dos CN's	Impacto ambiental	
1	7	0.0	95.2	32.1	96.5	91.0	56.7
2	14	0.0	95.2	33.0	96.5	88.8	56.9
3	21	0.0	95.2	32.3	96.5	82.1	56.4
4	13	0.0	95.2	32.7	96.5	92.9	57.0
5	6	0.0	95.2	32.5	96.5	93.1	56.9
6	133	0.0	95.2	33.0	96.5	90.7	57.0
7	140	0.0	95.2	32.3	96.5	87.5	56.6
8	35	20.4	95.2	33.1	96.5	88.9	60.5
9	28	20.4	95.1	32.7	96.5	90.2	60.4
10	20	0.0	95.2	31.5	96.5	87.7	56.3
11	147	0.0	95.2	32.9	96.5	77.4	56.4
12	5	0.0	95.2	33.1	96.5	94.8	57.2
13	12	0.0	95.2	32.7	96.5	95.0	57.0
14	42	20.4	95.1	32.4	96.5	85.4	60.1
15	132	0.0	95.2	32.7	96.5	93.6	57.0
16	27	20.4	95.2	32.2	96.5	93.4	60.4
17	139	0.0	95.2	32.2	96.5	91.3	56.7
18	34	20.4	95.2	32.1	96.5	92.4	60.3
19	19	0.0	95.2	32.8	96.5	92.6	57.0
20	161	20.0	95.1	32.3	96.5	88.0	60.1
21	154	20.0	95.2	32.5	96.5	91.2	60.3
22	41	20.4	95.2	33.2	96.5	90.1	60.6
23	146	0.0	95.2	32.4	96.5	86.2	56.6
24	4	0.0	95.2	32.9	96.5	95.3	57.2
25	168	20.0	95.1	32.5	96.5	80.1	59.8
26	11	0.0	95.2	32.2	96.5	95.3	56.9
27	131	0.0	95.2	33.8	96.5	95.2	57.5
28	33	20.4	95.1	32.1	96.5	94.7	60.4
29	18	0.0	95.2	33.1	96.5	95.0	57.2
30	26	20.4	95.2	31.8	96.5	94.8	60.3

É interessante notar outros *tradeoffs* entre as alternativas. Por exemplo, a alternativa 35 (i=8) e 28 (i=9) possuem custos e benefícios muito similares. No entanto, a alternativa 28 possui uma maior pontuação no critério ambiental, enquanto a alternativa 25 possui um desempenho operacional um pouco maior. Ainda que a diferença seja sutil, perguntar-se qual alternativa é “melhor” é um exercício que auxilia na definição das prioridades no processo decisório, amadurecendo a importância real de cada critério. A alternativa 12 (i=13), por exemplo, possui grande benefício ambiental a um custo incremental de USD 0.25 / t em relação à alternativa de menor custo (i=1). Cabe ao tomador de decisão avaliar de o ganho ambiental é superior a USD 0.25 / t.

As estatísticas das pontuações são apresentadas na Tabela 45. Os valores do p-Value continuam sendo menores no teste-t pareado do que no teste-t não pareado.

Por fim, os critérios adotados apresentam pesos que podem eventualmente ser reavaliados através de análises de sensibilidade dos critérios abordados a seguir.

Tabela 45 - Estatística das pontuações

i	Alt.	p-Value p/ teste de hipótese H0: Benefício 1 ≠ Beneficio i+1 Compara com subsequente	
		T-Pareado	T-NãoPareado
1	7	-	-
2	14	35.89%	49.73%
3	21	3.04%	47.77%
4	13	8.94%	49.07%
5	6	10.09%	49.11%
6	133	17.37%	49.23%
7	140	13.13%	49.08%
8	35	0.01%	42.13%
9	28	0.01%	42.08%
10	20	3.45%	48.28%
11	147	2.21%	47.01%
12	5	3.66%	47.99%
13	12	2.88%	48.61%
14	42	0.03%	43.72%
15	132	4.32%	48.71%
16	27	0.01%	41.85%
17	139	49.70%	50.00%
18	34	0.01%	42.38%
19	19	18.35%	49.13%
20	161	0.02%	43.34%

