UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTU SENSU* EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – ÁREA DE TRANSPORTES

RODRIGO MEIRELLES NASCIMENTO

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE INDICADORES DE DESEMPENHO EM MODELO DE SIMULAÇÃO DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS UTILIZANDO APLICATIVO OTIMIZADOR

VITÓRIA-ES

Agosto/2016

RODRIGO MEIRELLES NASCIMENTO

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE INDICADORES DE DESEMPENHO EM MODELO DE SIMULAÇÃO DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS UTILIZANDO APLICATIVO OTIMIZADOR

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Transportes.

Orientador(a): Profª Drª Marta Monteiro da Costa Cruz

VITÓRIA-ES

Agosto/2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Nascimento, Rodrigo Meirelles, 1980-

N244a Análise da estabilidade de indicadores de desempenho em modelo de simulação de uma cadeia de suprimentos utilizando aplicativo otimizador / Rodrigo Meirelles Nascimento. – 2016.

215 f. : il.

Orientador: Marta Monteiro da Costa Cruz.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Simulação (Computadores). 2. Otimização matemática. 3. Controle de estoque. 4. Logística empresarial. 5. Análise de sensibilidade. 6. Cadeia de suprimentos. I. Cruz, Marta Monteiro da Costa. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

RODRIGO MEIRELLES NASCIMENTO

ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE INDICADORES DE DESEMPENHO EM MODELO DE SIMULAÇÃO DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS UTILIZANDO APLICATIVO OTIMIZADOR

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título Mestre em Engenharia Civil – Área de Concentração em Transportes.

Aprovada em ___/___/___ por:

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Profª. D.Sc. Marta Monteiro da Costa Cruz
Doutora em Engenharia de Transportes
Orientadora - UFES

_____

Profª. D.Sc. Patrícia Alcântara Cardoso
Doutora em Engenharia de Produção
Examinadora Interna - UFES

_____

Profº. D.Sc. Anilton Salles Garcia
Doutor em Engenharia Elétrica
Examinador Externo - UECE

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares mais próximos pelo apoio e participação no meu progresso acadêmico.

Agradeço especialmente à minha esposa pelo companheirismo e por compreender as minhas ausências justificadas pela dedicação que esse estudo exigiu.

Agradeço à empresa Petróleo Brasileiro S.A e seus gestores, por terem colaborado na medida do possível com minha participação presencial nas aulas do Mestrado, aliando a minha profissão ao meu desenvolvimento acadêmico.

Agradeço ao M.Sc. Roberto de Oliveira Júnior por ceder gentilmente os modelos de simulação originais que foram adotados como estudo de caso desta dissertação.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Profª. D.Sc. Patrícia Alcântara Cardoso, Profº. D.Sc. Anilton Salles Garcia e Profª. D.Sc. Marta Monteiro da Costa Cruz, pela contribuição técnica e científica para a validação e conclusão desta pesquisa.

Finalmente agradeço a todos os professores da Universidade Federal do Espírito Santo que contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico e científico, da graduação em Engenharia Civil ao presente Mestrado, os quais participaram indiretamente ou diretamente na consecução dessa pesquisa.

RESUMO

Frente aos efeitos da sazonalidade do mercado mundial de minerais metálicos, associado ao seu relevante custo logístico e de produção e à variação dos preços de aquisição de insumos para a indústria siderúrgica, empresas produtoras de minério de ferro e de seus derivados se vêem na necessidade de tomada de decisões, muitas vezes em sentido oposto ao do crescimento. Surgem como soluções dessas dificuldades, os desinvestimentos, o corte de custos, a priorização de atividades e a maximização da utilização de ativos, que podem ser implementadas com mudanças nas instalações e nos processos. Nesta pesquisa é empregada uma abordagem de otimização em modelo de simulação de cadeia de suprimentos para obter as melhores respostas para suporte na tomada de decisões operacionais e estratégicas. Especificamente, são investigados os níveis de trabalho de estoques ao longo da cadeia a partir dos quais se obtém, após alterações nos recursos e nos processos, o máximo de consumo do insumo carvão por ano para a produção de pelotas de minério de ferro pelas usinas de pelotização de uma mineradora. Um modelo de simulação de uma empresa real de mineração, já desenvolvido e validado no *software Arena*® em estudo anterior capta a natureza complexa do sistema e um otimizador criado no *add-in OptQuest*® *for Arena*® realiza a busca de melhores soluções. O simulador também é utilizado para gerar resultados de desempenho da cadeia nas situações ótimas obtidas. A experimentação sugere que alterações das capacidades instaladas, mudanças nas práticas de estocagem e variações nas capacidades dos processos da cadeia impactam, em alguns casos e em maior ou menor grau, no consumo de insumo. Demonstra-se também a sensibilidade dos resultados de desempenho na cadeia de suprimentos em função de mudanças aplicadas. Indicadores de desempenho apresentam a evolução entre os resultados dos casos experimentados.

Palavras chave: Simulação-otimização. Cadeia de suprimentos. Gestão de Estoques. Sensibilidade do desempenho da cadeia de suprimentos.

ABSTRACT

Faced with the effects of seasonality on global market of metallic minerals, associated with its relevant logistics and production costs besides of variation of raw materials purchase prices for the steel industry, mining companies need to apply decision making, often in opposite direction of the growth. Arise as solutions of these difficulties some divestments, cost cutting, prioritizing activities and maximizing the use of its assets that can be implemented with changes in facilities and processes. In this research, was applied an optimization approach in a supply chain simulation model to get the best answers to support operating and strategic decisions making. Specifically, were investigated the inventory work levels along the chain from which is obtained, after changes in resources and processes, a maximum coal input consumption per year for the production of iron ore pellets by pelletizing plants of a mining company. A simulation model of a real mining company, developed and validated in *Arena® software* from another previous study, was adopted as a case study of this research and captures the complex nature of the system and an optimizer created in the *add-in OptQuest® for Arena®* performs the search for best solutions. The simulator is also used to generate performance results of the chain in optimized situations. Experimentation suggests that changes of capacity, changes im storage practices and variations in the capacities of processes impact in some cases and to a greater or lesser extent, input consumption. It also demonstrates the sensitivity of performance results in the supply chain when changes were applied. Performance indicators show the evolution between the results of tested cases.

Keywords: Simulation optimization. Supply Chain. Inventory Management. Sensitivity of supply chain performance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Delimitação do tema da pesquisa..... 19
Figura 2. Estoques e a cadeia de suprimentos..... 28
Figura 3. Tipos de padrões de demanda..... 29
Figura 4. Relações entre os custos de estoques..... 30
Figura 5. Estoques puxados e empurrados..... 30
Figura 6. Modelo geral de gestão de estoques com reposições..... 32
Figura 7. Modelo de gestão de estoques com reposição instantânea e com *lead time* de pedidos..... 33
Figura 8. Modelo de gestão de estoques com reposições não-instantâneas e com *lead time* de pedidos..... 33
Figura 9. Otimização em simulação..... 36
Figura 10. Princípio da Simulação-Otimização..... 38
Figura 11. Sistemática simplificada de aplicação de otimizador..... 39
Figura 12. Método de meta-heurística na Sistemática de aplicação de otimizador em simulação..... 39
Figura 13. Funcionamento de Simulação-Otimização em *softwares* comerciais..... 40
Figura 14. Iterações da Simulação-Otimização segundo Hochmuth et al. (2012)... 41
Figura 15. Ciclo de Simulação-Otimização segundo Bachelet et al. (2007)..... 41
Figura 16. Estrutura da Simulação-Otimização..... 41
Figura 17. Esquema de interfaces entre a Simulação e Otimização para solução de problemas de otimização segundo Kôchel e Kâmpf (2006)..... 42
Figura 18. Esquema de interfaces entre a Simulação e Otimização para solução de problemas de otimização segundo Kôchel, Kunze e Nielânder (2003).... 42
Figura 19. Etapas para seleção de melhor cenário por meio de Simulação-Otimização segundo Brito et al. (2002)..... 43
Figura 20. Melhorias na integração da Simulação-Otimização pelos *softwares* Comerciais..... 44
Figura 21. Países de origem dos estudos sobre aplicações do *OptQuest*®, segundo a Tabela 06..... 75
Figura 22. Rotas de Produção de Aço - Insumos e Produtos..... 78
Figura 23. Fluxograma das operações da Samarco..... 79
Figura 24. Fluxograma simplificado do processo de pelotização..... 80

Figura 25. Cadeia de Suprimentos dos Insumos da Pelotização..... 82
Figura 26. Módulos Fornecedor, Transportadora e Cliente..... 86
Figura 27. Fluxograma da Cadeia de Suprimentos do Insumo Carvão mineral..... 86
Figura 28. Estrutura da Simulação-Otimização adotada para a pesquisa..... 96
Figura 29. Representação esquemática do funcionamento dos estoques pulmão...98
Figura 30. *Buffers* de estocagem, recursos e processos da cadeia de suprimento do insumo carvão 100
Figura 31. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo bruto na Mina do Fornecedor..... 101
Figura 32 Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo bruto no Porto do Fornecedor..... 102
Figura 33. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo bruto no Pátio de insumo bruto da Mineradora..... 103
Figura 34. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo moído nos Silos Diários da Mineradora..... 104
Figura 35. Estrutura de simulação-otimização do problema..... 109
Figura 36. Modelo de simulação-otimização: variáveis de decisão, função-objetivo e restrições da otimização..... 111
Figura 37. Modelo de simulação-otimização: simulação de resultados operacionais da cadeia na situação ótima..... 113
Figura 38. Modelo de simulação-otimização: simulação de resultados de desempenho da cadeia na situação ótima..... 114
Figura 39. Modelo de simulação-otimização: recursos e modal selecionados para os testes de mudanças na cadeia..... 121
Figura 40. Curvas de evolução dos resultados da função-objetivo do teste U_1..... 131
Figura 41. Curvas de evolução da otimização do teste $U_{1,}$ em função do número de replicações..... 131
Figura 42. Gráfico de comparação do perfil de evolução dos resultados dos testes de otimização e das simulações das situações ótimas, em escalas independentes..... 136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Aplicativos comerciais específicos de otimização em simuladores, segundo Swain (2005) e Rockwell Automation (2014)..... 56

Tabela 2. *Softwares* de simulação disponíveis no mercado sem aplicativo otimizador específico, com ou sem método de otimização, segundo Swain (2005)..... 57

Tabela 3. Áreas de aplicação dos *softwares* de simulação que utilizam o aplicativo *OptQuest®*..... 62

Tabela 4. Requisitos computacionais, características e estimativas de preços dos *softwares* de simulação que utilizam o aplicativo *OptQuest®*..... 63

Tabela 5. Áreas de Aplicação, requisitos computacionais, características e estimativas de preços dos *softwares* de simulação que utilizam aplicativo otimizador específico..... 64

Tabela 6. Evolução das aplicações do *OptQuest®* na Literatura..... 74

Tabela 7. Variáveis do modelo computacional de simulação: Insumo Carvão.....89

Tabela 8. Recursos do modelo computacional de simulação: Insumo Carvão.....90

Tabela 9. Capacidade dos recursos e dos modais no Fornecedor e na Mineradora..... 91

Tabela 10. Capacidade de armazenagem no Fornecedor e na Mineradora.....92

Tabela 11. Capacidade de processos de produção no Fornecedor e na Mineradora..... 93

Tabela 12. Capacidade de processos de operação de recursos no Fornecedor e na Mineradora..... 94

Tabela 13. Capacidade de processos de operação de modais na cadeia..... 94

Tabela 14. Componentes do modelo da cadeia de suprimento.....107

Tabela 15. Novas variáveis criadas no modelo de simulação adaptado: Insumo carvão.....115

Tabela 16. Fatores e níveis de teste de otimização.....120

Tabela 17. Plano de testes da otimização..... 122

Tabela 18. Resumo do quantitativo de testes de otimização.....123

Tabela 19. Plano de simulações das situações otimizadas.....123

Tabela 20. Resumo do quantitativo de testes de simulação.....124

Tabela 21. Plano de análises de sensibilidade.....128

Tabela 22. Resumo do quantitativo de testes de otimização para análises de sensibilidade..... 129
Tabela 23. Resumo do quantitativo de testes de simulação para análises de sensibilidade..... 129
Tabela 24. Resumo da duração total dos testes de otimização..... 132
Tabela 25. Resumo geral da duração total dos testes de simulação..... 133
Tabela 26. Resumo da duração total das análises de sensibilidade (otimzações).133
Tabela 27. Resumo da duração total das análises de sensibilidade (simulações)..134
Tabela 28. Resumo geral da duração total dos experimentos..... 134
Tabela 29. Resultados dos testes de simulação-otimização e das simulações na situação ótima para 3 variáveis: consumo total anual, modal ferroviário e *Lead time* do pedido..... 135
Tabela 30. Resumo das análises dos resultados dos testes de simulação-otimização..... 140
Tabela 31. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – consumo total anual do insumo carvão.....142
Tabela 32. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – *lead time* médio do pedido.....144
Tabela 33. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia.....146
Tabela 34. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – duração de interrupções da produção de pelotas por ano.....149
Tabela 35. Análises de sensibilidade – nível médio de estoques no pátio de insumo bruto – variação no modo de atendimento do pedido..... 151
Tabela 36. Resumo das análises dos resultados dos testes de sensibilidade..... 153

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Aplicativos comerciais contemporâneos de otimização em *softwares* de simulação..... 58
Quadro 2. Principais aplicativos comerciais de otimização em simuladores, segundo Fu (2002)..... 58
Quadro 3. Principais aplicativos comerciais de otimização em simuladores, segundo Montevechi, Miranda e Friend (2012)..... 58
Quadro 4. Simuladores atuais que utilizam o aplicativo *OptQuest*®..... 59
Quadro 5. Formulação do problema de otimização da cadeia do insumo carvão..110
Quadro 6. Formulação das expressões de respostas do simulador na situação ótima..... 112

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 16

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 16

1.2. DIRECIONADORES DA PESQUISA 17

1.3. ABORDAGEM METODOLÓGICA 23

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... 24

CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO 26

2.1. LOGÍSTICA NA CADEIA DE SUPRIMENTOS..... 26

2.1.1. GESTÃO DE ESTOQUES 27

2.2. SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO 34

2.2.1. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO: DIFERENÇAS E RELAÇÕES 34

2.2.2. SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO: CONCEITOS E MÉTODOS 36

2.2.3. ASPECTOS GERAIS SOBRE METAHEURÍSTICAS 46

2.2.4. APLICATIVOS OTIMIZADORES EM SIMULAÇÃO 54

2.2.5. EVOLUÇÃO DAS APLICAÇÕES DO *OPTQUEST*® NA LITERATURA 65

2.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM OTIMIZAÇÃO 75

CAPÍTULO 3. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DO ESTUDO 78

3.1. MODELO DE SIMULAÇÃO UTILIZADO 85

3.1.1. MODELO COMPUTACIONAL DA SIMULAÇÃO..... 88

3.1.2. VARIÁVEIS E RECURSOS DO MODELO COMPUTACIONAL..... 88

3.1.3. PARÂMETROS INICIAIS DO MODELO 90

3.1.4. INDICADORES DE DESEMPENHO IDENTIFICADOS..... 95

3.2. METODOOGIA ADOTADA 96

3.3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA..... 97

CAPÍTULO 4. ESTRUTURA LÓGICA E MODELAGEM DO PROBLEMA 107

4.1. COMPONENTES DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO 107

4.2. ESTRUTURAÇÃO DA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA

..... 108

4.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA 110

4.4. MODELAGEM COMPUTACIONAL DA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO 115

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS 117

5.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 117

5.1.1. PLANEJAMENTO DOS RECURSOS COMPUTACIONAIS..... 118

5.1.2. PLANEJAMENTO DO MÉTODO DE EXPERIMENTOS 119

5.1.3. PLANEJAMENTO DOS TESTES E DAS ANÁLISES.....120

5.1.3.1. PLANEJAMENTO DAS SIMULAÇÕES-OTIMIZAÇÕES.120

5.1.3.2. PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES DE SENSIBILILDADE 124

5.1.4. PLANEJAMENTO DAS ITERAÇÕES NOS MODELOS COMPUTACIONAIS 129

5.2. RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO E DAS SIMULAÇÕES NA SITUAÇÃO ÓTIMA..... 134

5.3. RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE..... 141

5.3.1. CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO..... 142

5.3.2. *LEAD TIME* MÉDIO DO PEDIDO..... 144

5.3.3. TAXA MÉDIA DE OCUPAÇÃO DO CONJUNTO DE RECURSOS RECURSOS DA CADEIA..... 146

5.3.4. DURAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES DE PRODUÇÃO POR ANO 149

5.3.5. NÍVEL MÉDIO DE ESTOQUES NO PÁTIO DE INSUMO BRUTO 151

5.4. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS..... 153

CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES 164

REFERÊNCIAS 168

APÊNDICE A - ALGORÍTMOS BÁSICOS DE MÉTODOS META-HEURÍSTICOS **176**

APÊNDICE B – MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO ADAPTADO PARA OTIMIZAÇÕES E PARA SIMULAÇÕES COMPLEMENTARES...**179**

APÊNDICE C – MODELOS COMPUTACIONAIS DA OTIMIZAÇÃO **..... 186**

APÊNDICE D – DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO E DAS SIMULAÇÕES NA SITUAÇÃO ÓTIMA**.. 191**

APÊNDICE E – DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE **..... 197**

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os problemas de logística são por muitas vezes abordados e resolvidos como um problema de planejamento. Antever às possíveis e futuras dificuldades operacionais, investigar os motivos de desvios que ocorrem no processo produtivo ou analisar comparativamente alternativas de decisão nos processos da cadeia de suprimentos são razões para que se procure visualizar as opções que se pode ter e os resultados que se podem alcançar.

Para Hillier e Lieberman (2006), a tomada de decisão para esses tipos de problemas partem de análises normalmente realizadas com o auxílio da Pesquisa Operacional. Problemas do tipo Programação de viagens, Filas, Dimensionamento de frota, Alocação de recursos e equipamentos, Roteamento de veículos, Análise de Gargalos, Análise de capacidade de instalações, Sistemas de informações, Armazenagem e acondicionamento de carga, Distribuição de carga, Localização de Fábrica ou Centro de Distribuição, Controle de estoque, Minimização de custos logísticos e Análise de capacidade de supridores são exemplos que essa técnica pode aprofundar e encontrar boas soluções.

Sendo assim, poder-se-ia abordar a pesquisa operacional no sentido de agrupar conhecimentos relacionados com o processo científico de tomada de decisão, aplicados a sistemas reais, num ambiente produtivo com recursos restritos. E é nesse contexto que técnicas como a Simulação (avaliação de resultados de cenários a partir de parâmetros determinísticos ou estocásticos) e a Otimização (programação matemática e analítica para investigação do melhor resultado) se apresentam como alternativas de modelagem, interpretação e predição de problemas operacionais, com relevantes diferenças, mas também com importantes interfaces.

O campo de atuação dos estudos da simulação e da otimização são bem delimitados e distinguem-se quanto a diversos critérios, em conceito, em método de aplicação, em forma de análise, em objetivos, em premissas, em modelagem e em formulação.

Nesse interím, nas últimas décadas, observou-se a necessidade de aperfeiçoar os resultados que se podem extrair dessas duas áreas, abrindo espaço para um esforço de integração entre eles, de forma a suprir as limitações de um e do outro. Trata-se da Simulação-Otimização, também denominada de Otimização da Simulação, que consiste basicamente em buscar o ótimo entre as alternativas simuladas. É realmente um conjunto de processos que agrega à pesquisa operacional a diminuição de incertezas sobre a solução de um problema e do tempo de cálculos para alcançá-la.

Além disso, a solução ou melhoria das condições de um problema logístico em cadeia de suprimentos é um típico caso de aplicação de pesquisa operacional. O seu estudo via simulação-otimização contribui para o aumento de conhecimento na área e a evolução na discussão sobre o seu uso e suas aplicações.

A presente pesquisa trata, portanto, de estudo da aplicação de técnicas de simulação-otimização, método de execução e análise de experimentação de uma cadeia de suprimentos de carvão mineral de uma empresa de mineração já modelada e simulada por Oliveira Júnior (2011). Foi então formulado um problema de otimização, foram perseguidos os melhores resultados e foi avaliada a estabilidade de seus resultados e suas medições a partir de técnicas de análise de sensibilidade.

1.2. DIRECIONADORES DA PESQUISA

Abrangência do tema

Avaliam-se indicadores de desempenho logístico e suscitam-se algumas questões que merecem aprofundamento teórico e prático para análises de outros pontos de vistas que ainda não foram abordados, como as seguintes questões:

- É possível avaliar, a partir de otimização de indicadores de desempenho identificados em modelo de simulação de uma cadeia de suprimentos, qual a melhor configuração de cenário para que o desempenho seja o melhor possível, usando ferramenta adequada e método eficaz?

- E considerando que a otimização pretendida seja bem sucedida, é possível correlacionar a estabilidade de indicadores da cadeia a partir de análise de sensibilidade? Como? Em que nível de estabilidade se encontram os indicadores de desempenho do estudo de caso? Como classificar um nível de estabilidade para uma determinada cadeia a partir dos resultados da simulação-otimização e da análise de sensibilidade de indicadores de desempenho identificados?

Verifica-se, portanto, que a análise da estabilidade de indicadores de desempenho de um modelo de simulação em cadeia de suprimentos tem relação com problemas de simulação-otimização, cujas análises podem ser feitas a partir de métodos combinados na interseção que existe na literatura entre as técnicas de simulação e de otimização para os casos em que se pretende buscar o melhor dos cenários simulados, com o uso de resultados obtidos da aplicação de um aplicativo otimizador.

Azadivar (1999) definiu um problema de simulação-otimização como um problema de otimização em que a função-objetivo e/ou algumas restrições são avaliadas por meio da simulação computacional. Portanto a simulação atua como validadora dos resultados otimizados. Acrescenta-se a isso o entendimento de Cardoso, Vinhoza e Sampaio Neto (2007, apud FERNANDES et al., 2013) de que a simulação, geralmente, tem como foco a estimativa de desempenho, enquanto a análise matemática sempre envolve o cálculo analítico do desempenho do sistema. A natureza pragmática da otimização traz ao simulador a busca por mais precisão na resposta do modelo. É uma contribuição importante para dar maior firmeza ao tomador de decisão na avaliação dos cenários que investiga.

Em problemas de logística, a simulação-otimização, também chamada na literatura de otimização em simulação, aparece como um instrumento de planejamento de grande valor para que o decisor possa antever ao que pode ser prejudicial a ele. A otimização é, juntamente com a Simulação, técnica bastante utilizada pela comunidade científica para resolver sistemas reais a partir de sistemas modelados. Isso é demonstrado no tópico 2.2.4 que trata dos aplicativos otimizadores em simulação.

A **Figura 1** esquematiza a delimitação do tema da pesquisa. Está destacado em vermelho a área de atuação deste estudo, qual seja a simulação-otimização em cadeia logística de suprimentos. Nele se apresentam os elementos principais de uma cadeia de suprimento, bem como o fluxo que pode existir entre eles. A simulação e a otimização, e mais especificamente a simulação-otimização se destacam pela interdisciplinaridade de suas aplicações em torno da cadeia, seja para problemas de estoques ou de transportes, seja para problemas de planejamento ou de operações, seja para problemas de custo ou de prazo, seja, portanto, para qualquer tipo de problema logístico que se queira investigar na cadeia:

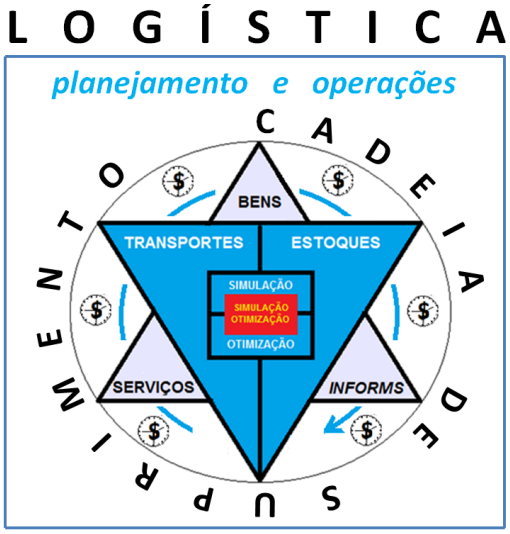


Figura 1. Delimitação do tema da pesquisa

Fonte: o autor

O presente estudo tem por finalidade, portanto, encontrar uma forma de se avaliar se os indicadores de desempenho identificados são representativos do processo, ou seja, se eles são eficazes na identificação de gargalos e adequados para munir o tomador de decisão de direcionadores de gestão. Pretende-se com a técnica de otimizar o que já está modelado em simulador encontrar os melhores parâmetros de decisão e, por conseguinte, a configuração do sistema que produz os melhores resultados. Além disso, análises de sensibilidade são propostas para verificar nesses cenários os níveis de estabilidade de cada indicador de desempenho e seus impactos na *performance* da cadeia de suprimentos analisada, bem como os riscos de implementação da solução otimizadora.

A definição e a descrição do problema são aprofundadas em tópico específico.

Relevância do tema

Para a cadeia de suprimento em estudo, restam oportunidades para desenvolvimento de novos conhecimentos na área que ainda permitiriam maior profundidade ao tema. Portanto, é esperado que a simulação integrada às técnicas de otimização seja uma importante contribuição para a continuidade do tema.

A otimização em simulação é uma técnica que interessa à comunidade científica, pois traz às incertezas naturais geradas pelo processo de simulação um foco direcionado ao ótimo e, no caso da simulação, pode se dizer que se alcança o melhor dos cenários, considerando as limitações do modelo, do *software*, do aplicativo e dos parâmetros de entrada do modelo.

Essa abordagem traz uma visão mais analítica a problemas de melhoria de desempenho em cadeia de suprimentos, convergindo os cenários para algo mais preciso e menos flexível. Portanto, assim como a simulação, a otimização em simulação traz diversos ganhos para a tomada de decisão no gerenciamento da cadeia de suprimentos, os quais são elencados na seção 2.2.1. Justifica-se, portanto, a sua utilização na análise de indicadores de desempenho e o desenvolvimento da pesquisa da forma como é proposta pelos seguintes motivos:

- Contribuição para a comunidade científica com o levantamento na literatura das principais aplicações otimizadoras em modelos simulados na área de logística, além da evolução dos estudos até os dias atuais sobre simulação-otimização;
- Grande variabilidade de resultados em simulações, em função da diversidade de cenários que se propõe analisar e consequente imprecisão nas respostas do modelo de simulação para tomada de decisão no gerenciamento da cadeia de suprimentos;
- Competitividade cada vez maior entre cadeias de suprimentos, destacando-se a importância no atingimento dos melhores desempenhos;

- Conhecimento dos principais aplicativos otimizadores em simulação disponíveis no mercado e suas aplicações na área de logística de cadeia de suprimentos;
- Vulnerabilidade de uma cadeia de suprimentos ao chamado “efeito chicote”, principalmente devido à forte relação do desempenho da cadeia com o comportamento do suprimento de cargas entre os fornecedores e os consumidores;
- Já existe um modelo de simulação de cadeia de suprimentos de uma empresa de mineração desenvolvido e indicadores de desempenho identificados no estudo de Oliveira Júnior (2011), para aplicação na pesquisa;
- Potencial contribuição do estudo com análises de como otimizar indicadores de desempenho logístico de uma cadeia de suprimento e como verificar suas estabilidades para medição de resultados.

Objetivos

Como objetivo geral, a pesquisa pretende analisar a estabilidade de indicadores de desempenho relacionados à capacidade instalada de uma cadeia de suprimentos e identificados a partir de um modelo de simulação já desenvolvido, por meio da utilização de aplicativo otimizador adequado e disponível no mercado.

Para a consecução desse intento, objetivos específicos são traçados como seguem:

a) Estudar a abrangência de aplicação da simulação-otimização, bem como a evolução dos estudos existentes com a utilização dessa técnica;
b) Compreender o funcionamento e as interfaces da cadeia de suprimentos a ser analisada e o modelo de simulação já desenvolvido;
c) Conhecer na teoria e na prática a ferramenta de simulação *Arena*® e o seu *add-in* otimizador *OptQuest*®;
d) Planejar e obter resultados de otimização do desempenho da cadeia;
e) Analisar a estabilidade dos indicadores de desempenho estudados por meio dos dados gerados pela execução da simulação-otimização no modelo e a partir de análises de sensibilidade.

Premissas, restrições, produtos e requisitos

Como premissa experimental deste estudo, destaca-se a utilização do modelo de simulação de cadeia de suprimento já desenvolvido e a análise de indicadores de desempenho já identificados para a consecução dos objetivos dessa pesquisa.

Como restrição ao trabalho, elenca-se a necessidade de acesso e conhecimento teórico e prático do processo de simulação computacional, especificamente no *software Arena*®, pois o modelo de simulação já se encontra desenvolvido nessa plataforma e porque se pretende realizar os experimentos dessa pesquisa no mesmo sistema.

Quanto aos produtos, têm-se como propósitos principais do estudo:

- Auferir resultados otimizados para indicadores de desempenho relacionados à capacidade da cadeia de suprimentos a partir da aplicação de aplicativo otimizador adequado;
- Gerar análises da sensibilidade e conclusões quanto à estabilidade dos indicadores de desempenho otimizados na medição de atividades na cadeia de suprimentos.

Já quanto aos requisitos necessários para que o estudo possa ser executado, experimentado e concluído, elenca-se o levantamento na literatura das principais aplicações otimizadoras em modelos simulados na área de logística em cadeia de suprimentos e, com isso, identificação e adequação de método capaz de apoiar a pesquisa para atender aos objetivos propostos e responder ao problema formulado.

Outro requisito é o conhecimento da prática do uso do aplicativo *OptQuest*® (desenvolvido pela empresa OptTek Systems, Inc.), selecionado para aplicação deste estudo de caso. O conhecimento de modelagem no *software Arena*® também foi requisitado já que o modelo foi desenvolvido nesse sistema.

Limitações em relação aos objetivos e ao tema

Os resultados das variáveis de resposta, otimizados a partir do aplicativo *OptQuest*® do *software Arena*®, são obtidos por meio de estimativas do ótimo devido ao sistema complexo e não-linear, não se garantindo a certeza da obtenção dos melhores resultados possíveis para cada indicador de desempenho otimizado. Porém, isso é uma limitação justificável pelos recursos que existem até hoje para aplicação de otimizadores em simuladores, o que por sinal reduz consideravelmente as incertezas dos cenários.

A conclusão do nível de estabilidade será baseada basicamente pela análise de sensibilidade dos resultados e os resultados do otimizador, validados no simulador.

1.3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

A classificação da pesquisa utilizou a taxonomia descrita por Moresi (2003).

Do ponto de vista da sua natureza, é uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais.

A forma de abordagem do problema é quantitativa, pois considera variáveis e elementos quantificáveis, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer também o uso de técnicas estatísticas.

Quanto aos fins, a pesquisa é de investigação exploratória, realizada em área na qual há espaço para desenvolvimento de mais conhecimentos. Objetiva levantar estudos similares feitos e contribuir com novas abordagens.

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa é de laboratório com experimentação de modelo computacional em *softwares*. A pesquisa também é bibliográfica, pois baseia seu referencial teórico em informações obtidas em material publicado em livros, revistas, jornais e *internet*. É também uma pesquisa experimental, pois se

realiza em laboratório a partir da manipulação e o controle de variáveis independentes e observação das suas variações em relação a variáveis dependentes.

Por fim, é um estudo de caso circunscrito à empresa de mineração objeto da pesquisa.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Dissertação é composta de seis Capítulos, um conjunto de Referências e cinco Apêndices.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, identificando e delimitando o problema da pesquisa, os objetivos (gerais e específicos), a justificativa para o tema em termos de relevância e complexidade e as limitações aos objetivos e da abordagem do tema. Apresentam-se também a abordagem metodológica slecionada e a estrutura de capítulos da dissertação.

O Capítulo 2 revisa os principais conceitos relativos à logística e à gestão de estoques na cadeia de suprimentos, à pesquisa operacional, à simulação, à otimização, à aplicação de otimização em simuladores e a métodos de análises. São abordados todos os embasamentos teóricos levantados na literatura para fundamentar o atendimento dos objetivos traçados, iniciando pela conceituação do problema, passando pela evolução das técnicas de solução aplicáveis em pesquisa operacional e terminando com conhecimento das aplicações já estudadas na literatura.

No Capítulo 3 descrevem-se os trabalhos relacionados com o tema da pesquisa e destacam-se os pontos da cadeia de suprimento analisada sobre os quais interessa desenvolver as propostas desta pesquisa. Apresentam-se também os modelos experimentais desenvolvidos no *software Arena*® e que são utilizados para atendimento dos objetivos propostos. Neste capítulo também se define e se descreve com precisão o problema e suas delimitações.

No Capítulo 4 debruça-se sobre o *design* do fluxo do processo iterativo, a formulação do problema, e a modelagem computacional. Selecionam-se as variáveis e os recursos de trabalho no modelo pré-existente e os *set ups* dos elementos que caracterizam a situação inicial e real da empresa no momento em que o estudo de caso foi realizado. Também se define variáveis de decisão, objetivo e restrições para preparação da base do modelo de otimização. Realiza-se adicionalmente um *overview* da ferramenta *OptQuest*® do software *Arena*® e seus parâmetros de entrada e saídas. Faz-se também uma descrição do modelo computacional de otimização elaborado.

O Capítulo 5 é dedicado aos experimentos. Identificam-se hipóteses de estudo e apresenta-se o plano detalhado de execução dos experimentos. Avaliam-se e definem-se premissas de iterações do modelo computacional para obtenção de resultados de interesse e com a qualidade desejada. Propõem-se análises consistentes com os objetivos da pesquisa e com a busca de soluções e/ou recomendações para o problema. Por fim, avaliam-se os resultados do processo de otimização e dos indicadores de desempenho selecionados na cadeia de suprimento a partir de análise de sensibilidade.

No Capítulo 6, é dado o fechamento do conteúdo da dissertação, com as considerações finais do autor e recomendações para estudos futuros.

Adicionalmente, as referências e os Apêndices A, B, C, D e E completam a parte final do conteúdo da estrutura desta dissertação.

CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. LOGÍSTICA NA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A logística é uma área de conhecimento que se encontra historicamente respaldada na inteligência militar e de guerra, época em que se viu a necessidade de um planejamento tático e estratégico para administração das forças e dos insumos que garantissem a solidez e eficiência das ações militares. Pretendia-se basicamente com a logística, o armazenamento e o suprimento de insumos e a sua distribuição pelas frentes de batalha.

Daí iniciou uma evolução do seu conceito, com a introdução de novos elementos até então não relevados, haja vista a natureza comercial que foi configurada para a sua compreensão atual. O termo “logística” é visto hoje muito mais do que um conjunto de conhecimentos de administração de estoque e de distribuição, ou seja, a logística atual não focaliza somente às atividades relacionadas ao transporte de cargas e pessoas como antigamente. Vai muito além disso, pois atualmente envolve toda uma cadeia de suprimentos, ou seja, desde a solicitação de um produto, serviço ou informação até a satisfação do consumidor final.

Segundo a definição de logística do *Council of Logistics Management* norte-americano citado por Antônio Galvão Novaes (2001, p. 36):

> Logística é o processo de planejar, implementar e controlar de maneira eficiente o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos do consumidor

Extrai-se desse conceito formal de uma instituição internacional renomada que a logística não é um conjunto de conhecimentos somente, é processo que compreende toda a trajetória do fluxo de bens, e serviços e informações agregadas, a partir de uma origem até um destino. E é numa cadeia de suprimentos que a logística tem um vasto campo de atuação. Obviamente que a atividade logística não depende de uma cadeia para ser praticada, principalmente nos métodos mais clássicos, porém é nela que atualmente se potencializa a sua razão de ser. Para

Ballou (2006) a cadeia de suprimentos é o conjunto de todas as atividades funcionais que se repetem, inúmeras vezes, ao longo do canal no qual matérias-primas, insumos e materiais vão sendo convertidos em produtos acabados, aos quais se agrega valor ao cliente.

Segundo Novaes (2001), a cadeia de suprimentos pode ser dividida durante a sua evolução histórica em quatro fases: segmentada, rígida, flexível e estratégica. O autor argumenta que nas três primeiras fases, a integração da cadeia era feita basicamente por meios físicos e operacionais e que na quarta fase ocorre uma evolução do tratamento da logística como algo estratégico para a cadeia. E nessa fase surge um conjunto de abordagens para tratamento de problemas logísticos, conhecido como Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management – SCM*).

De forma complementar, o gerenciamento da cadeia de suprimentos capta a essência da logística integrada, destacando as interações logísticas entre os elos da cadeia no âmbito de uma empresa ou até mesmo entre empresa, no âmbito do canal de fluxo de produtos, serviços e informações (BALLOU, 2006).

Prajogo e Olhager (2012) conclui em seu estudo sobre os fatores que influenciam na *performance* da Integração da cadeia de suprimentos que as informações e o fluxo de materiais são importantes para a integração da cadeia de abastecimento, tendo efeitos significativos sobre o desempenho. Ao mesmo tempo, a integração da cadeia de suprimentos é uma tarefa difícil, pois envolve muitos aspectos de gestão para a troca de informações em apoio às atividades de integração logística relativos ao fluxo físico de material entre com os fornecedores. Relata que tais questões complexas só podem ser gerenciadas quando onde há uma relação de longo prazo entre os parceiros da cadeia de suprimentos e reforça a importância da logística atuante na mesma direção.

2.1.1. GESTÃO DE ESTOQUES

Os estoques representam uma grande parcela de funcionamento de uma cadeia de suprimento, assim como as atividades de transporte. Como a logística se trata de

movimentação de bens, serviços e informações entre dois ou mais pontos, ela prescinde, em cadeias de suprimentos, do elemento propulsor dos deslocamentos (transportes) e do elemento provedor dos produtos (estoques).

Nos ensinamentos de Ballou (2006), estoques são:

> acumulações de matérias-primas , suprimentos, componentes, materiais em processo e produtos acabados que surgem em numerosos pontos do canal de produção e logística das empresas.

A **Figura 2** apresenta uma típica cadeia de suprimentos e o posicionamento dos pontos de estocagem nos diferentes elos da cadeia:

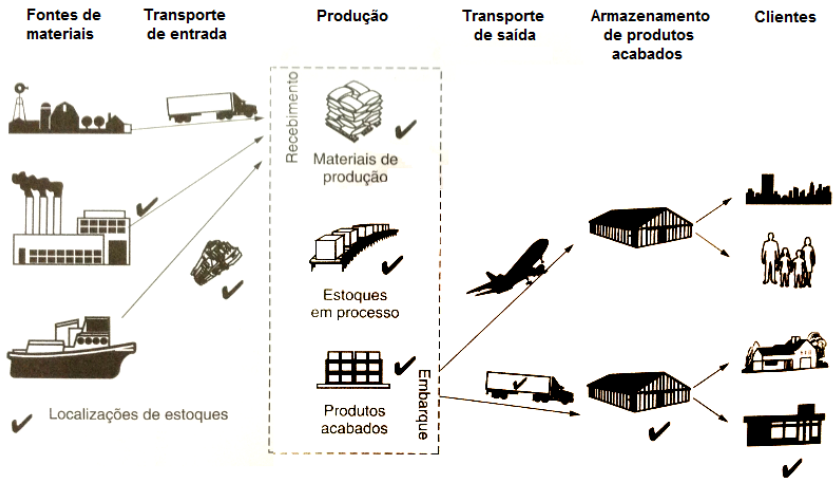


Figura 2. Estoques e a cadeia de suprimentos

Fonte: Balllou (2006)

Diante da importância inquestionável dos estoques para o funcionamento da logística e tendo em vista as características, classes e tipos que podem assumir, incide, entretanto, a necessidade de se avaliar se a inclusão de pontos de estocagem traz vantagens às operações. Ballou (2006) traça como vantagens a melhoria nos serviço ao cliente, pela oferta de um nível de disponibilidade de produtos quando demandados, e a redução de custos operacionais, pois os estoques funcionam como um pulmão entre os processos produtivos o que torna as operações mais equilibradas e melhor distribuídas no tempo. Acrescenta-se a elas o aumento da segurança para manutenção da continuidade do fluxo, evitando-se a interrupção das operações por falta de produto para atendimento da demanda.

Porém, por outro lado podem haver desvantagens, destacando-se os riscos de isolamentos dos elos a montante e a jusante dos pontos de estocagem, prejudicando a gestão integrada da cadeia como um todo e o alto custo de manutenção de estoques e de capital pelo depósito de produtos que poderiam render mais financeiramente se capitalizados monetariamente ou investidos para o aumento da produtividade da cadeia. Acrescenta-se a elas o risco de obsolescência de produtos por deterioração, por perda ou por vencimento da vida útil.

Não obstante a isso, uma vez que se decida incluir ou não estoques na cadeia, eles precisam ser gerenciados. Para Ballou (2016), o gerenciamento de estoques se pauta em duas variáveis principais: os níveis e o comportamento da demanda, os prazos dos ciclos de reposição de estoques e os custos de estocagem. Existem diversos comportamentos que uma demanda pode apresentar como se pode verificar na **Figura 3**. Quanto aos custos de estoques (**Figura 4**), um cuidado de gestão deve se ter no equilíbrio a que se indica perseguir entre os custos de aquisição e os custos de manutenção, uma vez que a tendência é que quanto maior o tamanho das reposições de estoque, maior o custo de manutenção (proporcionais ao volume), porém menores são os custos de aquisição devido à consolidação de lotes maiores numa mesma aquisição (ganho em escala). O custo total de estoques é a somatória dos custos de manutenção, dos custos de aquisição e dos custos de perdas de vendas por falta de atendimento do cliente.

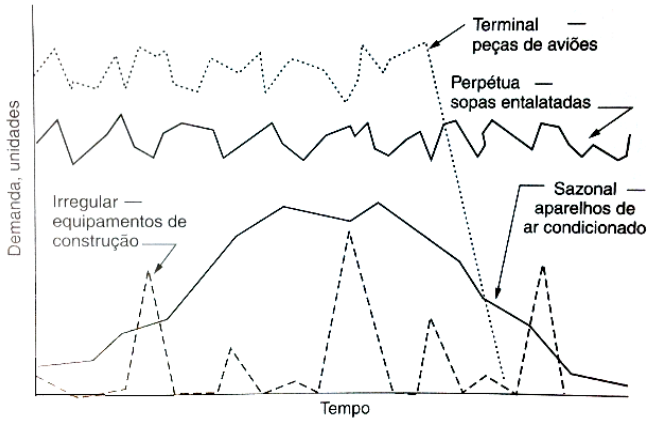


Figura 3. Tipos de padrões de demanda

Fonte: Ballou (2006)

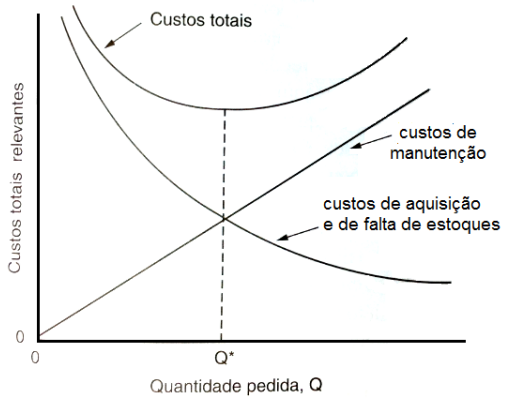


Figura 4. Relações entre os custos de estoques

Fonte: Ballou (2006)

O gerenciamento de estoques pode ser executado a partir de duas formas: *estoque puxado*, em que os pontos de estoques são independentes entre si, mas a estocagem é solicitada à fábrica que produz a partir de uma previsão de demanda. Ou seja, a formação/reposição de estoques puxa a produção a montante a partir de uma demanda a jusante; o *estoque empurrado* é o oposto do puxado, sendo que os estoques são formados a partir da produção da fábrica, de tal forma que os volumes são distribuídos coletivamente nos pontos de estocagem com o fim de escoar a produção. Em resumo, a formação/reposição de estoques é empurrada da produção a partir de critérios da própria produção. Há a possibilidade também de estoque híbrido, com a união das formas puxada e empurrada. A **Figura 5** ilustra essas formas:

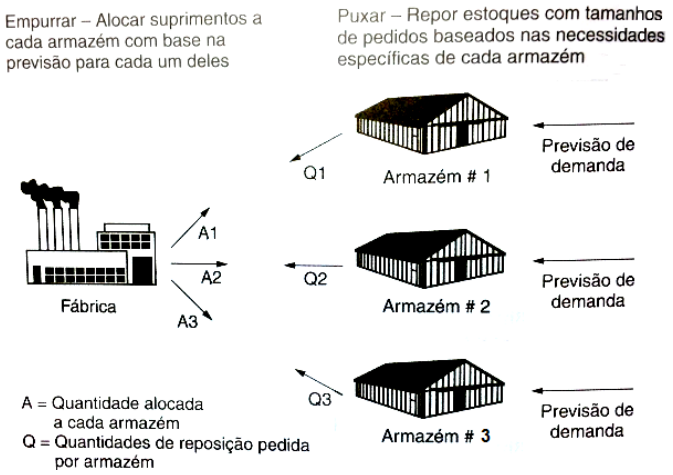


Figura 5. Estoques puxados e empurrados

Fonte: Ballou (2006)

O controle dos estoques puxados, por sua vez, pretende níveis suficientes para atender à demanda e à contingência planejada para ela. Para Ballou (2006), a gestão do processo desse tipo de estoque pode ser feita basicamente em quatro cenários: (1) demanda única, em que se requer a formação de estoque para atendimento específico de um único serviço ou de produtos com vida útil curta; (2) reposições periódicas, repetidas e instantâneas num determinado nível de estoque de trabalho, em que se requer continuidade de atendimento de demandas cíclicas com reposições imediatas; (3) reposições periódicas, repetidas e instantâneas, porém com prazo entre o pedido e a entrega (*Lead time* do pedido) de um determinado nível de estoque de trabalho, em que se requer continuidade de atendimento de demandas cíclicas após decurso do prazo de processamento de pedido e de entrega de produto; e (4) reposições periódicas, repetidas e não-instantâneas num determinado nível de estoque de trabalho, em que se requer continuidade de atendimento de demandas cíclicas, porém com prazo de processamento de pedido, de entrega de produto e de composição do estoque pedido no armazém que somados perfazem o *lead time* do pedido.