5.4.2. Análise de sensibilidade dos critérios

Considerando os resultados da Tabela 44, pode-se desejar alterar os pesos dos critérios ou até incluir um novo critério. Para ilustrar essa possibilidade, a importância do peso do critério “Risco” foi diminuída e sua função de valor alterada. Além disso, aumentou-se o peso do critério “Sustentabilidade”.

Critério	Proporção de Chinamax	Ocupação máxima dos berços de importação	Ocupação máxima dos berços de exportação	Ocupação dos CN's	Impacto fila de navios – CO2e
Peso	0.12	0.26	0.35	0.17	0.09

A Figura 18 ilustra os resultados com os novos critérios. As faixas observadas na seção anterior são mais sutis, indicando que as alternativas são menos discrepantes em termos de pontuação. Além disso, é possível ver a curva de eficiência bem definida, em que só é possível aumentar a pontuação em detrimento de um aumento de custo.

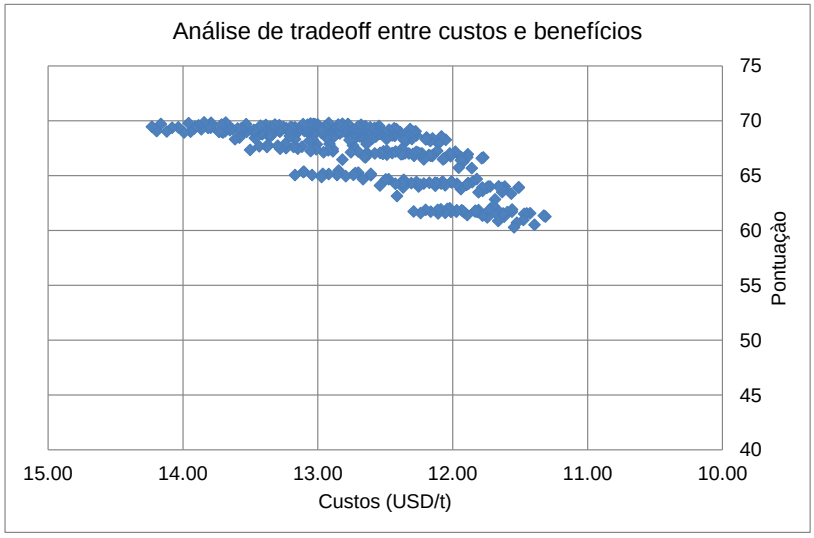

Figura 18 - Análise de sensibilidade dos critérios: resultados

6. Conclusões

A principal conclusão e contribuição desse estudo pode ser apontada como a eficácia da integração da metodologia da simulação, análise de decisão e métodos de otimização para simulação. Com o intuito de sustentar essa conclusão, conclusões específicas desse trabalho são divididas e apresentadas nas seções a seguir.

6.1. SED, MCDA e Simulação-otimização aplicados a sistemas logísticos.

Com o intuito de entender as qualidades e deficiências das metodologias utilizadas quando aplicadas a sistemas logísticos, seis critérios de avaliação foram elaborados:

1. Capacidade em considerar a aleatoriedade;
2. Compreensão do sistema;
3. Compreensão dos objetivos e valores;
4. Capacidade em encontrar a solução ótima;
5. Capacidade em fomentar novas ideias e soluções;
6. Capacidade em prever (estimar) o comportamento do sistema.

A partir da revisão bibliográfica e do estudo de caso, apresentam-se na Tabela 46 as características das metodologias abordadas no presente estudo de acordo com seis critérios supracitados.