O modelo geral do comportamento dos níveis de estoques em função do tempo e da demanda pode ser denotado pela **Figura 6**, em que se identificam os 4 elementos principais: Taxa de demanda ou taxa de consumo, nível de estoque, tempo e ponto de reposição de estoque. Eles se relacionam de tal forma que a demanda reduz no tempo a reserva disponível em estoque até que se verifique a necessidade de reabastecimento de novo nível de estoque para a continuidade do atendimento ao cliente.

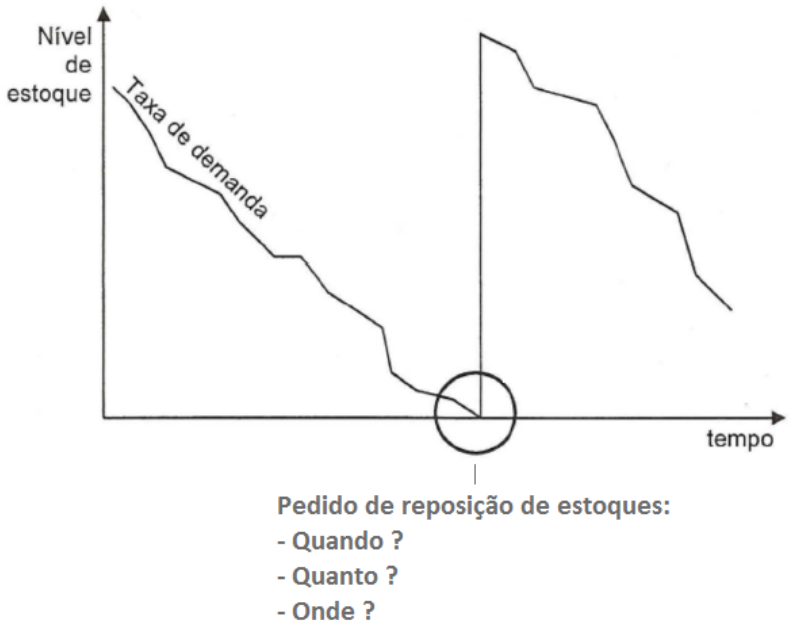


Figura 6. Modelo geral de gestão de estoques com reposições

Fonte: o autor

Associado a esse modelo de gestão de estoques com previsão de reposições periódicas, o processamento dos pedidos de reposição e a formação de estoques fazem diferença dependendo do cenário analisado. Regra geral, o pedido e a composição de estoque no armazém levam tempo, desde a sua criação até o efetivo acondicionamento do estoque pedido no local designado. A reposição pode ser instantânea ou não instantânea, a depender da variável tempo de estocagem, cujo prazo deve ser considerado frente à taxa de demanda. E quando instantânea, pode precisar de antecedência de pedido ou não, a depender da variável tempo de processamento do pedido.

Os casos de reposições instantâneas seriam possíveis, por exemplo, quando existe proximidade física entre o fornecedor e o cliente, ou quando há simplesmente transferências entre armazéns num curto espaço de tempo. Já os casos de reposição não-instantânea deriva das situações mais comuns atualmente, em cadeias de suprimento que o fornecedor e o cliente são globais e não locais. Portanto, depende do caso.

As **Figuras 7** e **8** apresentam respectivamente os modelos de gestão de estoques com reposição instantânea e com *lead time* de pedidos e o modelo com reposições não-instantâneas, com *lead time* de pedidos.

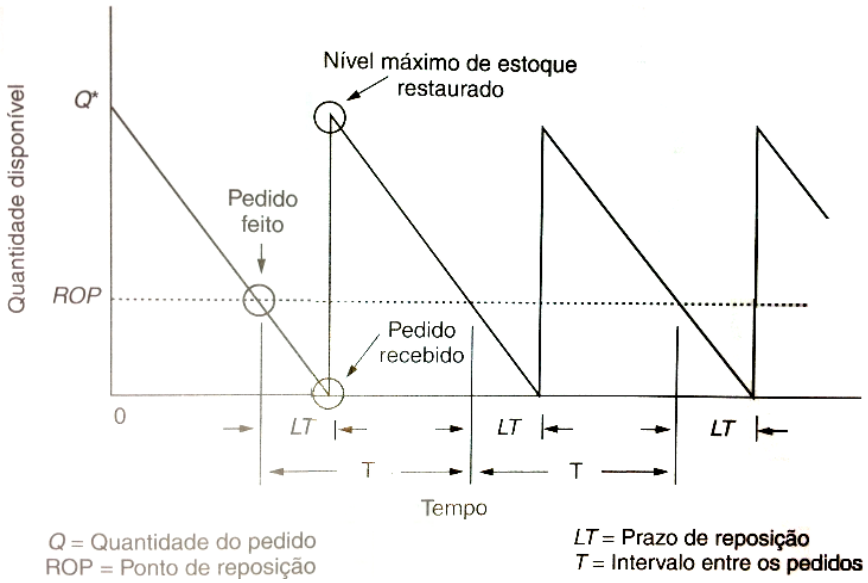


Figura 7. Modelo de gestão de estoques com reposição instantânea e com *lead time* de pedidos

Fonte: Ballou (2006)

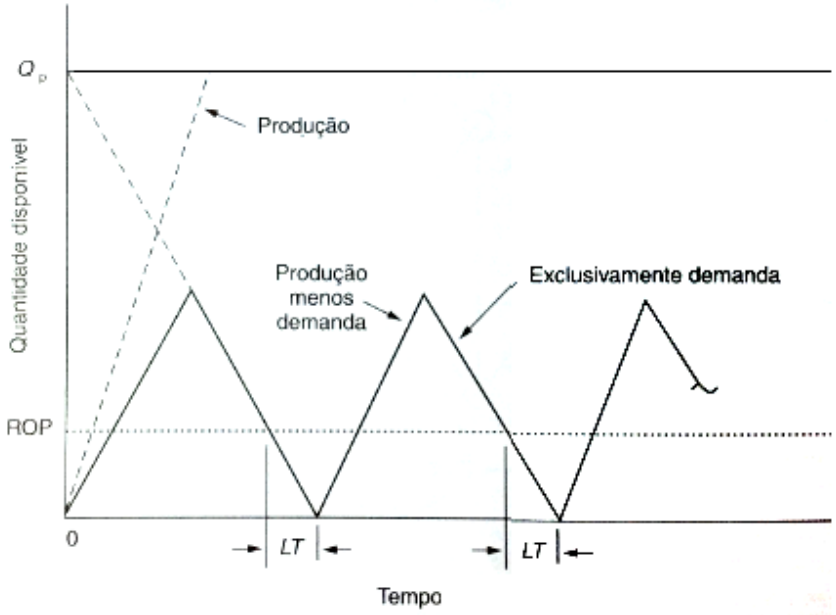


Figura 8. Modelo de gestão de estoques com reposições não-instantâneas e com *lead time* de pedidos

Fonte: Ballou (2006)

2.2. SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

2.2.1. SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO: DIFERENÇAS E RELAÇÕES

A Simulação e a Otimização são duas grandes técnicas científicas de investigação operacional de processos produtivos, a primeira para a busca de cenários prováveis e medidas de seus desempenhos, a segunda na busca da solução ótima, ou senão for possível o ótimo, próximo do ótimo através de métodos matemáticos.

A Simulação pode ser entendida como técnica científica adequada quando não se há função-objetivo representada por equações matemáticas claras e definidas. Isso é característica de um objetivo de otimização, seja ela mais ou menos complexa. A simulação surge como uma ferramenta de modelagem descritiva, visando, como já foi exposto, descrever comportamentos e cenários prováveis de ocorrer e seus resultados. Além do mais, é instrumento de pesquisa que trabalha com métodos randômicos.

Contribuem para a compreensão das extensões dos conceitos e aplicações de Simulação, Banks et al. (2009), Harrel, Ghosh e Bowden (2000, apud PINHO et al., 2012), Swain (2005), Kelton et al. (2007), Law e Kelton (2000), Silva (2011), Brito et al. (2012), Harrell et al. (2004, apud SILVA, 2011), Gavira (2003), PARAGON (2014), Banks (2000), Saliby (1989) e Banks (2000).

A otimização por sua vez, tem como base os modelos matemáticos que são representações simplificadas da situação original, expressas através de símbolos e expressões matemáticas (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Ao mesmo passo, todo problema de otimização segue, em tese, com a formação de sistemas de equações ou inequações por sempre coexistirem mais de uma variável em análise. E por existirem diversas componentes inter-relacionadas entre si, os modelos matemáticos de problema de otimização possuem uma estruturação elementar própria.

Contribuem também para a compreensão das extensões dos conceitos e aplicações de Otimização, Chwif e Medina (2007, apud MEIRELES, 2010) e Ragsdale (2007, apud RODRIGUES JUNIOR, 2011).

Entretanto, mesmo sendo nítida a diferença entre os fins da Simulação e da Otimização, a união de suas forças agrega conhecimento e soluções relevantes nas abordagens de problemas em que, devido à sua complexidade, a otimização por si só não satisfaz e que, devido à solução pretendida, a simulação por si só também não satisfaz.

Para Chwif e Medina (2007, apud MEIRELES, 2010) a simulação computacional apresenta vantagens em relação à otimização, porém possui algumas limitações, pois é uma ferramenta avaliadora de soluções e não geradora de soluções. Identificam a utilização de técnicas de otimização na simulação computacional como meio de suprir suas restrições. Por outro lado, para os mesmos autores, a utilização da otimização pode implicar em limitação na construção de modelo de sistemas complexos, dinâmicos e com muitas variáveis. O grande desafio é como juntar simulação e otimização de modo que possa minimizar as desvantagens de cada uma delas.

Consubstanciam a percepção de Chwif e Medina sobre a importância de se promover a integração entre a simulação e otimização os esclarecimentos de Morito et al. (1999) e Ceciliano (2007), que identificam uma relação muito tênue entre a simulação e otimização, indicado um apoio mútuo para solução de problemas analíticos e/ou complexos. Afirmam que as forças e fraquezas da programação matemática e da simulação são complementares, a primeira padecendo de técnicas para modelos dinâmicos e não lineares e a segunda capaz apenas de prever comportamentos de cenários, sem gerar soluções, mesmo que em modelos mais complexos. Sendo assim, uma vez que em certas situações não é possível incluir todas as restrições e procedimentos operacionais de um sistema real em um modelo de otimização, a simulação pode ser uma ferramenta útil para incorporar todos estes aspectos.

Por outro lado, argumentam que, embora alguns problemas importantes sejam de natureza da otimização, sua aplicação para problemas complexos pode conduzir a dificuldades de interpretação dos resultados. Uma vez que em certas situações não é possível incluir todas as restrições e procedimentos operacionais de um sistema real em um modelo de otimização, a simulação pode ser uma ferramenta útil para

incorporar todos estes aspectos. Daí percebe-se a importância de adoção do método de simulação-otimização para sanar as necessidades de busca do melhor cenário em modelos de sistemas logísticos complexos.

2.2.2. SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO: CONCEITOS E MÉTODOS

Segundo Fu (2002), até o final do milênio passado, otimização e simulação foram mantidos praticamente separados na prática, mesmo que não houvesse um grande corpo de pesquisa relevante na literatura para combiná-los. Na última década, no entanto, métodos de otimização têm sido inseridos nos *softwares* de simulação.

Em geral, a otimização baseada em simulação é o processo de procurar o melhor conjunto de especificações do modelo, ou seja, os parâmetros de entrada e as premissas estruturais, em que o valor objetivo é a saída do desempenho do modelo de simulação para o sistema subjacente (FU, 2002 ; OLAFSSON ; KIM, 2002).

Montevechi, Miranda e Friend (2012) especifica que um modelo de simulação geralmente inclui “n” variáveis de entrada (x_1, x_2, ..., x_n) e “m” variáveis de saída (y_1, y_2, ..., y_m) e a otimização do método de simulação implica em encontrar a configuração ótima das variáveis de entrada, isto é, os valores de x_1, x_2, ..., x_n que otimize as variáveis de resposta. A **Figura 9** ilustra esse efeito:

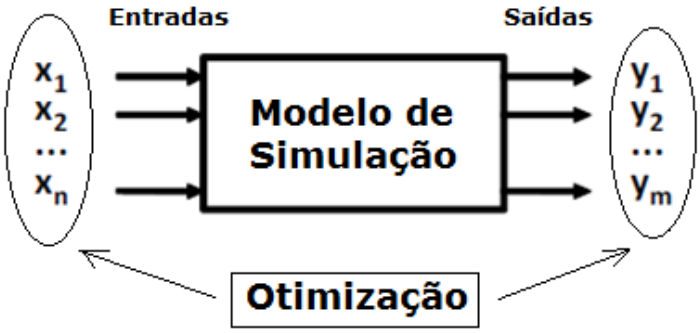


Figura 9. Otimização em simulação

Fonte: adaptado de Montevechi, Miranda e Friend (2012)

A otimização, nesse caso, ajuda a responder a perguntas do tipo: Quais são os

ajustes ótimos para as variáveis de entrada (x), que maximiza (ou minimiza) uma dada saída (y) do modelo de simulação ? O objetivo, portanto, é encontrar um valor ótimo que maximiza ou minimiza um determinado indicador de desempenho do modelo simulado.

Não obstante, a simulação-otimização ou otimização em simulação tem como princípio a aplicação de método otimizador em modelos simulados com o fim de se mitigar as incertezas remanescentes no processo de simulação.

Segundo Pinho et al. (2012), também em algumas situações, sem a integração entre a simulação e otimização não é possível avaliar os resultados do modelo sob um determinado conjunto de condições, pois para usar a simulação, cenários precisam ser construídos e testados e, apesar de ser capaz de gerar bons resultados , torna-se cansativo e demorado sem garantias de que se encontrará as melhores configurações, quando desejadas. As técnicas de otimização e simulação são usadas para resolver problemas como os mencionados.

Azadivar (1999) avoca os métodos de otimização como forma de suprir incertezas que restam na análise dos resultados de simulação de cenários, muitas vezes sem garantias de que se está testando as melhores configurações do modelo Para se minimizar as dúvidas no processo de simulação, o trabalho árduo de construção e teste de mais cenários é imprescindível. A associação da simulação-otimização é um método eficaz para sanar essa lacuna.

O mesmo autor entende que a simulação-otimização se trata de uma técnica de otimização em que a representação dos parâmetros do sistema é feita por meio de funções implícitas, a função-objetivo e as restrições do problema podem ser avaliadas por meio de simulação.

Ademais, a principal razão que confere toda essa importância de aplicabilidade da otimização em simulação é que muitos problemas de otimização do mundo real são complexos demais para serem resolvidos com formulações matemáticas clássicas. Várias não-linearidades, relacionamentos combinatórios e incertezas são acessível para modelagem apenas em simulação. Em tais situações cenários são construídos

na esperança de que pelo menos um dará uma solução aceitável. Aí entrariam os métodos de otimização combinado com a simulação, interagindo entre si para criar uma maneira de orientar uma série de simulações a fim de se produzir soluções de alta qualidade, na ausência de estruturas matemáticas tratáveis. (OPTEK SYSTEMS, INC., 2014).

Portanto, a simulação-otimização é habilitada para integrar um simulador de sistema real a métodos de otimização satisfatórios para um determinado problema, associando os objetivos da otimização às vantagens da simulação (CECILIANO, 2007; PINTO JUNIOR, 2001).

Fernandes et al. (2013) simplifica a metodologia de otimização em simuladores identificando o método otimizador no centro de todo o processo, participando repetidamente a simulação para controle das variáveis e validação dos resultados ótimos que são gerados. O critério de parada do *looping* para o referido autor se encerra no processo de otimização. A **Figura 10** demonstra de forma esquemática, a base do seu princípio:

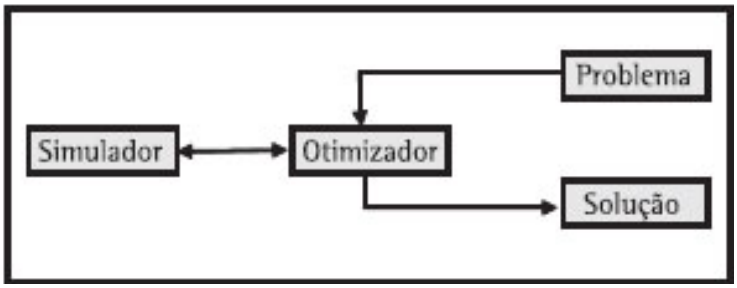


Figura 10. Princípio da Simulação-Otimização
Fonte: Fernandes et al. (2003)

Bush, Biles e Depuy (2003, apud FERNANDES et al., 2013) explicam que a repetição do *looping* gerado entre os processos de Simulação e Otimização permitem que, a cada passo que se obtém resultados mais precisos, o desempenho do sistema é estimado e comparado pela simulação, até que se atenda a um critério de satisfação dos resultados para os parâmetros de decisão do problema. A aplicação da Simulação com os parâmetros otimizados serve para validá-los.

A **Figura 11** apresenta a representação esquemática do processo de Simulação-Otimização identificando as entradas e saídas do Simulador e do Otimizador. Após um sistema modelado e simulado, as saídas da simulação serão colocados no otimizador, cujas saídas serão reinseridas no processo anterior com a criação de novos cenários e novas simulações até que finalize o processo.

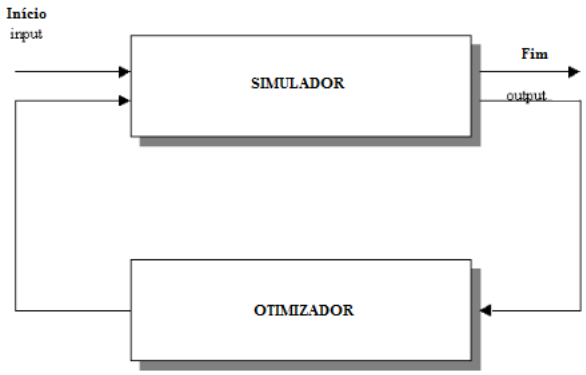


Figura 11. Sistemática simplificada de aplicação de otimizador
Fonte: Adaptado de NobleProg Training Materials (2014)

Além dos tradicionais métodos matemáticos de otimização, a técnica da heurística toma corpo na simulação-otimização quando a representação matemática simplifica demais o sistema real e a busca pelo resultado aproximado do ótimo atende. Isso depende do problema em questão e também do objetivo do modelo. A **Figura 12** identifica a participação de algoritmos meta-heurísticos no processo otimizador.

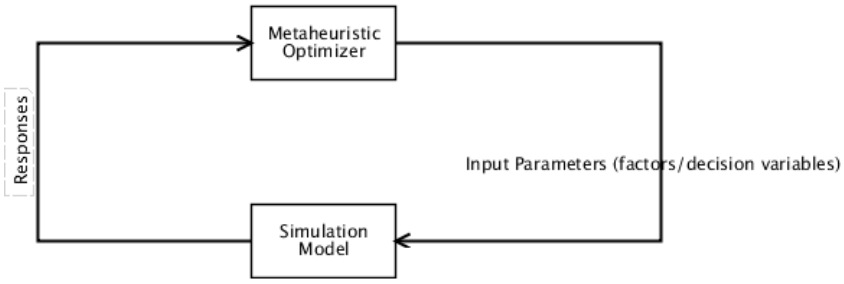


Figura 12. Método de meta-heurística na Sistemática de aplicação de otimizador em simulação
Fonte: NobleProg Training Materials (2014)

Como é um caso de funções implícitas e variáveis na maioria das vezes estocásticas, a geração de cenários faz com que a programação matemática não consiga atender ao propósito da metodologia de Simulação-Otimização. A meta-

heurística é técnica disponível em *softwares* e capaz de suprir essas lacunas, oferecendo estimativas do ótimo. Segue também na **Figura 13** uma interpretação do processo feita por Fu (2002). Fu indica que o processo de otimização por heurística computacional gera potenciais candidatos à solução que passarão por análise de desempenho em cenários de simulação até que a melhor solução seja escolhida. Sobre essa modalidade de método, serão esclarecidos na seção 2.2.3 alguns aspectos e os tipos comumente usados nos aplicativos otimizadores disponíveis no mercado.

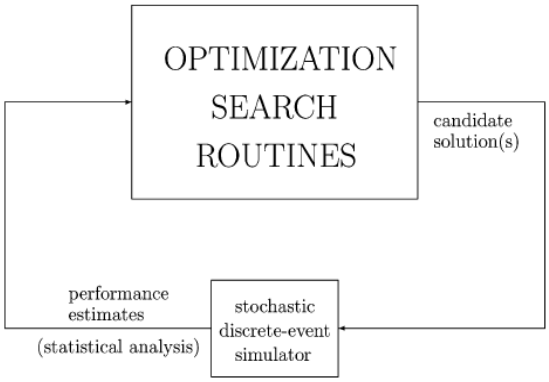


Figura 13. Funcionamento de Simulação-Otimização em *softwares* comerciais

Fonte: Fu (2002)

Fu (2002) afirma também que a otimização deve ocorrer de uma forma que complementa a simulação, proporcionando possíveis soluções para as variáveis para posterior simulação, que, por sua vez fornece respostas (saídas) para a situação proposta, até que haja uma saída satisfatória.

Com conceitos similares, Hochmuth et al. (2012), Bachelet et al. (2007), Melouk et al. (2013), Kôchel e Kâmpf (2006) e Kôchel, Kunze e Nielânder (2003) identificam nas **Figuras 14**, **15**, **16**, **17** e **18** o processo de simulação-otimização como cíclico até que a insistência pela busca seja contemplada com uma solução aproximada do ótimo.

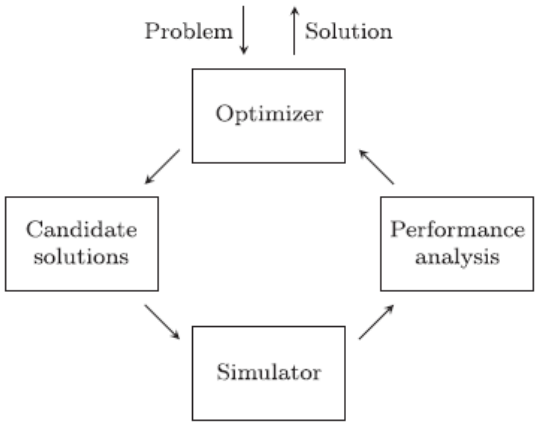


Figura 14. Iterações da Simulação-Otimização segundo Hochmuth et al. (2012)

Fonte: Hochmuth et al. (2012)

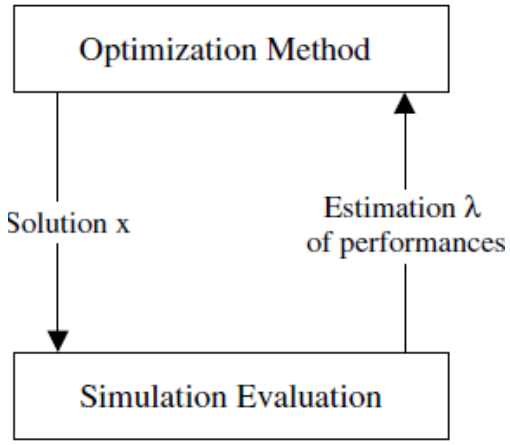


Figura 15. Ciclo de Simulação-Otimização segundo Bachelet et al. (2007)

Fonte: Bachelet et al. (2007)

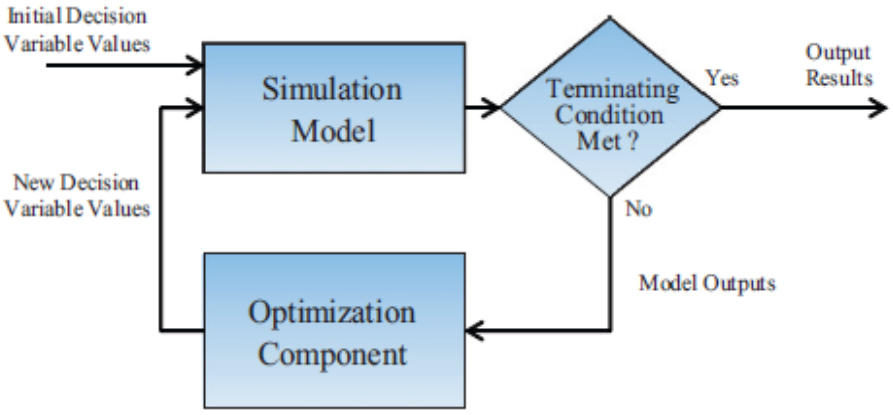


Figura 16. Estrutura da Simulação-Otimização

Fonte: Melouk et al. (2013)

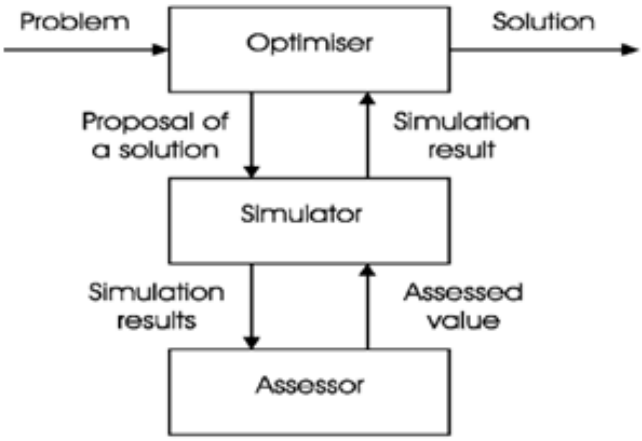


Figura 17. Esquema de interfaces entre a Simulação e Otimização para solução de problemas de otimização segundo Kôchel e Kâmpf (2006)

Fonte: Kôchel e Kâmpf (2006)

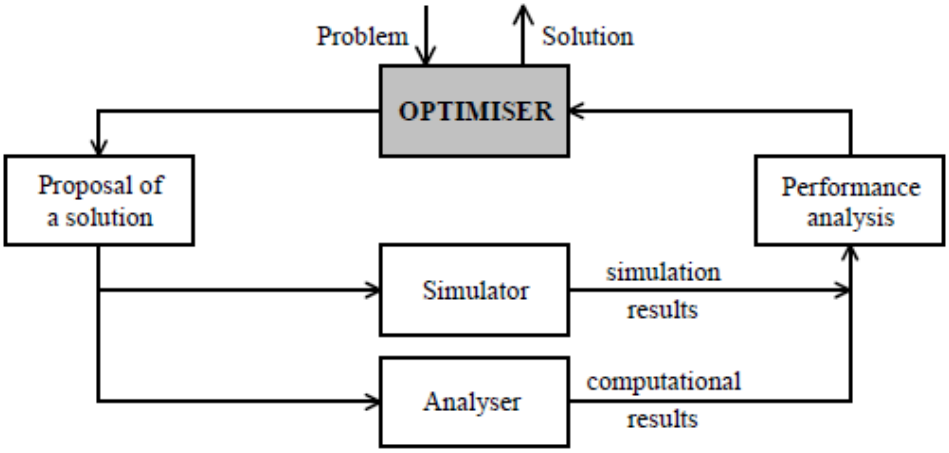


Figura 18. Esquema de interfaces entre a Simulação e Otimização para solução de problemas de otimização segundo Kôchel, Kunze e Nielânder (2003)

Fonte: Kôchel, Kunze e Nielânder (2003)

Brito et al. (2012), expõe que a partir da Simulação-Otimização se procura obter a melhor configuração de cenário dentre as alternativas avaliadas a partir dos parâmetros de saída da otimização (**Figura 19**).

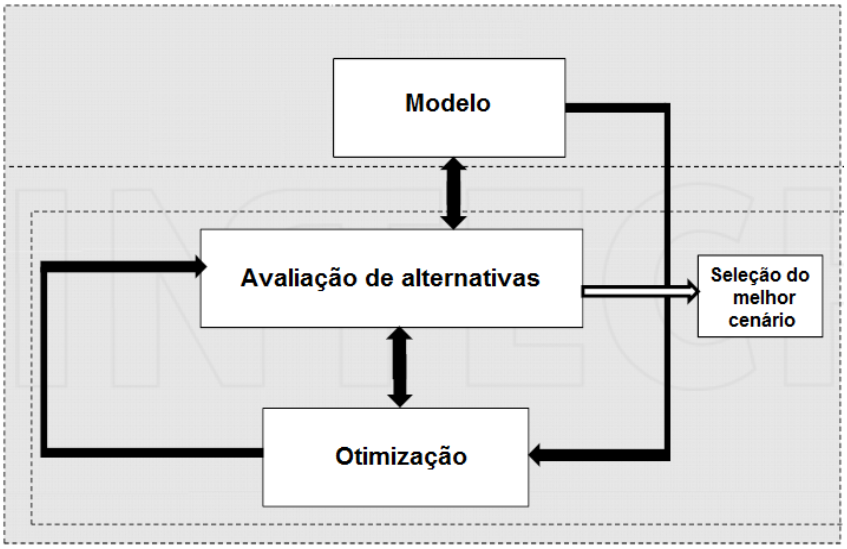


Figura 19. Etapas para seleção de melhor cenário por meio de Simulação-Otimização segundo Brito et al. (2002)

Fonte: Adaptado de Brito et al. (2002)

Comparando-se os estudos feitos por esses autores, percebe-se que para Kôchel et al. (2003), Hochmuth et al. (2012), Bachelet et al. (2007), Kôchel et al. (2006), Fu (2002) e Brito et al. (2012), o processo se inicia pela Otimização, enquanto para Melouk et al. (2013), a partida se dá pela imputação dos parâmetros do problema em Simulação. Dependendo da complexidade do modelo, poder-se-ia ser melhor começar pela simulação. Porém, começar pela otimização quando possível pode diminuir o número de cenários a se analisar e validar.

Fu (2002) acrescenta que na evolução das últimas décadas, houve melhorias o processo de Simulação-Otimização convergindo para elaboração de ferramentas que o integrassem e gerassem maiores formas de análises. Muitos *softwares* atuais já preveem essa interface num mesmo sistema operacional. Isso torna os dois processos mais dependentes um do outro e melhora a escolha de candidatos à solução do problema. Para isso, representou um esquema (**Figura 20**) que explica essas interfaces.

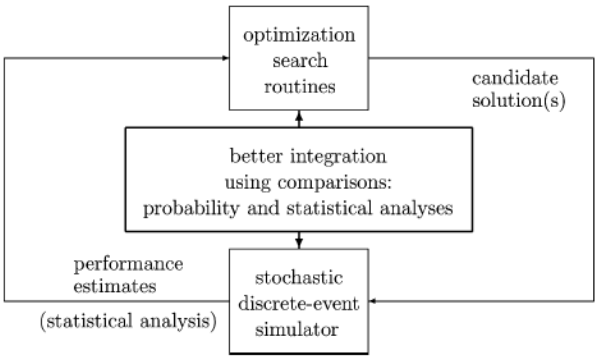


Figura 20. Melhorias na integração da Simulação-Otimização pelos *softwares* comerciais

Fonte: Fu (2002)

Mesmo assim, com tantos benefícios que se pode extrair da aplicação combinada das duas técnicas, Banks et al. (2000, apud FU, 2002) destaca relevantes dificuldades entendendo que, mesmo quando não há incertezas, a otimização pode ser muito difícil, se o número de variáveis é grande, quando o problema contém um conjunto diversificado de tipos de variáveis, e quando pouco se sabe sobre a estrutura da função do desempenho. Otimização via simulação adiciona uma complicação adicional porque o desempenho de um projeto particular não pode ser avaliado exatamente, mas em vez disso devem ser estimados, não sendo possível determinar conclusivamente se um projeto é melhor do que outros. Em princípio, pode-se eliminar esta complicação, fazendo muitas repetições ou corridas longas no simulador, em cada ponto do projeto que a estimativa de desempenho não varie tanto. Na prática, isso pode significar pouca diversificação de cenários experimentados em virtude do tempo necessário para simular cada um.

A Optek Systyems, Inc (2014) especifica diversos objetivos que se pode estabelecer no uso da simulação-otimização, como por exemplo:

- Buscar a melhor configuração de máquinas para a programação da produção;
- Buscar a melhor integração de produção, estoque e distribuição;
- Buscar os melhores layouts, links e capacidades para projeto de rede;
- Buscar a melhor carteira de investimentos para o planejamento financeiro;
- Buscar o melhor aproveitamento dos empregados para o planejamento da força de trabalho;

- Buscar a melhor localização de instalações para distribuição comercial;
- Buscar a melhor programação de funcionamento para o planejamento de energia elétrica;
- Buscar a melhor alocação funcional de pessoal médico na administração hospitalar;
- Buscar a melhor definição de tolerâncias em projeto de fabricação;
- Buscar o melhor conjunto de políticas de tratamento na gestão de resíduos.

Pode se destacar como vantagens da simulação-otimização, de acordo com Azadivar (1999) que:

a) A complexidade do sistema modelado não implica necessariamente no aumento de complexidade do processo de otimização;
b) representação dos parâmetros de decisão do sistema por meio de funções implícitas;
c) A natureza estocástica da função-objetivo e/ou das restrições do problema permite que as melhores configurações do sistema possam ser avaliadas por meio de simulação;
d) possibilidade de modificação das funções-objetivo e restrições durante execução do otimizador/simulador, de forma a se direcionar e especificar as alternativas a serem estudadas;
e) validação das saídas da otimização por meio de seu uso como entradas no simulador e avaliação dos cenários com os valores e parâmetros otimizados, quantas vezes forem necessárias até que um critério de parada seja satisfeito. Isso faz com que seja possível além de validar um sistema ideal (otimização), verificar sua compatibilidade com o sistema real (simulação).

Já quanto a desvantagens, tem que se ter atenção com os seguintes detalhes:

a) Não há uma expressão analítica da função-objetivo ou das restrições, estando as análises das variáveis dificultadas;

b) o fato da função-objetivo e as restrições do modelo compõem variáveis randômicas, porém de decisão determinística. Isso pode dificultar o encontro do melhor ponto de decisão;
c) As linguagens de simulação são bastante diferentes das linguagens de otimização. Para tanto, necessário usar *softwares* confiáveis e de boa eficácia na interface entre os dois tipos de modelos.

2.2.3. ASPECTOS GERAIS SOBRE META-HEURÍSTICAS

Como já destacado, os processos otimizadores em simulação estão sendo adaptados a *softwares* de simulação computacional e possuem, em suas programações, algorítmos de busca de valores para variáveis basicamente feitos por métodos meta-heurísticos, em função da complexidade e do grande volume de variáveis que um modelo de simulação pode requerer. Portanto, importa a esta pesquisa tecer algumas considerações e revisar alguns conceitos a respeito desse tema.

Lopes et al. (2007), identifica a heurística como uma ferramenta com boa aceitabilidade na solução de problemas de pesquisa operacional, quando diz:

> Nas áreas de computação e engenharia há muitos problemas para os quais não há um algoritmo determinístico para a sua solução ou, quando há, é computacionalmente inviável. [...] A busca por métodos computacionais que sejam ao mesmo tempo simples (de fácil implementação), robustos (que funcionem satisfatoriamente nas mais variadas situações de um problema), flexíveis (que sirvam para uma vasta gama de problemas) e eficientes (que encontrem soluções de boa qualidade) tem ganhado espaço junto à comunidade de pesquisadores em ciência da computação, pesquisa operacional e engenharias. Assim, muitos métodos heurísticos de otimização têm ganhado atenção.

A heurística, portanto, era um método de aproximação de soluções, não necessariamente a melhor, porém com o propósito de suprir a necessidade de otimização de determinados problemas em que a modelagem matemática clássica não atende satisfatoriamente. Tem-se, portanto, a substituição de um algoritmo determinístico por um algoritmo heurístico.

Chwif e Medina (2007, apud MEIRELLES, 2010) valida esse raciocínio entendendo que caso a formulação seja não-linear, podem ser aplicadas técnicas de busca heurística, devido em muitos casos as técnicas tradicionais não garantirem o ótimo. Os autores as chamam de técnicas “sub-otimizantes”, como por exemplo as meta-heurísticas *Genetic Algorithm*, o *Simulated Annealing* e o *Tabu Search*. A utilização da otimização pode implicar em alguns inconvenientes. O primeiro é a limitação na modelagem de sistemas complexos, dinâmicos e com muitas variáveis. Por outro lado, existem modelos simples de otimização que não possuem uma técnica de solução apropriada, impedindo a resolução do problema.

Para Banks et al. (2005, apud PINHO et al., 2012), a existência de variabilidade na amostragem da variável de entrada, muitas vezes obriga otimização de possuir pesquisas heurísticas robustas e poderosas. Muitas abordagens heurísticas têm foram desenvolvidos para problemas de otimização que, apesar de não garantir a encontrar a melhor solução, mostram-se eficientes em problemas práticos complexos.

O desenvolvimento de métodos heurísticos evoluiu de tal maneira que atualmente temos as chamadas meta-heuristicas bem esclarecidas pelo Fred Glover (1986) que destaca a sua finalidade de “descrever uma estratégia mestre que guia e modifica outras heurísticas para produzir soluções para além das que são normalmente gerados em busca de otimização local”.

Nas últimas duas décadas, uma série de métodos tem surgido como meta-heurísticas, que visam a obtenção de melhores resultados do que os obtidos com as heurísticas tradicionais. Assim, diante de um problema de otimização, pode-se empregar qualquer uma dessas metodologias para projetar um algoritmo específico para calcular uma solução aproximada. (MARTÍ et al., 2013).

Em algoritmos meta-heurísticos, meta significa “além"' ou “nível superior"' e elas geralmente desempenham melhor do que a heurística simples. Todos os algoritmos meta-heurísticos afastam-se de uma busca local para uma exploração global. Podem ser uma maneira eficiente de produzir soluções aceitáveis por tentativa e erro para um problema complexo em um tempo razoavelmente prático, evitando-se

uma pesquisa exaustiva de todas as soluções possíveis ou as combinações delas (YANG, 2011).

Pode-se concluir do estudo da literatura que a meta-heurística é método heurístico para resolver de forma genérica problemas de otimização e utiliza escolhas aleatórias e conhecimento histórico das iterações já realizadas pelo próprio método, com o fim de efetuar buscas dentro do espaço de pesquisa. Sua aplicação é apropriada a problemas de simulação-otimização e, de modo geral, a literatura as consideram como indispensáveis na busca de soluções viáveis nesses tipos de problema.

Ainda segundo Yang (2011), não há garantia de que as melhores soluções possam ser encontradas e não se sabe previamente se uma meta-heurístifca vai funcionar. A idéia é ter um algoritmo capaz de produzir soluções de boa qualidade em menos tempo. A busca de soluções transitam entre a busca local e a global e sua associação com a diversificação por meio de randomização aumenta a diversidade das soluções e a chance de otimização do problema Portanto, intensificação da busca local e diversificação da busca para além do local são duas características das meta-heurísticas que, em dosagens equilibradas, convergem a solução para o ótimo global.

Boussaid et al. (2013) classifica as meta-heurísticas em métodos de trajetória (*Trajectory methods*) e métodos populacionais (*Population-based methods).* Os primeiros partem de uma única solução inicial e, durante as iterações, vai se afastando dela descrevendo uma trajetória no espaço de busca. São extensões aperfeiçoadas de algoritmos de busca local. Esses métodos englobam, dentre outros, o *Simulated annealing* (SA), *Tabu Search* (TS), *GRASP* e *Variable Neighborhood Search* (VNS).

Já os métodos baseados em populações lidam com um conjunto de soluções iniciais. Os métodos baseados na população mais estudados estão relacionados com *Evolutionary Algorithms* (EA) e *Swarm Intelligence* (SI). Os algoritmos de EA, também chamados de algorítimos evolutivos, são inspirados na teoria evolucionária de Darwin, em que a população de indivíduos é modificada a partir de recombinação

e mutação. Esses métodos englobam, dentre outros, o *Evolution Strategy* (ES), *Genetic Algorithm* (GA), *Scatter Search* (SS), *Evolutionary Programming* (EP) e *Genetic Programming* (GP) e suas variantes. Nas meta-heurísticas SI, também denominados de métodos de inteligência de enxames, a idéia é explorar simples análogos de interação social, ao invés de habilidades cognitivas puramente individuais. Esses métodos englobam, dentre outros, o *Ant Colony Optimization* (ACO) e o *Bee Colony Optimization* (BCO).

Não obstante, percebeu-se no levantamento da literatura que os métodos heurísticos mais utilizados para a otimização em simuladores comerciais são: *Tabu Search*, *Simulated Annealing, Scatter Search*, *Genetic Algorithm*, *Evolution Strategy*, *e a*lguns casos combinado com a técnica das redes neurais. (ESKANDARI et al., 2011 ; FU, 2002 ; SWAIN, 2005).

O *Tabu Search* (TS)*,* também denominado de Pesquisa Tabu, é uma meta-heurística que guia uma heurística de busca local para explorar a solução além da otimização local (GLOVER ; LAGUNA, 1997, apud MARTÍ et al., 2013). Um dos principais componentes é o uso de memória adaptativa, o que cria um comportamento de busca mais flexível. Este método é a essência do que foi recentemente chamado como programação de memória adaptativa. Segundo Boussaid et al. (2013), ele explicitamente usa a história da pesquisa, tanto para escapar de mínimos locais e implementar uma estratégia exploratória. Sua principal característica é de fato com base na utilização de mecanismos inspirados na memória humana.

O algoritmo é iniciado a partir de uma solução aleatória e melhorá-lo através da troca aleatória de elementos. As trocas são avaliadas até que se o movimento melhor admissível (não-tabu) é realizado. O método executa iterações até que a melhor solução encontrada não possa ser melhorada segundo algum critério de parada. Em seguida a busca é reiniciada a partir de uma nova solução inicial obtida usando as informações da memória de longo prazo registradas durante a pesquisa. (MARTÍ et al., 2013). Boussaid et al. (2013) também esclarece que a lista tabu grava as últimas soluções encontradas (ou alguns atributos deles) e impedem que essas soluções (ou soluções contendo um desses atributos) sejam visitadas novamente,

enquanto eles estiverem na lista. Esta lista pode ser vista como a memória de curto prazo, que registra informações sobre as soluções visitadas recentemente. Seu uso impede de voltar às soluções recentemente visitadas e evita a formação de *looping* sem fim. O comprimento da lista controla a memória da busca, de forma que quanto menor, mais concentrada será a pesquisa em pequenas regiões, tendendo para uma busca local e, quanto maior, mais diversificado será o processo de pesquisa para exploração global do espaço de busca.

A descrição o algoritmo computacional para as iterações e busca de soluções do método *Tabu Search* é apresentado no **APÊNDICE A**.

O método *Simulated anneling* (SA), também denominado de Recozimento Simulado procede da mesma forma como a busca local comum, mas incorpora algumas aleatoriedades no movimento de seleção de soluções viáveis para evitar que a busca fique emperrada num ótimo local, por não encontrar outras soluções melhores. Os movimentos para fora do ótimo local são aceitos de acordo com probabilidades tomadas a partir da analogia com o processo natural de recozimento. (KIRKPATRICK et al., 1983)

Boussaid et al. (2013) descreve a metodologia de aplicação como inspiração na técnica de recozimento usado pelos metalúrgicos para a obtenção de um estado sólido bem ordenado com o controle de energia utilizada. Consiste no transporte de um material a uma temperatura elevada, seguida de redução de temperatura lentamente. A função-objetivo do problema é a energia utilizada no material, a qual se pretende minimizar pela introdução de uma temperatura T como um parâmetro controlável.

O algoritmo é iniciado por meio da geração aleatória de uma solução inicial com uma temperatura inicial T. Em seguida, em cada iteração, novas soluções são selecionadas aleatoriamente na vizinhança (N) da solução anteriormente gravada. As novas soluções (s’) substituem as atuais dependendo de uma condição que envolve T e a o valor da solução atual (s), de tal forma que a nova solução deve minimizar a função-objetivo para ser aceita. O processo entra num *looping* com a

redução gradativa da temperatura a cada iteração até que se consiga o equilíbrio termodinâmico.

A descrição do algoritmo computacional para as iterações e busca de soluções do método *Simulated Annealing* é apresentada no **APÊNDICE A**.

Os métodos baseados em algoritmos de computação evolutiva *Genetic Algorithm* e *Evolution Strategy*, possuem um padrão de algoritmos, conforme descrito no **APÊNDICE A**. Como já mencionado, baseiam-se nas modificações da população em função de processos biológicos evolutivos como recombinação, cruzamento, mutação e aptidão.

Boussaid et al. (2013) apresenta que cada iteração do algoritmo evolutivo corresponde a uma geração, em que uma população de soluções candidatas, chamadas de indivíduos, é capaz de reproduzir e está sujeito a variações genéticas. Seguindo a teoria darwiniana da seleção natural (sobrevivência do mais apto), novas soluções são criadas por meio da aplicação de recombinação / cruzamento de indivíduos denominados “pais” para a produção de um ou mais novos indivíduos denominados “proles”, e/ou da aplicação mutação, que permite o aparecimento de novos traços na descendência para promover a diversidade. As soluções resultantes são avaliadas com base numa estratégia de seleção para determinar quais soluções serão mantidas para a próxima geração. Para definição do limite de iterações do algoritmo, um número pré-definido de gerações ou alguns critérios de parada mais complexos podem ser aplicados.

Yang (2011) também entende que os métodos evolutivos se baseiam na abstração da evolução darwiniana e seleção natural dos sistemas biológicos, representados em operadores matemáticos e que são modelados o comportamento natural do *cross-over* e recombinação, mutação, aptidão e seleção do mais apto.

O *Genetic Algorithm* (GA), também chamado de Algorítimo Genético, é a técnica de computação evolutiva mais conhecida e usada atualmente (BOUSSAID, 2013). Segundo Yang (2011) tem-se como critério mais comum o uso a sobrevivência do mais apto, ou seja, um processo de atualização contínua das melhores soluções

encontradas, “sobrevivendo a melhor de todas”. Também pode ser usado o critério de garantir que a melhor solução ou a mais apta não sejam perdidas, devendo ser passada para as próximas gerações. Os operadores mais comuns nesse método são os processos de cross-over cromossomos e as mutações, sendo esse último uma iteração secundária.

A base do algorítimo GA é muito genérica e existem muitos aspectos e várias estratégias que podem ser implementadas de formas diferentes de acordo com o problema, porém não é objetivo da pesquisa detalhá-los.

O método *Evolution Strategy* baseia-se numa população em que um único pai produz um único descendente, por meio de uma mutação representada por uma distribuição normal (Gaussiana). O operador de seleção, então, determina o indivíduo mais apto a tornar-se o pai da próxima geração, podendo ser o próprio genitor ou a prole, extinguindo-se o pior e mantendo-se o tamanho original da população.

Já o Scatter Search (SS), também chamada de Pesquisa de Dispersão ou Busca Gulosa, segundo Martí et al. (2013) é um método inspirado na natureza da evolução da população que explora soluções evolvendo soluções de referência, armazenadas num conjunto de referências (*RefSet*). A evolução do conjunto de referência é induzida pela aplicação de quatro métodos: geração de subconjuntos, atualização, combinação e melhoria, em que os dois primeiros têm implementações padrão, mas os dois últimos devem ser concebidos para cada problema específico.

Boussaid et al. (2013) descreve a busca de dispersão em 6 etapas:

1) Geração de sementes: cria uma ou mais soluções iniciais, que são soluções testes aleatórias;
2) Geração de Diversificação: gera um conjunto de soluções testes diversos a parir da solução inicial;
3) Melhoria: é usado para transformar uma solução teste em uma ou mais soluções testes avançadas. A busca local é normalmente usada como um mecanismo de melhoria (memória adaptativa);

4) Aualização do conjunto de de referência: construção e manutenção de um conjunto de referência constituído por uma série de melhores soluções encontradas no decorrer do algoritmo. Soluções são selecionadas pelos critérios de qualidade ou diversidade;
5) Geração de subconjuntos: opera no conjunto de referência para produzir um subconjunto de suas soluções como base para a criação de soluções combinadas;
6) Combinação de soluções: transforma um dado subconjunto de soluções gerado em uma ou mais soluções combinadas.

A descrição do algoritmo para as iterações e busca de soluções do método *Scatter Search* é apresentada no **APÊNDICE A**.

As Redes Neurais, também denominadas de *Artificial Neural Networks* (ANN), foram inicialmente desenvolvidas para imitar sistemas neurais do cérebro humano e são compostas por um número de elementos de processamento simples interligados entre si, chamados de neurônios ou nós. Cada nó recebe um sinal de entrada que é o total de informação de outros nós ou estímulos externos, processa localmente através de uma ativação ou função de transferência e produz um sinal transformado de saída para outros nós ou saídas externas. A capacidade de processamento de informações faz com que esse método seja um poderoso dispositivo computacional e capaz de aprender a partir de exemplos e de generalizar a exemplos nunca antes visto. (ZHANG et al., 1998).

Para o mesmo autor, são características das ANNs: o aprendizado, pela capacidade de aprender com a experiência (repetição de iterações); a generalização, pela capacidade de inferência de resultados para toda a população; a capacidade de estimar valores para inúmeros tipos de funções; e utilização de processos não lineares.

Uma rede neural pode possuir uma ou múltiplas camadas. Nos casos de camada única, só existiriam as camada de entrada e a de saída. Já para a rede multicamadas, seria o caso de coexistirem a camada de entrada, em que as unidades recebem os padrões; a camada intermediária, também chamada de

camada oculta e onde é feito processamento e a extração de características; e a camada de saída, que conclui e apresenta o resultado final. Todos os nós são interconectados por meio de arcos entre camadas, no sentido da camada inicial para a final. Quanto maior o número de camadas, melhor a capacidade de aprendizado e maior é o universo de representação a qualquer função, contínua ou não, linear ou não linear.

Portanto, as meta-heurísticas são métodos avaliados pela Literatura como eficazes e recomendados na condução de problemas de PO a soluções otimizadoras. Seu uso tem sido adotado por muitos aplicativos comerciais atualmente disponíveis, como será verificado na seção seguinte.

2.2.4. APLICATIVOS OTIMIZADORES EM SIMULAÇÃO

Na visão da OpTek Systems, Inc. (2014), empresa desenvolvedora de aplicativos de otimização para simuladores, como por exemplo o aplicativo *OptQuest*® que é utilizado no desenvolvimento e análises da pesquisa, a fusão de tecnologias de otimização e simulação tem visto um crescimento notável nos últimos anos, sendo uma área que tem suscitado tanto interesse no mundo acadêmico quanto em ambientes práticos.

O objetivo dos aplicativos otimizadores em modelos de simulação, segundo Fu (2002), é buscar definições melhoradas dos parâmetros do sistema selecionado pelo usuário com respeito para a medida do desempenho de interesse, pois caso fosse usado software de programação matemática, o usuário não teria como saber se um resultado ótimo foi realmente atingido.

No contexto de simulação, um algoritmo de otimização deve ser robusto o suficiente para lidar com os desafios da aleatoriedade e incerteza envolvida nas funções objetivo estimadas para o modelo simulado. Segundo Eskandari et al. (2011), existem alguns pacotes de otimização tipicamente baseados em algoritmos de busca heurística. No entanto, uma das fases importantes da resolução de problemas para os tomadores de decisão e usuários é a escolha de um otimizador eficiente e acessível entre os diferentes pacotes de otimização existentes.

Swain (2005) realizou um estudo de campo a respeito dos *softwares* de simulação de eventos discretos disponíveis no mercado no ano de 2005 e identificou uma grande diversidade de simuladores, muitos deles continuam sendo aplicados em problemas reais. A partir do seu levantamento e incluindo-se as informações mais atuais dos *softwares Arena*®,e AutoMod, pôde-se consolidar por meio das **Tabelas 1** e **2**, as informações por ele coletadas, destacando na primeira tabela os casos de simuladores que possuem aplicativos otimizadores específicos em seu sistema e, na segunda tabela, os simuladores que possuem ou não métodos otimizadores em seu bojo, porém sem aplicativo comercial específico:

Tabela 1. Aplicativos comerciais específicos de otimização em simuladores, segundo Swain (2005) e Rockwell Automation (2014)

Id	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	EMPRESA PROPRIETÁRIA	PAÍS SEDE	APLICATIVO OTIMIZADOR	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO
1	.@RISK	PALISADE CORP.	ESTADOS UNIDOS	**RiskOptmizer**	Metaheurística Genetic algorithm
2	ANYLOGIC	XJ TECHNOLOGIES	RUSSIA	**OptQuest (Anylogic)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
3	ARENA STANDARD EDITION	ROCKWELL AUTOMATION	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest for Arena**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
4	ARENA PROFESSIONAL EDITION	ROCKWELL AUTOMATION	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest for Arena**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
5	AUTOMOD	AUTOSIMULATIONS, INC.	ESTADOS UNIDOS	**AutoStat**	Metaheurísticas Evolution strategy e Genetic algorithm
6	CRYSTAL BALL PROFESSIONAL	DECISIONEERING	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (Crystal Ball)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
7	CSIM 19	MESQUITE SOFTWARE	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (CSIM 19)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
8	ENTERPRISE DYNAMICS SIMULATION SOFTWARE	PRODUCTION MODELING CORP	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (Enterprise Dynamics Simulation Software)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
9	ENTERPRISE DYNAMICS STUDIO	INCONTROL ENTERPRISE DYNAMICS	HOLANDA	**OptQuest (Enterprise Dynamics Studio)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
10	EXTEND INDUSTRY	IMAGINE THAT, INC.	ESTADOS UNIDOS	**Extend Optimizer**	Metaheurística Evolution strategy
11	EXTEND OR	IMAGINE THAT, INC.	ESTADOS UNIDOS	**Extend Optimizer**	Metaheurística Evolution strategy
12	EXTEND SUITE	IMAGINE THAT, INC.	ESTADOS UNIDOS	**Extend Optimizer**	Metaheurística Evolution strategy
13	FLEXSIM	FLEXSIM SOFTWARE PRODUCTS, INC.	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (FlexSim)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
14	MICRO SANT CHARP	MICRO ANALYSIS & DESIGN	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (Micro Saint Sharp)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
15	PROCESSMODEL	PROMODEL INC.	ESTADOS UNIDOS	**SimRunner**	Metaheurísticas Evolution strategy e Genetic algorithm
16	PROMODEL OPTIMIZATION SUITE	PROMODEL CORP.	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest for ProModel ou SimRunner (ProModel)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
17	SERVICE MODEL OPTIMIZATION SUITE	PROMODEL CORP.	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (ServiceModel Optmization) ou; SimRunner (ServiceModel Optmization)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
18	SIMCAD PRO	CREATEASOFT, INC.	ESTADOS UNIDOS	**Integrado no simulador**	Experimentos e repetição de simulação de cenários com alteração de parâmetros
19	SIMUL8 PROFESSIONAL	SIMUL8 CORP.	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (SIMUL8)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
20	SIMUL8 STANDARD	SIMUL8 CORP.	ESTADOS UNIDOS	**OptQuest (SIMUL8)**	Metaheurísticas Scatter Search, Tabu Search e Redes Neurais
21	WITNESS	LANNER GROUP	INGLATERRA	**Witness Optimizer**	Metaheurísticas Simulated anneling e Tabu Search

Fonte: o autor

Tabela 2. *Softwares* de simulação disponíveis no mercado sem aplicativo otimizador específico, com ou sem método de otimização, segundo Swain (2005)

Id	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	EMPRESA PROPRIETÁRIA	PAÍS SEDE	APLICATIVO OTIMIZADOR	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO
1	AGENARISK	AGENA	INGLATERRA	Não há	Não se aplica
2	ANALYTICA	LUMINA DECISON SYSTEMS, INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Programação Linear, Programação quadrática e Programação não-linear
3	CRYSTAL BALL STANDART	DECISIONEERING	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
4	DECISIONPRO	VANGUARD SOFTWARE CORP	ESTADOS UNIDOS	Não há	Simplex por programação inteira
5	DECISIONSCRIPT	VANGUARD SOFTWARE CORP	ESTADOS UNIDOS	Não há	Simplex por programação inteira
6	EM-PLANT	UGS	ESTADOS UNIDOS	Não há	Sequenciamento, alocação de intervalo, assistente de otimização
7	EXPERTFIT	AVERILL M. LAW	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
8	GAUSS MATRIX	APTECH SYSTEMS, INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Quasi-Newton, programação linear e programação não-linear
9	GOLDSIM	GOLDSIM TECHNOLOGY GROUP	ESTADOS UNIDOS	Não há	Otimização global não-linear para modelos dinâmicos.
10	LEAN MAST	CMS RESEARCH INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
11	LEAN-MODELER	VISUAL8	CANADÁ	Não há	Não se aplica
12	MAST	CMS RESEARCH INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
13	MYSTRATEGY	GLOBAL STRATEGY DYNAMICS LTD.	INGLATERRA	Não há	Não se aplica
14	PORTFOLIO SIMULATOR	PROMODEL CORP.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Experimentos e repetição de simulação de cenários com alteração de parâmetros
15	PROCESS SIMULATOR	PROMODEL CORP.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Experimentos e repetição de simulação de cenários com alteração de parâmetros
16	PROJECT SIMULATOR	PROMODEL CORP.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Experimentos e repetição de simulação de cenários com alteração de parâmetros
17	PSM++ SIMULATION SYSTEM	STANISLAW RACZYNSKI	MÉXICO	Não há	Não se aplica
18	QUATITATIVE METHODS SOFTWARE	QUANTMETHODS	ESTADOS UNIDOS	Não há	Análise de máximos e mínimos por meio de representação gráfica.
19	SAIL	CMS RESEARCH INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
20	SAS SOFTWARE	SAS INSTITUTE INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
21	SCIMOD TECHNO	TECHNO SOFTWARE INTERNATIONAL	ÍNDIA	Não há	Não se aplica
22	SHOWFLOW	WEBB SYSTEMS	INGLATERRA	Não há	Não se aplica
23	SIGMA	CUSTOM SIMULATIONS	ESTADOS UNIDOS	Não há	Execução directa da metodologia de dilatação do tempo
24	SLIM	MJC LIMITED	INGLATERRA	Não há	Não se aplica
25	SUPPLY CHAIN BUILDER	SIMULATION DYNAMICS, INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
26	SYSTEMFLOW 3D ANIMATOR	SYSTEMFLOW SIMULATIONS, INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
27	VISUAL SIMULATION ENVIRONMENT	ORCA COMPUTER, INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica
28	WEBGPSS	ACOBIAFLUX AB	SUÉCIA	Não há	Método Grid Search
29	XLSIM	ANALYCORP INC.	ESTADOS UNIDOS	Não há	Não se aplica

Fonte: o autor

Law (2007, apud ESKANDARI et al., 2011) destaca que atualmente existem 5 principais pacotes de otimização embutidos em *softwares* de simulação – AutoStat, Extend Optimizer, *OptQuest*®, SimRunner e Witness Optimizer. Suas abordagens,

software de aplicação e método de rotina otimizadora estão especificados no **Quadro 1**:

Quadro 1. Aplicativos comerciais contemporâneos de otimização em *softwares* de simulação

Optimization Package	Vendor	simulation software	Search strategy
AutoStat	Brooks Automation	AutoMod, AutoSched	Evolution strategies
Extend Optimizer	Imagine That	Extend	Evolution strategies
OptQuest	OpTek, Inc	Arena, Flexsim, Promodel, Quest, Simul8	Scatter search, tabu search and neural networks
SimRunner2	Promodel Corp	Promodel	Evolution strategies, genetic algorithms
Witness Optimizer	Lanner Group Inc	Witness	Simulated annealing and tabu search

Fonte: Law (2007, apud ESKANDARI et al., 2011)

Para Fu (2002) e Montevechi, Miranda e Friend (2012), o Extend Optimizer cede destaque para o aplicativo Optimiz da SIMUL8, conforme demonstrado nos **Quadros 2** e **3**:

Quadro 2. Principais aplicativos comerciais de otimização em simuladores, segundo Fu (2002)

Optimization Package (Simulation Platform)	Vendor (URL)	Primary Search Strategies
AutoStat (AutoMod)	AutoSimulations, Inc. (www.autosim.com)	evolutionary, genetic algorithms
OptQuest (Arena, Crystal Ball, et al.)	Optimization Technologies, Inc. (www.opttek.com)	scatter search and tabu search, neural networks
OPTIMIZ (SIMUL8)	Visual Thinking International Ltd. (www.simul8.com)	neural networks
SimRunner (ProModel)	PROMODEL Corp. (www.promodel.com)	evolutionary, genetic algorithms
Optimizer (WITNESS)	Lanner Group, Inc. (www.lanner.com/corporate)	simulated annealing, tabu search

Fonte: Fu (2002)

Quadro 3. Principais aplicativos comerciais de otimização em simuladores, segundo Montevechi, Miranda e Friend (2012)

Optimization Software	Simulation Package	Optimization Technique
AutoStat®	AutoMod®, AutoSched®	Evolutionary and Genetic Algorithms
OptQuest®	Arena®	Scatter Search, Taboo and Neural Networks
Optimiz®	Simul8®	Neural Networks
Optimizer®	Witness®	Simulated Annealing e Taboo Search
SimRunner®	ProModel®	Evolutionary and Genetic Algorithms

Fonte: Montevechi, Miranda e Friend (2012)

Dentre todos esses métodos de otimização em simuladores, percebe-se que a empresa OptTek Systems, Inc., (2014) possui uma vasta área de atuação, podendo

aplicar suas metodologias nos tipos de problemas de cada *software* em que foi adotado para gerar soluções otimizantes. Ela especifica o *OptQuest*® como uma ferramenta multiuso, com parcerias com mais de um *software* comercial. Abaixo segue o **Quadro 4**, elaborado a partir de dados levantados nas referências Optek Systems, Inc. (2014), Swain (2005) e Rockwell Automation (2014), e que apresenta os sistemas em que a utilização do *OptQuest*® pode ser verificada:

Quadro 4. Simuladores atuais que utilizam o aplicativo *OptQuest*®

Fonte: o autor

APLICATIVO OTIMIZADOR	EMPRESA DESENVOLVEDORA	PAÍS SEDE	*SOFTWARES* DE SIMULAÇÃO	
			SOFTWARES	**PARCERIA**
OPTQUEST	OPTEK SYSTEMS, INC	ESTADOS UNIDOS	**ANYLOGIC** (XJ TECHNOLOGIES, RUSSIA)	AnyLogic
			ARENA STANDARD EDITION	Arena®
			ARENA PROFESSIONAL EDITION (ROCKWELL AUTOMATION, EUA)	Arena®
			CRYSTAL BALL PROFESSIONAL (DECISIONEERING, EUA)	ORACLE CRYSTAL BALL
			CSIM 19 (MESQUITE SOFTWARE, EUA)	MESQUITE SOFTWARE
			ENTERPRISE DYNAMICS SIMULATION SOFTWARE (PRODUCTION MODELING CORP, EUA)	PMC Data-driven productivity solutions
			ENTERPRISE DYNAMICS STUDIO (INCONTROL ENTERPRISE DYNAMICS, HOLANDA)	INCONTROL ENTERPRISE DYNAMICS.COM
			FLEXSIM (FLEXSIM SOFTWARE PRODUCTS, INC., EUA)	FlexSim problem solved.
			MICRO SANT CHARP (MICRO ANALYSIS & DESIGN, EUA)	Micro Analysis & Design
			PROMODEL OPTIMIZATION SUITE (PROMODEL CORP., EUA)	ProModel VAO
			SERVICE MODEL OPTIMIZATION SUITE (PROMODEL CORP., EUA)	ProModel VAO
			SIMUL8 PROFESSIONAL (SIMUL8 CORP., EUA)	SIMUL8 CORPORATION
			SIMUL8 STANDARD (SIMUL8 CORP., EUA)	SIMUL8 CORPORATION

Segundo a Rockwell Automation (2014), o *OptQuest*® é um aplicativo desenvolvido pela OptTek Systems, Inc., servido como ferramenta de otimização customizada e aperfeiçoada para analisar e otimizar os resultados de simulações realizadas em

software. Ele automatiza ou controla modelo de simulação no *Arena*® para definir os valores das variáveis.

O aplicativo analisa os resultados da simulação e utiliza algoritmos meta-heurísticos (pesquisa Tabu, busca de dispersão, e redes neurais) e programação inteira para estabelecer um novo conjunto de valores das variáveis de controle, e inserindo novamente no processo de simulação repetidas vezes até que seja encontrada uma solução ideal ou um critério de parada seja satisfeito. Dessa forma, consegue encontrar melhores respostas mais rapidamente. Eskandari et al. (2011) acrescenta que a heurística de busca por dispersão é eleita como estratégia principal de pesquisa, a busca tabu como método secundário e as redes neurais como o último método.

Em complemento a esse raciocínio, para Kleijnen e Wan (2007) todos os métodos de otimização em simulação abordam práticas heurísticas iterativas. Nesse mesmo passo, o aplicativo *OptQuest*® trata o modelo de simulação como uma caixa preta, ou seja, não usa fórmulas explícitas que estão dentro o modelo, de simulação. Observa apenas a entrada / saída do modelo de simulação. Para os autores, a heurística exata é desconhecida por razões comerciais do próprio aplicativo.

As variáveis utilizadas nesse software são aleatórias e a amostragem / geração de valores segue o método de Monte Carlo. De acordo com Evans e Olson (2002, apud SILVA, 2011), a simulação de Monte Carlo é basicamente um experimento amostral cujo objetivo é estimar a distribuição de resultados possíveis da variável que interessa (variável de saída), com base em uma ou mais variáveis de entrada, que se comportam de forma probabilística de acordo com alguma distribuição estipulada.

O referido otimizador está disponível no *software Arena*® nas edições *Standard Edition* e *Professional Edition* e é uma ferramenta indicada a problemas logísticos em que se tem por finalidade a melhoria de produtividade, seja pela minimização de custos, pela maximização de lucros ou pela racionalização de qualquer fator gargalo do processo produtivo.

O método empregado por esse otimizador consiste na obtenção de solução candidata que, não se enquadrando nas restrições impostas ao modelo, é eliminada, até que diante de uma tarefa exploratória, o otimizador encontra os candidatos que são mais propensos a serem melhores. Necessita da especificação de mínimos e máximos valores para as variáveis que serão otimizadas, determinando o ponto de partida para as iterações do otimizador. Como definição das saídas, requer-se a seleção da (s) variável (is) de saída que pertencerá (ão) ao objetivo da otimização e daquelas que também deverão atender aos requisitos do problema. (KLEIJNEN ; WAN, 2007)

Adiante, apresenta-se algumas características, áreas de aplicação, requisitos de processamento computacional, além de estimativas de preços dos *softwares* de simulação que utilizam alguma técnica de otimização de cenários, sob a aplicação de algum aplicativo otimizador específico disponível no mercado. Os dados das **Tabelas 3**, **4** e **5** são fruto da pesquisa feita por Swain (2005). As duas primeiras tabelas destacam as informações atinentes aos simuladores que utilizam o aplicativo *OptQuest*® e a terceira tabela visa elencar informações adicionais relacionadas aos simuladores que também tem opção de otimização, porém a partir de aplicativos específicos e distintos do *OptQuest*®.

Tabela 3. Áreas de aplicação dos *softwares* de simulação que utilizam o aplicativo *OptQuest*®

Id	*SOFTWARE*	APLICAÇÕES TÍPICAS	ÁREA DE MERCADO PRIMÁRIO	ANÁLISE DE SUPORTE DE SAÍDA	*1	COMENTÁRIOS DO FORNECEDOR
1	Analogic 6.0 *XJ Technologies*	Modelo de mercado e competitividade, cadeia de mantimentos, logística, processos de negócios, gerente de ativo e projetos, dinâmica de pedestres, etc.	Modelo global para qualquer tipo de negócio, telecomunicações, transporte, distribuição, seguro, serviços, agricultura, etc.	Análise de estatística básica, exporta para text, Excel, DB	S	Multi-ferramento de suporte, sistema dinâmico e modelo de evento. Oferece modelador max. Flexibilidade de encontrar abstração usando diferentes tipos de abordagens
2	Arena *Rockwell Automation*	Projeto de instalação/configuração, cronograma, efeito de passageiros e processo de bagagem de mão, gerenciamento de pacientes, estratégia de roteamento/despacho	Aeroportos, assistência médica, logística, cadeia de mantimentos, fábricação, militar, processo de negócios	Análise de saída Arena, sem custo	S	Ajuda consumidores a fazer escolha de investimentos, reduzindo custos, simplifica operações, aumenta o lucro. Melhora o desempenho e sucesso da empresa
3	Crystal Ball Professional *Decisioneering*	Analista de planejamento, custo e benefícios, gerenciamento de projeto de risco, exploração de petróleo; Six Sigma	Serviços financeiros, meio ambiente, óleo e gás, farmacêutico, telecomunicações, fábrica, energia, utilitários, seguros	display com resultados em gráficos. Extrai dados brutos e cria resultados	-	Extremamente rápido, otimização, presibilidade, customização VBA. Visite o site para informações
4	CSIM 19 Mesquite Software	Conjunto de ferramentas para simulação de processos de orientação, modelo de evento discreto de computador, comunicação e sistema de serviço de entrega	Conjunto de ferramentas geral com proposta para C, C++, e Java desenvolvedores. Pode ser usado com pacotes de otimização	Intervalos de confiança, controle de comprimento de percurso	-	C, C++ ou Java, criado para usar ferramentas padrão. Modelos CSIM executam eficientemente e deixa embutir em outras aplicações
5	Enterprise Dynamics Simulation Software *Production Modeling Corporation*	Manuseamento de materias de fábrica, serviço de telefonista e aplicativos de serviço industrial, Melhoria de processos, planejamento de capacidade	Aço, eletrônicos, aeroespacial, automotivo, alimentação e bebidas, indústria de bens de consumo, aeroportos, ferrovias	S	-	Melhor preço
6	Enterprise Dynamics Studio *Incontrol Interprise Dynamics*	Objeto de siulação/orientação de software. Um dos mais rápidos do mercado. Para consultores de produção/logística, engenheiros de processamento de negócios	Biblioteca, logística para fábrica, armazém, simulação de entrega de bagagem	Experiência Wizard e gerente de cenário	-	Um dos mais inovadores produto de software de simulação do mercado atualmente. Mais de 1500 licenças vendidas
7	Flexsim *Flexsim Software Products. Inc.*	Fabricação, logística, manuseamento de materiais, transporte de conteinêres, armazenagem, distribuição, mineração, cadeia de mantimentos	Logística de fábrica, entrega de materiais, transporte de contêineres, armazém, distribuição, mineração, cadeia de mantimentos	Gráficos, histogramas, ODBC, definidor do usuário	S	Entre em contato com a Flexsim para avaliar outros produtos
8	Micro Saint Sharp Version 2.1 *Micro Analysis & Design*	Proposta geral, modelagem de ambiente de simulação de eventos discretos, melhora a facilidade do projeto, maximiza o desempenho do trabalho e mais	Militar, fatores humano, assistência médica, fábrica, indústria de serviços, pequenos negócios	Limitado (max, mean, standart, deviation, graphing	-	Atualizar é muito significativo para a MA&D, desde a introdução do Windows, há 12 anos. Redesenhando um novo software tecnológico
9	ProModel Optimization Suite *ProModel Corporation*	SixSigma, analista de planejamento de capacidade e custo, modelo de processo de redução de ciclo, modelo de otimização de mais	Fábrica, logística, farmacêutica, defesa	Análise de saídas de relatórios e gráficos inclusos. Saída para Excel e Acces para análise	S	Soluções dirigidas por VAO. Tecnologia, levando decisões de desempenho aos superiores
10	ServiceModel Optimization Suite *ProModel Corporation*	processo de melhoria de otimização, planejamento de capacidade, analista de custo, modelagem de processos de redução de tempo de ciclo, otimização de rendimento e mais	Financiamento, banco, seguro, companhia aérea, segurança, telecomunicações, negócios de engenharia e outros	Análise de saídas de relatórios e gráficos inclusos. Saída para Excel e Acces para análise	S	Soluções dirigidas por VAO. Tecnologia, levando decisões de desempenho aos superiores
11	SIMUL8 Professional *SIMUL8 Corporation*	Gerenciamento de fluxo de trabalho, analista de transferência, descongestionamento, gerenciamento de processamento, analista de capacidade e mais	Processos de negócios, telecomunicações, fábrica, cadeia de suprimentos, logística, assistência médica, financiamento, farmácia e outros	Relatórios estatísticos customizáveis de 95% a 99% com intervalos de confiança e gráficos	S	Certificado da parceira Microsoft com integração da Viso e tem aliança com a Brooks/AutoMod. Traduções disponíveis
12	SIMUL8 Standart *SIMUL8 Corporation*	Gerenciamento de fluxo de trabalho, analista de transferência, descongestionamento, gerenciamento de processamento, analista de capacidade e mais	Processos de negócios, telecomunicações, fábrica, cadeia de suprimentos, logística, assistência médica, financiamento, farmácia e outros	Relatórios estatísticos customizáveis de 95% a 99% com intervalos de confiança e gráficos. Exporta para o excell, Minitab	S	Certificado da parceira Microsoft com integração da Viso e tem aliança com a Brooks/AutoMod. Traduções disponíveis

*1 Misto de modelagem de eventos discretos e contínuos

Fonte: Adaptado de Swain (2005

Tabela 4. Requisitos computacionais, características e estimativas de preços dos *softwares* de simulação que utilizam o aplicativo *OptQuest*®

Id	*Software*	MEM. RAM	OPERATING SYSTEMS	*1	*2	*3	*4	PREÇO	PREÇO VERSÃO ESTUDANTE
1	Anylogic 6.0 *XJ Technologies*	512MB, 1G recom.	Any Java-enabled platform	S	S	S	-	A partir de $5,000	A partir de $500
2	Arena *Rockwell Automation*	64MB	Windows 98, 98 SE, Me, 2000 (SP 3-later), Server 2003, XP (SP 1-later)	S	S	S	S	$795 para cima	Grátis
3	Crystal Ball Professional *Decisioneering*	16MB	Microsoft Excel 2000, 2002 (XP), 2003	-	S	S	-	$1,795	$79 licença anual
4	CSIM 19 *Mesquite Software*	100MB	Windows, Mac OS X, Linux, Solaris, AIX	-	-	-	-	Profissional: $1,000, Educacional: $300	$55
5	Enterprise Dynamics Simulation Software *Production Modeling Corporation*	64MB	Windows 98/2000/XP	S	S	S	S	Pacote Econômico a partir de $5000; add-ons extra	Grátis Versão de Avaliação. Licença acadêmica $5,400
6	Entrerprise Dynamics Studio *Incontrol Enterprise Dynamics*	256MB	Windows 95,98, 2000, XP, NT4	S	S	S	S	$12,500	Grátis
7	Flexsim *Flexsim Software Products. Inc.*	512 recom.	Windows XP e 2000	S	S	S	S	$12,500 - $19,500	Grátis
8	Micro Saint Sharp Version 2.1 *Micro Analysis & Design*	64MB, 128MB recom.	Windows 2003, XP, ME, 2000, 98 (must support.NET Framework 1.1)	S	S	S	S		Professor: $1500, Estudante: $60
9	ProModel Optimization Suite *ProModel Corporation*	128MB min., 512MB recom.	Windows 98 later	S	S	S	S	$18,500	$30
10	ServiceModel Optimization Suite *ProModel Corporation*	128MB min., 512MB recom.	Windows 98 ou later	S	S	S	S	$18,500	$30
11	SIMUL8 Professional *SIMUL8 Corporation*	64MB	Windows 95, 98, ME, NT 4, 2000, XP ou later	S	S	S	S	$4,995	Acadêmico: $1,995, Estudante: Grátis (W gratuito/Acad mediante compra)
12	SIMUL8 Standart *SIMUL8 Corporation*	-	Windows 95, 98, ME, NT 4, 2000, XP ou later	S	S	S	S	$1,495	Acadêmico: $1,995, Estudante: Grátis (W gratuito/Acad mediante compra)

*1 Modelo de construção gráfica
*2 Animação
*3 Visualização da animação em tempo real
*4 Animação 3D

Fonte: Adaptado de Swain (2005)

Tabela 5. Áreas de Aplicação, requisitos computacionais, características e estimativas de preços dos *softwares* de simulação que utilizam aplicativo otimizador específico

Id	*SOFTWARE*	APLICAÇÕES TÍPICAS	ÁREA DE MERCADO PRIMÁRIO	ANÁLISE DE SUPORTE DE SAÍDA	*1	COMENTÁRIOS DO FORNECEDOR	MEM. RAM	OPERATING SYSTEM	*2	*3	*4	*5	PREÇO	PREÇO VERSÃO ESTUDANTE
1	@RISK Palisade Corporation	Análise de risco, decisão tomada sob incerteza	Analista financeiro, desenvolvimento de Óleo e Gás, analista de pensão, seguros e resseguros, pesquisa científica, negócios, planejamento, etc.	Estatísticos e Gráficos, sensibilidade e cenário	S	Conduzir a simulação Monte Carlo para adicionar no Microsoft Excel	32MB	Windows/Excel	S	S	S	-	$795	$35
2	Extend industry *I magine That, Inc.*	Acrescenta a taxa baseada na simulação de Extend OR	Grande escala e sistema baseado em taxa, logística de distribuição, volume alto de call centers, linhas de embalagens, etc.	Intervalos de confiança são calculados em um click no botão	S	Adiciona um módulo de fluxo de taxa discreta para para o Extend OR	128MB	Windows XP e 2000	S	S	S	-	$2,295; Descontos para acadêmicos disponíveis	$125; Descontos para estudantes disponíveis
3	Extend OR *Imagine That, Inc.*	Mensagens baseadas em eventos discretos de modelos de processos de arquitetura envolvendo objetos físicos e lógicos	Modelagem de fábrica e negócios, sistema de comunicação, assistência médica, Six Sigma, transportes e etc.	Intervalos de confiança são calculados em um click no botão	S	Pedágio essencial para simulação de operações de qualquer sistema e processamento. Adiciona mensagem discreta baseada em evento de arquitetura e recursos para o produto Extend CP	128MB	Windows XP e 2000; Macintosh 0S X	S	S	S	-	$1,595; Descontos para acadêmicos disponíveis	$125; Descontos para estudantes disponíveis
4	Extend Suite *Imagine That, Inc.*	Modelo contínuo, processos de evento discreto ou taxa discreta; modelo 3D e ajuste de distribuição analítica	Grande escala e sistema baseado em taxa, fábrica, logística, linhas de embalagens, transportes e etc.	Customização de relatório visual e representação de dados	S	Conjunto de ferramentas compreensível e integrado com o modelo 3D para o produto Extend Industry	128MB	Windows XP e 2000	S	S	S	S	$3995; Descontos para acadêmicos disponíveis	$125; Descontos para estudantes disponíveis
5	ProcessModel Version 5.1 *ProcessModel, Inc* .	Melhorias de processos de negócios, simulação e otimização tanto para serviços e áreas de produção relacionados	Todos	Gráfico com análise do tempo, customização e relatório pré-definido	S	Wa Aiso oferece preço GSA, acordo de licenciamento corporativo, e não cobra taxa de manutenção annual. Contact Trawis Healy, 801-356-7165 x 166	24MB	Windows 98, ME, NT, 2000, XP	S	S	S	-	$3,995; Suporte técnico grátis e 3 dias	Contato para detalhes
6	Simcad Pro *CreateASoft, Inc.*	Planejamento de gestão de contigência/risco, visualização 3D, simulação, mapeamento de valor de fluxo, plano de capacidade e muito mais	Fábrica, financimento, saúde, defesa, óleo de gás, polícia	Opção de análise embutida	S	Eliminar código. Alcançar níveis de confiança de até 99%. Manter a melhoria contínua dos processos. Validação antes da implementação, flexibilidade e facilidade no uso	512MB	Windows 2000, XP	S	S	S	S	$8000	$3,000 por Campus Universitário
7	WITNESS 2006 *Lanner Group*	Modelagem de fábrica, hospitais, logística, processos de negócios			S	-	256MB	Windows 98, 2000, NT, ME e XP	S	S	S	S	Preço da aplicação	Preço da aplicação

*1 Misto de modelagem de eventos discretos e contínuos
*2 Construção de modelo gráfico
*3 Animação
*4 Visualização da animação em tempo real
*5 Animação 3D

Fonte: Adaptado de Swain (2005)

2.2.5. EVOLUÇÃO DAS APLICAÇÕES DO *OPTQUEST*® NA LITERATURA

Nesta seção são abordados os diversos estudos científicos realizados na área de simulação-otimização com a utilização do aplicativo *OptQuest*®, bem como a sua evolução na Literatura.

Fu (2002) estudou em sua obra o conhecimento teórico e prático das aplicações de otimização em simulação de eventos discretos e avaliou que a recente integração de técnicas de otimização para a prática de simulação, especificamente em software comercial, tornou-se quase onipresente, como a maioria dos pacotes de simulação de eventos discretos agora incluem alguma forma de rotina "otimização". Os softwares desenvolvidos implementam algoritmos muito gerais adotados a partir de técnicas de otimização determinística com base em meta-heurísticas.

Para o autor, o *OptQuest*® é uma das rotinas de otimização mais populares e atualmente disponível em software de simulação comercial. O aplicativo contém características desejáveis para uma boa implementação da otimização:

- Generalidade: As rotinas de otimização devem ser capazes para lidar com a ampla gama de problemas, ou seja, o software deve ser inteligente o suficiente para ser capaz de verificar a existência de estrutura especial e explorá-la, quando disponível;
- Transparência para o usuário: Interfaces gráficas de usuário (GUIs) e menus do usuário;
- Alta dimensionalidade: Algoritmos mais eficientes com possibilidade de uma investigação mais aprofundada.
- Eficiência: Poder computacional na rotina de otimização de simulação pode levar a utilização mais eficiente dos recursos computacionais, resultando em boas soluções para problemas maiores.

No estudo de Bayindir, Dekker e Porras (2006), o problema investigado foi a otimização do nível de esforço para a recuperação de itens utilizados e devolvidos, sob uma política de controle de estoque quando o sucesso de recuperação é probabilístico. A. O esforço de recuperação é representado pelo tempo esperado

para tanto. Alternativamente à recuperação dos itens, a demanda pode ser satisfeita por itens novos.

Quatro políticas de controle de estoque são proposta pelo autor e se diferem na duração e nas informações utilizadas na decisão de compra. O objetivo do modelo foi encontrar o nível de recuperação junto com o parâmetro de controle de estoque que minimizam o custo total médio no longo prazo.

Concluiu-se que para esses sistemas de maximizar o sucesso de recuperação é quase equivalente a minimizar os custos esperados. Uma limitação do estudo foi identificada como: foi considerada uma probabilidade de sucesso independente da idade dos itens na operação de recuperação, pois na realidade, espera-se que, com a idade dos itens usados e com o aumento do número de recuperações, a probabilidade de sucesso na operação de recuperação deveria diminuir.

Na pesquisa de Kleijnen e Wan (2007), o problema abordado foi a otimização de simulação de um sistema de gestão de estoques (s, S). Objetivou-se minimização dos custos específicos de estoque. Os resultados da otimização foram testados por meio de condições denominadas Karush-Kuhn-Tucker (KKT), para verificação da eficácia do método.

Concluiu-se que os resultados dos níveis de controle ótimo, usando o *OptQuest*®, passaram em parte pelo teste chamado Karush-Kuhn-Tucker-(KKT) o que indicou que a sua eficiência depende tanto do tamanho da área de busca como e a escolha da solução inicial da busca (o teste mede melhor em amostrar grandes).

Al Rifai e Rossetti (2007) publicou artigo que versa sobre um problema de definição de política de estoques de peças sobressalentes que não podem ser reparadas, consistindo num armazém e varejistas idênticos. Foi formulado um problema de decisão de política de estoque a fim de minimizar o investimento anual total em estoques que está sujeito a uma determinada freqüência média anual de pedidos e número esperado de restrições de atraso no atendimento de pedidos. Para a solução do problema, foi decomposto o sistema e gerado expressões para os

parâmetros da política de estoque e desenvolvido um algoritmo (algoritmo IHOA - Iterative Heuristic Optimization Algorithm) de otimização heurística iterativa.

Concluiu-se que o algoritmo de otimização desenvolvido é um método eficiente e eficaz para a definição dos parâmetros da política em sistemas de estoques em grande escala, até mais que o aplicativo *OptQuest*®, comparando-se os tempos de computação e qualidade dos pontos de soluções para pequenos sistemas de estoques. Uma limitação identificada foi a consideração de varejista idênticos.

Na pesquisa de Aras e Aksen (2008), foi abordado o problema de definição da localização ótima de centros de coleta de uma empresa que tem como objetivo o recolhimento de produtos usados por consumidores. O valor restante nos produtos utilizados que podem ser capturados por operações de recuperação é a principal motivação da empresa para a operação de coleta. Os artigos recuperados e retornados ao consumo são classificados em relação ao seu nível de qualidade em classes e um incentivo diferente é oferecido para cada tipo de retorno. Para tanto, foi gerado um modelo mix de expressões inteiras mista não-lineares de localização-alocação para determinar tanto os locais ótimos dos centros de coleta como os valores de incentivo ideais para cada tipo de retorno, de modo a maximizar o lucro dos retornos. Uma limitação desse estudo foi a desconsideração da capacidade dos veículos coletores.

Já para Aras, Aksen e Gönül Tanugur (2008), o problema de seleção da localização ótima de centros de coleta de uma empresa que tem como objetivo recolher produtos usados dos detentores de produtos. Nesse caso, definiu-se como condição o uso de uma frota homogênea de veículos com capacidade limitada, expedidos a partir de centros de coleta para os locais dos titulares dos produtos, retornando com a carga. O modelo é inteiro misto com programação não-linear para encontrar os locais ideais numa amostra determinada e os valores de incentivo ideais para diferentes tipos de retorno. O número de veículos operados, a quantidade de cada tipo de retorno e o valor do incentivo são as variáveis de decisão. Foi proposto um método heurístico (base busca tabu) para resolver casos de médio e grande porte.