Tabela 46 – Potencialidades da SED, MCDA e otimização na avaliação de sistemas logísticos (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR)

Critério	Definição	Coomentários
Capacidade em considerar aleatoriedade	Corresponde à capacidade de representar sistemas altamente influenciado pela aleatoriade dos processos	A abordagem proposta pela SED possibilita a consideração de funções de probabilidade adequadas, representando o caráter estocástico de grande parte dos sistemas. A otimização estocástica aborda aleatoriedade nos sistemas de uma forma menos detalhada, enquanto o MCDA pode considerar incertezas e riscos
Compreensão do sistema	Capacidade da metodologia em expandir a compreensão do usuárico acerca do sistema	A SED possibilita diversas análises "e se", expandindo o número de possibilidades e análises, muitas vezes com grande precisão. A otimização de sistemas também expande a compreensão de sistemas, porém de uma forma menos eficiente que a SED
Compreensão dos objetivos e valores	Capacidade da metodologia em expandir a compreensão dos objetivos e valores	MCDA tem como objetivo estruturar e expandir a compreensão dos objetivos e valores dos tomadores de decisão. A otimização induz o modelador e usuário reflitirem sobre os objetivos para definição da função objetivo, mas sem um método específico
Capacidade em encontrar a solução ótima	Habilidade da metodologia em procurar alternativas que correspondam à solução ótima ou próxima à ótima.	Sem dúvida, a otimização é o único método focado na busca pela solução ótima de sistemas
Capacidade em fomentar novas ideias e soluções	Está relacionado à capacidade da metodologia em expandir a criação de novas possibilidades em um problema.	Uma vez que o MCDA expande o conhecimento dos tomadores de decisão sobre seus objetivos e valores, o leque de alternativas também é expandido (o método Value Focused Thinking é adequado para este propósito). Além disso, através das perguntas "e se", o usuário pode utilizar a SED para testar novas alternativas e avaliar seus desempenhos
Capacidade em prever o comportamento do sistema	Capacidade e precisão do modelo em prever o comportamento de um sistema sob diversas condições.	A SED tem a capacidade de representar o sistema de forma fidedigna, considerando alto grau de detalhamento. Dessa forma, o comportamento de sistemas pode ser estimado com precisão.

Com base em uma pontuação para cada critério, pode-se avaliar a área de contribuição de cada metodologia (Figura 19). Em problemas em que é conveniente a utilização das três metodologias em conjunto, há uma diminuição na capacidade em se encontrar uma solução ótima, seja pela dificuldade em encontrar critérios sobre o que é “ótimo”, seja pela dificuldade

computacional ocasionada pelo caráter estocástico e pela complexidade de simulação.