No estudo de Gumrukcu, Rossetti e Buyurgan (2008), o problema se insere no processo de controle físico do estoque, ou melhor, no registro de estoques dentro de uma cadeia de suprimentos e que, caso ineficientes, podem levar à insatisfação do cliente e aumento dos custos operacionais. Foi modelado um simulador de um sistema de estoques, consistindo de um varejista, um centro de distribuição e um fornecedor, com a utilização de ciclo de contagem como a ação corretiva. Objetivou-se investigar a melhor configuração possível do ciclo de contagem.

Os resultados indicaram que, em geral, a correta aplicação do ciclo de contagem irá aumentar a precisão de registro e fornecer quantidade significativa de economias para toda a cadeia de abastecimento. O modelo foi capaz de fornecer precisão e medidas de discrepância para o varejista em todos os tipos de itens considerados (itens de alta demanda, baixo custo e itens de baixa demanda de alto custo).

O estudo de Kull e Closs (2008) trata do risco de abastecimento dentro do contexto de uma falha no fornecimento em empresas com política de redução de estoques. Baseia-se nas teorias de estoques e de dependência de recursos.

Foram avaliados o nível de risco de abastecimento, a probabilidade de falha de fornecimento, a duração do evento provável e o impacto sobre a satisfação do cliente. Os resultados indicaram que o aumento do estoque em uma cadeia de suprimentos em camadas às vezes pode aumentar o risco de fornecimento em vez de diminuí-la. Foi demonstrado que o nível de dependência de recursos de uma organização não é um indicador adequado de sensibilidade falha de fornecimento da cadeia de suprimento.

Keskin, Melouk e Meyer (2010) estudou um problema de seleção generalizada de fornecedores que integra decisões de seleção de fornecedores e de reposição de estoques de uma empresa. Além de compras e da gestão de custos, foram considerados a reposição de estoques e os custos de atraso de atendimento a pedidos para atender a uma demanda estocástica estacionária. O objetivo foi selecionar o melhor conjunto de fornecedores junto com as decisões de estoque ótimo em cada planta da empresa, para minimizar os custos totais de todo o sistema e atingir os níveis de serviço e confiabilidade desejados. Devido às incertezas de

demanda e do atendimento por parte dos fornecedores, foi utilizado o aplicativo de simulação-otimização de eventos discretos para avaliar a função-objetivo do problema, que trabalha em conjunto com uma abordagem de otimização meta-heurística *scatter search*.

Concluiu-se que a simulação-otimização a partir do *OptQuest*® foi eficaz para determinar os melhores fornecedores e níveis de estoque ideais para as plantas da empresa e para avaliar o impacto da qualidade, as interrupções e desempenho de entrega pelos fornecedores. Foi possível uma abordagem global com a compreensão do impacto de eventos dinâmicos e a mitigação de risco em caso de espera / interrupções inesperadas dos fornecedores. Como limitação, foi elencado o tempo necessário para o uso do simulador computacional que foi demasiado.

No estudo de Kleijnen, Beers e Nieuwenhuyse (2010), é apresentada uma aplicação de nova heurística para otimização de modelos computacionais de simulação de variáveis aleatórias. Trata-se de um problema de um sistema de estocagem em call-center e objetivou-se comparar a aplicação da heurística desenvolvida com os resultados extraído do aplicativo *OptQuest*®, nas versões 11 e 12 do software *Arena*®.

A modelagem se baseou no objetivo de minimização com entradas no simulador de valores inteiros e restrições lineares ou não-lineares. A heurística criada combinou: (i) Krigagem (ou processo de Gauss ou modelagem correlação espacial) para analisar os dados de entrada da simulação / saída globais decorrentes do modelo; e (ii) programação inteira não-linear para estimar a solução ideal a partir dos meta-modelos de krigagem.

Concluiu-se que, nestas duas aplicações, a heurística desenvolvida no artigo supera o *OptQuest*® em termos de número de combinações de entrada simulados e qualidade da estimativa do ótimo. Os autores aplicaram a nova heurística para vários modelos de simulação e comparado o seu desempenho com *OptQuest*®, foi observado menos cenários avaliados para se encontrar uma solução ótima.

Grewal, Enns e Rogers (2010) desenvolveu pesquisa no uso de simulação de eventos discretos e otimização heurística para ajustar dinamicamente os parâmetros dentro de uma estratégia de ponto de reabastecimento com pedidos contínuos. Este ajuste dinâmico ajuda a gerenciar estoques e níveis de serviço em um ambiente de cadeia de suprimentos simples, com demanda sazonal. Um modelo de simulação de eventos discretos de uma cadeia produtiva é desenvolvido e um procedimento para ajustar dinamicamente os parâmetros de reposição com base na re-otimização durante as diferentes partes do ciclo de demanda sazonal é explicado. A lógica de simulação e otimização de processo são descritas. Além disso, a análise do impacto sobre o estoque é realizado.

O trabalho de Brickner, Indrawan, Williams e Chakravarthy (2010) identifica o problema de filas num sistema de serviço em que três tipos de clientes recebem serviços de um pool de servidores dedicados e/ou flexíveis. Quando um cliente chega, pertence a um dos três tipos e o cliente admitido é servido por um dos servidores dedicados ou por um dos servidores. Os servidores flexíveis são utilizados apenas quando os respectivos servidores dedicados estão todos ocupados.

A otimização aplicada foi com o objetivo de minimização do custo total esperado por hora que é calculado considerando: custos para contratação de servidores dedicados e flexíveis; custos para os clientes que esperam no sistema; e custos para os clientes perdidos.

Young Yun, Mi Lee e Seok Choi (2011) lidou em seu trabalho com um problema de controle de estoques de contêineres vazios num sistema de transporte de interiores. Contêineres são transportados entre o terminal e o local de entrega por caminhões, trens ou barcaças. Conteineres vazios devem ser periodicamente reposicionados das zonas com excedentes para as áreas de escassez. Foi proposto uma política de estoque eficiente (s,S) para controlar o reposicionamento e retorno dos recipientes vazios. Foi suposto que as demandas por unidade de tempo são variáveis independentes e aleatórias. A simulação foi utilizada para estimar a taxa de custo esperado e a otimização foi aplicada para obter a política ideal de controle de estoques (s, S).

Concluiu-se que enquanto não há um prazo para reposicionamento, pode-se alugar contêineres vazios imediatamente. Uma limitação do estudo foi a consideração de um único depósito de contêineres vazios por cliente.

Eskandari, Mahmoodi, Fallah e Geiger (2011) apresenta um estudo para avaliar e comparar dois aplicativos comerciais de otimização baseados em simulação, *OptQuest*® e Witness Optimizer®, para determinar o seu desempenho relativo baseado na qualidade das soluções obtidas em um esforço computacional razoável. Foram abordados dois problemas: um problema de fabricação puxada com número diferente de máquinas e buffers em cada estação de trabalho; e um problema de sistema de estoques com valores diferentes para a sua política de controle.

Concluiu-se que ambos os pacotes de otimização têm bom desempenho nos problemas dados. Ambos os pacotes encontraram ótimos satisfatórios e em tempo computacional aceitável. O *OptQuest*® é capaz de proporcionar uma solução ligeiramente de melhor qualidade, quando um grande número de cálculos e soluções é permitido.

No estudo de Sang e Takakuwa (2012), foi abordado um problema de previsão de demanda de produtos de consumo não-duráveis e com prazo de validade, que muitas vezes leva a prejuízos ou perdas de oportunidade e que resultam em desperdício de recursos e insatisfação do cliente. Foi adaptado um método conhecido de suavização exponencial (“método de Winters”) para prever a demanda horária de bolinho de arroz, utilizando o conceito do “problema do jornaleiro” e um modelo de simulação computacional construído para simular os prejuízos de material e as perdas de oportunidade de vendas. A otimização realizada foi para a quantidade ideal de pedidos de forma que maximize o lucro esperado do varejista, utilizando o aplicativo e realizando uma análise de sensibilidade.

No estudo de Becerril-Arreola, Leng e Parlar (2013), o problema em questão é a determinação do nível de estoque ótimo para um varejista online, objetivando-se a maximização da sua margem de lucro. Foi desenvolvida a função lucro esperado do varejista. Foi realizada a simulação-otimização pelo aplicativo e ao final uma análise

de sensibilidade para examinar a relação do estoque no custo unitário de transporte em decisões ótimas do varejista e o impacto na maximização do lucro.

Como conclusão, foi recomendado o uso do software *Arena*® para simular a operação de varejo on-line e o uso do *OptQuest*® para encontrar as decisões ótimas e lucro máximo.

Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013), desenvolveram uma ferramenta de otimização de simulação para auxiliar na tomada de decisões estratégicas e operacionais de uma empresa fabricante de aço. Objetivou-se a minimização dos custos de utilização.

Concluiu-se que o método aplicado demonstrou a capacidade da abordagem de solução para analisar sistemas industriais complexos e identificar potenciais melhorias em um curto espaço de tempo. A experimentação sugeriu que economias significativas de custo são possíveis com ajustes dos níveis de serviço no processo de estocagem, bem como alterações de capacidade e taxas de processamento na área de produção.

No artigo científico de Pritee e Mamata (2013), foi tratado o problema de alocação ótima de vários fornecedores, sob um cenário de interrupção de fornecimento e com uma demanda estocástica, em que os fornecedores têm limitações de capacidade. Objetivou-se investigar o problema dos fornecedores incapacitados e o seu efeito sobre a decisão de fornecimento para a escolha das estratégias de *sourcing* mais rentáveis na presença de riscos de interrupção de abastecimento.

Para a abordadagem do modelo, foram testados o algorítimo *Genetic Algorithm* e a otimização em simulação. Concluiu-se que a simulação-otimização deu uma solução melhor em um período de tempo razoável, porém há limitações. Foi considerado apenas para os casos de produtos com curto período de ciclo de vida.

Por fim, no estudo de Pérez e Geunes (2014), analisou-se um problema de otimização de reabastecimento de estoque na realização de transporte com segregação de embarques e uso de vários modos de entrega. Uma vez que

aumenta os custos totais de transporte, por outro lado pode oferecer alguns benefícios compensadores, como: redução na probabilidade de falta de estoque e do custo médio de estoque. Foi considerado um modelo de reposição de estoques de estágio único, que inclui dois modos de entrega: um modo mais barato, menos confiável, e outro, mais caro, porém perfeitamente confiável. Foram caracterizados modelos de otimização para decisão de reabastecimento com estes dois modos, assim como os potenciais benefícios da utilização simultaneamente dois modos de entrega.

Como conclusão, a utilização de um modo de fornecimento mais barato frequentemente implica lidar com níveis de incerteza elevados quando comparados com um modo mais caro e, se o primeiro é usado, pode ser vantajoso considerar completando este com um modo de alimentação secundária que é mais confiável, mesmo que mais dispendioso. Um fornecedor que oferece diferentes opções de modo de transporte com diferentes custos de entrega e níveis de confiabilidade podem fornecer valor adicional para os potenciais compradores. Uma limitação do estudo foi que o modelo não leva em consideração o risco do tomador de decisão.

A **Tabela 6** resume a evolução das aplicações do *OptQuest*® na Literatura e a **Figura 21** identifica os países de origem dos estudos científicos feitos sobre aplicações do *OptQuest*®, segundo a Tabela 06.

Tabela 6. Evolução das aplicações do *OptQuest*® na Literatura

Id.	Autor	Ano	País(es)	Área de Aplicação	Problema	OptQuest recomendado	
						SIM	NÃO
1	Fu	2002	Estados Unidos	Conhecimento	Estado da arte sobre a prática dos softwares comerciais para simulação-otimização	X	
2	Bayindir, Dekker & Porras	2006	Estados Unidos Holanda	Controle de Estoques	Otimização do nível de esforço para a recuperação de itens utilizados e devolvidos, sob uma política de controle de estoque, a partir da minimização do custo total médio no longo prazo	X	
3	Kleijnen & Wan	2007	Holanda China	Gestão de Estoques	Otimização da simulação de um sistema de gestão de estoques (s, S), a partir da minimização dos custos específicos de estoque	X	
4	Rifai & Rossetti	2007	Estados Unidos	Política de Estoques	Definição da política ótima de estoques de peças sobressalentes que não podem ser reparadas, consistindo num armazém e varejistas idênticos		X
5	Aras & Aksen	2008	Turquia	Localização de instalações	Definição da localização ótima de centros de coleta de uma empresa que tem como objetivo o recolhimento de produtos usados por consumidores.	X	
6	Aras, Aksen & Gönül Tanugur	2008	Turquia	Localização de instalações	Seleção da localização ótima de centros de coleta de uma empresa que tem como objetivo recolher produtos usados dos detentores de produtos, com o uso como condição o uso de uma frota homogênea de veículos com capacidade	X	
7	Gumrukcu, Rossetti & Buyurgan	2008	Estados Unidos	Controle de Estoques	Configuração do processo de controle físico do estoque, ou melhor, no registro de estoques dentro de uma cadeia de suprimentos	X	
8	Kull & Closs	2008	Estados Unidos	Suprimentos	Risco de abastecimento dentro do contexto de uma falha no fornecimento em empresas com política de redução de estoques	X	
9	Keskin, Melouk & Meyer	2010	Estados Unidos	Seleção de Fornecedores	Seleção generalizada de fornecedores que integra decisões de seleção de fornecedores e de reposição de estoques de uma empresa	X	
10	Kleijnen, Beers & Nieuwenhuyse	2010	Holanda Holanda Bélgica	Controle de Estoques	Sistema de estocagem em call-center		X
11	Grewal, Enns & Rogers	2010	Canadá	Suprimentos	Definição de estratégia de funcionamento de ponto de reabastecimento com pedidos contínuos	X	
12	Brickner, Indrawan, Williams & Chakravarthy	2010	Estados Unidos	Filas	Filas num sistema de serviço em que três tipos de clientes recebem serviços de um pool de servidores dedicados e/ou flexíveis	X	
13	Young Yun, Mi Lee & Seok Choi	2011	República da Coréia	Controle de Estoques	Controle de estoques de contêineres vazios num sistema de transporte de interiores.	X	
14	Eskandari, Mahmoodi, Fallah & Geiger	2011	Irã Irã Irã Estados	Controle de Estoques	Foram abordados dois problemas: um problema de fabricação puxada com número diferente de máquinas e buffers em cada estação de trabalho; e um problema de sistema de estoques com valores diferentes para a sua política de controle	X	
15	Sang & Takakuwa	2012	Japão	Previsão de demanda	Previsão de demanda de produtos de consumo não-duráveis e com prazo de validade	X	
16	Becerril-Arreola, Leng & Parlar	2013	Estados Unidos Hong Kong	Gestão de Estoques	Determinação do nível de estoque ótimo para um varejista online, objetivando-se a maximização da sua margem de lucro	X	
17	Melouk, Freeman, Miller & Dunning	2013	Estados Unidos	Gestão de Estoques	Tomada de decisões estratégicas e operacionais de uma empresa fabricante de aço, objetivando-se a minimização dos custos de utilização.	X	
18	Pritee & Mamata	2013	Índia	Gestão de Fornecedores	Alocação ótima de vários fornecedores, sob um cenário de interrupção de fornecimento e com uma demanda estocástica, em que os fornecedores têm limitações de capacidade	X	
19	Pérez & Geunes	2014	Estados Unidos	Gestão de Estoques	Otimização de reabastecimento de estoque na realização de transporte com segregação de embarques e uso de vários modos de entrega	X	

Fonte: o autor

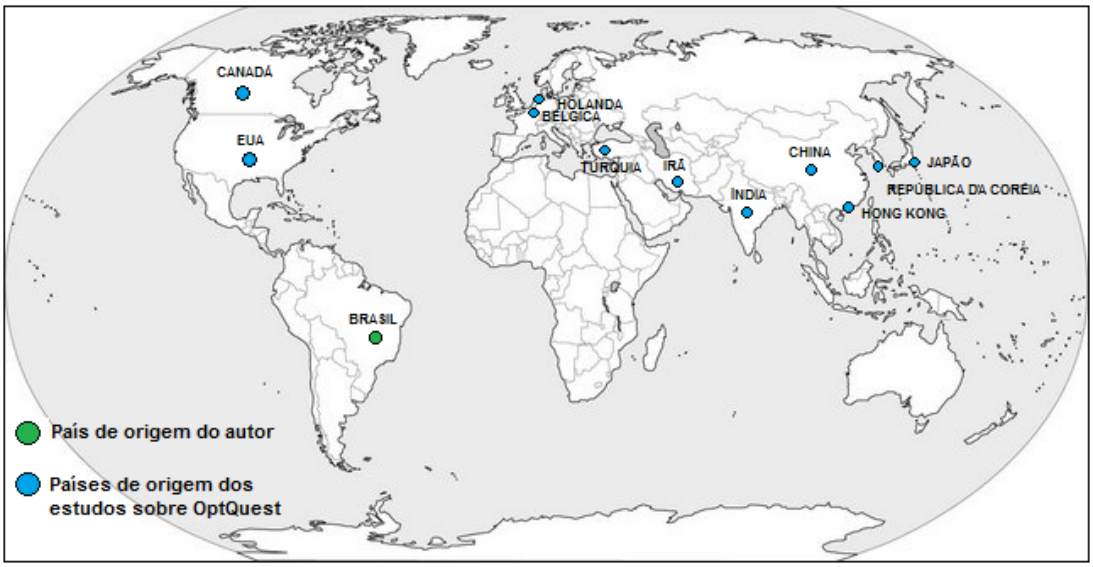


Figura 21. Países de origem dos estudos sobre aplicações do *OptQuest*®, segundo a Tabela 6
Fonte: o autor

2.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE EM OTIMIZAÇÃO

Como esclarecido na seção 2.2.2, o usuário de métodos de simulação-otimização não tem como saber se um ponto ótimo foi realmente alcançado. As rotinas de otimização com base em meta-heurísticas encaminham o problema em direção ao ótimo, mas não o garante. Portanto, a aplicação de métodos de otimização em ambientes simulados sempre traz certo nível de incerteza e que precisa ser analisado pelo pesquisador. A análise de sensibilidade é uma forma de avaliação do comportamento do modelo em função das configurações que ele pode apresentar.

Segundo Kleijnen (2005), a análise de sensibilidade, também chamada de “análise hipotética”, é definida neste como a investigação sistemática e global num modelo que se faz sobre a reação de saídas do modelo a drásticas mudanças nas entradas e/ou na estrutura do modelo.

Montevechi, Miranda e Friend (2012) também entende que a análise de sensibilidade pode ser interpretada como uma investigação sistemática das saídas do modelo, de acordo com as variáveis de entrada do modelo. Acrescenta que é feita uma avaliação de como as variáveis independentes afetam a variável dependente e identifica-se a amplitude e a intensidade do efeito entre elas.

Para a NobleProg Training Materials (2014), a análise de sensibilidade pode ser compreendida como a análise dos impactos no sistema modelado ao se fazer as alterações nos objetivos finais (por exemplo, redução de perdas, redução de custos, redução de estoques, etc.).

Kleijnen (2005) identifica que no intuito de se encontrar a solução ótima ou “quase” ótima, é necessário verificar um grande número de valores de parâmetros o que normalmente se torna uma tarefa exaustiva do ponto de vista computacional. Considerando-se que nem todas as variáveis de decisão são de igual importância em relação à resposta da variável que se deseja para otimizar, uma análise de sensibilidade pode ser levada a cabo no modelo de simulação, selecionando-se as variáveis que irão compor a otimização e delimitando-se o espaço de busca, ou seja, limitando-se o número de variáveis o que torna a pesquisa mais rápida e eficaz. Assim, pode-se focar a pesquisa nas variáveis de entrada que realmente têm um efeito significativo sobre uma determinada variável de resposta, reduzindo-se o número de experiências necessárias e o esforço computacional envolvido no processo.

Verifica-se, portanto, a possibilidade de se identificar indicadores de sensibilidade das variáveis de decisão do modelo baseando-se nas referências de simulação-otimização. O estudo também pretende encontrar uma forma de se avaliar a representatividade e relevância desses indicadores de desempenho para a identificação de gargalos na cadeia e para munir o tomador de decisão de direcionadores de gestão. Nesse interím, buscam-se os melhores parâmetros de entrada e melhores resultados de saída do modelo, identificando-se a configuração do sistema que produz os melhores desempenhos. E assim, a partir de uma análise de sensibilidade, verificam-se o nível de estabilidade dos indicadores de desempenho para a medição do desempenho da cadeia de suprimentos analisada e as suas capacidades de resposta. Interpretam-se os efeitos das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes mais significativas sobre cada indicador que as compreendem.

Portanto, para a proposta do presente estudo, a análise de sensibilidade pode contribuir com informações indispensáveis para a interpretação do efeito das variáveis dependentes mais significativas sobre o indicador que as compreendem.

CAPÍTULO 3. DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DO ESTUDO

A cadeia de suprimentos em estudo se insere no mercado mundial de minérios de ferro, especificamente o de pelotas. O *case*, bem como o modelo de simulação adotado, foram extraídos do trabalho de Oliveira Júnior (2011). Já a metodologia adotada e a problemática relacionada foram referenciadas a partir da obra de Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013).

Os tipos de minério de ferro comerciais se classificam de acordo com a granulometria em 4 classes:

- Granulado ou *Lump*: partículas mais grossas que variam de 6,35mm a 50 mm de diâmetro;
- Finos de minério de ferro ou *sinter feed*: partículas que variam de 0,15mm a 6,35mm de diâmetro, insumo para o processo siderúrgico de sinterização;
- Ultrafinos de minério de ferro ou *pellet-feed*: partículas finas e ultrafinas (inferiores a 15mm), geradas nas etapas de lavras, manuseio e transporte. É insumo para o processo siderúrgico de pelotização;
- Pelotas ou *pellets*: partículas finas e ultrafinas (entre 6,3 e 18mm), aglomeradas na forma esférica e geradas a partir do processo siderúrgicos de pelotização.

A **Figura 22** ilustra os processos de mineração e siderurgia na indústria de Produção de Aço, identificando a utilização dos diversos tipos de minério de ferro:

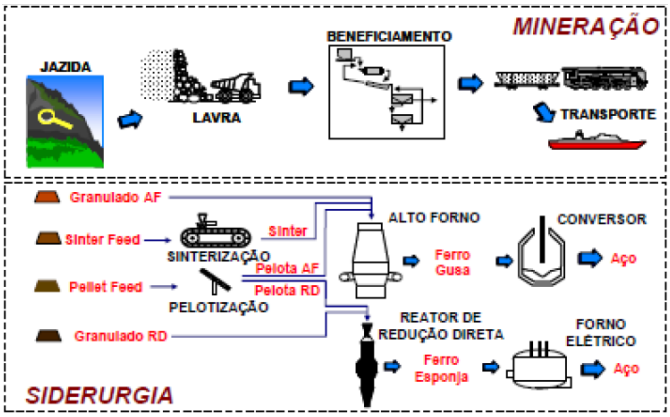


Figura 22. Rotas de Produção de Aço - Insumos e Produtos

Fonte: Oliveira Junior (2011)

A empresa do *case* foi a SAMARCO MINERAÇÃO S.A., uma empresa brasileira e sediada em Belo Horizonte – MG, iniciando o seu processo produtivo (lavra e beneficiamento) na unidade de Germano, nos Municípios de Mariana e Ouro Preto, também no Estado de Minas Gerais, e após transporte por dois minerodutos com extensão de 396 km cada, termina seu processo (pelotização e exportação de minério de ferro) na unidade industrial de Ponta Ubú, no Município de Anchieta/ES.

A **Figura 23** ilustra as operações da Samarco, com processos integrados desde as jazidas de Minas Gerais até o porto de Ubú no Espírito Santo, passando pelas áreas de beneficiamento, transporte, aglomeração, estocagem e embarque:

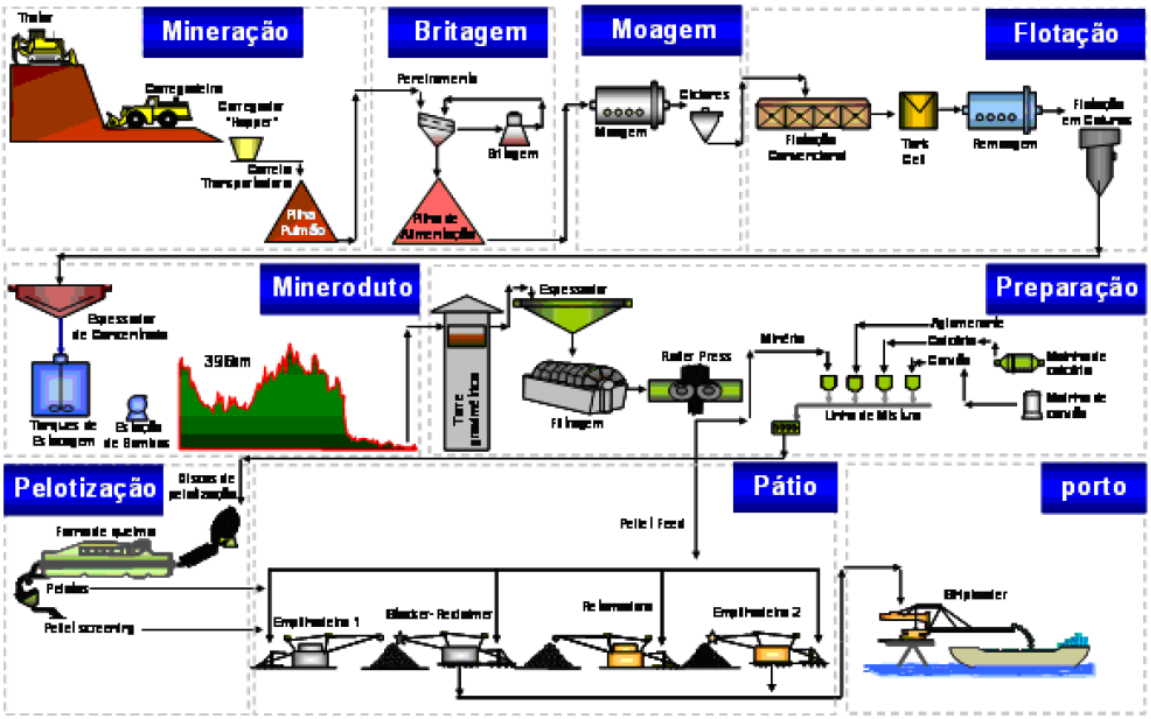


Figura 23. Fluxograma das operações da Samarco

Fonte: Oliveira Junior (2011)

Sobre a empresa modelo, foi selecionada para a realização da pesquisa operacional do estudo uma parte da cadeia de suprimentos de todo o processo produtivo: o suprimento de insumos. Além disso, em virtude da complexidade dessa cadeia em específico, o *case* avaliou a necessidade de simplificação dos processos de modelagem e simulação e concentrou os seus estudos nos insumos que alimentam o processo de pelotização do minério de ferro, por considerar que se trata de uma

etapa que demanda os insumos mais relevantes de todo o sistema, em termos de custo, complexidade de aquisição e riscos operacionais.

Detalhando o fluxo do processo da indústria de pelotização (**Figura 24**), desde a chegada do minério de ferro na Unidade Industrial da Ponta de Ubú até o embarque no Porto de Ubú, têm-se as seguintes atividades:

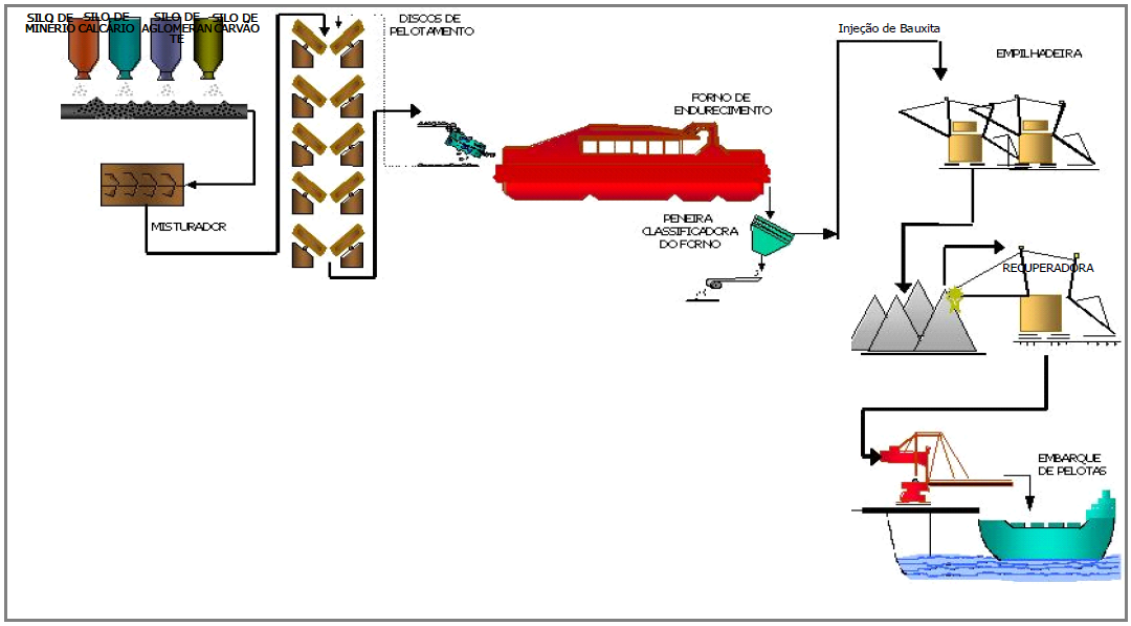


Figura 24. Fluxograma simplificado do processo de pelotização

Fonte: Oliveira Júnior (2011)

1) <u>Filtragem</u>: separação da água na mistura aquosa de minério de ferro concentrado proveniente dos minerodutos;
2) <u>Prensagem do *pellet-feed*</u>*:* Redução do tamanho das partículas provenientes da filtragem, passando a ser denominado *pellet-feed*;
3) <u>Transporte do *pellet-feed* até área de mistura</u>: realizada por meio de correias transportadoras;
4) <u>Mistura</u>: os principais insumos (carvão, calcário, bentonita e aglomerantes orgânicos) já preparados para consumo são adicionados ao *pellet-feed*;
5) <u>Transporte da mistura até as usinas de pelotização</u>: o material pós-mistura é transportado por correias para as três usinas de pelotização para a formação das pelotas;

6) Usinagem: onde se formam as pelotas (processo de aglomeração). Nesta etapa é necessária também a queima do insumo gás-natural para geração de calor;
7) Classificação das pelotas cruas: após primeira usinagem, as pelotas cruas (*green pellets*) são classificadas em mesas de rolos para ajuste da granulometria contratada, sendo que as pelotas maiores que 18mm ou menores que 8mm retornam ao processo de pelotização;
8) Endurecimento das pelotas enquadradas: as pelotas de tamanho padrão, entre 8 e 18 mm, são endurecidas, por meio de um processo térmico, em três fornos de pelotização do tipo grelha móvel;
9) Reclassificação das pelotas: após endurecidas, as pelotas são novamente classificadas em peneiras vibratórias para remoção de finos gerados durante o processo de queima;
10) Transporte ao pátio: por meio de correias transportadoras são levadas e empilhadas no pátio de estocagem;
11) Embarque: em navios atracados no porto de Ubú.

O *case* também analisou, diante do rol de insumos necessários para alimentação do processo de pelotização, a delimitação para a modelagem e simulação daqueles que tivessem influência relevante no desempenho logístico da cadeia de suprimentos. Assim, foram selecionados o calcário, a bentonita e o carvão mineral como insumos que, após preparação, são posteriormente misturados com o *pellet-seed*.

A **Figura 25** ilustra a cadeia de suprimentos de insumos do processo de pelotização da Samarco Mineração S.A.:

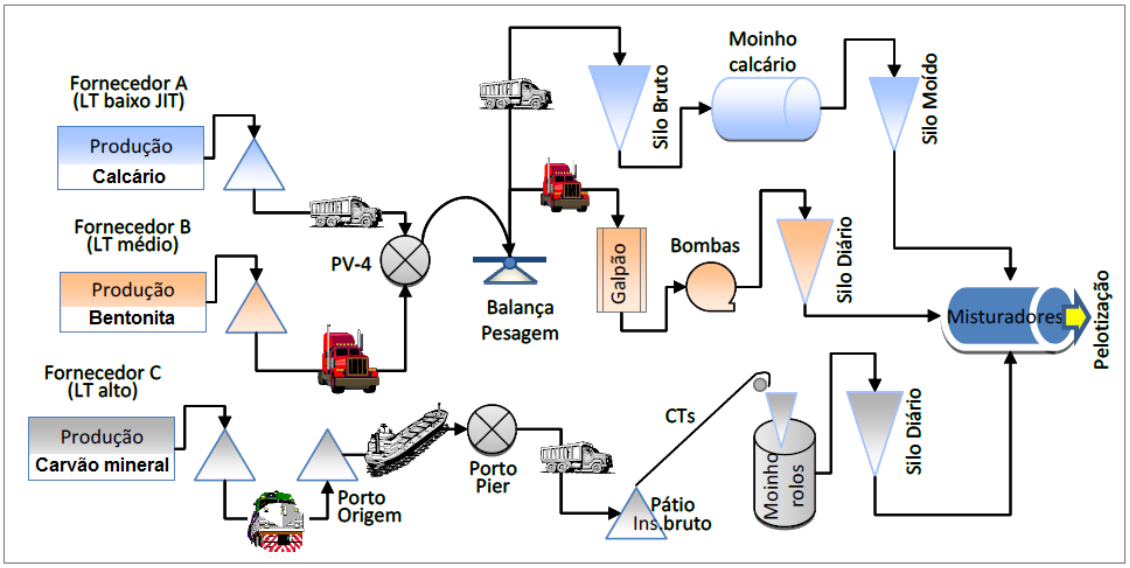


Figura 25. Cadeia de Suprimentos dos Insumos da Pelotização

Fonte: Oliveira Junior (2011)

O fluxo da cadeia de suprimentos dos insumos Calcário, Bentonita e Carvão Mineral, desde a extração, passando pela armazenagem na Unidade Industrial da Ponta de Ubú, até o embarque no Porto de Ubú, compreende as seguintes atividades:

Insumo Calcário

1) Extração: extração de rochas calcárias em jazidas da região de Cachoeiro de Itapemirim-ES;
2) Beneficiamento: Moagem na planta industrial do fornecedor por meio de britador, moinho de martelo e vibratórios. Objetiva-se o enquadramento de especificação;
3) Estocagem no pátio do fornecedor: empilhamento em área coberta e preparação para embarque;
4) Carregamento em carretas: por meio de tratores;
5) Transporte à Samarco: Transporte à Unidade Industrial de Ponta de Ubú por meio de carretas;
6) Espera no pátio externo da Samarco: devido à indisponibilidade da balança de pesagem ou da área de descarga;
7) Pesagem: pesagem de uma carreta por vez, por meio de balança rodoviária;

8) Descarga: em área própria dentro da Unidade Industrial da Ponta de Ubú, sendo possível duas carretas atendidas por vez. Após descarga, a carreta retorna ao fornecedor para novo carregamento, se necessário;
9) Transporte do insumo ao Silos Brutos: por meio de correias transportadoras;
10) Armazenagem em Silos Brutos: acondicionamento e empilhamento em silos de calcário bruto;
11) Moagem para consumo: em moinho de bolas para enquadramento do calcário para uso;
12) Transporte do insumo aos Silos Diários: encaminhamento dos calcários enquadrados para armazenagem, por meio de correias transportadoras;
13) Armazenagem em Silos Diários: acondicionamento e empilhamento em silos de calcário moído e disponibilização para consumo. Também denominados de Silos Moídos.

Insumo Bentonita

1) Extração: extração de bentonita em jazidas da região de Campina Grande-PB e Vitória da Conquista-BA, sendo o primeiro mais distante;
2) Secagem*:* realizada na planta industrial, a bentonita é espalhada em área pavimentada e em céu aberto;
3) Beneficiamento*:* realizado na planta industrial, a partir da adição de barrilha e moagem com moinhos pendulares, para enquadramento de especificação;
4) Armazenagem: em galpão fechado, acondicionado em *big-bags*;
5) Carregamento: por meio de empilhadeiras;
6) Transporte à Samarco: Transporte à Unidade Industrial de Ponta de Ubú por meio de carretas do tipo graneleiros, com lona ou fechadas, de bi-trens ou por meio de treminhões;
7) Espera no pátio externo da Samarco: devido à indisponibilidade da balança de pesagem ou da área de descarga;
8) Pesagem: pesagem de uma carreta por vez, por meio de balança rodoviária;
9) Descarga: em galpão fechado com uso de empilhadeira e ponte rolante. Após descarga, a carreta retorna ao fornecedor para novo carregamento, se necessário;
10) Armazenagem: armazenagem dos *big-bags* em galpão fechado e coberto;

11) Desensacagem: por meio de desensacadeiras, a bentonita é retirada de dentro dos *big-bags*;
12) Transporte do insumo aos Silos Diários: encaminhamento da bentonita *in natura*, por meio de bombas para transporte pneumático;
13) Armazenagem em Silos Diários: acondicionamento e empilhamento em silos de bentonita e disponibilização para consumo.

Insumo Carvão mineral

1) Extração: extração de carvão mineral realizada em minas subterrâneas ou em jazidas à céu aberto da África do Sul;
2) Beneficiamento*:* realizado na planta industrial, a partir da eliminação de impurezas do carvão *in* natura (lavagem), moagem para enquadramento de especificação e peneiramento com separadores magnéticos;
3) Estocagem no pátio fornecedor: em áreas descobertas;
4) Carregamento em trem: vagões abertos e em quantidade necessária para o volume a transportar;
5) Transporte ao porto exportador: por meio de trem;
6) Descarregamento no porto exportador: por meio de viradores de vagão (*cardumpers*);
7) Armazenagem no pátio exportador: em áreas pré-determinadas chamadas *slots*;
8) Embarque no porto exportador: em navios do tipo graneleiros;
9) Transporte marítimo: do porto da África do Sul até o Porto de Ubú em Anchieta/ES;
10) Descarregamento no porto importador: por meio de guindastes de bordo do navio. Moegas e caminhões. Ao final da descarga, a pesagem é feita a partir da medição de calado do navio antes e depois do descarregamento;
11) Transporte do insumo ao pátio de estocagem da Samarco: por meio de caminhões que recebem o carvão mineral sob as moegas em píer do Porto de Ubú;
12) Estocagem em área descoberta na Samarco: a carga é previamente basculhada;
13) Movimentação da carga no pátio de estocagem: por meio de tratores de esteira para a formação de pilhas maiores e preparação para moagem;

14) Transporte do insumo ao Silo de carvão bruto: por meio de correias transportadoras;
15) Moagem para consumo: em moinhos de rolos, com o objetivo de enquadramento de especificação;
16) Transporte do insumo aos Silos Diários: após moído, o carvão mineral é encaminhado aos Silos Diários por meio de correias transportadoras para reposição de estoques;
17) Armazenagem em Silos Diários: acondicionamento em silos de carvão moído e disponibilização para consumo.

Com o fim de atender ao objeto central desta dissertação, qual seja o de testar a metodologia de simulação-otimização proposta e aplicar o plano experimental elaborado para analisar e comparar os seus resultados, focou-se apenas na cadeia de suprimento do insumo carvão mineral, uma vez que já é por si só a mais completa e complexa cadeia entre os insumos, composta por elementos logísticos diversos como estoques, recursos, processos e intermodalidade.

Dessa forma, todo o levantamento de dados e de informações, bem como todos os modelos de simulação e de otimização adotados, criados e adaptados neste trabalho para a aplicação de metodologia proposta, se referem à cadeia de suprimento do carvão mineral.

3.1. MODELO DE SIMULAÇÃO UTILIZADO

O simulador define como ponto focal do estudo as seguintes atividades: previsão de demanda e aquisição dos insumos necessários ao planejamento de produção da empresa; produção, armazenagem e transporte desses insumos por parte de seus principais fornecedores; e, por fim, recebimento, manuseio, preparação e consumo pela empresa.

Não foram retratadas na modelagem e simulação do estudo de caso, as etapas do processo de pelotização relativas à mistura de insumos, produção, armazenagem e distribuição de pelotas por parte da empresa.

Para representar o fluxo de processo da cadeia do insumo selecionado em modelos de simulação, foram segmentados três grandes módulos, denotando as etapas: fornecedor, transportadora e cliente (**Figura 26**).

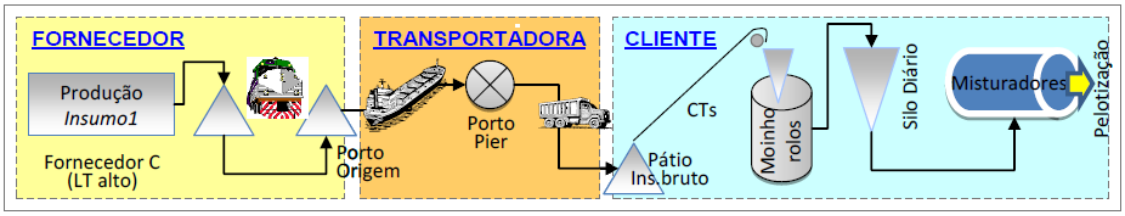


Figura 26. Módulos Fornecedor, Transportadora e Cliente

Fonte: Oliveira Junior (2011)

Os módulos, por sua vez, são compostos por submódulos que deverão retratar as atividade do processo e suas interconexões. Por fim, cada submódulo possui um fluxograma de eventos. A **Figura 27** ilustra os fluxogramas de atividades integradas entre as etapas "Fornecedor", "Transportadora" e "Cliente", para a cadeia de suprimentos.

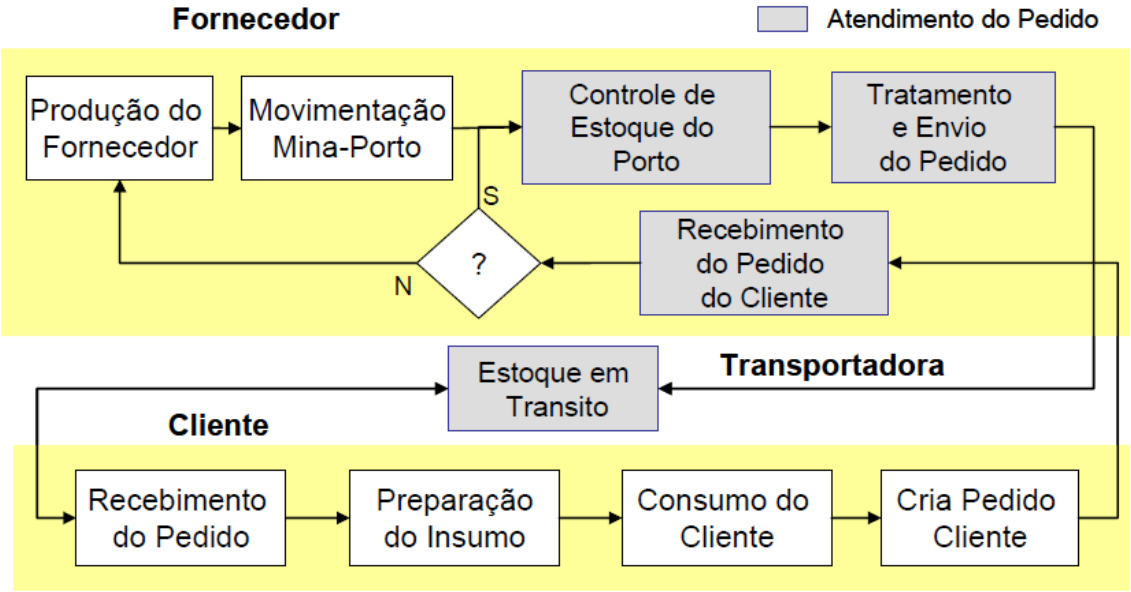


Figura 27. Fluxograma da Cadeia de Suprimentos do Insumo Carvão mineral

Fonte: Oliveira Junior (2011)

As atividades são compreendidas em submódulos como já mencionado no parágrafo anterior e são descritas a seguir:

ELO DO FORNECEDOR

A) Produção do Fornecedor: gestão dos estoques e demanda de produção na Mina pelo controle do nível de estoque de segurança e do nível de estoque de trabalho do Fornecedor;

B) Movimentação Mina-Porto: Gestão de vagões e formação de composição de trem para transporte Mina-Porto do insumo e reposição do estoque do Porto do Fornecedor. Demanda de transporte pelo controle do nível de estoque de trabalho no Porto do Fornecedor;

ELO FORNECEDOR / TRANSPORTADORA

C) Atendimento do Pedido: recepção dos pedidos pelo Fornecedor e criados pela Mineradora, contratação de navio para despacho do pedido de reposição de estoque no Pátio de insumo Bruto na Mineradora e transporte marítimo Porto Fornecedor-Porto Mineradora;

C.1) Recebimento de pedidos da Mineradora: Processamento dos pedidos feitos pela Mineradora para a reposição do nível de estoque de trabalho no Pátio de insumo bruto. Pedidos oriundos da equipe de gestão de estoques do Pátio.