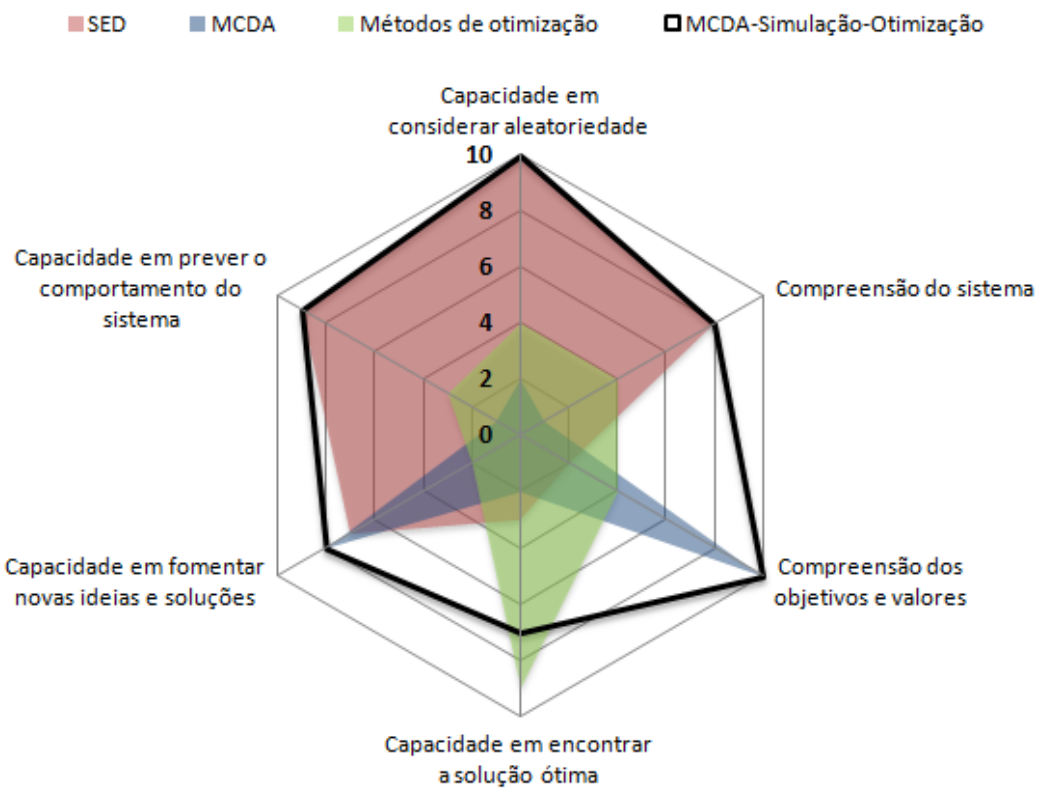

Figura 19 – Gráfico sobre as potencialidades das metodologias SED, MCDA e Otimização para simulação (Fonte: CONTRIBUIÇÃO DO AUTOR)

Observa-se que a metodologia de Análise de Decisão auxilia na formação da "função objetivo" de um problema; a SED é útil na análise de desempenho de um cenário e os métodos de otimização para simulação são úteis em comparar e buscar alternativas eficientes. Além disso, as análises "what-if" da SED, que expandem o entendimento do problema, são complementadas pelas análises de objetivos e valores do MCDA: no primeiro caso, busca-se entender os "resultados" de uma alternativa; no outro, busca-se entender quais "resultados" são importantes e relevantes.

6.2. Conclusão sobre o estudo de caso

No que ser refere à definição do problema e elaboração de critérios de análises mais amplos, a metodologia de análise de decisão se mostrou adequada e complementar à metodologia da simulação. A partir dela foi possível estabelecer relações de *tradeoff* mais complexas e capturar elementos intangíveis (como aversão ao risco dos tomadores de decisão pela frota exclusivamente composta por Chinamax) e antagônicos no processo decisório.

Com relação aos métodos de otimização para simulação, conclui-se que estes foram úteis em possibilitar a análise de alternativas em tempos computacionais factíveis, explorando o espaço de soluções e mantendo a validade estatística para comparações.

Em especial, os métodos de CRN aplicados à geração de navios se mostraram bastante eficientes, possibilitando comparações entre duas alternativas com número reduzido de replicações. Sem a sua aplicação, seria inviável comparar as alternativas apresentadas em tempos computacionais factíveis.

Portanto, uma das contribuições desse trabalho é a indicação de que números aleatórios comuns são eficientes na redução de variância para aplicações da SED em sistemas portuários ou similares.

6.3. Conclusões gerais

É importante destacar que a aplicabilidade da otimização para simulação e MCDA como metodologias complementares à SED varia de acordo com a

complexidade de cada problema. Para problemas com alta complexidade no processo de decisão, o MCDA possui função importante nas análises de *tradeoff*. Nesses problemas, o aspecto da qualidade abordado por Robinson (2002) deve ser ressaltado: “a modelagem de simulação só sobreviverá enquanto for uma técnica útil para seus usuários e clientes”.