C.2) Controle de Estoque do Porto: Atualização dos estoques e acompanhamento da necessidade de reposição do nível de estoque de trabalho no Porto do Fornecedor. Requisição de abastecimento oriundos da Mina.

C.3) Tratamento e envio do pedido: Elaboração de documentação da carga para embarque no Porto do Fornecedor e liberação do navio para desembarque e descarregamento no Porto da Mineradora;

C.4) Estoque em trânsito: carga transferida para o modal marítimo. Persiste desde o início do carregamento no Porto do Fornecedor até o fim do descarregamento no Porto da Mineradora. A atualização de seu nível se dá com o carregamento ou descarregamento nos portos.

ELO DA MINERADORA

D) Recebimento do pedido pelo Cliente: Desembaraço aduaneiro para descarregamento da carga do navio e transporte por caminhão até o pátio de

insumo bruto, onde serão depositados os volumes de insumo descarregados do navio. Por fim, liberação do navio, após o descarregamento de todo o volume transportado;

E) Preparação do insumo para consumo: Processo de transferência e moagem do insumo bruto na Unidade de moinhos para em sequência ser depositado nos Silos Diários, a partir do controle do nível de estoque nos Silos Diários de insumo moído. Esses Silos trabalham em sua capacidade máxima, a jusante sendo subtraído pelo consumo da Mineradora para produção de pelotas de minério de ferro e a montante sendo adicionado com a reposição de moídos do insumo.

F) Consumo do cliente: Atendimento das solicitações de insumo pelo Misturador da fábrica, a partir de uma campanha de consumo ininterrupta. Havendo interrupção na campanha de produção por falta de estoque de moídos nos Silos Diários, o tempo de parada é contabilizado como perda de produção e sua duração registrada;

G) Criação de pedidos pela Mineradora: Pedidos de reposição do nível de estoque de trabalho no pátio de insumo bruto da Mineradora controlados pela equipe de gestão de estoques do pátio.

3.1.1. MODELO COMPUTACIONAL DA SIMULAÇÃO

Os modelos de simulação foram desenvolvidos no software *Arena*®, originários do documento eletrônico *SC_HLT_Aumento Consumo 2 - Insumo 3.doe* (Oliveira Júnior, 2011).

3.1.2. VARIÁVEIS E RECURSOS DO MODELO COMPUTACIONAL

As variáveis são elementos dos modelos que podem assumir qualquer valor dentro de suas condições, características e restrições. Sua importância na simulação ora é para controlar o processo iterativo (variáveis independentes), ora é para responder o que se pretende obter do modelo (variáveis dependentes). E é possível também a partir daquelas primeiras e da sua manipulação obter, num processo iterativo de simulação-otimização, resultados do objetivo que se pretende, no caso, a otimização

(minimização ou maximização) das variáveis operacionais e de desempenho da cadeia de suprimento modelada.

Sendo assim, extrai-se do simulador e consolida-se nas **Tabelas 7** e **8**, as variáveis e os recursos para os modelos da cadeia de suprimento do insumo Carvão:

Tabela 7. Variáveis do modelo computacional de simulação: Insumo Carvão

Variáveis do modelo computacional de simulação Insumo Carvão		
Variável	**Descrição**	**Unidade**
producao_hora	Produção média horária do Fornecedor	ton/h
est_max_fornecedor	Nível de Estoque limite na Mina Fornecedor	ton
est_alvo_fornecedor	Nível de Estoque de reposição na Mina do Fornecedor	ton
est_atual_fornecedor	Nível de Estoque atualizado na Mina do Fornecedor	ton
est_atual_cliente	Nível de Estoque atualizado nos Silos Diários na Mineradora	ton
consumo_cliente	Taxa de consumo horário de insumo na Mineradora	ton/h
interrupcao_producao	Duração de interrupções da produção de minério de ferro na Mineradora	h
est_max_cliente	Nível de Estoque limite nos Silos Diários na Mineradora	ton
qtd_transf_bruta_cliente	Taxa de moagem na Mineradora	ton/h
est_atual_bruto_cliente	Nível de Estoque atualizado no Pátio de Insumo Bruto na Mineradora	ton
est_max_bruto_cliente	Nível de Estoque limite no Pátio de Insumo Bruto na Mineradora	ton
est_alvo_bruto_cliente	Nível de Estoque ide reposição no Pátio de Insumo Bruto na Mineradora	ton
est_transito	Volume de Estoque em trânsito no navio e nos caminhões carvão, do Porto de descarregamento ao Pátio de Insumo Bruto na Mineradora	ton
pedido_residual	Restante do pedido aguardando atendimento	ton
pedido_pendente	Mostrador do volume do pedido em atendimento	ton
qtd_caminhoes	Quantidade de caminhões utilizados	unid.
porc_est_fornecedor	Porcentagem do estoque na Mina do Fornecedor em relação ao estoque limite.	%
Porc_est_bruto_cliente	Porcentagem do estoque no Pátio de Insumo Bruto na Mineradora em relação ao estoque limite	%
Porc_est_cliente	Porcentagem do estoque nos Silos Diários na Mineradora em relação ao estoque limite	%
est_segur_fornecedor	Nível de alerta do Estoque na Mina do Fornecedor	ton
necessita_producao	Necessidade de produção adicional do Fornecedor por solicitação à jusante	ton
cap_caminhao_carvao	Capacidade unitária de transporte do caminhão carvão, para transporte do Porto de descarregamento ao Pátio de Insumo Bruto na Mineradora	ton/unid.
total_descarreg_navio	Volume descarregado do navio no porto de descarregamento da Mineradora	ton
qtd_vagoes	Quantidade de vagões utilizados na composição do trem de numa determinada viagem, para carregamento da Mina do Fornecedor e transporte/descarregamento no Porto do Fornecedor	unid.
cap_vagao	Capacidade unitária de trasnporte de vagão utilizado na composição do trem de numa determinada viagem, para carregamento da Mina do Fornecedor e transporte/descarregamento no Porto do Fornecedor	ton/unid.
cap_navio	Capacidade unitária de trasnporte de navio utilizado na viagem do Porto do Fornecedor ao Porto do de descarregamento na Mineradora	ton/unid.
est_atual_porto	Nível de Estoque atualizado no Porto do Fornecedor	ton
porc_est_porto	Porcentagem do estoque no Porto do Fornecedor em relação ao estoque limite	%
est_alvo_porto	Nível de Estoque ide reposição no Porto do Fornecedor	ton
est_max_porto	Nível de Estoque limite no Porto do Fornecedor	ton
pedido_processando	Pedido em atendimento pelo Fornecedor, medido pela quantidade de vagões utilizados em cada viagenm	unid.
qtd_restante_navio	Volume restante no navio aguardando descarregamento	ton
necessidade_pedido	Volume do próximo pedido para atendimento do Porto do Fornecedor	ton
numero_pedido	Ordem do pedido	número
taxa_carregamento	Taxa de carregamento de navio no Porto do Fornecedor	ton/h
consumo_total	Total de insumo consumido na Mineradora	ton
mostra_marca1	Lead Time em determinado atendimento entre o Porto de descarregamento da Mineradora e o Pátio de Insumo Bruto	h
mostra_marca2	Lead Time em determinado atendimento entre o Porto de carregamento do Fornecedor e o Pátio de Insumo Bruto	h
cap_caminhao	Variável não utilizada no modelo original	-
Porc_est_atual_bruto_cliente	Variável não utilizada no modelo original	-
carvao	Variável não utilizada no modelo original	-
Variable 74	Variável não utilizada no modelo original	-

Fonte: o autor

Tabela 8. Recursos do modelo computacional de simulação: Insumo Carvão

Recursos do modelo computacional de simulação		
Insumo Carvão		
moinho	unidade de moinhos na Mineradora	unid.
Moega	moega de descarregamento no Porto da Mineradora	unid.
caminhao_carvao	caminhões para carregamento no Porto da Mineradora e descarregamento no Pátio de Insumo Bruto	unid.
car_dumper	viradores de vagões para descarregamento no porto do Fornecedor	unid.
carregador_vagao	carregador de vagão na Mina do Fornecedor	unid.
descarrega_navio	Guindastes descarregamento do navio no Porto da Mineradora	unid.
caminhao	não utilizado no modelo original	-
cc	não utilizado no modelo original	-
Resourse19	não utilizado no modelo original	-

Fonte: o autor

3.1.3. PARÂMETROS INICIAIS DO MODELO

Capacidade dos recursos e dos modais:

Capacidade dos recursos e dos modais de transporte

Os recursos e os modais de transporte estão disponíveis desde o fornecedor até a entrega no estoque bruto do cliente. Referem-se à logística de movimentação de insumos brutos até sua devida estocagem na Mineradora. Na cadeia em estudo, são utilizados o recurso rodoviário e os modais ferroviário e marítimo.

Capacidade dos recursos de carregamento e de descarregamento

As operações de carga e descarga na Mina de insumo bruto e nos portos também influenciam no desempenho da cadeia. Estão presentes na cadeia, equipamentos para o carregamento de vagões na Mina do Fornecedor, descarregamento de vagões no Porto do Fornecedor e descarregamento de navio no Porto da Mineradora. O carregamento no Porto do Fornecedor não é fornecido por recurso, mas sim por um processo interno de transferência do porto para o porão do navio. Sua descrição já foi apresentada no item que tratou da capacidade das variáveis de processo.

Capacidade dos recursos de transformação

Tratam-se dos elementos que processam os insumos brutos, beneficiando-os e acabando-os na forma de insumo processado, preparando-os para o consumo. Na cadeia em tela, a unidade de moinhos é o único recurso até o consumo pelo Misturador de insumos com a função de processar o produto.

Segue a **Tabela 9** que discrimina os dados dos recursos e modais disponíveis e parametrizados no modelo de simulação:

Tabela 9. Capacidade dos recursos e dos modais no Fornecedor e na Mineradora.

CAPACIDADE DE RECURSOS E MODAIS								
Elo da cadeia	**Segmento**	**Local na cadeia**	**Recurso / Modal**		**Representação no modelo de simulação**		**Capacidade**	
			Item	**Tipo**	**Descrição**	**Forma**	**Valor**	**Unid.**
FORNECEDOR	**carregamento ou descarregamento**	**Mina de carvão mineral**	Carregadores de Vagões de trem	Recurso	*carregador_vagao*	Recurso	1	unid.
		Porto do Fornecedor	Descarregadores de vagões de trem	Recurso	*car_dumper*	Recurso	3	unid.
	Transporte	**Mina - Porto do Fornecedor**	Trem (vagões)	Modal	*qtd_vagoes*	Variável	≥ 30 e ≤ 400	unid.
					cap_vagao	Variável	60	ton.
TRANSPORTADORA	**Transporte**	**Porto do Fornecedor - Porto da Mineradora**	Navio *	Modal	*cap_navio*	Variável	Normal (50.000 ; 5.000) (1 navio por viagem)	ton
MINERADORA	**carregamento ou descarregamento**	**Porto da Mineradora**	Descarregadores de navio	Recurso	*descarrega_navio*	Recurso	1 Unidade de descarregamento (2 a 3 guindastes)	unid.
			Moegas	Recurso	*moega*	Recurso	3	unid.
	Transporte	**Porto da Mineradora - Pátio de Insumo Bruto**	Caminhões de carvão	Recurso	*caminhao_carvao*	Recurso	20	unid.
					cap_caminhao_carvao	Variável	25	ton
	Transformação	**Pátio de Insumo Bruto - Silos Diários**	Unidade de moinhos	Recurso	*moinho*	Recurso	1 unidade de moinhos (3 moinhos)	unid.

* O navio, por ser um serviço obtido por meio de contrato de afrentamento por viagem, foi considerado nesse estudo como de controle da Mineradora para fins de gestão e acompanhamento dos pedidos e do seu atendimento. Portanto, é modal disponível, porém não de propriedade da Mineradora.

Fonte: o autor

Capacidade de armazenagem:

Aqui podem existir até quatro tipos de variáveis de armazenagem por ponto de estoque, a saber: (a) estoque máximo; (b) estoque alvo; (c) estoque atual e (d) estoque de segurança. O estoque máximo é o limite superior de volume que se

demanda armazenar em determinado local. Estoque alvo é o nível de armazenamento de trabalho a partir do qual se solicita reposições para a garantia de escoamento da produção. Estoque atual é o dado atualizado do nível de estoque em determinado instante. No caso do modelo, a cadeia já inicia sua corrida com algum estoque atual residual. Por fim, estoque de segurança é o mínimo nível de estoque que se busca conservar para compensar as flutuações de demanda.

Segue a **Tabela 10** que discrimina os dados de estoques parametrizados no modelo de simulação:

Tabela 10. Capacidade de armazenagem no Fornecedor e na Mineradora.

CAPACIDADE DE ARMAZENAGEM						
Elo da cadeia	**Local na cadeia**	**Estoque**	**Representação no modelo de simulação**		**Capacidade**	
			Descrição	**Forma**	**Valor**	**Unid.**
FORNECEDOR	**Mina de carvão mineral**	Estoque máximo	*est_max_fornecedor*	Variável	40.000	ton
		Estoque inicial	*est_atual_fornecedor*	Variável	8.000	ton
		Estoque de segurança	*est_segur_fornecedor*	Variável	10.000	ton
		Nível de Estoque de trabalho	*est_alvo_fornecedor*	Variável	30.000	ton
	Porto do Fornecedor	Estoque máximo	*est_max_porto*	Variável	90.000	ton
		Estoque inicial	*est_atual_porto*	Variável	20.000	ton
		Nível de Estoque de trabalho	*est_alvo_porto*	Variável	60.000	ton
MINERADORA	**Pátio Bruto de Insumo Bruto**	Estoque máximo	*est_max_bruto_cliente*	Variável	90.000	ton
		Estoque inicial	*est_atual_bruto_cliente*	Variável	20.000	ton
		Nível de Estoque de trabalho	*est_alvo_bruto_cliente*	Variável	60.000	ton
	Silos Diários de Moídos	Estoque máximo	*est_max_cliente*	Variável	900	ton
		Nível de Estoque de trabalho	*est_atual_cliente*	Variável	600	ton

Fonte: o autor

Capacidade de processos:

Capacidade dos processos de produção

São identificados quatro principais processos produtivos na cadeia: Produção na Mina de insumo bruto do Fornecedor; Carregamento de navio no Porto de embarque do Fornecedor; Gestão de estoque de insumo bruto no pátio de insumo bruto da Mineradora; e Consumo horário de insumo moído para a produção de pelotas de minério de ferro. A **Tabela 11** os apresenta, além das identidades das variáveis e suas capacidades iniciais no modelo.

Tabela 11. Capacidade de processos de produção no Fornecedor e na Mineradora.

CAPACIDADE DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO						
Elo da cadeia	**Local na cadeia**	**Processo**	**Representação no modelo de simulação**		**Capacidade**	
			Descrição	**Forma**	**Valor**	**Unid.**
FORNECEDOR	**Mina de carvão mineral**	Produção horária de Insumo Bruto	*producao_hora*	Variável	Normal (400 ; 41,3)	ton/h
	Porto do Fornecedor	Taxa de carregamento de insumo bruto em navio	*taxa_carregamento*	Variável	Normal (10.000 ; 2000)	ton/h
MINERADORA	**Pátio de Insumo Bruto**	Gestão de estoque bruto	*gestao do estoque*	Processo	Normal (2 ; 1)	h/pedido
	Misturador de insumos	Consumo horário de insumo moído para produção de pelotas	*consumo_cliente*	Variável	Normal (62 ; 3)	ton/h

Fonte: o autor

Capacidade dos processos de operação de recursos

São identificados seis principais processos de uso e manuseio dos recursos: carregamento de vagão de trem na Mina do Fornecedor; descarregamento de vagão no *slot* do Porto do Fornecedor; descarregamento de navio no Porto da Mineradora; descarregamento das moegas no Porto da Mineradora; movimentação dos caminhões de carvão entre o Porto e o Pátio de insumo bruto da Mineradora; e moagem de carvão bruto na Unidade de moinhos entre o Pátio e os Silos Diários da

Mineradora. A **Tabela 12** os apresenta, além dos recursos associados, suas identificações no modelo e as suas capacidades.

Tabela 12. Capacidade de processos de operação de recursos no Fornecedor e na Mineradora

CAPACIDADE DE PROCESSOS DE OPERAÇÃO DE RECURSOS								
Elo da cadeia	**Local na cadeia**	**Processo**	**Representação no modelo de simulação**		**Recurso associados**		**Capacidade**	
			Descrição	**Forma**	**Recurso**	**Descrição no modelo de simulação**	**Valor**	**Unid.**
FORNECEDOR	**Mina de carvão mineral**	Carregamento de vagão de trem	*carrega vagao de trem*	Processo	Carregadores de vagão de trem	*carregador_vagao*	Triangular (2 ; 5 ; 7)	min/vagão
	Porto do Fornecedor	Descarregamento de vagão de trem no *slot*	*descarrega vagao no slot*	Processo	Descarregadores de vagões de trem	*car_dumper*	Triangular (15 ; 20 ; 30)	min/vagão.descarregador
MINERADORA	**Porto da Mineradora**	Descarregamento de navio	*- rota garagem moega* *- rota porto patio* *- rota patio moega* *- carrega caminhao carvao* *- libera navio*	Processos	Descarregadores de navio	*descarrega_navio*	**Recurso em uso quando há navio aguardando:** *rota garagem moega* : Normal (10 ; 1) *rota porto patio* : Normal (13 ; 7) *rota patio moega* : Normal (7 ; 3) **Recurso em uso quando há navio aguardando:** *carrega caminhao carvao* : Normal (11 ; 4) *libera navio* : 0	min/caminhão de carvão.rota - min/caminão de carvão.moega - min
		Descarregamento de moega	*carrega caminhao carvao*	Processo	Moegas	*moega*	Normal (11 ; 4)	(min/caminão de carvão.moega)
	Porto da Mineradora - Pátio	Movimentação dos caminhões de carvão	*- rota garagem moega* *- rota porto patio* *- rota patio moega* *- Llibera navio*	Processos	Caminhões de carvao	*caminhao_carvao*	**Recurso em uso quando há navio aguardando:** *rota garagem moega* : Normal (10 ; 1) *rota porto patio* : Normal (13 ; 7) *rota patio moega:* Normal (7 ; 3) **Recurso em uso quando há navio aguardando:** *libera navio* : 0	min/caminhão de carvão.rota min
	Pátio de Insumo Bruto - Silos Diários	Moagem do carvão bruto	*qtd_transf_bruta_cliente*	Variável	Unidade de moinhos (3 moinhos)	*moinho*	Normal (62 ; 3)	1º - N (17 ; 3) 2º - N (20 ; 3) 3º - N (25 ; 3)	(ton/h)

Fonte: o autor

Capacidade dos processos de operação de modais

São identificados dois processos de uso e manuseio dos modais de transporte: transporte de trem entre a Mina e o Porto do Fornecedor; e o transporte de navio entre o Porto do Fornecedor e o Porto da Mineradora. A **Tabela 13** os apresenta, além dos modais associados, suas identificações no modelo e as suas capacidades.

Tabela 13. Capacidade de processos de operação de modais na cadeia.

CAPACIDADE DE PROCESSOS DE OPERAÇÃO DE MODAIS							
Elo da cadeia	**Local na cadeia**	**Processo**	**Representação no modelo de simulação**		**Modal associado**	**Capacidade**	
			Descrição	**Forma**	**Modal**	**Valor**	**Unid.**
FORNECEDOR	**Mina - Porto do Fornecedor**	Transporte de trem	*rota_fornecedor_porto*	Processo	Trem (vagões)	Normal (5 ; 2)	h/viagem
TRANSPORTADORA	**Porto do Fornecedor - Porto da Mineradora**	Transporte de navio	*rota_porto carregamento_cliente*	Processo	Navio	Normal (480 ; 72)	h/viagem

Fonte: o autor

3.1.4. INDICADORES DE DESEMPENHO IDENTIFICADOS

A geração de indicadores de desempenho de processos de gerenciamento de cadeias logísticas se motiva pela importância da mensuração do desempenho individual das principais variáveis que retratam a utilização dos recursos correspondentes a cada elo da cadeia e a operação dos processos de conexão entre eles, além da relevância de se monitorar e controlar a qualidade das atividades logísticas na cadeia, conquistando-se maior integração entre os elos que a compõem.

O estudo realizado por Oliveira Júnior (2011) identificou indicadores para avaliação do desempenho da cadeia, segmentando-os em 4 áreas:

1) Produção;
2) Armazenagem ou estoque na cadeia;
3) Transporte;
4) Atendimento do suprimento.

Os indicadores de produção identificados foram:

1a) Interrupção da produção de pelotas de minério de ferro na Mineradora
1b) Consumo específico nas campanhas de produção de pelotas de minério de ferro
1c) Capacidade de moagem dos moinhos na Mineradora
1d) Capacidade de produção de insumo bruto na Mina do Fornecedor

Os indicadores de armazenagem ou estocagem foram:

2a) Estoque médio de insumo moído nos silos diários da Mineradora
2b) Estoque médio de insumo bruto no pátio de insumo bruto da Mineradora
2c) Estoque médio de insumo bruto no porto de embarque do Fornecedor
2d) Estoque médio de insumo bruto na Mina do Fornecedor
2e) Estoque em trânsito entre o Porto do Fornecedor e o Pátio de insumo bruto da Mineradora

Os indicadores de transporte foram:

3a) Quantidade de veículos (carretas, bi-trem, vagões) por pedido
3b) *Lead-time* de recebimento entre chegada do insumo no Porto da Mineradora e o descarregamento no Pátio de insumo bruto da Mineradora

Os indicadores de atendimento do suprimento foram:

4a) *Lead-time* total por pedido entre a criação do pedido pela Mineradora e o descarregamento no Pátio de insumo bruto da Mineradora

3.2. METODOLOGIA ADOTADA

O processo de resolução do problema da pesquisa seguirá a lógica de estruturação proposta por Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013) (**Figura 28**).

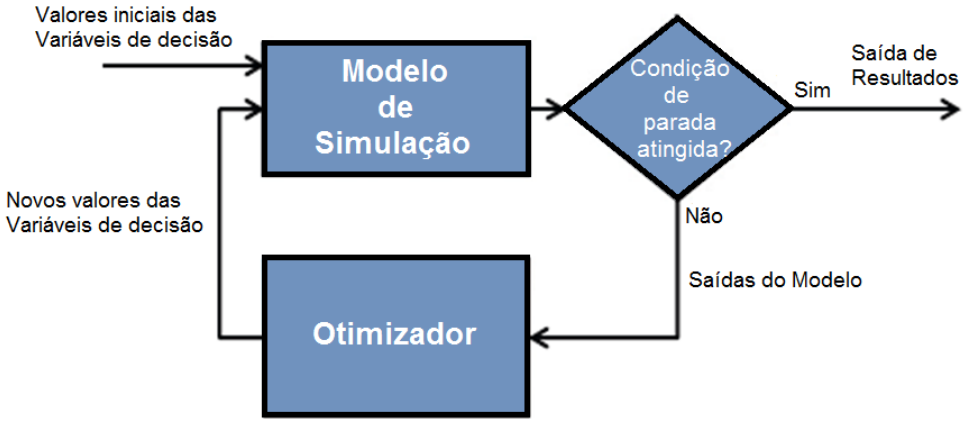


Figura 28. Estrutura da Simulação-Otimização adotada para a pesquisa
Fonte: Adaptado de Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013)

Para os fins experimentais, adotou-se a mesma referência, em que se abordou a realização de testes experimentais de otimização do modelo de simulação e avaliação de cenários de mudanças de capacidade de recursos, equipamentos e processos a montante e à jusante dos *buffers* de estocagem.

No estudo em referência, os fatores de mudança utilizados foram relacionados à capacidade de processos, a saber: a capacidade máxima de processamento do

forno de aquecimento do processo de laminação e o tempo de processo desse forno, em que se variaram os níveis de recebimento de lâminas no forno e os tempos de aquecimento no forno, avaliando-se ao final os resultados minimizados de custo de estoques e a configuração dos níveis de estoques para esses resultados. Também se realizou análise da sensibilidade dos custos totais de estocagem em relação à variação dos custos de manutenção dos estoques.

3.3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para a definição do problema, verificou-se que o intento desta pesquisa se aproxima em muito ao estudo feito por Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013). Devido a essa última se tratar da indústria siderúrgica e identificar a capacidade do sistema de produção como variável de decisão para minimização dos custos, interessou realizar uma avaliação da aplicação da mesma metodologia ao caso específico desta pesquisa para responder os objetivos propostos.

Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013) abordou o problema de determinar o nível de estoques iniciais em empresa siderúrgica produtora de bobinas e placas de aço, antes de iniciar a campanha de produção. Objetivou otimizar os custos de estoques e também de ociosidade de processo de fabricação. A finalidade de sua pesquisa foi desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão para auxiliar na tomada de decisões estratégicas e operacionais de cadeias de suprimento semelhantes a da produção de acabados de aço.

Destaca-se na pesquisa em referência o trabalho de investigação dos níveis de estoque e propostas de potenciais alterações no processo fabril para reduzir os custos totais. Utilizou para isso um modelo de simulação para desenhar os fluxos de processos e um otimizador, no caso o *OptQuest*®, para refinar as soluções do problema até se conquistar o objetivo. Concluiu que os testes realizados sugerem que significativas economias de custo diárias são possíveis, modificando as práticas atuais de estocagem e capacidades de processo de produção.

O problema desta pesquisa gira em torno da problemática de otimização do desempenho da cadeia de suprimento a partir da manipulação dos níveis de

armazenamento nos *buffers* de estocagem, o que depende dos recursos disponíveis, da capacidade de atendimento dos processos e do tempo despendido para as atividades.

Nesse contexto, apresenta-se a **Figura 29** que ilustra um *buffer* de estocagem cercado por processos à montante e processos à jusante e seu papel protetor entre os processos:

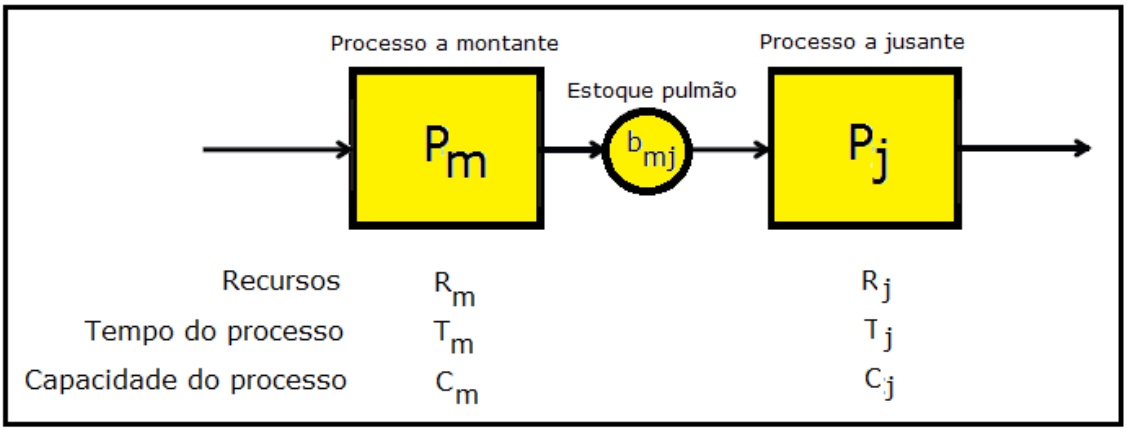


Figura 29. Representação esquemática do funcionamento dos estoques pulmão

Fonte: o autor

Assim, reconhece-se que um dos elementos da cadeia em que há estressante trabalho para gerenciamento do desempenho operacional e da capacidade de escoamento da produção é a armazenagem, principalmente aqueles pontos de estocagem situados estrategicamente no meio da cadeia para se formarem um “pulmão” de garantia de continuidade do fluxo produtivo, da forma mais eficaz e efetiva possível.

Por exemplo, a interrupção da produção na cadeia em estudo por paradas não programadas, ou seja, por paralisações imprevistas e que causam grande impacto no faturamento do negócio, podem gerar perdas de lucros por falta de atendimento do consumidor final, em diversas vezes por falhas no processo de gerenciamento dos níveis e reposições dos estoques ao longo da cadeia. Isso é um problema que pode ser evitado com um planejamento e ferramenta eficaz de tomada de decisão.

Outras variáveis de desempenho têm semelhante valor gerencial como o *Lead time* médio dos pedidos, o consumo da fábrica para produção de pelotas de minério de ferro, o nível de utilização dos recursos e o nível médio de aproveitamento da capacidade disponível de estocagem no Pátio. Portanto, os *buffers* de armazenagem são uma opção valiosa para a mitigação de problemas desses tipos na cadeia, principalmente quando bem gerenciada.

Numa mesma cadeia, seja no elo fornecedor, no elo fabril ou no elo consumidor, é possível coexistirem uma ou mais locações de armazenagem que possam fazer esse serviço. Esses “estoques pulmão” são demandados quantos forem percebidos os pontos potenciais de gargalos operacionais.

No ambiente de estudo desta pesquisa, a cadeia do suprimento do carvão, por ser mais complexa em relação aos outros insumos (calcário e bentonita por exemplo), demanda grande necessidade de *buffers*. Nela, foram identificados quatro: Os galpões da Mina do Fornecedor que armazenam insumo bruto no aguardo de solicitações do porto, neste estudo denominado de estoque na Mina do Fornecedor (Estoque M.F.); os *slots* no porto de origem que recebe e armazena o insumo descarregado dos trens, neste estudo denominado de estoque no Porto do Fornecedor (Estoque P.F.); o Pátio de Insumo Bruto, que recebem o insumo descarregado dos caminhões, neste estudo denominado de estoque no Pátio de insumo bruto da Mineradora (Estoque P.B.M.); e os Silos Diários que recebem por meio de correias transportadoras e armazenam o insumo advindo do Pátio e moído pela unidade de moinhos, neste estudo denominado de estoque nos Silos Diários da Mineradora (Estoque S.D.M.).

A abordagem desta pesquisa foi motivada pela análise do conjunto dos 4 *buffers inventories* existentes na cadeia e seus efeitos nas operações e no desempenho dos recursos disponíveis e dos processos existentes.
Na **Figura 30**, está ilustrado o posicionamento dos *buffers* de estocagem da cadeia de suprimento de carvão:

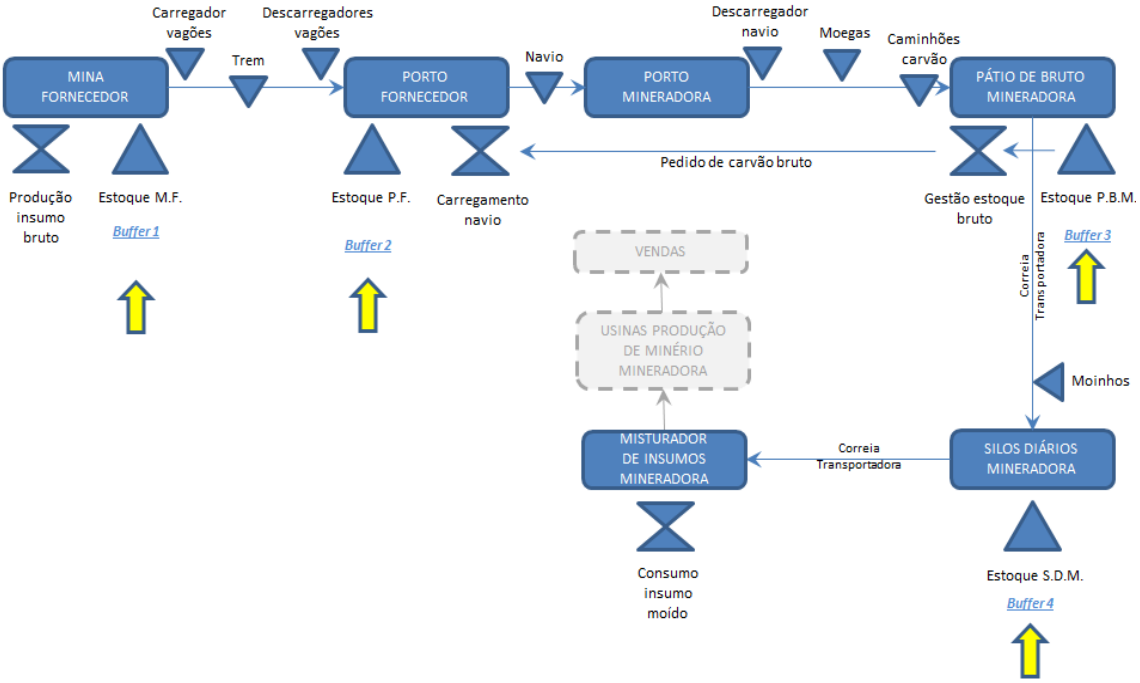


Figura 30. *Buffers* de estocagem, recursos e processos da cadeia de suprimento do insumo carvão

Fonte: o autor

Os estoques na Mina do Fornecedor, denotados pelas variáveis do modelo *est_atual_fornecedor, est_segur_fornecedor, est_alvo_fornecedor* e *est_max_fornecedor*, são gerenciados com base em duas situações: (a) solicitação de reposição do estoque para atender a demanda do Porto do Fornecedor quando não houver insumo bruto suficiente em estoque da Mina do Fornecedor. Neste caso a composição do estoque se cessa quando atendida a demanda do porto por completo; (b) solicitação de reposição ao nível de estoque de trabalho quando o nível atualizado do estoque atingir patamar inferior ao do nível do estoque de segurança. A retirada devido à demanda é feita a partir do carregamento de vagões para atendimento de demanda do Porto Fornecedor.

São, portanto, estoques da classe de matérias-primas, de tipo cíclico, com uso de contingência aplicada aos níveis de estoque de trabalho, gerenciados de forma puxada no cenário de demanda de reposições periódicas, repetidas e não instantâneas, com *lead time* entre o da solicitação e a conclusão da composição do estoque.

A **Figura 31** a seguir que demonstra os elementos e o plano de gerenciamento dos estoques na Mina do Fornecedor:

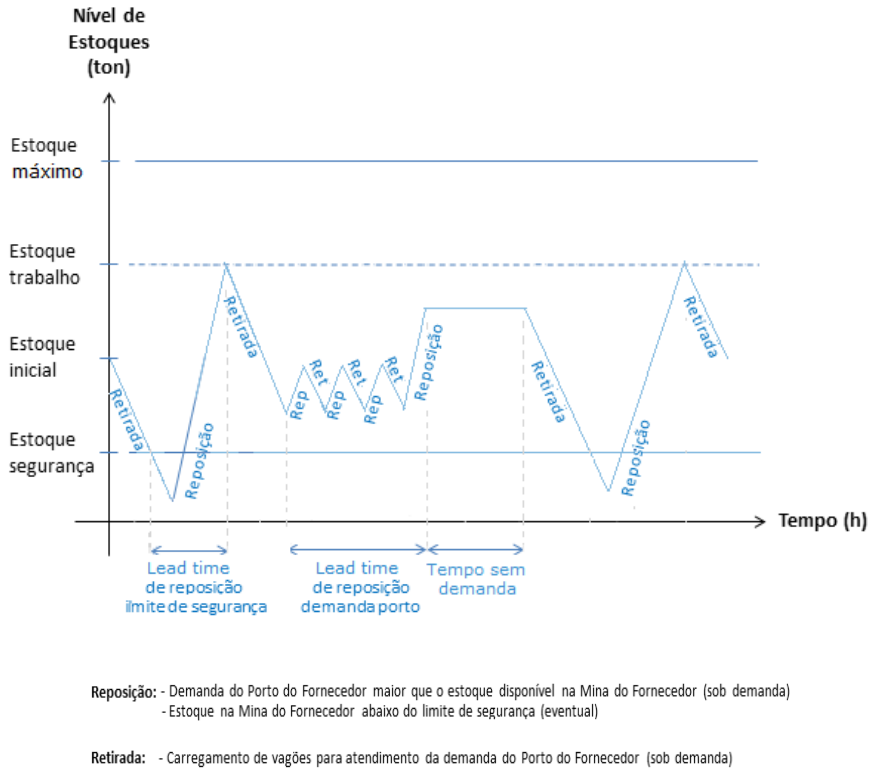


Figura 31. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo bruto na Mina do Fornecedor
Fonte: o autor

Os estoques no Porto do Fornecedor, denotados pelas variáveis do modelo *est_atual_porto, est_alvo_porto* e *est_max_porto*, são gerenciados com base na solicitação de reposição ao nível de estoque de trabalho quando o nível atualizado do estoque atingir patamar inferior a ele. A retirada devido à demanda é feita a partir do carregamento de navio para atendimento de pedido do Pátio de Insumo Bruto da Mineradora, de forma contínua em cada atendimento.

São, portanto, estoques da classe de matérias-primas, de tipo cíclico, com uso de contingência aplicada aos níveis de estoque de trabalho, gerenciados de forma puxada no cenário de demanda de reposições periódicas, repetidas e não instantâneas, com *lead time* entre o da solicitação e a conclusão da composição do estoque.

A **Figura 32** a seguir demonstra os elementos e o plano de gerenciamento dos estoques no Porto do Fornecedor:

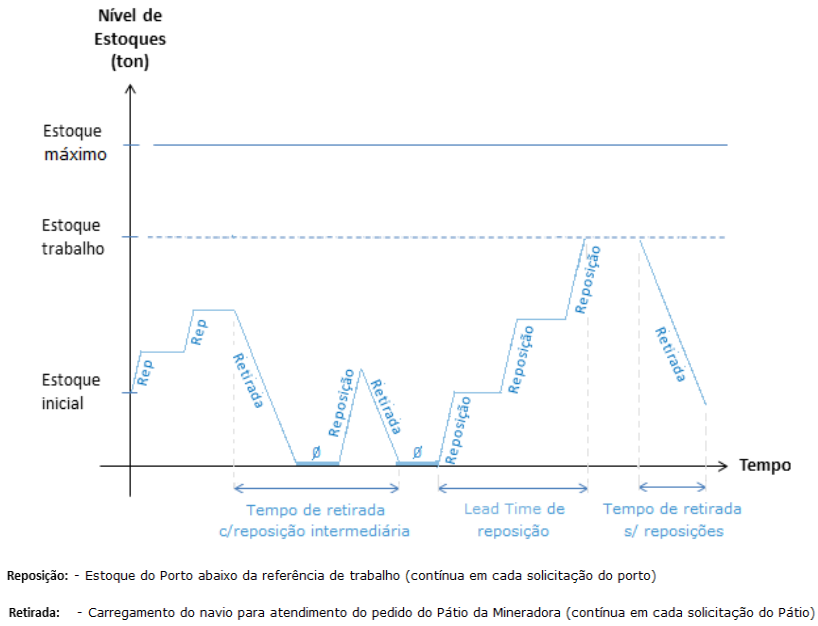


Figura 32. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo bruto no Porto do Fornecedor
Fonte: o autor

Os estoques no Pátio de insumo bruto da Mineradora, denotados pelas variáveis do modelo *est_atual_bruto_cliente, est_alvo_bruto_cliente* e *est_max_bruto_cliente*, são gerenciados com base no seguinte critério: pedidos de reposição ao nível de estoque de trabalho quando o nível atualizado do estoque somado ao estoque em trânsito contido no navio em viagem de pedido anterior precisar de mais um navio completo de carga para retornar ao nível de trabalho. A retirada devido à demanda é feita a partir da transferência para a unidade de moinhos, de forma contínua enquanto tiver capacidade de estocagem disponível nos Silos Diários de moídos.

São, portanto, estoques da classe de matérias-primas, de tipo cíclico associado ao tipo em trânsito, com uso de contingência aplicada aos níveis de estoque de trabalho, gerenciados de forma puxada no cenário de demanda de reposições periódicas, repetidas e não instantâneas, com *lead time* entre o pedido e a conclusão da composição do estoque.

A **Figura 33** a seguir demonstra os elementos e o plano de gerenciamento dos estoques no Pátio de insumo bruto da Mineradora:

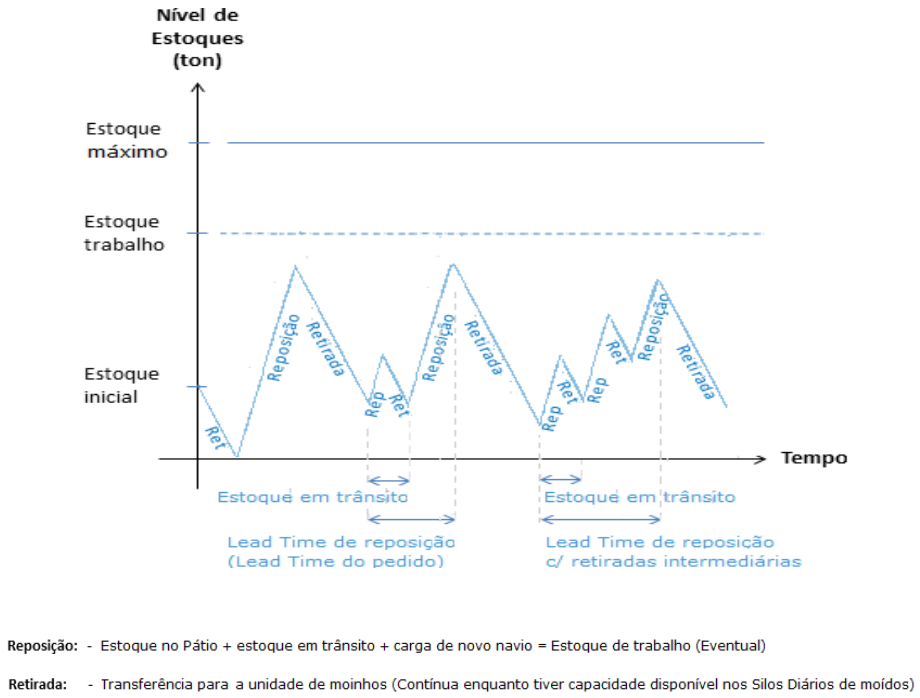


Figura 33. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo bruto no Pátio de insumo bruto da Mineradora

Fonte: o autor

Os estoques nos Silos Diários da Mineradora, denotados pelas variáveis do modelo *est_atual_cliente* e *est_max_cliente*, são gerenciados com base em dois condicionantes: (a) primeiramente existência de capacidade disponível nos Silos Diários; (b) em segundo lugar, existência de estoque no Pátio de insumo bruto. A reposição e a retirada são contínuas, até que seja interrompida ou por lotação dos Silos Diários (interrupção de reposição) ou por falta de insumos moídos nos Silos Diários (interrupção do consumo / interrupção da produção de minério de ferro).

São, portanto, estoques da classe de produtos acabados (considerando o Misturador de insumos como cliente), de tipo perpétuo (reposição a princípio ininterrupta), gerenciados de forma puxada no cenário de demanda de reposições periódicas, repetidas e instantâneas, porém com *lead time* entre a solicitação, passando pela moagem até seu efetivo recebimento.

A **Figura 34** a seguir demonstra os elementos e o plano de gerenciamento dos estoques nos Silos Diários da Mineradora:

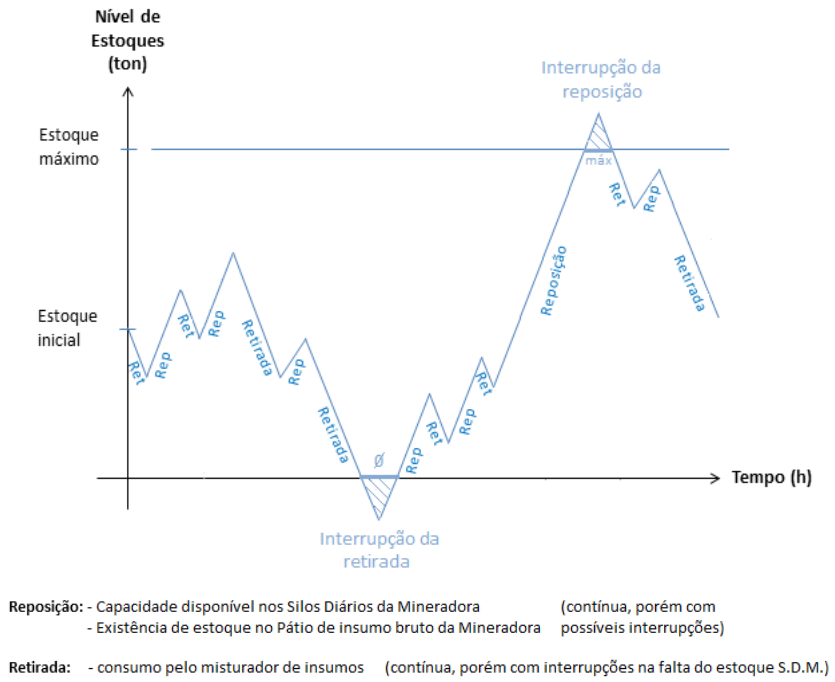


Figura 34. Gráfico do perfil de gerenciamento do estoque de insumo moído nos Silos Diários da Mineradora

Fonte: o autor

Conclui-se que análise do desempenho da cadeia a partir dos *buffers* está intimamente relacionada com os recursos disponíveis e com os processos imediatamente à montante e à jusante de cada ponto de estoque.

Quanto aos recursos, merece relevância a sua avaliação, pois, considerando que a empresa *case* possui capacidade de estocagem maior que a usada rotineiramente (Estoques de trabalho ≤ Estoques máximos) e considerando que os processos de produção e de operações compatibilizam seus rendimentos com o rítimo que é imprimido ao fluxo de carvão na cadeia, limitados obviamente ao limite de suas capacidades, pode haver problemas de obsolescência de equipamentos ou de ociosidade operacional das instalações o que os torna um elemento logístico de grande importância para o gerenciamento da cadeia.

Da mesma forma, as respostas da cadeia como o *Lead time* médio dos pedidos, o consumo da fábrica para produção de pelotas de minério de ferro, o nível de utilização dos recursos, o nível médio de aproveitamento da capacidade disponível de estocagem no Pátio e a frequência de interrupções inesperadas devido à falta de insumo para o consumo das usinas, merecem tratamento equânime.

Contudo, delimita-se o problema desse estudo com o objetivo de determinar os novos níveis de estoque de trabalho nos *buffers* de estocagem contidos em toda a cadeia de suprimento do insumo carvão, desde a Mina do Fornecedor até o Misturador de insumos na Mineradora, de forma a aumentar a produtividade de mistura dos insumos para a produção de pelotas de minério de ferro pelas Usinas a jusante, a partir da maximização do consumo anual de carvão mineral, dentro de um cenário de sazonalidade do mercado mundial de minerais metálicos e relevante custo de produção que imponha às empresas da cadeia de produção de aço, reavaliação de seus ativos.

Destaca-se que não é de interesse do autor elaborar propostas de soluções reais à empresa, mesmo porque muitas premissas podem estar simplificadas neste estudo, mas apenas aplicar a metodologia proposta e avaliar seus efeitos numa cadeia de suprimentos complexa desse tipo.

Para atendimento desta proposta, são analisados quais os parâmetros iniciais do modelo de simulação criado por Oliveira Júnior (2011) seriam utilizados como ponto de partida. Em sua pesquisa, criou primeiramente um modelo *"As Is"* e, a partir dele, atualizou apenas os parâmetros da campanha de consumo de insumo moído, tendo como motivador de seu problema: a previsão de ampliação da capacidade de produção de pelotas de minério de ferro, que na época era de 22 Milhões de toneladas, para um patamar de 32 Milhões de toneladas no curto ou médio prazos. Dessa forma, o seu modelo *"As Is"* tornou-se apenas referência da situação real da empresa em 2010 e um novo modelo foi adaptado com a nova taxa de consumo horário de carvão pelo Misturador, identificado como Cenário C.e3.0.

Assim, toda a sua análise visou partir já do cenário desafiador previsto do aumento da demanda de consumo de insumo, passando pelos resultados esperados caso

nenhuma ação fosse tomada e terminando com a análise de propostas de mudanças em diversos elementos da cadeia para simular os resultados e comparar as soluções para a continuidade operacional da cadeia.

Em função do trabalho de Oliveira Júnior (2011) trabalhar com a previsão de ampliação de capacidade, analisou-se se para a presente pesquisa se adotaria a capacidade disponível em 2010 (22 Milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro) ou a capacidade ampliada de 32 Milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro.

Diante disso, verificou-se que na página 12 do Relatório Anual de Sustentabilidade do exercício do ano de 2014, elaborado e divulgado pela Samarco Mineração S.A. a capacidade nominal de produção chegou a 30,5 Milhões de toneladas anuais de pelotas de minério de ferro, após a entrada em operação do Projeto Quarta Pelotização (P4P), em 2014. Sendo assim, mais razoável que seja base de modelo para esta dissertação, aquele com os parâmetros adequados ao cenário de ampliação da capacidade produtiva da empresa *case*.

Pela dificuldade de acesso a informações mais atualizadas da empresa e a composição de equipamentos e processos da cadeia nos dias atuais, e como não se objetiva especificamente a empresa em si, adotou-se apenas para fins da aplicação metodológica que nenhuma mudança de estoques, recursos e/ou processos foi implementada desde 2010.

CAPÍTULO 4. ESTRUTURA LÓGICA E MODELAGEM DO PROBLEMA

4.1. COMPONENTES DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Os elementos constituintes da cadeia, quais sejam os *Buffers* de estocagem, recursos, modais e processos da cadeia do insumo carvão são especificados na **Tabela 14**:

Tabela 14. Componentes do modelo da cadeia de suprimento

COMPONENTES DE CONTROLE E DE RESPOSTAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO					
Grupo		**Elo da cadeia**	**Local na cadeia**	**Item**	**Identificação no modelo de simulação-otimização**
ESTOQUES		**Fornecedor**	**Mina de carvão mineral**	Nível de Estoque de trabalho Mina	*Buffer 1*
			Porto do Fornecedor	Nível de Estoque de trabalho Porto	*Buffer 2*
		Mineradora	**Porto da Mineradora**	Nível de Estoque de trabalho Pátio	*Buffer 3*
			Silos Diários de Moídos	Nível de Estoque de trabalho Silos Diários	*Buffer 4*
RECURSOS		**Fornecedor**	**Mina de carvão mineral**	carregadores de vagões	*Recurso 1*
			Porto do Fornecedor	descarregadores de vagões	*Recurso 2*
		Mineradora	**Porto da Mineradora**	descarregadores de navio	*Recurso 3*
			Porto da Mineradora	Moegas	*Recurso 4*
			Porto Mineradora - Pátio	caminhões de carvão	*Recurso 5*
			Porto Mineradora - Pátio	Unidade de moinhos	*Recurso 6*
MODAIS		**Fornecedor**	**Mina - Porto do Fornecedor**	trem (vagões)	*Modal 1*
		Transportadora	**Porto do Fornecedor - Porto da Mineradora**	Navio	*Modal 2*
PROCESSOS	**PRODUÇÃO**	**Fornecedor**	**Mina de carvão mineral**	Produção de insumo bruto	*Processo P1*
			Porto do Fornecedor	Carregamento de bruto em navios	*Processo P2*
		Mineradora	**Pátio de Insumo Bruto**	Gestão de estoque bruto	*Processo P3*
			Silos Diários de Moídos	Consumo de insumo moído	*Processo P4*
	OPERAÇÃO DE RECURSOS	**Fornecedor**	**Mina de carvão mineral**	Carregamento de vagão de trem	*Processo R1*
			Porto do Fornecedor	Descarregamento de vagão de trem no *slot*	*Processo R2*
		Mineradora	**Porto da Mineradora**	Descarregamento de navio	*Processo R3*
			Porto da Mineradora	Descarregamento de moega	*Processo R4*
			Porto da Mineradora - Pátio	Movimentação dos caminhões de carvão	*Processo R5*
			Pátio de Insumo Bruto - Silos Diários	Moagem do carvão bruto	*Processo R6*
	OPERAÇÃO DE MODAIS	**Fornecedor**	**Mina - Porto do Fornecedor**	Transporte de trem	*Processo M1*
		Transportadora	**Porto do Fornecedor - Porto da Mineradora**	Transporte de navio	*Processo M2*

Fonte: o autor

Portanto, na cadeia destacam-se quatro *buffers* de estocagem, seis recursos, dois modais e doze processos. Para o objetivo proposto são selecionados como componentes para a formulação do problema de otimização os 4 *buffers (*estoque na Mina do Fornecedor – *Buffer 1*; estoque no Porto do Fornecedor – *Buffer* 2; estoque no Pátio de insumo bruto da Mineradora – *Buffer* 3; e estoque de insumo moído nos Silos Diários da Mineradora – *Buffer* 4). Também são adicionadas quatro restrições de capacidade máxima de estocagem (estoque máximo na Mina do Fornecedor; estoque máximo no Porto do Fornecedor; estoque máximo no Pátio de insumo bruto na Mineradora; e estoque máximo nos Silos Diários da Mineradora).

4.2. ESTRUTURAÇÃO DA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA

O modelo de simulação-otimização apresenta a simulação e a otimização como parceiras na melhoria da cadeia, mas cada qual com suas funções. O trânsito entre ambos é de tal maneira que um só começa quando termina o outro, ou seja, eles se imputam dados. Esse conceito somente se torna eficaz caso haja uma condição factível que se satisfaça para, aí sim, encerrar o *looping* iterativo, fornecendo o resultado ótimo esperado.

A condição de parada escolhida para o modelo é a delimitação do número de iterações, cujo critério de definição é apresentado no tópico 5.1.4.

Para o propósito deste estudo, adapta-se esse fluxo com outro interesse que é o de se obter, na configuração ótima gerada pelo otimizador, resultados do mesmo modelo de simulação para outros elementos da cadeia, como o percentual de utilização dos recursos e dos modais de transporte, além de valores de respostas de algumas variáveis de desempenho.

A **Figura 35** apresenta a estrutura de trabalho da simulação-otimização do *case*.

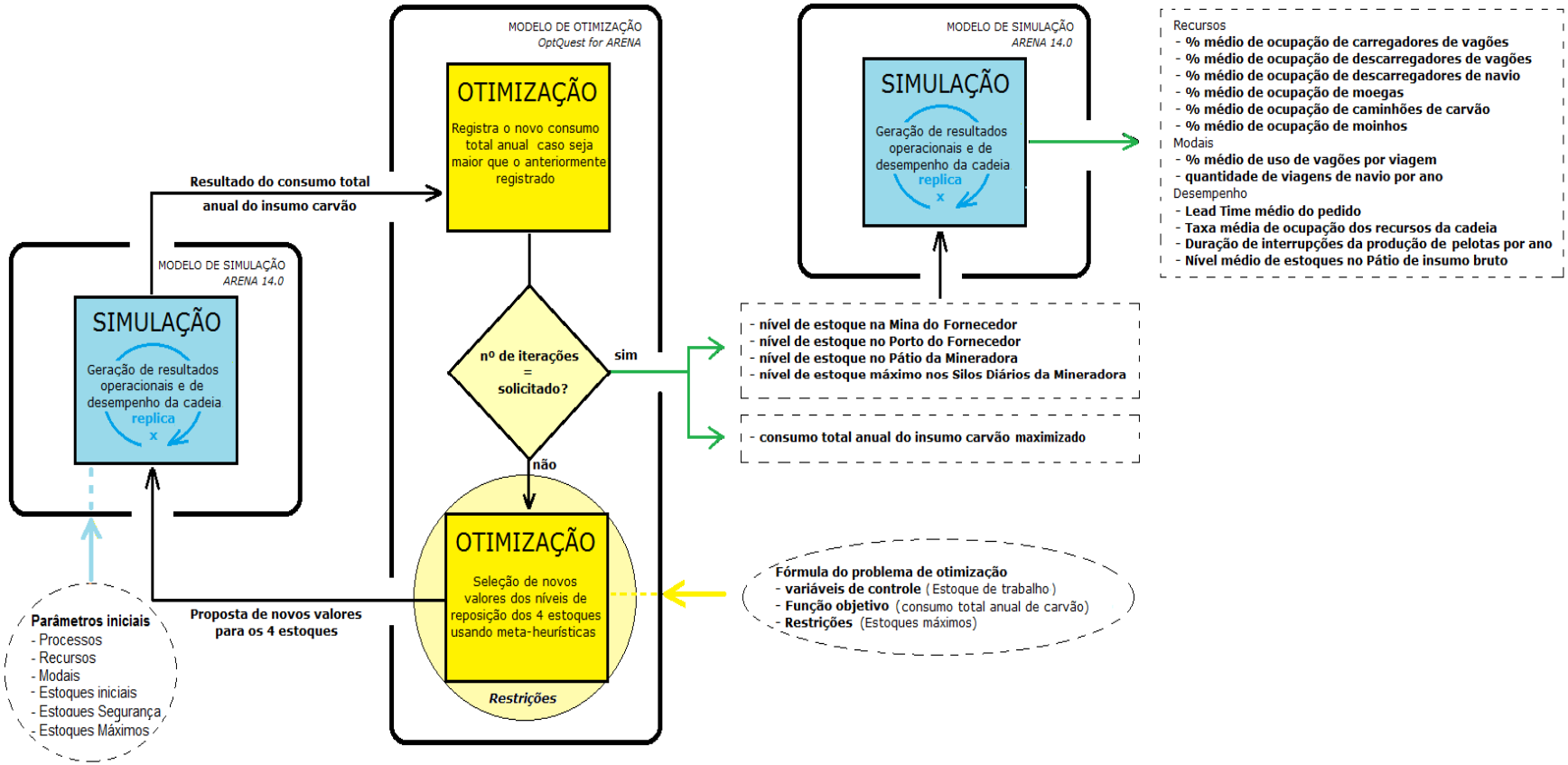


Figura 35. Estrutura de simulação-otimização do problema

Fonte: o autor

4.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de simulação-otimização proposto conjuga dois fluxos de respostas: uma da otimização propriamente dita e outra da simulação de respostas operacionais e de desempenho da cadeia nas situações otimizadas.

Assim sendo, formula-se o problema de otimização como representado no **Quadro 5**:

Quadro 5. Formulação do problema de otimização da cadeia do insumo carvão

Fórmula do modelo de Otimização	Unid.	Variáveis do modelo de Simulação
Variáveis de controle e decisão		
Nível de Estoque Bruto na Mina do Fornecedor	ton	*est_alvo_fornecedor*
Nível de Estoque Bruto no Porto do Fornecedor	ton	*est_alvo_porto*
Nível de Estoque Bruto no Pátio de Insumo Bruto da Mineradora	ton	*est_alvo_bruto_cliente*
Nível de Estoque Máximo de Moídos nos Silos Diários da Mineradora	ton	*est_max_cliente*
Objetivo		
Maximizar consumo total anual do insumo carvão	ton/ano	*consumo_total*
Restrições		
Nível de Estoque na Mina do Fornecedor ≤ Estoque Máximo na Mina do Fornecedor		*est_alvo_fornecedor ≤ est_max_fornecedor*
Nível de Estoque no Porto do Fornecedor ≤ Estoque Máximo no Porto do Fornecedor		*est_alvo_porto ≤ est_max_porto*
Nível de Estoque no Pátio da Mineradora ≤ Estoque Máximo no Pátio da Mineradora		*est_alvo_bruto_cliente ≤ est_max_bruto_cliente*
Nível de Estoque Máximo nos Silos Diários da Mineradora ≤ 900 ton		*est_max_cliente ≤ 900 ton*

Fonte: O autor

A **Figura 36** ilustra na cadeia de suprimentos, os elementos constituintes da formulação do problema de otimização (variáveis de decisão na cor amarela, Função-objetivo na cor verde e restrições na cor vermelha):

PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

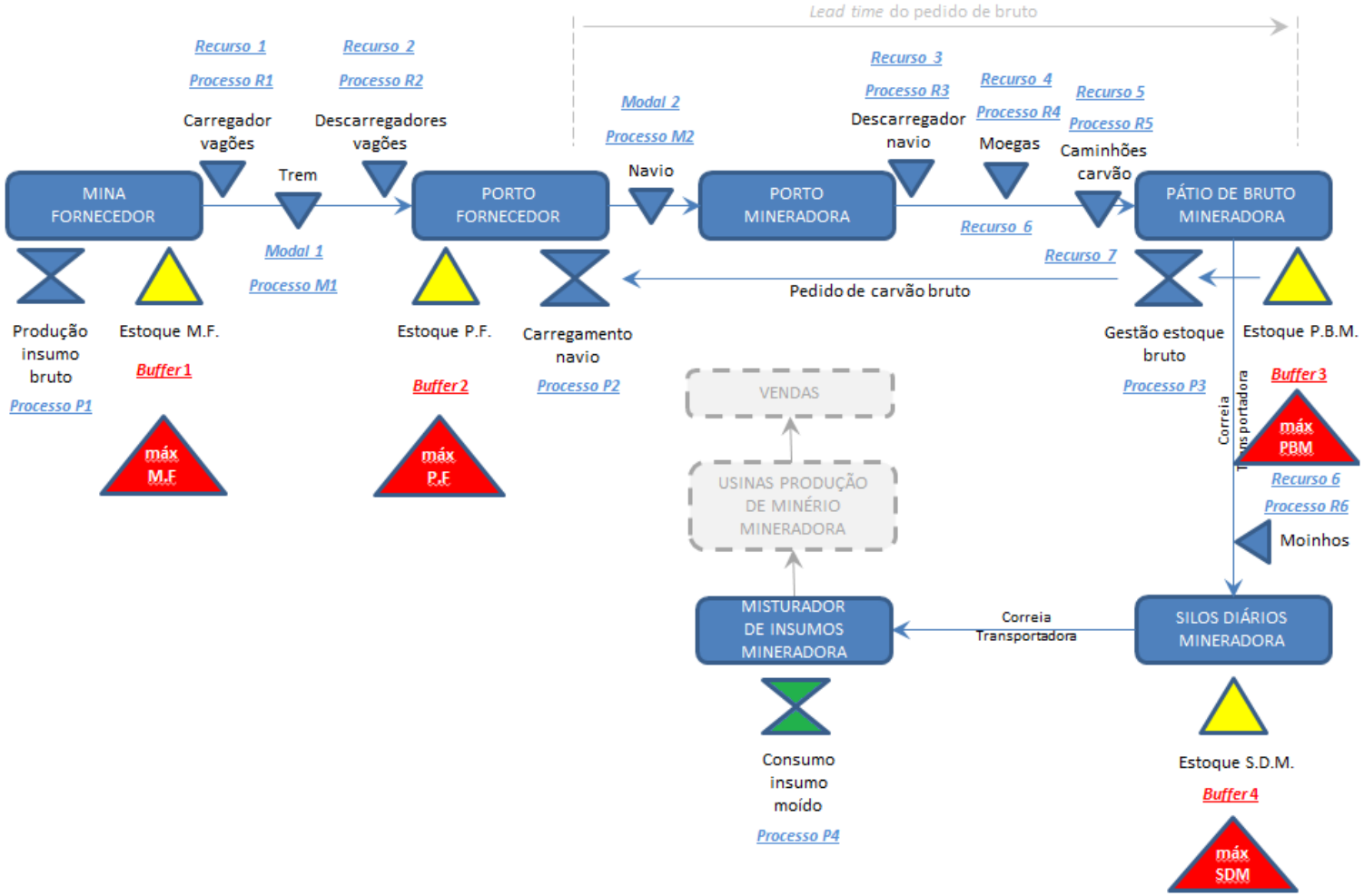


Figura 36. Modelo de simulação-otimização: variáveis de decisão, função-objetivo e restrições da otimização

Fonte: o autor

No **Quadro 6**, apresenta-se a formulação matemática das expressões de respostas do simulador na situação otimizada.

Quadro 6. Formulação das expressões de respostas do simulador na situação ótima

Fonte: O autor

		Respostas da simulação	Unid.	Recursos	Variáveis
Resultados operacionais da cadeia na situação ótima					
Recursos	1	% ocupação dos carregadores de vagões na Mina do Fornecedor	%	*carregador_vagao*	-
Recursos	2	% ocupação dos descarregadores de vagões no Porto do Fornecedor	%	*car_dumper*	-
Recursos	3	% ocupação dos descarregadores de navio no Porto do Fornecedor	%	*descarrega_navio*	-
Recursos	4	% ocupação das moegas	%	*moega*	-
Recursos	5	% ocupação dos caminhões de carvão	%	*carrega caminhao carvao.Queue.NumberInQueue / caminhao_carvao*	-
Recursos	6	% ocupação da unidade de moinhos	%	*moinho*	-
Modais	7	% médio do uso de vagões por viagem da Mina ao Porto do Fornecedor	%	-	*%_uso_vagoes_viagem*
Modais	8	quantidade de viagens de navio por ano	unid.	-	*qtd_viagens_navio*
Resultados de desempenho da cadeia na situação ótima					
Variáveis de desempenho	9	Lead Time médio do atendimento dos pedidos	h	-	*mostra_marca2*
Variáveis de desempenho	10	Taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia	%	*- carregador_vagao* *- car_dumper* *- descarrega_navio* *- moega* *- carrega caminhao carvao.Queue.NumberInQueue / caminhao_carvao* *- moinho*	-
Variáveis de desempenho	11	Interrupções de produção de pelotas por ano	h/ano	-	*interrupcao_producao*
Variáveis de desempenho	12	Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto	%	-	*Porc_est_bruto_cliente*

A **Figura 37** ilustra na cadeia de suprimentos, os elementos constituintes da simulação de variáveis operacionais (Recursos 1 a 6 e Modais 1 e 2), perfazendo um total de 8 respostas de simulação. Já a **Figura 38** identifica os 4 indicadores simulados e a relação de cada um com os elementos constituintes da cadeia.

PLANO DE SIMULAÇÕES DE RESULTADOS OPERACIONAIS NA SITUAÇÃO ÓTIMA

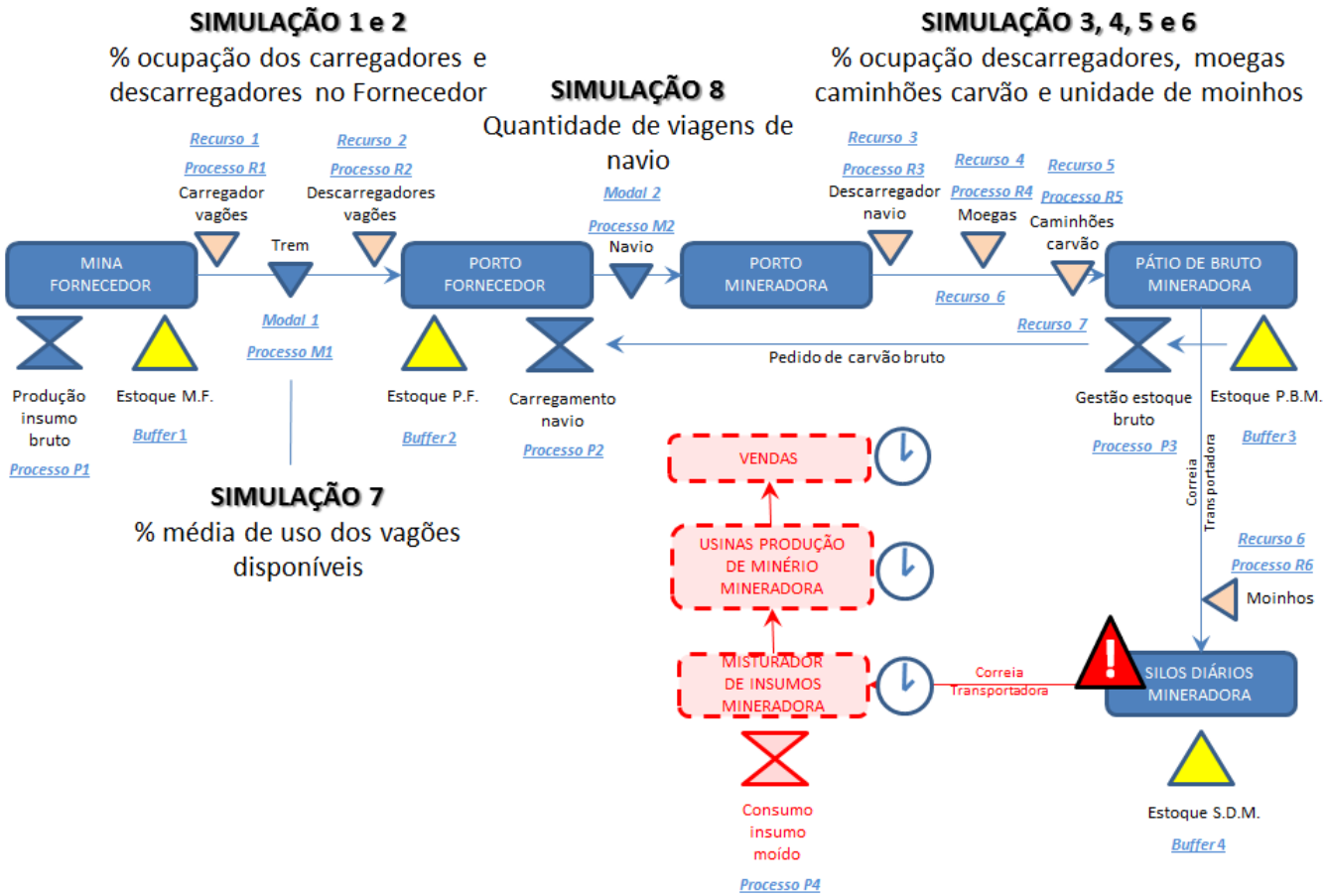


Figura 37. Modelo de simulação-otimização: simulação de resultados operacionais da cadeia na situação ótima

Fonte: o autor

PLANO DE SIMULAÇÕES DE RESULTADOS DE DESEMPENHO NA SITUAÇÃO ÓTIMA

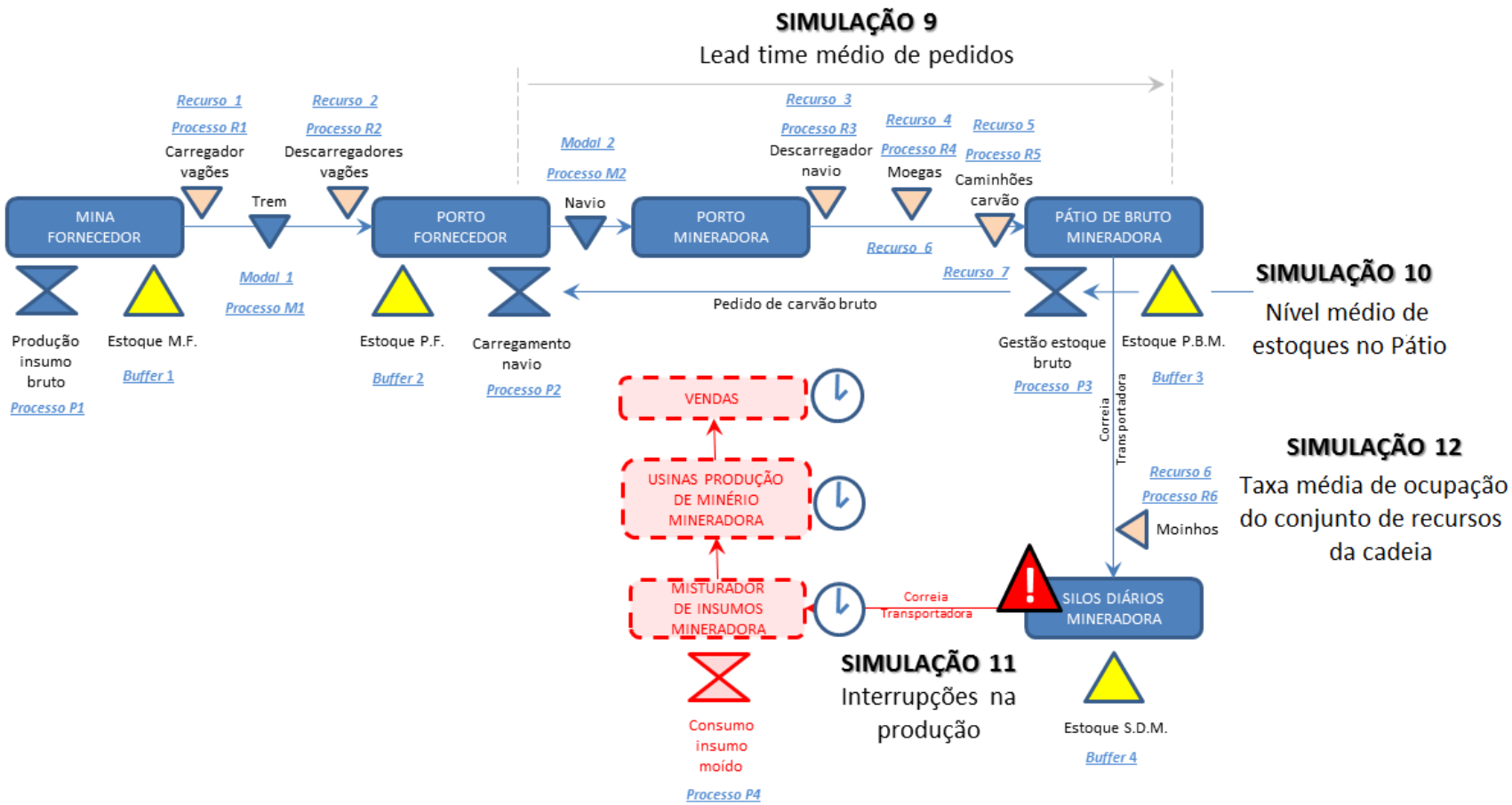


Figura 38. Modelo de simulação-otimização: simulação de resultados de desempenho da cadeia na situação ótima

Fonte: o autor

4.4. MODELAGEM COMPUTACIONAL DA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

A modelagem em software precisou ser trabalhada tanto na plataforma do *software Arena*® como na plataforma do a*dd in OptQuest*®*.*

Para o problema proposto, foi necessário realizar adaptações no modelo de simulação original em função das variáveis de controle selecionadas para o otimizador e também devido a resultados operacionais e de desempenho que se pretende gerar no simulador. A necessidade de alterações nas variáveis de controle consiste no fato dos estoques estarem com valores pré-fixados no modelo original, o que impede a manipulação dos valores por meio do *OptQuest*®*,*. Já no que diz respeito às demais variáveis do simulador, foi preciso reescrever algumas expressões e adicionar outras, sem que a estrutura base e os fluxos fossem alterados. Todas as alterações realizadas no modelo de simulação estão discriminadas no **APÊNDICE B** – MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO ADAPTADO PARA OTIMIZAÇÕES E SIMULAÇÕES COMPLEMENTARES.

Além de adaptações no modelo, novas variáveis foram criadas no simulador conforme descritas na **Tabela 15**. Os recursos do modelo computacional, por sua vez, não sofreram alterações.

Tabela 15. Novas variáveis criadas no modelo de simulação adaptado: Insumo Carvão

Variáveis do modelo computacional de simulação adaptado		
Insumo Carvão		
Variável	**Descrição**	**Unidade**
conta_descarga_pedidos_patio	Registro da contagem de descargarrentos completos de pedidos no Pátio de Insumo Bruto na Mineradora	unid.
vagoes_disponiveis	Quantidade de vagões disponíveis para uso pelo Fornecedor	unid.
conta_viagens_trem	Registro da contagem da ordem das viagens de trem entre a Mina do Fornecedor e o Porto do Fornecedor	unid.
%_uso_vagoes_viagem	Percentual de vagões disponíveis ocupados para determinada viagem de trem entre a Mina do Fornecedor e o Porto do Fornecedor	%
registro_placar_%uso_vagoes	Registro do percentual de vagões disponíveis ocupados para determinada viagem de trem entre a Mina do Fornecedor e o Porto do Fornecedor. Apresentação visual no modelo	%
registro_placar_vagoes_viagem	Registro da quantidade de vagões utilizados na composição do trem de numa determinada viagem, para carregamento da Mina do Fornecedor e transporte/descarregamento no Porto do Fornecedor. Apresentação visual no modelo.	unid.
registro_placar_lead_time_pedido	Registro do Lead Time em determinado atendimento entre o Porto de carregamento do Fornecedor e o Pátio de Insumo Bruto, para apresentação visual no modelo	h
qtd_viagens_navio	Quantidade de viagens realizadas por trasporte marítimo de insumo bruto desde o Porto do Fornecedor até o Porto da Mineradora.	unid.

Fonte: o autor

Já a elaboração do modelo de otimização no aplicativo *OptQuest*® foi feita a partir da transferência da fórmula do problema ao formato exigido pelo *software* com os seguintes elementos:

Controls: São as variáveis ou recursos que podem ser manipulados para influenciar o desempenho de um sistema simulado. São definidas como variáveis de controle do modelo e selecionadas para tomada de decisão, também chamadas de variáveis de decisão.

Constraints: São as relações entre as variáveis de controle e/ou variáveis de resposta impondo-se limites. Também chamadas de restrições.

Responses: São as variáveis de resposta do modelo de otimização, representando as saídas das iterações. Devido à sua condição de resultado, compõem a função-objetivo e não são alteráveis no modelo de otimização.

Objective: é uma expressão matemática usada para representar a função-objetivo do modelo, no intuito de minimizar ou maximizar resultados globais dependentes das variáveis de controle, variáveis de resposta e/ou recursos na simulação de um modelo.

Os modelos de otimização criados são apresentados no **APÊNDICE C** – MODELOS COMPUTACIONAIS DA OTIMIZAÇÃO.

A conclusão das corridas de otimização no *software* gerará resultados chamados de "*Best Solutions*" para as variáveis independentes (Controls) selecionadas e para a variável dependente proposta (função-objetivo), dentre os quais serão avaliadas as melhores soluções e factíveis (*feasible solutions)* em cada teste.

CAPÍTULO 5. EXPERIMENTOS

Os experimentos foram planejados e executados cada etapa ao seu tempo, de tal forma que o desenvolvimento da pesquisa transcorresse em sentido convergente ao planejado. Preocupou-se no início, portanto, em dispendiar razoável tempo da pesquisa no planejamento de todas as condições e de todas as respostas pretendidas, de tal forma que na fase de execução das iterações computacionais e das análises, prosseguisse os experimentos com poucas revisões de conceito e de metodologia.

Estima-se que entre planejamento, execução de experimentos, análises dos resultados e dissertação, que os percentuais de ocupação do tempo efetivamente utilizado para o estudo foram distribuídos da seguinte forma:

- Planejamento (conceitual e experimental): 50%
- Treinamento para uso dos *softwares* computacionais: 10%
- Execução experimental: 10%
- Análises dos resultados: 5%
- Dissertação dos conceitos, dos experimentos e das análises dos resultados: 25%

5.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para os fins a que se busca esta pesquisa, foram planejados preliminarmente os para a execução dos experimentos, os seguintes itens:

Recursos computacionais, para levantar e escolher o microprocessador adequado para o desenvolvimento das iterações do modelo e os softwares de edição de texto, edição de imagem, planilhas eletrônicas e de modelagem.

Modelos computacionais, a partir de *software* de modelagem usual e adequado para edição de modelos, realização dos experimentos e validade dos resultados obtidos.

Testes de simulação-otimização, com a elaboração de um plano çlaro, objetivo, factível e eficaz.

Testes de sensibilidade, de variáveis dependentes selecionadas no modelo de simulação, para avaliação dos efeitos de variação de variáveis independentes.

Iterações do modelo computacional, a partir de um critério válido, justificável e que permita a qualidade esperada para os resultados.

Custo, suficiente para o uso de microcomputador, o consumo de energia elétrica, transporte, impressões de papéis e encadernação da dissertação.

Prazo, para quantificar o tempo necessário para o planejamento (conceitual e experimental), execução experimental, análises dos resultados e dissertação dos conceitos, dos experimentos e das análises dos resultados.

Quantitativo de homem-hora, para a alocação de mão-de-obra necessária para o atendimento dos requisitos da dissertação e do curso de Mestrado.

5.1.1. PLANEJAMENTO DOS RECURSOS COMPUTACIONAIS

Para consecução dos experimentos propostos e devido ao tempo que as iterações demandam, foram utilizados microcomputador, com as seguintes especificações: CPU Intel Core i3 2,40 GHz. Memória RAM de 3 GB, Sistema Operacional de 64 bits e Windows 7 Home Premium, de 2009.

Além da capacidade de processamento computacional alocada, também foram utilizadas as ferramentas do Pacote Office para edição de texto (Microsoft Word), elaboração de planilhas eletrônicas (Microsoft Excel) e elaboração de apresentações em slides (Microsoft PowerPoint), além da ferramenta Paint do Windows para edição de algumas figuras anexadas nesta dissertação.

Para a execução dos experimentos, foram utilizados o *software Arena*® e seu *add-in OptQuest*® for *Arena*®, ambos trabalhando simultaneamente em função da otimização em modelo de simulação.

5.1.2. PLANEJAMENTO DO MÉTODO DE EXPERIMENTOS

Ao aplicar o método de Melouk, Freeman, Miller e Dunning (2013) neste estudo, avaliaram-se propostas de mudanças no modelo de simulação original, parametrizando-se fatores de efeito na cadeia como um todo de tal modo que cada um pudesse ter diferentes níveis. Objetivou-se com isso avaliar o impacto sobre os resultados operacionais e de desempenho a partir de mundaças realizadas. Além disso, os testes foram classificados em fator único e fatores múltiplos, sendo que a primeira classe se refere à avaliação de impacto nas variáveis e função-objetivo a partir de mudanças de níveis de um único fator / característica e a segunda classe se referem à combinação de dois ou mais fatores, variando os níveis em cada um deles.

Propôs-se a avaliação do efeito de fatores relacionados a um modal (variável), a um recurso e a um processo de operação de recurso, nessa ordem: (a) fator de capacidade de transporte do insumo bruto da Mina do Fornecedor ao Porto do Fornecedor, (b) fator de capacidade de descarregamento do insumo bruto no Porto Fornecedor e (c) fator de capacidade de moagem de insumo bruto.

Assim, aplicando-se esse método nas rodadas das otimizações com a variação desses fatores, os resultados das variáveis de decisão e da função-objetivo para cada fator único ou combinado são registrados em planilhas para se avaliar possíveis melhorias de desempenho da cadeia comparando-se os testes.

Análises de sensibilidade também se fizeram importantes e úteis, a partir das quais se avaliam o efeito da variação gradativa da capacidade de algumas variáveis selecionadas sobre a função-objetivo e sobre outras variáveis dependentes de desempenho da cadeia. Isso contribui com um balizador adicional de tomada de decisão na cadeia sobre o funcionamento dos processos, dos equipamentos e dos estoques.

Importa salientar que as avaliações propostas neste estudo se justificam pela aplicação da técnica de simulação-otimização em vez da técnica pura de simulação, pois nesta última se testariam cenários sem garantia da melhor solução, embora

seja essencial para representar computacionalmente a cadeia de produção. Sem o um modelo de simulação, a otimização se torna muito complicada em cadeias complexas, por se tratar basicamente de operações matemáticas.

A partir da aplicação de simulação-otimização, testaram-se cenários simulados, propôs-se configurações de soluções viáveis e melhores para as variáveis sob o critério da função-objetivo, e se obteve o suporte iterativo e contínuo da simulação para avaliação da qualidade da solução proposta. O método proposto, portanto, permite analisar sistemas complexos, como o ambiente em estudo, e identificar potenciais melhorias, além de otimizadas, num curto espaço de tempo.

Contudo, o esforço metodológico desta pesquisa levou à identificação de fatores de mudança, avaliados com relevante grau de relação com os níveis de estoque e relevante grau de efeito sobre o rítimo de consumo do insumo. Tais fatores e seus níveis são detalhados no tópico 5.1.3.1.

5.1.3. PLANEJAMENTO DOS TESTES E DAS ANÁLISES

5.1.3.1. PLANEJAMENTO DAS SIMULAÇÕES-OTIMIZAÇÕES

Apresenta-se a **Tabela 16** em consonância com o método de experimentos planejado, que descreve os fatores selecionados, suas denominações e os níveis testados:

Tabela 16. Fatores e níveis de teste de otimização

FATORES E NÍVEIS DE TESTE									
Fatores	Definição	Componente associada			unid.	Níveis			
		Tipo	Descrição	Representação no modelo de simulação		0	1	2	3
fcmp	fator de capacidade de transporte do insumo bruto da Mina do Fornecedor ao Porto do Fornecedor	Modal	Vagões de trem	Variável *vagoes_disponiveis*	unid.	100% 400,00	75% 300,00	50% 200,00	25% 100,00
fcd	fator de capacidade de descarregamento do insumo bruto no Porto Fornecedor	Recurso	Descarregadores de vagões	Recurso *car_dumper*	unid.	100% 3,00	67% 2,00	33% 1,00	
fcm	fator de capacidade de moagem de insumo bruto	Processo de operação de recurso	Moagem do carvão bruto	Variável *qtd_transf_bruta_cliente*	ton/h	100% 3 moinhos 62,00	73% 2 moinhos 45,00	40% 1 moinho 25,00	

Fonte: o autor

A seleção dos fatores de teste considerou aqueles recursos e equipamentos que, na visão do autor desta pesquisa, apresentam-se como os mais onerosos, tanto no valor do próprio ativo como também nos custos de operação e de manutenção.

A **Figura 39** identifica na cadeia de suprimentos, os elementos destacados na cor verde e que são objetos dos testes de mudanças para as simulações-otimizações e para as simulações na situação ótima.

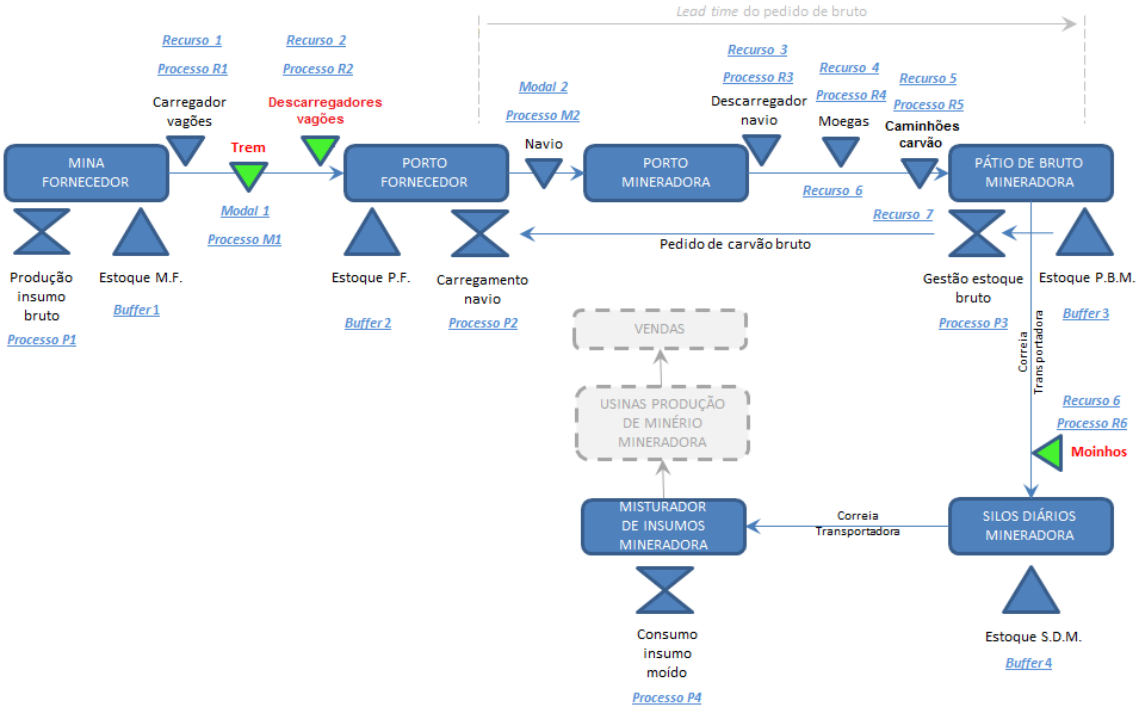


Figura 39. Modelo de simulação-otimização: modal e recursos selecionados para os testes de mudanças na cadeia

Fonte: o autor

Dessa forma, os testes foram agrupados em dois tipos: casos teste de fatores únicos e casos teste de fatores múltiplos combinados. Os casos testes de fatores únicos foram identificados pela letra “U” e os de fatores múltiplos pela letra “M”, além de serem organizados em ordem numérica. Para ambos os tipos de testes foi prevista a avaliação de um cenário sem mudanças e outro com mudanças nos recursos.