Em processos decisórios complexos, algum métodos de otimização para simulação podem ter aplicabilidade reduzida, uma vez que é interessante realizar análises de sensibilidade com os critérios e pesos. Dessa forma, métodos que demandam uma função objetivo muito bem definida e que têm a finalidade de encontrar uma única alternativa ótima (ou algumas poucas) podem ser indesejáveis. Nesses casos, métodos de comparação e ordenação podem ser mais adequados.

Por outro lado, para problemas decisórios que possuem um grande número de alternativas e que os critérios são facilmente ponderáveis em uma única função objetivo, métodos de otimização para simulação que utilizem heurísticas de busca (como as apresentadas nas seções 2.3.5 até 2.3.9) tendem a ser mais apropriados, já que o objetivo é encontrar a melhor solução e não realizar *tradeoffs* entre as alternativas.

Uma questão importante para aplicação dessas metodologias integradas é a maior necessidade em se ter uma equipe multidisciplinar. Por exemplo, Montibeller e Franco (2010) discutem o papel de se realizar projetos de Pesquisa Operacional com auxílio de um facilitador – *Facilitated Modelling*.

6.4. Recomendações na área de otimização para simulação

Considerando os métodos de otimização para simulação utilizados no estudo de caso, ressalta-se que há um campo vasto a ser explorado.

Segundo Fu (2002), os mais relevantes tópicos na literatura de otimização para simulação são:

- *Ranking and Selection* (R&S), *Multiple Comparison Procedures* (MCP) e *Ordinal Optimization*;
- Aproximação estocástica (*Gradient based Optimization*);
- *Response Surface Methodology;*
- *Random Search;*
- *Sample Path Optimization*.

Métodos puramente de comparação (como R&S e MCP) utilizam um número finito de alternativas possíveis (busca exaustiva), enquanto os métodos de busca focam em percorrer parte do espaço de solução do problema para encontrar alternativas eficientes. Além disso, os métodos de comparações são importantes para os métodos de otimização para simulação, pois focam em uma avaliação estatística eficiente de alternativas.

Ainda sobre os métodos de comparação, adotou-se no presente trabalho um método de comparação entre duas alternativas que, a rigor, não é utilizado para determinar a melhor alternativa dentre várias de forma simultânea (mas sim comparar alternativas duas a duas). Dessa forma, destaca-se a importância de estudar e avançar em métodos de comparação que possibilitam o uso de CRN (principalmente em problemas que envolvam

sistemas portuários) e que indiquem qual alternativa é a melhor de todas, de forma simultânea, dado um nível de significância. O trabalho de Nelson e Matejcik (1995) pode ser indicado como ponto de partida, uma vez que aborda procedimentos de comparações múltiplas (MCP) com o uso de CRN.

6.5. Recomendações para estudos de sistemas portuários

Um importante aspecto dos sistemas portuários é a definição de regras de atracação de embarcações, por dois motivos: a) o investimento necessário em um berço depende dos navios que nele atracarão; b) pode ser conveniente proibir ou não priorizar uma atracação de uma embarcação menor em um dado berço para deixa-lo livre para uma embarcação maior (considerando os diferentes *demurrages* para diferentes classes de navio).

Dessa forma, a partir do modelo de simulação construído nesse trabalho, o método de busca exaustiva aplicado no estudo de caso pode ser utilizado e evoluído para a análise de regras de atracação de um porto, identificando o conjunto de berços e de regras que minimizem os custos de CAPEX e OPEX e, eventualmente, considerem critérios qualitativos.

Por se tratar de um problema combinatório, sugere-se para essa aplicação a utilização de métodos de busca mais robustos (como algoritmo genético, por exemplo) aliados à geração de números aleatórios comuns (CRN).

7. Bibliografia

ALTIOK, T., MELAMED, B. (2007). **Simulation Modeling and Analysis with Arena**. 1ra Ed. Elsevier Press, USA.

BANKS, J., J. S. CARSON, B. L. NELSON, AND D. M. NICOL. (2000). **Discrete-Event System Simulation**. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

BASHYAM, S.; FU, M. C., (1998). **Optimization of (s, S) Inventory Systems with Random Lead Times and a Service Level Constraint**. Management Science, v. 44, n. 12, p. 243-256.

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

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

BRITO, T. B., TREVISAN, E. F., & BOTTER, R. C. (2011). **A conceptual comparison between discrete and continuous simulation to motivate the hybrid simulation methodology**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 3915–3927).

BRITO, T.B; TREVISAN, E. F. C.; SILVA, R. C. S.; BOTTER, R. C. (2012). **Discrete Event Simulation Combined with Multiple Criteria Decision Analysis as a Decision Support Methodology in Complex Logistics Systems, Discrete Event Simulations - Development and Applications**, , InTech, DOI: 10.5772/50107.

BUTLER, J. C.; MERRICK, J. R. W.; MORRICE, D. J, (2011). **Assessing oil spill risk in port tanker operations using a multiattribute utility approach to ranking and selection**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC) (pp. 1696–1707).

CHWIF, L., MEDINA, A.C. (2010). **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.

DIAS, G. P. P., (2003). **Gestão de estoques numa cadeia de distribuição com sistema de reposição automática e ambiente colaborativo**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia de Sistemas Logísticos.

FISHER, M. L., (1997). **What is the Right Supply Chain for Your Product?** Harvard Business Review

FU, M. C., (2002). **Optimization for Simulation: Theory vs. Practice**. INFORMS Journal on Computing.

FU, M. C.; GLOVER, F. W.; APRIL, J., (2005). **Simulation Optimization: A Review, New Developments, and Applications.** Proceedings of the Winter Simulation Conference.

GASS, S. I., C. M. HARRIS, eds. 2000. **Encyclopedia of Operations Research and Management Science**, 2nd ed. Kluwer Academic, Boston, MA.

GOODWIN, P., WRIGHT, P., (2004). **Decision Analysis for Management Judment**. Vol. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

HARRELL, C.R.; GHOSH, B.K. E BOWDEN, R., (2004). **Simulation Using ProModel**, 2ª edição, McGraw-Hill Professional.

HONG, L. J., B. L. NELSON. (2005). **The Tradeoff between Sampling and Switching: New Sequential Procedures for Indifference-zone Selection**. IIE Transactions 37 (7): 623–634.

HOWICK, S., ACKERMANN,F (2011). **Mixing OR methods in practice: Past, present and future directions.** European Journal Of Operational Research, p. 503–511

IANNONI, A. P.; MORABITO, R., (2006). **A discrete simulation analysis of a logistics supply system**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 42, n. 3.

JABER, T., NAZZAL, R., HORANI, A., & AL-SHIHABI, S., (2011). **Selecting the best supplier based on a Multi-Criteria Taguchi loss function: A simulation optimization approach**. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference WSC 4280–4288 (2011). IEEE.

KEENEY, R. L., (1982). **Decision Analysis: An overview**. Operations Research, v. 30, p. 803-838.

KEENEY, R. L., (1996). **Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives**. European Journal Of Operational Research, v. 2217, n. 1992, p. 4-5.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H., **Conflicting objectives in Decisions**, J. Wiley, New York, 1977, p. 209-222.

KELTON, W. D., SADOWSKI, R. P., SADOWSKI, D. A., (1998). **Simulation with Arena, McGraw-Hill, New York**.

LAPIDE, L., (2006). **MIT's SC2020 Project: The Essence of EXCELLENCE**. Supply Chain Management Review.

LAW, A. M., & KELTON, W. D. (2000). **Simulation modeling and analysis** (3rd ed.). Boston: McGraw Hill.

LI, J.; GONZÁLEZ, M.; ZHU, Y., (2009). **A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing**. International Journal of Production Economics, v. 117, n. 2, p. 286-301.