Fundamentou-se a motivação desses experimentos com base numa hipótese de ambiente externo de ocorrência de sazonalidade no mercado mundial de minerais

metálicos, associado ao seu alto custo logístico e de produção. Para avaliação, a hipótese proposta foi o intento de maximização da utilização dos ativos na cadeia de suprimento.

A **Tabela 17** apresenta e descreve o plano de testes de otimização:

Tabela 17. Plano de testes da otimização

DESCRIÇÃO DOS TESTES DE OTIMIZAÇÃO									
HIPÓTESE DE AMBIENTE EXTERNO	**HIPÓTESE PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO**	**CENÁRIO**		**Id. Cenário**	**TESTES**				
					Proposição	**fator único**		**fatores múltiplos combinados**	
						Casos teste	**Fatores**	**Casos teste**	**Fatores**
SAZONALIDADE DO MERCADO MUNDIAL DE MINERAIS METÁLICOS, ASSOCIADO AO SEU RELEVANTE CUSTO LOGÍSTICO E DE PRODUÇÃO E À VARIAÇÃO NO PREÇO DOS INSUMOS	MAXIMIZAÇÃO DO CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO	MANTER OS RECURSOS, OS PROCESSOS E SUAS CAPACIDADES CONFORME SITUAÇÃO INICIAL	0	Cen.0.C	**Sem Mudanças e Otimizações**	U_0	---	M_0	---
					Sem Mudanças, porém com Otimizações	U_1	*fcmp0 = fcm0 = fcpp0*	M_1	*fcmp0 . fcm0 . fcpp0*
		NECESSIDADE DE MUDANÇAS NOS RECURSOS, NOS PROCESSOS E/OU NAS SUAS CAPACIDADES	1	Cen.1.C	**Redução da capacidade de transporte Mina - Porto Fornecedor**	U_2 U_3 U_4	*fcmp1* *fcmp2* *fcmp3*	M_2 M_3 M_4 M_5 M_6 M_7 M_8 M_9 M_{10} M_{11} M_{12} M_{13}	*fcmp1 . fcd1 . fcm1* *fcmp1 . fcd1 . fcm2* *fcmp1 . fcd2 . fcm1* *fcmp1 . fcd2 . fcm2* *fcmp2 . fcd1 . fcm1* *fcmp2 . fcd1 . fcm2* *fcmp2 . fcd2 . fcm1* *fcmp2 . fcd2 . fcm2* *fcmp3 . fcd1 . fcm1* *fcmp3 . fcd1 . fcm2* *fcmp3 . fcd2 . fcm1* *fcmp3 . fcd2 . fcm2*
					Redução da capacidade de descarregamento no Porto do Fornecedor	U_5 U_6	*fcd1* *fcd2*		
					Redução da capacidade de moagem na Mineradora	U_7 U_8	*fcm1* *fcm2*		

LEGENDA	
U_n	Caso teste "n" utilizando fator único
M_n	Caso teste "n" utilizando fatores múltiplos combinados
$fcmp_n$	fator de capacidade de transporte do insumo bruto da Mina do Fornecedor ao Porto do Fornecedor, nível "n"
$fcpp_n$	fator de capacidade de transporte do insumo bruto do Porto da Mineradora ao Pátio de Insumo Bruto da Mineradora, nível "n"
fcm_n	fator de capacidade de moagem de insumo bruto, nível "n"

Fonte: o autor

Somam-se ao todo, 20 diferentes testes de otimização, compreendendo os 2 cenários (Cen.0.C e Cen.1.C).

A **Tabela 18** detalha a distribuição desse quantitativo entre os dois tipos de fatores avaliados:

Tabela 18. Resumo do quantitativo de testes de otimização

RESUMO - TESTES DE OTIMIZAÇÃO -	
FATOR ÚNICO	FATORES MÚLTIPLOS COMBINADOS *
8	12
20	
* O teste $U_1 = M_1$	

Fonte: o autor

Após os testes de otimização, deu-se início às simulações para a geração dos resultados operacionais e de desempenho (8 operacionais e 4 de desempenho na cadeia). A **Tabela 19** apresenta o plano de simulações dos resultados dos testes no Fornecedor, denotados pelas siglas S_nRO_x (Simulação "n" e Resultado Operacional "x") e S_nRD_z (Simulação "n" e Resultado de Desempenho "z"):

Tabela 19. Plano de simulações das situações otimizadas

RESULTADOS OPERACIONAIS E DE DESEMPENHO														
Fator	**Caso Teste**	**fator e nível**	**Recursos**						**Modal Ferroviário**	**Modal Marítimo**	**Variáveis de desempenho da cadeia**			
			Fornecedor		**Mineradora**									
			% ocupação carreg. vagões	% ocupação descarreg. vagões	% ocupação descarreg. navio	% ocupação moegas	% ocupação caminhão carvão	% ocupação moinhos	% médio uso de vagões por viagem (% / viagem)	quantidade de viagens por ano (unid./ano)	Lead Time médio (h)	Taxa média de ocupação do conjunto de recursos (%)	Interrupções de produção pelotas por ano (h/ano)	Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto (%)
Cenário.0.C														
----	$U_0 = M_0$	_____	S_0RO_1	S_0RO_2	S_0RO_3	S_0RO_4	S_0RO_5	S_0RO_6	S_0RO_7	S_0RO_8	S_0RD_1	S_0RD_2	S_0RD_3	S_0RD_4
Único e Múltiplo	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0 fcd0.fcm0*	S_1RO_1	S_1RO_2	S_1RO_3	S_1RO_4	S_1RO_5	S_1RO_6	S_1RO_7	S_1RO_8	S_1RD_1	S_1RD_2	S_1RD_3	S_1RD_4
Cenário.1.C														
Único	U_2	*fcmp1*	S_2RO_1	S_2RO_2	S_2RO_3	S_2RO_4	S_2RO_5	S_2RO_8	S_2RO_7	S_2RO_8	S_2RD_1	S_2RD_2	S_2RD_3	S_2RD_4
	U_3	*fcmp2*	S_3RO_1	S_3RO_2	S_3RO_3	S_3RO_4	S_3RO_5	S_3RO_6	S_3RO_7	S_3RO_8	S_3RD_1	S_3RD_2	S_3RD_3	S_3RD_4
	U_4	*fcmp3*	S_4RO_1	S_4RO_2	S_4RO_3	S_4RO_4	S_4RO_5	S_4RO_6	S_4RO_7	S_4RO_8	S_4RD_1	S_4RD_2	S_4RD_3	S_4RD_4
	U_5	*fcd1*	S_5RO_1	S_5RO_2	S_5RO_3	S_5RO_4	S_5RO_5	S_5RO_6	S_5RO_7	S_5RO_8	S_5RD_1	S_5RD_2	S_5RD_3	S_5RD_4
	U_6	*fcd2*	S_6RO_1	S_6RO_2	S_6RO_3	S_6RO_4	S_6RO_5	S_6RO_6	S_6RO_7	S_6RO_8	S_6RD_1	S_6RD_2	S_6RD_3	S_6RD_4
	U_7	*fcm1*	S_7RO_1	S_7RO_2	S_7RO_3	S_7RO_4	S_7RO_5	S_7RO_6	S_7RO_7	S_7RO_8	S_7RD_1	S_7RD_2	S_7RD_3	S_7RD_4
	U_8	*fcm2*	S_8RO_1	S_8RO_2	S_8RO_3	S_8RO_4	S_8RO_5	S_8RO_6	S_8RO_7	S_8RO_8	S_8RD_1	S_8RD_2	S_8RD_3	S_8RD_4
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	S_9RO_1	S_9RO_2	S_9RO_3	S_9RO_4	S_9RO_5	S_9RO_6	S_9RO_7	S_9RO_8	S_9RD_1	S_9RD_2	S_9RD_3	S_9RD_4
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	$S_{10}RO_1$	$S_{10}RO_2$	$S_{10}RO_3$	$S_{10}RO_4$	$S_{10}RO_5$	$S_{10}RO_6$	$S_{10}RO_7$	$S_{10}RO_8$	$S_{10}RD_1$	$S_{10}RD_2$	$S_{10}RD_3$	$S_{10}RD_4$
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	$S_{11}RO_1$	$S_{11}RO_2$	$S_{11}RO_3$	$S_{11}RO_4$	$S_{11}RO_5$	$S_{11}RO_6$	$S_{11}RO_7$	$S_{11}RO_8$	$S_{11}RD_1$	$S_{11}RD_2$	$S_{11}RD_3$	$S_{11}RD_4$
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	$S_{12}RO_1$	$S_{12}RO_2$	$S_{12}RO_3$	$S_{12}RO_4$	$S_{12}RO_5$	$S_{12}RO_6$	$S_{12}RO_7$	$S_{12}RO_8$	$S_{12}RD_1$	$S_{12}RD_2$	$S_{12}RD_3$	$S_{12}RD_4$
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	S_1RO_1	S_1RO_2	S_1RO_3	S_1RO_4	S_1RO_5	S_1RO_6	S_1RO_7	S_1RO_8	S_1RD_1	S_1RD_2	S_2RD_3	S_1RD_4
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	S_1RO_1	S_1RO_2	S_1RO_3	S_1RO_4	S_1RO_5	S_1RO_6	S_1RO_7	S_1RO_8	S_1RD_1	S_1RD_2	S_2RD_3	S_1RD_4
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	$S_{13}RO_1$	$S_{13}RO_2$	$S_{13}RO_3$	$S_{13}RO_4$	$S_{13}RO_5$	$S_{13}RO_6$	$S_{13}RO_7$	$S_{13}RO_8$	$S_{13}RD_1$	$S_{13}RD_2$	$S_{13}RD_3$	$S_{13}RD_4$
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	$S_{14}RO_1$	$S_{14}RO_2$	$S_{14}RO_3$	$S_{14}RO_4$	$S_{14}RO_5$	$S_{14}RO_6$	$S_{14}RO_7$	$S_{14}RO_8$	$S_{15}RD_1$	$S_{14}RD_2$	$S_{14}RD_3$	$S_{14}RD_4$
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	$S_{15}RO_1$	$S_{15}RO_2$	$S_{15}RO_3$	$S_{15}RO_4$	$S_{15}RO_5$	$S_{15}RO_6$	$S_{15}RO_7$	$S_{15}RO_8$	$S_{16}RD_1$	$S_{15}RD_2$	$S_{15}RD_3$	$S_{15}RD_4$
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	$S_{16}RO_1$	$S_{16}RO_2$	$S_{16}RO_3$	$S_{16}RO_4$	$S_{16}RO_5$	$S_{16}RO_6$	$S_{16}RO_7$	$S_{16}RO_8$	$S_{17}RD_1$	$S_{16}RD_2$	$S_{16}RD_3$	$S_{16}RD_4$
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	$S_{17}RO_1$	$S_{17}RO_2$	$S_{17}RO_3$	$S_{17}RO_4$	$S_{17}RO_5$	$S_{17}RO_6$	$S_{17}RO_7$	$S_{17}RO_8$	$S_{18}RD_1$	$S_{17}RD_2$	$S_{17}RD_3$	$S_{17}RD_4$
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	$S_{18}RO_1$	$S_{18}RO_2$	$S_{18}RO_3$	$S_{18}RO_4$	$S_{18}RO_5$	$S_{18}RO_6$	$S_{18}RO_7$	$S_{18}RO_8$	$S_{19}RD_1$	$S_{18}RD_2$	$S_{18}RD_3$	$S_{18}RD_4$
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	$S_{19}RO_1$	$S_{19}RO_2$	$S_{19}RO_3$	$S_{19}RO_4$	$S_{19}RO_5$	$S_{19}RO_6$	$S_{19}RO_7$	$S_{19}RO_8$	$S_{20}RD_1$	$S_{19}RD_2$	$S_{19}RD_3$	$S_{19}RD_4$
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	$S_{20}RO_1$	$S_{20}RO_2$	$S_{20}RO_3$	$S_{20}RO_4$	$S_{20}RO_5$	$S_{20}RO_6$	$S_{20}RO_7$	$S_{20}RO_8$	$S_{21}RD_1$	$S_{20}RD_2$	$S_{20}RD_3$	$S_{20}RD_4$

Fonte: o autor

Somam-se, ao todo, 20 simulações distintas, compreendendo os 2 cenários (Cen.0.C e Cen.1.C). Adicionalmente, a simulação dos casos testes U_0 e M_0, que são iguais e se referem ao Cenário 0 (sem mudanças) e a fatores de nível 0 (sem otimizações) é informação de referência do modelo de simulação original do *case* e, portanto, deve ser incluída no conjunto de experimentos, perfazendo um total de 21 simulações.

A **Tabela 20** detalha a distribuição desse quantitativo entre os dois tipos de fatores avaliados:

Tabela 20. Resumo do quantitativo de testes de simulação

RESUMO - SIMULAÇÕES DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS E DE DESEMPENHO -		
Simulação da Situação inicial (sem mudanças e sem otimizações)	Testes de FATOR ÚNICO	Testes de FATORES MÚLTIPLOS COMBINADOS *
1	8	12
21		
* O teste $U_1 = M_1$		

Fonte: o autor

5.1.3.2. PLANEJAMENTO DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é a terceira e última etapa do processo experimental. Foi avaliada entre os elementos de estoques, de recursos e de processos da cadeia a escolha de variáveis independentes sob o critério de se analisar a estabilidade de algumas variáveis dependentes que medem o desempenho da cadeia.

Para se definir o contexto prático em que se interessa avaliar os efeitos dessas variáveis, adotou-se uma premissa de que as informações coletadas fossem úteis para suporte na tomada de decisão no gerenciamento dos estoques. Verificou-se, portanto, que existem algumas incertezas na cadeia que podem gerar variações involuntárias no seu funcionamento e foi avaliado que esse risco é importante de se antever frente às dificuldades de mercado em que a cadeia está inserida. Entre as incertezas levantadas, o conjunto de atividades que compõem o ciclo do pedido de

reposição de estoque no Pátio de insumo bruto pode oferecer diferenças no padrão de serviços que se acostuma praticar.

O ciclo de pedido de reposição do estoque do pátio se inicia com a emissão do pedido pela equipe de Gestão de Estoques da Mineradora e termina com a entrega de toda a carga na área do pátio. É dividido em dois grupos de atividades: (1) Atendimento do pedido e (2) Recebimento do pedido.

O conjunto de atividades do atendimento do pedido é realizado pela Transportadora, serviço terceirizado mediante contrato de afretamento por viagem, compreendendo a realização do carregamento no Porto do Fornecedor e do transporte marítimo até o Porto da Mineradora. A Incerteza identificada nesse caso é quanto ao tipo e as características do navio que estará disponível no momento da solicitação do serviço.

O conjunto de atividades de recebimento do pedido é realizado no Porto da Mineradora e com recursos próprios, para a movimentação da carga até o Pátio de insumo bruto. Tratam-se da operação de moegas para descarregamento do navio e carregamento dos caminhões de carvão e dos serviços de transporte até o pátio. A Incerteza identificada nesse caso é quanto à eficiência operacional dos serviços do Porto da Mineradora para o recebimento do pedido.

Assim, foram identificados 1 modal, 1 processo de operação de modal e 3 processos de operação de recursos como componentes para as análises de sensibilidade, a saber, respectivamente: o navio (*Modal 2)* e o transporte de navio (*Processo M2*) fornecidos pela Transportadora*; e o* descarregamento de navio (*Processo R3*), o descarregamento de moega (*Processo R4*), e a movimentação dos caminhões de carvão (*Processo R5*), operados pela Mineradora.

Para o atendimento do pedido, as componentes de sensibilidade foram analisadas em conjunto e são a capacidade de carga e a duração da viagem do navio em função do tipo e tamanho da embarcação que estará disponível no momento da solicitação do serviço pela Mineradora.

Para o recebimento do pedido, no processo de operação de descarregamento de moega, a componente analisada foi o tempo do processo de carregamento de caminhão de carvão. Já no processo de operação de movimentação dos caminhões de carvão do Porto da Mineradora ao pátio, as componentes analisadas foram os tempos de viagem nas rotas garagem-moega, porto-pátio e pátio-moega. Por fim, no processo de operação de descarregamento do navio, as componentes analisadas foram as mesmas da movimentação de caminhão de carvão e do descarregamento de moega, uma vez que o navio permanece atracado e descarregando até que termine toda a movimentação no porto para o recebimento de determinado pedido.

A partir das capacidades iniciais desses processos/variáveis, extraídas do modelo de simulação original de Oliveira Júnior (2011), foi arbitrado um *range* de variação de - 50% a + 50% (variações de - 50%, - 25%, + 25% e + 50%) sobre esses valores para se investigar a resposta da função-objetivo do problema de otimização (maximização do consumo total anual do insumo carvão) e das quatro variáveis de desempenho da cadeia selecionadas (*Lead time* do pedido no Pátio de insumo bruto, Taxa média de ocupação dos recursos da cadeia, duração total das interrupções na produção de pelotas ao ano e nível médio de estoques no Pátio).

Especificamente nos testes de sensibilidade da variação das componentes do atendimento do pedido pela Transportadora, simplificou-se uma premissa de que a variação na capacidade de carga do navio é diretamente proporcional (e no mesmo percentual) à variação do tempo de transporte marítimo do Porto do Fornecedor ao Porto da Mineradora. O critério usado foi de que quanto mais leve a embarcação, maior a sua velocidade de serviço e, portanto, menor a duração da viagem.

A aplicação dos percentuais de variação das variáveis determinísticas foi realizada simplesmente sobre os valores iniciais extraídos do modelo de simulação. Geraram-se dessa forma os novos valores.

Para a aplicação dos percentuais sobre os valores das variáveis que possuem espaço amostral com distribuição de probabilidade (curvas normais), adotou-se uma premissa de simplificação para a estimativa dos novos valores, de tal forma que a sua redução ou o seu aumento alterou na mesma proporção a média amostral.

Assim, nas variáveis de distribuição normal foram aplicados os percentuais apenas sobre o valor da média, mantendo-se o inalterado o valor original do desvio padrão.

Avaliou-se que a simplificação de cálculo e as estimativas obtidas atenderam os objetivos propostos para o estudo da estabilidade dos indicadores de desempenho, uma vez que se pretendeu assumiu a premissa citada para gerar de forma direcionada novos padrões de valores para as variáveis probabilísticas de processo, com o simples intuito de reduzí-los ou aumenta-los com critério.

A **Tabela 21** apresenta o Plano de análises de sensibilidade:

Tabela 21. Plano de análises de sensibilidade

DESCRIÇÃO DAS PROPOSIÇÕES E DAS COMPONENTES DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE										
Hipótese proposta para avaliação	**Elo da cadeia**	**Proposição**	**Componente**			**Capacidade inicial**	**Unid.**	**TESTES**		**Objetivo**
			item	**Descrição no modelo de simulação**						
				Processo / Variável	**Tipo**			**%**	**novos valores de capacidade para análise**	
INCERTEZAS NO CICLO DO PEDIDO DE REPOSIÇÃO DE ESTOQUE NO PÁTIO DE INSUMO BRUTO	**TRANSPORTADORA**	**Previsão de risco de variação no modo de atendimento do pedido**	Capacidade do navio	*cap_navio*	Variável	Normal (50.000 ; 5.000)	ton	+ 50%	*cap_navio* : Normal (75.000 ; 5.000) *rota_porto carregamento_cliente:* Normal (720 ; 72)	**MAXIMIZAR O CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO**
								+ 25%	*cap_navio* : Normal (62.500 ; 5.000) *rota_porto carregamento_cliente:* Normal (600 ; 72)	
								0%	____	
			Transporte de navio	*rota_porto carregamento_cliente*	Processo	Normal (480 ; 72)	h/viagem	- 25%	*cap_navio* : Normal (37.500 ; 5.000) *rota_porto carregamento_cliente:* Normal (360 ; 72)	
								- 50%	*cap_navio* : Normal (25.000 ; 5.000) *rota_porto carregamento_cliente:* Normal (240 ; 72)	
	MINERADORA	**Previsão de risco de variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido**	Descarregamento de navio	- *rota garagem moega* - *rota porto patio* - *rota patio moega* - *carrega caminhao carvao* - *libera navio*	Processos	*rota garagem moega* : Normal (10 ; 1) *rota porto patio* : Normal (13 ; 7) *rota patio moega* : Normal (7 ; 3) *carrega caminhao carvao* : Normal (11 ; 4) *libera navio* : 0	- min/caminhão de carvão.rota - min/caminhão de carvão.rota - min/caminhão de carvão.rota - min/caminão de carvão.moega - min	+ 50%	*rota garagem moega:* Normal (15 ; 1) *rota porto patio:* Normal (19,5 ; 7) *rota patio moega:* Normal (10,5 ; 3) *carrega caminhao carvao:* Normal (16,5 ; 4) *libera navio:* 0	
								+ 25%	rota garagem moega: Normal (12,5 ; 1) rota porto patio: Normal (16,3 ; 7) rota patio moega: Normal (8,8 ; 3) carrega caminhao carvao: Normal (13,8 ; 4) libera navio: 0	
			Descarregamento de moega	*carrega caminhao carvao*	Processo	*carrega caminhao carvao* : Normal (11 ; 4)	min/caminão de carvão.moega	0%	____	
			Movimentação dos caminhões de carvão	- *rota garagem moega* - *rota porto patio* - *rota patio moega* - *Llibera navio*	Processos	*rota garagem moega* : Normal (10 ; 1) *rota porto patio* : Normal (13 ; 7) *rota patio moega* : Normal (7 ; 3) *libera navio* : 0	- min/caminhão de carvão.rota - min/caminhão de carvão.rota - min/caminhão de carvão.rota - min	- 25%	rota garagem moega: Normal (7,5 ; 1) rota porto patio: Normal (9,8 ; 7) rota patio moega: Normal (5,3 ; 3) carrega caminhao carvao: Normal (8,3 ; 4) libera navio: 0	
								- 50%	*rota garagem moega:* Normal (5 ; 1) *rota porto patio:* Normal (6,5 ; 7) *rota patio moega:* Normal (3,5 ; 3) *carrega caminhao carvao:* Normal (5,5 ; 4) libera navio: 0	

Fonte: o autor

As **Tabelas 22** e **23** mostram o detalhamento do quantitativo dos testes de sensibilidade programados.

Tabela 22. Resumo do quantitativo de testes de otimização para análises de sensibilidade

RESUMO GERAL - TESTES DE OTIMIZAÇÃO PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADE -			
PROPOSIÇÕES	**QUANTIDADE DE VARIANTES**	**QUANTIDADE DE CASOS TESTE**	**QUANTIDADE DE TESTES**
VARIAÇÃO NO MODO DE ATENDIMENTO DO PEDIDO	4	20	80
VARIAÇÃO NAS EFICIÊNCIAS DOS RECURSOS QUE RECEBEM O PEDIDO	4		80
TOTAL	8	20	160

Fonte: o autor

Tabela 23. Resumo do quantitativo de testes de simulação para análises de sensibilidade

RESUMO GERAL - SIMULAÇÕES DE VARIÁVEIS DE DESEMPENHO PARA OS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE -				
PROCESSOS	**QUANTIDADE DE VARIANTES**	**SITUAÇÃO INICIAL**	**QUANTIDADE DE CASOS TESTE**	**QUANTIDADE DE SIMULAÇÕES**
VARIAÇÃO NO MODO DE ATENDIMENTO DO PEDIDO	4	1	20	84
VARIAÇÃO NAS EFICIÊNCIAS DOS RECURSOS QUE RECEBEM O PEDIDO	4			84
TOTAL	8	1	20	168

Fonte: o autor

5.1.4. PLANEJAMENTO DAS ITERAÇÕES NOS MODELOS COMPUTACIONAIS

Prevendo uma grande quantidade de testes de otimização e de simulação a realizar e o consequente tempo que demandaria para a obtenção de todos os dados pretendidos, antes de qualquer experimento foram avaliadas as quantidades suficientes de replicações para o simulador e para as iterações do otimizador.

No modelo de simulação criado por Oliveira Júnior (2011), o horizonte de tempo (duração de cada replicação) definido é de 1 ano, contabilizado em 360 dias, com um período de pré-aquecimento (*warm up*) de 60 dias para início do registro dos resultados, sendo que os parâmetros da situação inicial foram extraídos por Oliveira Júnior (2011) a partir da coleta de dados históricos da empresa Mineradora, desde 1º de janeiro de 2010 e terminado em 31 de dezembro de 2010. As proposições de

simulação de mudanças na cadeia e elaboradas pelo autor foram testadas com 80 replicações.

O simulador *Arena*® demanda para o modelo original de Oliveira Júnior (2011) cerca de 1 minuto por replicação para uma velocidade de 100 unidades de tempo por quadro, totalizando 1h 20’ 00” por corrida de simulação. Realizando um teste piloto com um dos modelos de otimização criados para o problema e, utilizando o simulador adaptado para a otimização com corrida de 80 replicações, cada iteração de otimização demandou cerca de 1 minuto. Na hipótese de se admitir ao estudo corridas de otimização de 200 iterações, seriam 3h 20’ 00” por corrida de otimização.

Como o estudo prevê otimizações com o objetivo de maximização dentro de um conjunto de testes, incluindo simulações para gerar alguns resultados operacionais e de desempenho em cada situação ótima obtida no otimizador e, além disso, propõe análises de sensibilidade de resultados das otimizações e das simulações, o experimento realizado nessas circunstâncias ficaria extenso demasiadamente.

Dessa forma, tentou-se minimizar os esforços iterativos, primando-se pela qualidade adequada dos resultados. Para isso, adotou-se como método de definição da premissa de iterações, a realização de testes-piloto com corridas de otimização de 200 iterações, sendo escolhido um teste base previsto no planejamento experimental (caso teste no cenário sem mudanças, mas com otimização – Cenário Cen.0.C, teste U_1). As corridas de otimização foram rodadas com 80 replicações, 40 replicações, 20 replicações e 1 replicação no simulador e plotou-se gráficos conforme representado nas **Figuras 40** e **41**. Cada iteração de otimização com 80 replicações foi estimada em 1 minuto; a de 40 replicações em 30 segundos; a de 20 replicações em 15 segundos; e a de 1 replicação em 01 segundo.

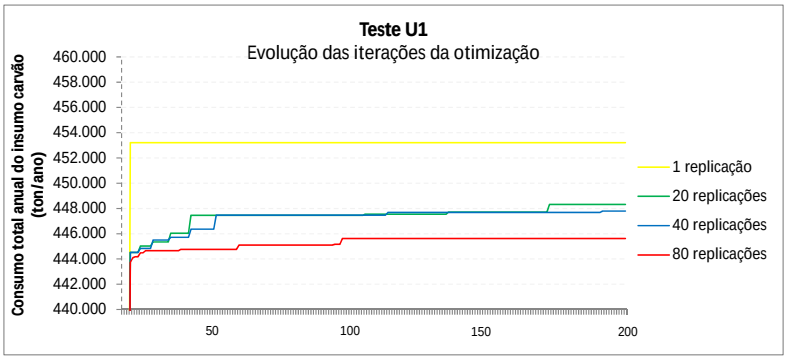


Figura 40. Curvas de evolução dos resultados da função-objetivo do teste U_1

Fonte: o autor

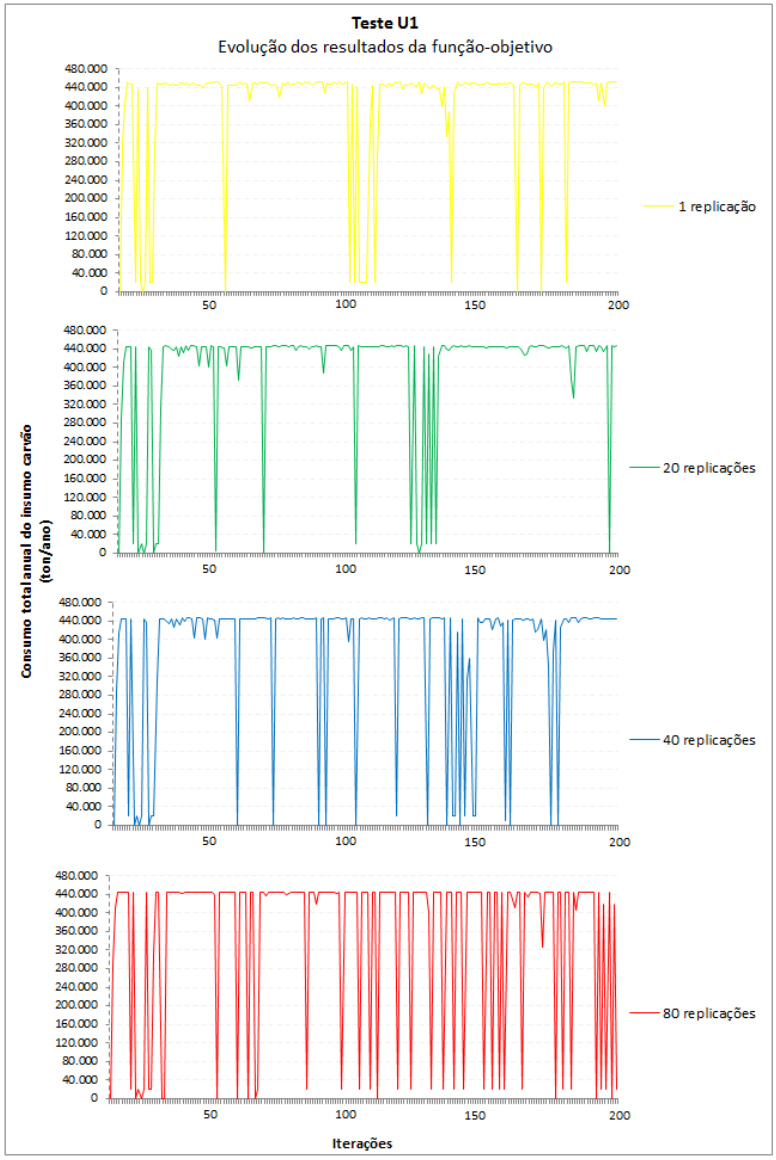


Figura 41. Curvas de evolução da otimização do teste $U_{1,}$ em função do número de replicações

Fonte: o autor

De posse dos relatórios de iterações das otimizações-piloto, percebe-se que a função-objetivo não sofreu significativas evoluções a partir da 170ª iteração. Portanto padronizou-se corrida de otimização de 170 iterações.

Outra observação que pode ser feita é quanto ao número de replicações de simulação suficientes para cada iteração de otimização. O teste-piloto com 1 replicação, por não representar uma média amostral significativa, mesmo com altos valores para a função-objetivo, foi refutada pela sua simplicidade estatística.

Por outro lado, verifica-se que pela corrida de 20 replicações se obtém os maiores valores para a função-objetivo e que se reduzir as 80 replicações originais do modelo para 20 replicações, o impacto sobre a maximização da função-objetivo é pequeno (diferença de apenas 0,6% entre os resultados ótimos em 200 iterações). Como o tempo de simulação é bem influenciado pelo número de replicações, padronizou-se 20 replicações para cada iteração de simulação-otimização.

A **Tabela 24** detalha a estimativa de prazo para todo o processo de testes de otimização:

Tabela 24. Resumo da duração total dos testes de otimização

RESUMO - DURAÇÃO DOS TESTES DE OTIMIZAÇÃO -			
Quantidade de replicações de simulação por iteração	Duração da iteração	Quantidade de testes	Quantidade de iterações por corrida / teste
20	15 segundos	20	170
14,2 computador-horas = 0,6 computador-dias			

Fonte: o autor

O mesmo fundamento foi usado para a definição de corridas na etapa de simulações dos resultados operacionais e de desempenho, previstas para os testes de simulação-otimização e nas análises de sensibilidades.

Considerando-se que a duração da execução da simulação no modelo com 80 replicações é estimada em 1h 20’ 00”, a de 40 replicações em 40 minutos e a de 20

replicações em 20 minutos, decidiu-se por adotar 20 replicações também para cada corrida de simulação.

A **Tabela 25** detalha a estimativa de prazo para todo o processo de testes de simulação:

Tabela 25. Resumo geral da duração total dos testes de simulação

RESUMO - DURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS E DE DESEMPENHO -		
Quantidade de replicações por corrida	Duração da corrida de simulação	Quantidade de simulações
20	20 minutos	21
7 computador-horas = 0,3 computador-dias		

Fonte: o autor

Para as análises de sensibilidade, no que se aplica às corridas de otimização e às corridas de simulação, são adotadas as mesmas premissas para cada processo e cada mudança proposta.

As **Tabelas 26** e **27** detalham as estimativas de prazo para todo o processo de análise de sensibilidade, otimizado e simulado:

Tabela 26. Resumo da duração total das análises de sensibilidade (otimizações)

RESUMO - DURAÇÃO DOS TESTES DE OTIMIZAÇÃO PARA ANÁLISES DE SENSIBILIDADE -			
Quantidade de replicações de simulação por iteração	**Duração da iteração**	**Quantidade de iterações por corrida / teste**	**Quantidade de testes**
20	15 segundos	170	160
113,3 computador-horas = 4,7 computador-dias			

Fonte: o autor

Tabela 27. Resumo da duração total das análises de sensibilidade (simulações)

RESUMO - DURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE VARIÁVEIS DE DESEMPENHO PARA OS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE -		
Quantidade de replicações por corrida	**Duração da corrida de simulação**	**Quantidade de simulações**
20	20 minutos	168
56 computador-horas = 2,3 computador-dias		

Fonte: o autor

A **Tabela 28**, por fim, consolida todas as etapas e durações dos experimentos previstos na pesquisa:

Tabela 28. Resumo geral da duração total dos experimentos

RESUMO GERAL - ETAPAS E DURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS -				
ETAPAS		QUANTIDADE	DURAÇÃO TOTAL	
			computador-horas	computador-dias
TESTES DE OTIMIZAÇÃO		20	14,2	0,6
SIMULAÇÕES		21	7,0	0,3
TESTES DE SENSIBILIDADE	OTIMIZAÇÕES	160	113,3	4,7
	SIMULAÇÕES	168	56,0	2,3
TOTAL		**369**	**190,5**	**7,9**

Fonte: o autor

5.2. RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO E DAS SIMULAÇÕES NA SITUAÇÃO ÓTIMA

Como já mencionado, os testes de otimização e as simulações de resultados operacionais e de desempenho foram segregados em dois cenários: sem mudanças, identificada pela sigla Cen.0.C, e com mudanças, identificada como Cen.1.C. Os experimentos sem mudanças foram realizados sem otimização (U_0 e M_0) e com

otimização (U_1 e M_1). Já nos testes com mudanças, todos foram realizados com otimização (U_2 à U_8 e M_2 à M_{13}).

Após a realização dos testes e obtidos os resultados em cada cenário e em cada experimento, os dados foram planilhados e organizados de forma a permitir a comparação das diferenças e das evoluções na experimentação, conforme descrito no **APÊNDICE D** - DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÂO-OTIMIZAÇÃO E DAS SIMULAÇÕES NA SITUAÇÃO ÓTIMA.

Destaca-se cono resultados com efeitos mais significativos sobre o desempenho da cadeia, a função-objetivo (consumo total anual) o indicador operacional Modal Ferroviário e o indicador de desempenho *Lead time* do pedido. A **Tabela 29** a seguir consolida os resultados dos testes realizados para essas 3 variáveis:

Tabela 29. Resultados dos testes de simulação-otimização e das simulações na situação ótima para 3 variáveis: consumo total anual, modal ferroviário e *Lead time* do pedido

RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO									
Fator	Caso Teste	fator e nível	Estoques				Objetivo	Modal Ferroviário	Variáveis de desempenho da cadeia
			Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)	Maximização do Consumo total anual do insumo carvão (ton/ano)	% médio do uso de vagões por viagem (% / viagem)	Lead Time médio pedido (h)
Cenário.0.C									
---	$U_0 = M_0$	_____	30.000	60.000	60.000	900	383.680	64,0%	609
Único e Múltiplo	*Simulação-Otimização OptQuest **							*Simulação Arena ***	
	$U_1 = M_1$	*fcmp0= fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	30.312	13.166	88.910	308	447.720	32,9%	745
Cenário.1.C									
*Simulação-Otimização OptQuest **								*Simulação Arena ***	
Único	U_2	*fcmp1*	37.697	72.400	89.810	897	449.154	54,1%	600
	U_3	*fcmp2*	36.711	88.428	84.282	836	452.262	60,1%	594
	U_4	*fcmp3*	31.966	88.780	80.082	374	449.624	69,1%	600
	U_5	*fcd1*	40.000	25.682	90.000	891	447.169	65,5%	744
	U_6	*fcd2*	16.151	26.874	89.347	428	441.788	66,0%	809
	U_7	*fcm1*	32.321	9.644	86.905	452	331.599	23,0%	761
	U_8	*fcm2*	16.656	34.970	85.884	900	186.315	67,3%	702
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	30.560	73.210	69.516	744	331.042	48,4%	591
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	27.899	24.758	83.812	549	186.206	53,9%	752
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	35.497	36.264	86.506	871	326.970	57,0%	728
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	24.105	42.956	89.839	898	186.329	51,7%	656
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	27.762	87.329	90.000	395	330.524	62,9%	595
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	39.955	21.141	86.489	900	186.255	52,7%	756
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	35.410	90.000	85.488	900	327.191	61,4%	608
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	35.692	4.267	89.933	881	185.997	25,6%	994
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	25.912	46.998	72.409	530	330.952	67,9%	638
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	40.000	19.258	90.000	900	186.230	63,4%	741
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	10.200	82.383	86.854	900	327.783	72.7%	587
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	36.763	13.187	89.251	808	186.188	65,3%	896

* Modelo de otimização configurado para uma corrida de 170 iterações, cada uma com 20 replicações de simulação.

** Modelo de simulação ajustado e configrurado para corrida de 20 replicações, *warm up* de 60 dias e cada replicação com duração de 360 dias.

Fonte: o autor

A **Figura 42** a seguir apresenta um gráfico com os perfis de evolução dos resultados das variáveis operacionais e de desempenho gerados pelos testes de otimização e pelas simulações das situações ótimas, plotadas em escalas independentes (consumo 1:1000, *lead time* 1:10, interrupções 1:100, % uso de vagões 1:1, taxa de ocupação de recursos 1:1, nível médio de estoques no pátio 1:1 e viagens de navio 1:1). Nele se consegue comparar os aumentos e as reduções entre as variáveis.

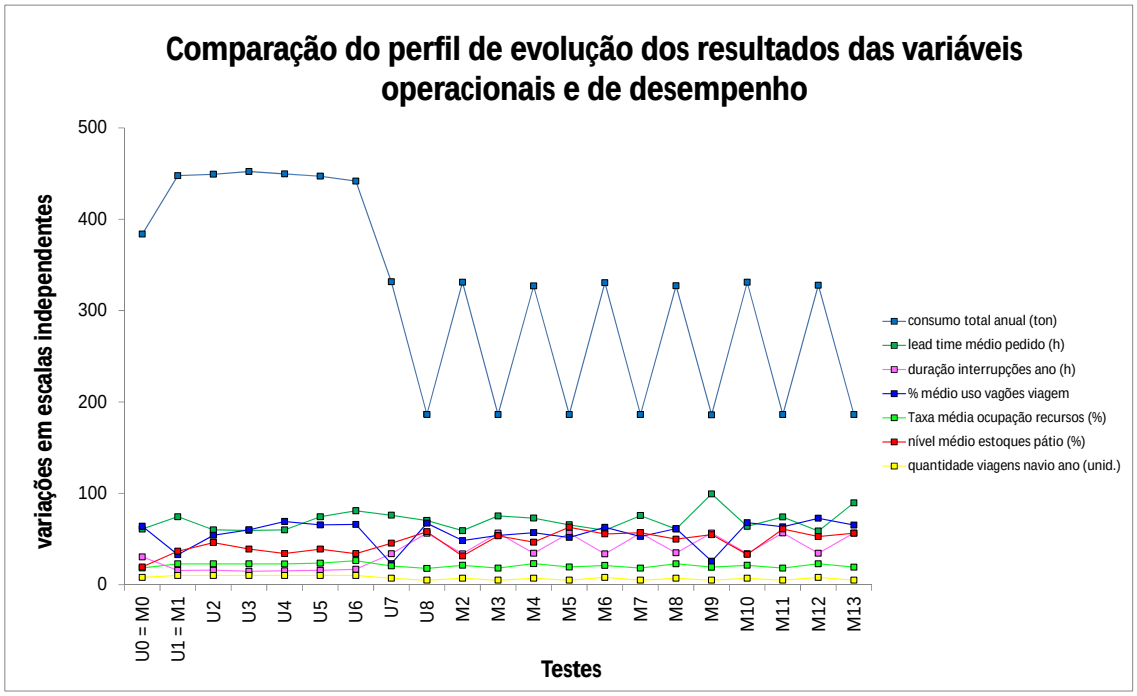


Figura 42. Gráfico de comparação do perfil de evolução dos resultados dos testes de otimização e das simulações das situações ótimas, em escalas independentes.

Fonte: o autor

Da análise dos testes de simulação-otimização, observa-se que:

- A proposta de otimização do simulador, efetivada pelas 20 proposições testadas nessa pesquisa (casos teste U_1=M_1 à U_8 e M_2 à M_{13}) traz ao ambiente estudado, resultados satisfatórios ao objetivo de maximização do consumo total anual do insumo carvão, bem como a melhoria de indicadores de desempenho identificados na cadeia de suprimento em análise. Por outro lado, também mostrou que resultados piores à situação inicial podem ser obtidos. Passa-se, portanto, à análise criteriosa dos valores obtidos nos experimentos e, mais a frente, ao levantamento de possíveis causas dos melhores e dos piores resultados.

- O teste de simulação-otimização U_3 (com redução do número de vagões de trem de 400 para 200) apresentou o melhor resultado de consumo total anual do insumo carvão, estimado em 452.262 toneladas. Também obteve o melhor resultado de duração de interrupções na produção de pelotas de minério de ferro, estimado em apenas 1.469 horas por ano. Outro ganho foi quanto à taxa média de ocupação da Unidade de moinhos, com 86,1 % de uso durante o ano. Na situação inicial, atinge-se 383.680 toneladas de consumo, 3.044 horas de interrupção e 68,8 % de ocupação dos moinhos. Já os piores resultados otimizados desses três indicadores foram, respectivamente: 185.997 toneladas (caso teste M_9), 5.660 horas (caso teste M_{11}) e 85,6 % (caso teste U_6), sendo os dois primeiros ainda piores que a própria situação inicial.

- O teste de simulação-otimização U_6 (com redução do número de descarregadores de vagões de 3 para 1) apresentou o melhor resultado para a taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia, estimada em 26,4 %. Na situação inicial, atinge-se 18,4 %, apenas. Já o pior resultado otimizado foi de 17,8 % no caso teste U_8.

- O teste de simulação-otimização M_{12} (com redução do número de vagões de 400 para 100, redução do número de descarregadores de 3 para 1 e redução do número de moinhos de 3 para 2) apresentou o melhor resultado para o percentual médio de uso de vagões por viagem de trem, estimado em 72,7 %, e também para o *lead time* do pedido, com o menor valor de 587 horas. Na situação inicial, atinge-se, respectivamente, 64,0 % e 609 horas. Já o pior resultado otimizado para o uso de vagões foi de 23,0 % (caso teste U_7) e para o lead time foi de 994 horas (caso teste M_9), abaixo ainda piores do que a situação inicial.