LO, S.; POWER, D., (2010). ***An empirical investigation of the relationship between product nature and supply chain strategy***. Supply Chain Management, v. 15, n. 2, p. 139-EOA.

MENTZER, J. T.; KEEBLER, J. S.; NIX, N. W.; SMITH, C. D.; ZACHARIA, Z. G., (2001). **Defining supplychain management**. Journal of Business Logistics, v. 22, n. 2, p. 1-25.

MONTIBELLER, G., FRANCO, L.A., (2011). **Raising the bar: strategic multi-criteria decision analysis.** Journal of the Operational Research Society, 62 (5). pp. 855-867. ISSN 0160-5682

MONTIBELLER, G., FRANCO, L.A., (2010). **Multi-criteria Decision Analysis for Strategic Decision Making**. Handbook of Multicriteria Analysis, Volume 103, Part 1, p. 25-48, Springer, 1st Edition, Gainesville.

MONTIBELLER, G., FRANCO, L.A., (2009). **Facilitated modeling in operations research**. European Journal of Operational Research, p. 489-500.

NARASIMHAN, R.; KIM, S. W.; TAN, K. C., (2008***).*** **An empirical investigation of supply chain strategy typologies and relationships to performance**. International Journal of Production Research, v. 46, n. 18, p. 5231-5259, 15.

NELSON BL AND MATEJCIK FJ (1995). **Using common random numbers for indifference-zone selection and multiple comparisons in simulation**. Management Science 41(12): 1935–1945.

NETTO, J. F., (2013). **Modelo de simulação para dimensionamento da frota de contêineres movimentada por navios em rota dedicada.** Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ONO, R.T. (2007). **Modelagem Sistêmica e Planejamento Logístico da Cadeia de Suprimento de Petróleo**. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PASUPATHY, R., SHANE, HENDERSON, S. G., (2011). **Simopt: a library of simulation optimization problems**. Winter Simulation Conference. Anais... [S.l: s.n.].

ROBINSON, S. M., (1996). **Analysis of sample-path optimization**. Mathematics of Operations Research 21 513–528.

ROBINSON, S, (2002). **General concepts of quality for discrete-event simulation**. European Journal of Operational Research, v. 138, n. 1, p. 103-117.

RYZHOV, I. O.; TARIQ, A.; POWELL, W. B., (2011). **May the best man win: simulation optimization for match-making in e-sports**. Winter Simulation Conference. Anais... [S.l: s.n.].

SCHRIBER, T.J. (1974). **Simulation Using GPSS**. John Wiley & Sons, 1st Edition, New York, US.

SILVA, R. C. DOS S., (2012). **Análises de tradeoff em sistemas de transporte aquaviário com simulação de eventos discretos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Naval.

SWEETSER, A. (1999). **A comparison of System Dynamics (SD) and Discrete Event Simulation (DES***).* Anais da 17th International Conference of the System Dynamics Society, July 20 - 23, 1999, Wellington, Nova Zelandia.

TREVISAN, E. F. C.; MEDINA, A. C.; BOTTER, R. C., (2010). **Analysis and Sizing of a Coal Export System Through Simulation**. 12th WCTR, July 11-15, 2010 – Lisbon, Portugal.

VAMANAN, M.; WANG, Q.; BATTA, R.; SZCZERBA, R. J., (2004**). Integration of COTS software products ARENA & CPLEX for an inventory/logistics problem.** Computers & Operations Research, v. 31, n. 4, p. 533-547.

WANG, Y.; SHUMAN, L. L.; SHUMAN, L. J., (2011). **Best-subset selection procedure**. Winter Simulation Conference. Anais... [S.l: s.n.].

WEABER, R.; FRAZIER, P. I.; HENDERSON, S. G. (2010). **Performance measures for ranking and selection procedures**. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. Anais... [S.l: s.n.].

WINSTON, WAYNE L., (2004). **Operations Research: applications and algorithms**. Belmont: Brooks/Cole.