- O teste de simulação-otimização M_5 (com redução do número de vagões de 400 para 300, redução do número de descarregadores de 3 para 1 e redução do número de moinhos de 3 para 1) apresentou o melhor resultado para o nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto, estimado em 62,9%. Na situação inicial, atinge-se 19,5 %, apenas. Já o pior resultado otimizado foi de 31,4 % no caso teste M_2.

- Os testes de simulação-otimização U_1=M_1 (sem mudanças na cadeia) e U_2, U_3, U_4, U_5, U_6 (com reduções do número de vagões e do número de descarregadores de vagões), apresentaram as maiores necessidades de viagens de navios (10 viagens por ano) e consequentemente maiores custos de afretamento, porém, em contrapartida, ofereceram os maiores valores de consumo total anual, sendo que, entre eles, o teste U_3 oferece uma maior fração de consumo por viagem (cerca de 45.200 toneladas consumidas / viagem de navio). No todo, o teste U_7 (redução do número de moinhos de 3 para 2), mesmo não representando o maior consumo, apresenta a melhor fração de todo o conjunto de testes, estimada em 47.400 toneladas consumidas / viagem de navio. A pior contribuição é oferecida pelo teste M_9 (com redução do número de vagões de 400 para 200, redução do número de descarregadores de 3 para 1 e redução do número de moinhos de 3 para 1), estimada em 37.200 toneladas consumidas / viagem de navio. Avalia-se, portanto, que a menor quantidade de viagens solicitadas não é necessariamente o melhor para o desempenho da cadeia.

- Mesmo que se tenha obtido resultados distintos de taxa média de ocupação da Unidade de moinhos, percebe-se que para todos os casos teste otimizados no cenário Cen.1.C (com mudanças na cadeia) as variações dessa variável são mínimas ao ponto de não ser parâmetro relevante na tomada de decisão entre os casos testes otimizados. Porém, constata-se que a otimização da cadeia promove maiores taxas de uso do que a situação inicial, indicando que a otimização é favorável à melhoria do desempenho. Esse indicador apresenta valores superiores à 85% desde o caso U_1 até o caso $M_{13.}$

- A partir do caso teste U_7, em que foram testadas diversas mudanças em três elementos da cadeia (vagões, descarregadores de vagões e Unidade de moinhos), percebe-se que quando se altera a quantidade de moinhos, qualquer alteração de outro fator se torna irrelevante para aferir o consumo total anual do insumo carvão, tamanho é o impacto que a Unidade de moinhos causa sobre esse indicador. Assim sendo, os valores passam a ser cerca de 330.000 ou 186.000 toneladas, até o teste M_{13}. Porém, seu efeito em conjunto com os outros fatores não deve ser ignorado diante dos outros indicadores que não apresentam esse mesmo comportamento.

- Do conjunto de testes de simulação-otimização executados, sugere-se que os casos testes U_1=M_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6 e M_{12} são os que oferecem os melhores desempenhos à cadeia, em um ou mais indicadores avaliados. Desses, selecionam-se os testes U_3, U_6 e M_{12} como aqueles com mais indicadores melhorados. Já os casos teste U_8, M_3, M_5, M_7, M_9, M_{11}, M_{13}, M_5 são os que oferecem os menores desempenhos à cadeia, em um ou mais indicadores avaliados, principalmente no que diz respeito ao consumo e à duração de interrupções na produção.

- Importa esclarecer que, como se trata de uma hipótese de ambiente externo favorável à redução de ativos e também a partir do plano de ação proposto, qual seja o de maximizar o consumo de carvão para maximizar a produção de pelotas de minério de ferro de forma a compensar as reduções da capacidade instalada, melhor ou pior resultado significam, nesse contexto, menores ou maiores perdas de produtividade, respectivamente.

- A experimentação de simulação-otimização sugere o caso teste U_3 como aquele que oferece um saldo maior de resultados favoráveis à cadeia e o caso teste M_9 como aquele com um saldo maior de resultados desfavoráveis. O caso teste M_{12} também oferece ótimos resultados de uso dos equipamentos ferroviários e de minimização do *lead time* do pedido de reposição de estoques no Pátio bruto de insumo bruto, porém avalia-se que esses ganhos não superam o aumento da produção e a redução dos lucros cessantes oferecidos pelo caso U_3. O caso U_6, por sua vez, apresenta melhoria em 1 indicador de desempenho a menos que o caso M_{12}.

- O caso teste U_3, sugerido como adequado em função do conjunto de melhorias avaliadas nesse estudo hipotético de otimização, indica a seguinte decisão nos níveis de trabalho nos pontos de estocagem: Estoque na Mina do Fornecedor de 36.711 toneladas, Estoque no Porto do Fornecedor de 88.428 toneladas, Estoque no Pátio de insumo bruto de 84.282 toneladas e Estoque nos Silos Diários de 836 toneladas. Isso não implica em mudanças na política de estoques, mas sim alteração no tamanho dos pedidos de reposição de estocagem.

- Os testes de simulação-otimização associados à simulação de variáveis operacionais e variáveis de desempenho selecionados no estudo fornece informações relevantes, mas não conclusivas, para a tomada de decisão sobre os níveis dos 4 pontos de estocagem, de forma que uma avaliação quantitativa de custos e uma avaliação qualitativa do negócio e do produto são indicadas para também serem feitas, em virtude de variações no mercado de preços e de requisitos, notórios nesse tipo de negócio.

A **Tabela 30** resume as análises dos resultados obtidos dos nos testes de simulação-otimização, classificando as proposições quanto à sua atratividade para o desempenho da cadeia:

Tabela 30. Resumo das análises dos resultados dos testes de simulação-otimização

RESUMO GERAL - ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO -		
ITEM	CASO TESTE MAIS ATRATIVO	CASO TESTE MENOS ATRATIVO
CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO	U_3 ⇧	M_9 ⇩
LEAD TIME MÉDIO DO PEDIDO	M_{12} ⇩	M_9 ⇧
TAXA MÉDIA DE OCUPAÇÃO DOS RECURSOS DA CADEIA	U_6 ⇧	U_8 ⇩
DURAÇÃO DE INTERRUPÇÕES DA PRODUÇÃO DE PELOTAS POR ANO	U_3 ⇩	M_{11} ⇧
NÍVEL MÉDIO DE ESTOQUES NO PÁTIO DE INSUMO BRUTO	M_5 ⇧	M_2 ⇩
TAXA MÉDIA DE OCUPAÇÃO DA UNIDADE DE MOINHOS	U_3 ⇧	U_6 ⇩
% DE USO DE VAGÕES / VIAGEM DE TREM	M_{12} ⇧	U_7 ⇩
FRAÇÃO DE CONSUMO DE CARVÃO POR VIAGEM DE NAVIO	U_7 ⇧	M_9 ⇩
CASO TESTE MAIS FAVORÁVEL	**U_3**	**-**
CASO TESTE MAIS DESFAVORÁVEL	**-**	**M_9**

Fonte: o autor

5.3. RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE

Os testes de sensibilidade tiveram a mesma abordagem dos testes de simulação-otimização, a partir da realização de testes de otimização e de simulações de resultados operacionais e de desempenho, porém com o efeito adicional de variação de capacidades de elementos da cadeia que integram os elos da Transportadora da Mineradora.

A descrição dos resultados de sensibilidade gerados e que demonstram a evolução dos resultados dos casos testes nas 5 diferentes variantes propostas, estão apresentados no **APÊNDICE E** - DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE.

A proposta de avaliação da sensibilidade do simulador submetido a variações de elementos do ciclo de pedido de reposição de estoque Pátio de insumo bruto, efetivada pelas 2 proposições testadas nesta pesquisa (variação no atendimento do pedido e variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido) traz ao ambiente estudado informações importantes à tomada de decisão, em função do efeito das variáveis de gerenciamento dos pedidos sobre o desempenho da cadeia. As estatísticas consolidadas também permitem graduar a sensibilidade dos casos testes.

Os tópicos seguintes se dedicam comparar os resultados das sensibilidades propriamente ditas obtidas parar cada indicador de desempenho selecionado para avaliação, a partir de tabelas que consolidam os dados estatísticos mais relevantes para este estudo.

5.3.1. CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO

A **Tabela 31** consolida análises de sensibilidade do consumo total anual:

Tabela 31. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – consumo total anual do insumo carvão

ANÁLISES DE SENSIBILIDADE - CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO -													
Variação no modo de atendimento do pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**consumo total anual do insumo carvão (ton/ano)**						**Estoques**			
				Variação no atendimento					Δ % consumo	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		U6	*fcd2*		466.158				-	38.982	90.000	89.302	353
MENOR VALOR		M5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*					185.443	-	2.651	72.028	84.816	149
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	**452.411**	399.134	383.680	339.636	**324.766**	33,3%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U6	*fcd2*	465.472	**466.158**	441.788	432.063	**415.012**	11,6%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M13	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	188.167	**188.435**	**186.188**	187.989	187.295	1,2%	-	-	-	-
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**consumo total anual do insumo carvão (ton/ano)**						**Estoques**			
				Variação no atendimento					Δ % consumo	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		U4	*fcmp3*					466.066	-	37.865	88.043	85.976	838
MENOR VALOR		M9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*			185.997			-	35.692	4.267	89.933	881
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	379.959	**387.477**	383.680	380.817	**371.575**	4,1%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U4	*fcmp3*	456.907	464.751	**449.624**	464.340	**466.066**	3,7%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	188.104	188.259	**186.329**	188.443	**188.713**	1,3%	-	-	-	-

Fonte: o autor

Da análise dos testes de sensibilidade do consumo total anual, observa-se que:

- O teste de sensibilidade do indicador de consumo total anual do insumo carvão apresenta como maior valor possível, 466.158 toneladas no caso teste U_6, 3,1 % a mais do que o maior valor obtido em todos os testes da simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de -25% em elementos do atendimento do pedido. Por outro lado, o menor valor possível do mesmo indicador

alcança 185.443 toneladas no caso teste M_5, 0,3 % a menos do que o menor valor obtido em todos os testes de simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de +50% em elementos do atendimento do pedido.

- O caso teste U_6, sugerido como adequado para a busca do maior consumo total anual nesse estudo hipotético de otimização sob o efeito das sensibilidades propostas, indica a seguinte decisão nos níveis de trabalho nos pontos de estocagem: Estoque na Mina do Fornecedor de 38.982 toneladas, Estoque no Porto do Fornecedor de 90.000 toneladas, Estoque no Pátio de insumo bruto de 89.302 toneladas e Estoque nos Silos Diários de 353 toneladas. Isso não implica em mudanças na política de estoques, mas sim alteração no tamanho dos pedidos de reposição de estocagem.

- Ainda para o indicador de consumo total anual do insumo carvão, destaca-se como proposição de maior sensibilidade a do caso teste U_6 no atendimento do pedido, com 11,6 % de variação entre o menor e o maior valor. Já a proposição de menor sensibilidade é a do caso teste M_{13} no atendimento do pedido, com 1,2 % de variação entre o menor e o maior valor. Destaca-se que na situação inicial, com variação no atendimento do pedido, a sensibilidade é ainda maior, com 33,3 % de variação entre o menor e o maior valor.

5.3.2. *LEAD TIME* MÉDIO DO PEDIDO

A **Tabela 32** consolida análises de sensibilidade do *lead time* do pedido:

Tabela 32. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – *lead time* médio do pedido

ANÁLISES DE SENSIBILIDADE - LEAD TIME MÉDIO DO PEDIDO -													
Variação no modo de atendimento do pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Lead Time médio do pedido (h)**						**Estoques**			
				Variação no atendimento					Δ % lead time	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		M10	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*					1.190	-	40.000	5.826	87.495	158
MENOR VALOR		U4	*fcmp3*	241					-	25.491	67.796	83.561	587
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	**305**	475	609	789	**1.018**	117,1%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M10	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	**253**	489	638	762	**1.190**	146,8%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	**286**	670	**994**	951	958	71,3%	-	-	-	-
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Lead Time médio do pedido (h)**						**Estoques**			
				Variação no recebimento					Δ % lead time	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		M5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*					1.089	-	12.707	6.051	87.003	900
MENOR VALOR		M2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	504					-	34.565	75.013	79.677	745
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	551	**530**	609	603	**667**	22,5%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	**532**	565	656	552	**1.089**	85,0%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U8	*fcm2*	706	732	**702**	773	**796**	13,3%	-	-	-	-

Fonte: o autor

Da análise dos testes de sensibilidade do *lead time* médio do pedido, observa-se que:

- O teste de sensibilidade do indicador de *lead time* médio do pedido apresenta como menor valor possível, 241 horas no caso teste U_4, 59 % a menos do que o

menor valor obtido em todos os testes da simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de -50% em elementos do atendimento do pedido. Por outro lado, o maior valor possível do mesmo indicador alcança 1.190 horas no caso teste M_{10}, 19,7% a mais do que o maior valor obtido em todos os testes de simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de +50% nos elementos do atendimento do pedido.

- O caso teste U_4, sugerido como adequado para a busca do menor *lead time* médio do pedido nesse estudo hipotético de otimização sob o efeito das sensibilidades propostas, indica a seguinte decisão nos níveis de trabalho nos pontos de estocagem: Estoque na Mina do Fornecedor de 25.491 toneladas, Estoque no Porto do Fornecedor de 67.796 toneladas, Estoque no Pátio de insumo bruto de 83.561 toneladas e Estoque nos Silos Diários de 587 toneladas. Isso não implica em mudanças na política de estoques, mas sim alteração no tamanho dos pedidos de reposição de estocagem.

- Ainda para o indicador de *lead time* médio do pedido, destaca-se como proposição de maior sensibilidade a do caso teste M_{10} no atendimento do pedido, com 146,8 % de variação entre o menor e o maior valor. Já a proposição de menor sensibilidade é a do caso teste U_8 no recebimento do pedido, com 13,3 % de variação entre o menor e o maior valor.

5.3.3. TAXA MÉDIA DE OCUPAÇÃO DO CONJUNTO DE RECURSOS DA CADEIA

A **Tabela 33** consolida análises de sensibilidade da taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia:

Tabela 33. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia

ANÁLISES DE SENSIBILIDADE - TAXA MÉDIA DE OCUPAÇÃO DO CONJUNTO DE RECURSOS DA CADEIA -													
Variação no modo de atendimento do pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Taxa média do conjunto de recursos da cadeia (%)**						**Estoques**			
				Variação no atendimento					Δ % ocupação	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		U6	*fcd2*		26,7%				-	38.982	90.000	89.302	353
MENOR VALOR		U0 = M0	---					16,3%	-	30.000	60.000	60.000	900
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	**22,6%**	19,5%	18,4%	17,1%	**16,3%**	34,2%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	21,4%	**22,8%**	**21,2%**	22,1%	21,6%	7,5%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U5	*fcd1*	24,0%	**24,0%**	**23,6%**	23,6%	24,0%	1,6%	-	-	-	-
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Taxa média do conjunto de recursos da cadeia (%)**						**Estoques**			
				Variação no recebimento					Δ % ocupação	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		U6	*fcd2*					28,9%	-	35.853	77.501	85.459	853
MENOR VALOR		M7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	16,4%					-	11.581	74.903	83.158	381
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	**16,7%**	18,3%	18,4%	20,5%	**20,7%**	21,8%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U4	*fcmp3*	**20,2%**	21,8%	22,7%	24,4%	**26,0%**	25,8%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	**18,2%**	19,1%	19,2%	20,0%	**20,4%**	11,5%	-	-	-	-

Fonte: o autor

Da análise dos testes de sensibilidade da taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia, observa-se que:

-- O teste de sensibilidade do indicador de taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia apresenta como maior valor possível, 28,9 % no caso teste U_6,

9,5 % a mais do que o maior valor obtido em todos os testes da simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de +50% em elementos do recebimento do pedido. Por outro lado, o menor valor do mesmo indicador se tem quando se mantém a situação inicial (sem otimizações e sem mudanças), alcançando 16,3 %, 8,4 % a menos do que o menor valor obtido em todos os testes de simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de +50% nos elementos do atendimento do pedido.

- O caso teste U_6, sugerido como adequado para a busca da maior taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia nesse estudo hipotético de otimização sob o efeito das sensibilidades propostas, indica a seguinte decisão nos níveis de trabalho nos pontos de estocagem: Estoque na Mina do Fornecedor de 35.853 toneladas, Estoque no Porto do Fornecedor de 77.501 toneladas, Estoque no Pátio de insumo bruto de 85.459 toneladas e Estoque nos Silos Diários de 853 toneladas. Isso não implica em mudanças na política de estoques, mas sim alteração no tamanho dos pedidos de reposição de estocagem.

- Ainda para o indicador de taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia, destaca-se como proposição de maior sensibilidade a do caso teste U_4 no recebimento do pedido, com 25,8 % de variação entre o menor e o maior valor. Já a proposição de menor sensibilidade é a do caso teste U_5 no atendimento do pedido, com 1,6 % de variação entre o menor e o maior valor. Destaca-se que na situação inicial, com variação no atendimento do pedido, a sensibilidade é ainda maior, com 34,2 % de variação entre o menor e o maior valor.

Adicionado a isso, diante da criticidade dos efeitos do desempenho do uso da Unidade de moinhos sobre a cadeia e em face de sua relevância no desempenho produtivo da cadeia como um todo, uma vez que é recurso com papel fundamental no escoamento da produção, o seu funcionamento ou mau funcionamento pode torná-lo um gargalo operacional, o que impactaria diretamente em diversas variáveis de desempenho da cadeia, de fato, em todas as que foram selecionadas nesse estudo.

Assim, a avaliação da sensibilidade do nível de ocupação da Unidade de moinhos se torna informação individualmente importante ao tomador de decisão para se verificar as suas variações diante das condições de operação na cadeia.

Especificamente quanto à taxa de ocupação do recurso Unidade de moinhos, os testes de sensibilidade no atendimento do pedido e no recebimento do pedido não surtem relevante efeito para variação desse indicador em cenários otimizados, uma vez que, após primeiro caso teste de simulação-otimização U_1=M_1, atinge-se valores acima de 85 %, sendo que a sensibilidade no atendimento do pedido apresenta seu maior valor com 87,5 %, obtido no caso teste M_8 quando considera uma variação de -25%. Já a sensibilidade no recebimento do pedido apresenta seu menor valor com 85,1 % obtido no caso teste U_5 quando considera uma variação de -50%. Portanto, o grau médio de sensibilidade dos cenários otimizados gira em torno de 2,8 %. Entretanto, uma relevante sensibilidade é realmente percebida na variação do atendimento do pedido na situação inicial (30 %).

5.3.4. DURAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES DE PRODUÇÃO POR ANO

A **Tabela 34** consolida análises de sensibilidade da duração de interrupções de produção de pelotas:

Tabela 34. Análises de sensibilidade no atendimento e no recebimento do pedido – duração de interrupções da produção de pelotas por ano

ANÁLISES DE SENSIBILIDADE - DURAÇÃO DE INTERRUPÇÕES DA PRODUÇÃO POR ANO -													
Variação no modo de atendimento do pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Interrupções de produção de pelotas por ano (h/ano)**						**Estoques**			
				Variação no atendimento					Δ % interrupção	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		M11	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*			5.660			-	40.000	19.258	90.000	900
MENOR VALOR		U6	*fcd2*		1.119				-	38.982	90.000	89.302	353
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	**1.339**	2.199	3.044	3.163	**3.398**	67,6%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U6	*fcd2*	1.132	**1.119**	1.690	1.668	**1.943**	48,8%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U8	*fcm2*	**5.576**	5.586	**5.640**	5.594	5.602	1,1%	-	-	-	-
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Interrupções de produção de pelotas por ano (h/ano)**						**Estoques**			
				Variação no recebimento					Δ % interrupção	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		M11	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*			5.660			-	40.000	19.258	90.000	900
MENOR VALOR		U4	*fcmp3*					1.117	-	37.865	88.043	85.976	846
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	2.515	**2.391**	**3.044**	2.490	2.640	21,5%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U2	*fcmp1*	1.180	1.291	**1.593**	1.242	**1.167**	26,7%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	5.595	5.588	**5.649**	**5.587**	5.590	1,1%	-	-	-	-

Fonte: o autor

Da análise dos testes de sensibilidade, da duração total de interrupções da produção de pelotas por ano, observa-se que:

- O teste de sensibilidade do indicador de duração anual de interrupções da produção de pelotas de minério de ferro apresenta como menor valor possível, 1.117 horas no caso teste U_4, 24 % a menos do que o menor valor obtido em todos os testes da simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma

variação de +50% em elementos do recebimento do pedido. Por outro lado, o maior valor possível do mesmo indicador alcança 5.660 horas no caso teste M_{11}, o maior valor obtido entre todos os testes de simulação-otimização e entre todos os testes de sensibilidade. Isso é conseguido quando se considera uma variação de 0% nos elementos do atendimento do pedido e do recebimento do pedido.

- O caso teste U_4, sugerido como adequado para a busca da duração anual de interrupções da produção de pelotas de minério de ferro nesse estudo hipotético de otimização sob o efeito das sensibilidades propostas, indica a seguinte decisão nos níveis de trabalho nos pontos de estocagem: Estoque na Mina do Fornecedor de 37.865 toneladas, Estoque no Porto do Fornecedor de 88.043 toneladas, Estoque no Pátio de insumo bruto de 85.976 toneladas e Estoque nos Silos Diários de 846 toneladas. Isso não implica em mudanças na política de estoques, mas sim alteração no tamanho dos pedidos de reposição de estocagem.

- Ainda para o indicador de duração anual de interrupções da produção de pelotas de minério de ferro, destaca-se como proposição de maior sensibilidade a do caso teste U_6 no atendimento do pedido, com 48,8 % de variação entre o menor e o maior valor. Já a proposição de menor sensibilidade é a do caso teste M_5 no recebimento do pedido, com 1,1 % de variação entre o menor e o maior valor. Destaca-se que na situação inicial, com variação no atendimento do pedido, a sensibilidade é ainda maior, com 67,6 % de variação entre o menor e o maior valor.

5.3.5. NÍVEL MÉDIO DE ESTOQUES NO PÁTIO DE INSUMO BRUTO

A **Tabela 35** consolida análises de sensibilidade do nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto:

Tabela 35. Análises de sensibilidade – nível médio de estoques no pátio de insumo bruto – variação no modo de atendimento do pedido

ANÁLISES DE SENSIBILIDADE - NÍVEL MÉDIO DE ESTOQUES NO PÁTIO DE INSUMO BRUTO -													
Variação no modo de atendimento do pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto (%)**						**Estoques**			
				Variação no atendimento					Δ % estoque pátio	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		M11	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*					67,8%	-	29.473	66.501	90.000	900
MENOR VALOR		U0 = M0	---		18,1%				-	30.000	60.000	60.000	900
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	19,7%	**18,1%**	19,5%	22,5%	**26,9%**	45,2%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M10	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	51,1%	**26,0%**	33,2%	54,8%	**38,3%**	86,7%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U3	*fcmp2*	**35,8%**	37,1%	39,1%	36,4%	**41,5%**	14,5%	-	-	-	-
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido													
Item		**Caso teste**	**fator e nível**	**Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto (%)**						**Estoques**			
				Variação no recebimento					Δ % estoque pátio	Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)
				-50%	-25%	0%	+25%	+50%					
MAIOR VALOR		M5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*				68,2%		-	35.000	78.750	90.000	788
MENOR VALOR		U0 = M0	---					18,4%	-	30.000	60.000	60.000	900
NÍVEIS DE SENSIBILIDADE	**SENSIBILIDADE DA SITUAÇÃO INICIAL**	U0 = M0	---	**22,9%**	21,8%	19,5%	18,4%	**18,4%**	23,4%	-	-	-	-
	MAIOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	M10	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	**64,5%**	44,5%	**33,2%**	42,7%	38,8%	94,5%	-	-	-	-
	MENOR SENSIBILIDADE (Cenários otimizados)	U8	*fcm2*	**58,6%**	56,9%	58,0%	**54,5%**	57,0%	7,0%	-	-	-	-

Fonte: o autor

Da análise dos testes de sensibilidade do nível médio de estoques no pátio de insumo bruto, observa-se que:

- O teste de sensibilidade do indicador de nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto apresenta como maior valor possível, 68,2 % no caso teste M_5, 8,4 % a

mais do que o maior valor obtido em todos os testes da simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de +25% em elementos do recebimento do pedido. Por outro lado, o menor valor do mesmo indicador se tem quando se mantém a situação inicial (sem otimizações e sem mudanças), alcançando 18,1 %, 42,4 % a menos do que o menor valor obtido em todos os testes de simulação-otimização. Isso é conseguido quando se considera uma variação de -25% nos elementos do atendimento do pedido.

- O caso teste M_5, sugerido como adequado para a busca do maior nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto nesse estudo hipotético de otimização sob o efeito das sensibilidades propostas, indica a seguinte decisão nos níveis de trabalho nos pontos de estocagem: Estoque na Mina do Fornecedor de 35.000 toneladas, Estoque no Porto do Fornecedor de 78.750 toneladas, Estoque no Pátio de insumo bruto de 90.000 toneladas e Estoque nos Silos Diários de 788 toneladas. Isso não implica em mudanças na política de estoques, mas sim alteração no tamanho dos pedidos de reposição de estocagem.

- Ainda para o indicador de taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia, destaca-se como proposição de maior sensibilidade a do caso teste M_{10} no recebimento do pedido, com 94,5 % de variação entre o menor e o maior valor. Já a proposição de menor sensibilidade é a do caso teste U_8 no recebimento do pedido, com 7,0 % de variação entre o menor e o maior valor.

A experimentação de sensibilidade sugere primeiramente o caso teste U_4 e em segundo lugar o caso teste U_6 como aqueles que oferecem um saldo maior de resultados favoráveis à cadeia e o caso teste U_0=M_0 e M_{10} como aqueles com um saldo maior de resultados desfavoráveis.

Os testes de sensibilidade fornecem informações relevantes, mas não necessariamente conclusivas, para a tomada de decisão sobre os níveis dos 4 pontos de estocagem, de forma que uma avaliação quantitativa de custos e uma avaliação qualitativa do negócio e do produto são indicadas para também serem feitas, em virtude de variações no mercado de preços e de requisitos, notórios nesse tipo de negócio.

A **Tabela 36** resume as análises dos resultados obtidos dos nos testes de sensibilidade, classificando as proposições quanto à sua favorabilidade para o desempenho da cadeia:

Tabela 36. Resumo das análises dos resultados dos testes de sensibilidade

RESUMO GERAL - ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE -				
ITEM	CASOS TESTE FAVORÁVEIS		CASOS TESTE DESFAVORÁVEIS	
	MELHOR VALOR	MENOR SENSIBILIDADE	PIOR VALOR	MAIOR SENSIBILIDADE
CONSUMO TOTAL ANUAL DO INSUMO CARVÃO	U_6 ⇧	M_{13}	M_5 ⇩	U_6
LEAD TIME MÉDIO DO PEDIDO	U_4 ⇩	M_8	M_{10} ⇧	M_{10}
TAXA MÉDIA DE OCUPAÇÃO DOS RECURSOS DA CADEIA	U_6 ⇧	U_5	U_0 / M_0 ⇩	U_4
DURAÇÃO DE INTERRUPÇÕES DA PRODUÇÃO DE PELOTAS POR ANO	U_4 ⇩	M_5	M_{11} ⇧	U_6
NÍVEL MÉDIO DE ESTOQUES NO PÁTIO DE INSUMO BRUTO	M_5 ⇧	U_8	U_0 / M_0 ⇩	M_{10}
CASOS TESTE MAIS FAVORÁVEIS	**U_4 e U_6**		**-**	
CASOS TESTE MAIS DESFAVORÁVEIS	**-**		**M_{10} e U_0 / M_0**	

Fonte: o autor

5.4. ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

Existem relações sensíveis entre os cinco indicadores estudados e que merecem também uma avaliação holística e integrada devido à unicidade da cadeia. Nesse propósito se insere este tópico, conjugando os efeitos dos indicadores entre si e os efeitos dos indicadores sobre as atividades da cadeia.

Várias são as causas da obtenção de resultados dos testes de simulação-otimização, melhores ou piores do que a situação inicial. Primeiramente, cumpre destacar que a maximização da função-objetivo consumo total anual do insumo carvão não traz necessariamente os melhores resultados para as diversas variáveis de desempenho da cadeia. Uma maior movimentação de produto na cadeia pode significar tanto maior como menor eficiência no uso de recursos, ou um maior ou um menor tempo de atendimento, a depender do comportamento iterativo do modelo. Outras variáveis podem estar diretamente ou inversamente relacionadas como a quantidade de viagens de navios, com tendências claras de causa e efeito. Portanto,

uma análise de classificação dos resultados permitiu ao autor emitir opiniões sobre o problema, mas não conclui o tema em sua essência, abrindo espaço para novas discussões, sejam convergentes ou divergentes.

No modelo de simulação do *case* não se pretendeu um objetivo em específico, como o que ocorre no problema de otimização proposto. Percebe-se que antes mesmo de se manipular os fatores de redução dos ativos da cadeia, consegue-se obter no caso teste U_1 = M_1, um desempenho melhor do consumo de carvão, com simples mudanças de combinações de níveis de estoque de trabalho. Na situação inicial tem-se 383.680 ton/ano e na otimização do cenário.0.C (sem mudanças) já apresenta um consumo maior de 447.720 ton/ano. Confirma-se, portanto, que a cadeia já tinha um potencial de melhoria sem antes realizar qualquer investimento ou desinvestimento em seus ativos.

Outros indicadores testados no simulador a partir da situação ótima obtida no Cenário.0.C também mostram que a cadeia como um todo oferece desempenhos aperfeiçoados quando se redefine os estoques dos elos. O impacto dessa reconfiguração operacional impacta basicamente no rítimo de pedidos e da consequente utilização de recursos e processos, o que não inviabiliza a sua implementação no planejamento operacional. Quanto à operacionalização dessa solução, uma análise mais profunda do negócio em que a empresa atua e dos seus *stakeholders* deve ser feita para adequá-la ao caso concreto.

Nos testes de simulação-otimização do Cenário 1.C (com mudanças) ainda assim persistem melhores resultados até o caso teste U_6. Os fatores de mudança propostos são todos de redução de ativos tendo em vista o seguinte contexto hipotético: Sazonalidade do mercado mundial de minerais metálicos, associado ao seu relevante custo logístico e de produção e à variação no preço dos insumos de produção, em que se traçou o objetivo de maximização do consumo total anual do insumo carvão em cenários de manutenção ou redução na composição de ativos operacionais de uma cadeia de suprimento, por insuficiência do próprio mercado favorecendo a realização de desinvestimentos.

A princípio, uma análise preliminar pode indicar que os resultados deveriam piorar à medida que as reduções dos ativos fossem testadas, uma vez que a capacidade instalada seria consequentemente suprimida. Mas não foi o que se observou. Até o caso teste U_6, em que se avaliaram reduções únicas da quantidade de vagões de trem disponíveis para o transporte entre a Mina do Fornecedor e o Porto do Fornecedor, passando também pelo teste de reduções únicas de descarregadores de vagões, os chamados *car dumpers*, percebeu-se que todos os resultados do indicador de consumo do insumo foram maiores do que na situação inicial. A partir do momento em que se começa a reduzir a quantidade de moinhos da Unidade de moinhos, o que ocorre do caso teste U_7 até o M_{13}, aí então os valores de consumo total de carvão não conseguem mais superar a situação inicial, muito embora outros indicadores analisados apresentem melhores desempenhos. Cada indicador tem sua relação com os níveis de estoque de trabalho, diferentes e independentes entre si, de tal forma que numa mesma situação se podem obter melhorias ou perdas.

As melhorias no desempenho do consumo total do insumo carvão se devem primeiramente ao efeito do processo otimizador que desde o primeiro teste já subiu em 16,7% o seu valor e, à medida que os fatores são reduzidos, o valor decresce permanecendo ainda com os valores acima da situação inicial até que a alteração na Unidade de moinhos é testada. A alteração na Unidade de moinhos ocorre em todos os casos testes a partir do U_7 e, de toda forma, sempre gera perdas nesse indicador.

As melhorias no desempenho da Taxa média do uso de vagões por viagem de trem variam bastante e não há uma causa única para isso. É uma combinação de razões que levam ao aumento nesse valor, seja pelo rítimo e tamanho dos pedidos no Porto do Fornecedor, seja pela quantidade de vagões disponíveis para uso após a aplicação do fator de redução. A tendência é de que quanto mais frequentes são os pedidos de reposição de estoques, menores são os tamanhos dos pedidos e menor é a quantidade de vagões alocados para a realização do transporte. E quanto menor a disponibilidade de vagões para a realização do transporte, a utilização de todos eles tende a ser mais requerido, a depender do rítimo dos pedidos. Portanto, um rítimo de pedidos mais frequente conjugado a uma disponibilidade de menor quantidade de vagões levam à maximização da taxa de uso dos mesmos. O melhor é que se consiga usar a maior quantidade de vagões possíveis, permitindo maior

eficiência operacional nesse elo da cadeia. O pior é que se tenham vagões com capacidade ociosa e desnecessários para serem conservados e mantidos sem uso eficiente, o que ocorre na grande maioria dos casos teste.

Não se conseguiu no estudo obter uma situação de máximo uso dos vagões disponíveis, mesmo porque a função-objetivo era apenas a do consumo, e esse indicador foi gerado pelo simulador. 72,7% foi seu melhor resultado (caso teste M_{12}) e com um grau de redução grande de ativos (vagões, descarregadores e moinhos). Porém o resultado pior de 25,6% (caso teste M_9) também foi oriundo de um grau de redução grande de ativos, o que descarta essa como uma causa. Como já dito no parágrafo anterior, é necessária conjugação de ocorrências. As causas são intrínsecas ao modelo.

As melhorias no desempenho da Quantidade média de viagens de navio por ano podem ser analisadas de mais de um ponto de vista. Avaliando-se puramente a necessidade de contratos de afretamento para as “n” viagens, quanto mais viagens são demandadas por ano, maior o custo total anual no balanço do negócio. Dessa forma, o rítimo de viagens se comporta de forma proporcional ao consumo do insumo carvão, uma vez que elas são requisitadas para a reposição do estoque no Pátio de insumo bruto que, por sua vez, é a principal fonte de abastecimento do processo de moagem, de consumo e de mistura de insumos. Quanto menor o consumo, mais lento é a redução do nível de estoque P.B.M., menor é a frequência de pedidos de reposição do estoque e, portanto, menor é a quantidade de viagens requisitadas. Assim, os melhores resultados são conseguidos a partir do caso teste U_7, quando se começa a verificar reduções na Unidade de moinhos.

Porém outro ponto de vista avalia melhor o desempenho das viagens de navios, quando se obtém a fração média do consumo do insumo por viagem realizada. É um direcionador da eficiência das demandas de viagens em função do ganho que se obtém com os pedidos de reposição de estoque P.B.M. Observa-se no estudo que não é necessariamente o caso teste de maior consumo que gera a maior eficiência consumo por viagem. Isso ocorreu na situação inicial U_0=M_0, em que se obteve cerca de 48.000 toneladas consumidas por viagem de navio realizada e nenhum caso teste otimizado superou essa eficiência. Assim não se consegue uma

correlação direta com os outros indicadores, dependendo caso a caso das operações internas na cadeia. De certo que a tendência é que quando se tem uma redução percentual menor do número de viagens em relação à perda de consumo, pior é a eficiência do afretamento.

As melhorias no desempenho do *Lead time* médio do pedido de reposição do estoque P.B.M. também não oferecem respostas correlacionadas diretamente com os outros indicadores, variando de forma aparentemente indefinida. Porém uma relação é clara e certa: Quanto menor o tempo de entrega do pedido, melhor o desempenho do ciclo do pedido e mais rapidamente a cadeia funciona e atende os processos a jusante. E isso se obtém principalmente por duas causas: a disponibilidade do insumo em estoque no Porto do Fornecedor em quantidade suficiente para que seja necessário o mínimo de viagens de navios para entrega de todo o pedido e a disponibilidade dos recursos do Porto da Mineradora para recebimento e deposição da carga no Pátio de Insumo Bruto. Como o Porto da Mineradora somente se ocupa quando chegam os navios, a preocupação maior fica no nível de estoque do Porto do Fornecedor. As eficiências dos modais de transportes e dos recursos do Porto da Mineradora também influenciam bastante nesse indicador, assunto esse que será tratado nas análises de melhorias por sensibilidade.

As melhorias no desempenho da Taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia mostram que se obtêm as maiores taxas de uso das Moegas enquanto não se reduz a Unidade de moinhos. A mesma coisa ocorre com os caminhões de carvão, os carregadores de vagão e os descarregadores de navio. Já a taxa de ocupação dos descarregadores de vagões tem um comportamento bastante variável, estando a maioria dos melhores resultados no rol de casos testes que envolvem redução na Unidade de moinhos. Muito embora se perceba essa diferença de comportamento entre as taxas de ocupação dos recursos, sem redução ou com redução na Unidade de moinhos, a taxa de ocupação dos moinhos permanece na faixa dos 86% independentemente da quantidade de moinhos testada. Isso mostra que a quantidade de moinhos disponíveis afeta diversos indicadores de desempenho da cadeia, como os listados neste parágrafo e também nos anteriores, porém não afeta a sua capacidade útil e ociosa. É um recurso que não altera seu

rendimento, gerando uma preocupação de gargalo operacional (interrupções) caso seja diminuída a sua disponibilidade. Isso impacta diretamente na redução do consumo.

As melhorias no desempenho da Duração de interrupções da produção de pelotas por ano se devem primeiramente ao efeito do processo otimizador que desde o primeiro teste já desceu em 47,7% o seu valor e, à medida que os fatores são reduzidos, o valor acresce permanecendo ainda com os valores abaixo da situação inicial até que a alteração na Unidade de moinhos é testada. A alteração na Unidade de moinhos ocorre em todos os casos testes a partir do U_7 e, de toda forma, sempre gera perdas nesse indicador. A duração de interrupções assim como o consumo do insumo está, portanto, diretamente e fortemente relacionadas com a alteração na Unidade de moinhos.

Conclui-se que a Unidade de moinhos é um balizador importante numa avaliação de desinvestimentos na cadeia. Sem alterá-la, indicadores de desempenho relevantes melhoram, mas outros pioram, uns até muito, quando se pretende reduzir a quantidade de moinhos. Um moinho realmente possui um custo operacional e de manutenção alto, além de ser um ativo de alto valor imobilizado, porém deve se ter em mente as perdas que a sua supressão ocasiona na movimentação do insumo carvão.

As melhorias no desempenho do Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto mostram uma tendência de aumento do caso teste U_0=M_0 ao M_{13}. À medida que se amplifica a quantidade de reduções dos ativos da cadeia (vagões, descarregadores de vagão e moinhos), se obtém em média mais volumes estocados no Pátio. Isso se explica pela tendência de redução do consumo e pela tendência de aumento da duração de interrupção da produção, que favorece ao acúmulo do produto à montante.

Os testes de sensibilidade demonstram também que ao se variar processos da cadeia, se obtêm repostas da simulação-otimização indicando, dentro de um *range* de incertezas, o que pode melhorar ou piorar.

No estudo, buscou-se avaliar incertezas que podem gerar alterações nos processos da cadeia, independentemente de ações planejadas, ou seja, aquelas que poderiam ser inevitáveis e que impactariam no desempenho operacional. Ao se selecionar as variações no ciclo do pedido de reposição do estoque do Pátio de insumo bruto, seja no seu atendimento ou no seu recebimento, conseguiu-se atender eficazmente esse propósito, além de demonstrar uma boa correlação com o funcionamento da cadeia.

Quando se atendem aos pedidos com embarcações menores e com tempos de viagens mais curtos desde o Porto do Fornecedor, percebem-se na observação das melhorias nos seguintes indicadores de desempenho: Consumo total anual de carvão, *Lead time* médio do pedido, Taxa média de ocupação do conjunto de recursos, Taxa média de ocupação dos moinhos e Duração de interrupções na cadeia. O indicador do Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto não responde a essa sensibilidade de forma clara, possuindo melhoras e pioras, a depender do caso teste. Porém uma tendência pode ser estimada quando se diz que a variação de + 50% na capacidade de transporte marítimo promove melhorias no aproveitamento da capacidade disponível para estocagem no Pátio.

Quando se recebem os pedidos com o aumento na velocidade das operações dos recursos (redução dos tempos de operação) no Porto da Mineradora, percebem-se melhorias nos seguintes indicadores de desempenho: *Lead time* médio do pedido e Taxa média de ocupação dos moinhos. O indicador de Consumo total anual de carvão tende a melhorar. O indicador de Duração de interrupções na cadeia tende a piorar. O indicador da Taxa média de ocupação do conjunto de recursos por outro lado piora. Já o indicador o Nível médio de estoques no Pátio não permite extrair alguma tendência. Porém, nesse último indicador observam-se casos teste com mais melhorias do que pioras.

Na sensibilidade de atendimento do pedido no indicador de Consumo total anual de carvão, avalia-se que o aumento da rapidez das entregas, mesmo que em volumes menores e consequentemente em mais viagens, favorece a agilidade no fluxo do insumo até o misturador, mesmo porque se consegue retomar a operação a jusante do Porto da Mineradora mais cedo, mesmo que o estoque não esteja totalmente reabastecido. Isso pode gerar algumas interrupções de consumo intercorrentes (por

motivo de esvaziamentos mais frequentes nos Silos Diários da Mineradora), porém não ao ponto de piorar o consumo total do ano. Entretanto, quando se pretende abastecer a Mineradora com frações de insumo maiores por viagem de navio, verifica-se certo prejuízo na produtividade da cadeia.

Já na sensibilidade de recebimento do pedido no indicador de Consumo total anual de carvão, avalia-se que o aumento da rapidez dos descarregadores do navio e dos caminhões que movimentam a carga no Porto da Mineradora também provoca um aumento no consumo. De fato, o seu efeito é semelhante ao da rapidez do atendimento pelo transporte marítimo, oferecendo produto de forma mais continuada às operações à jusante do porto. E como durante as iterações do simulador se observou que o Estoque P.B.M. não “topa”, a velocidade de reposição só vem a agregar valor nos processos seguintes ao da movimentação no Porto da Mineradora.

Outra observação é que a melhora do consumo em função do nível de atendimento do pedido é mais acentuada na situação inicial. A piora também. O mesmo não ocorre quando varia o nível do recebimento do pedido. Em todos os outros casos teste de otimização, as melhorias e pioras são mais tênues. Isso se deve ao fato da distribuição inicial das capacidades de estocagem nos 4 *buffers* ser muito vulnerável ao tempo de espera para a reposição do estoque P.B.M., deixando os recursos operacionais à montante e à jusante, ociosos demasiadamente quando se aumenta essa duração.

Na sensibilidade de atendimento do pedido no indicador de *Lead Time* médio do pedido, avalia-se que o aumento da rapidez das entregas é eficaz ao encerramento mais rápido do ciclo do pedido no Porto da Mineradora. Portanto, o referido porto tem capacidade suficiente para receber cargas mais frequentes, agregando o ganho de tempo no transporte marítimo com o tempo normal de movimentação dos caminhões de carvão. Percebeu-se nas iterações do simulador que essa rapidez não gerou interrupção nas operações do porto, nem algum gargalo operacional nele. As operações transcorreram normalmente. Entretanto, quando se pretende abastecer a Mineradora com mais tempo de espera da chegada de navio no Porto

da Mineradora, há aumento indesejável no tempo de entrega do insumo ao estoque P.B.M.

Já na sensibilidade de recebimento do pedido nesse mesmo indicador, avalia-se que o aumento da rapidez das operações no Porto da Mineradora melhora o seu desempenho pelos efeitos agregadores já mencionados no parágrafo anterior. Como o referido porto tem capacidade para operar num rítimo mais veloz sem interrupções (apenas formação de filas maiores para descarregamento da Moega), a redução dos tempos das rotas de movimentação dos caminhões de carvão gera consequência imediata e positiva no seu *lead time*. E o estoque P.B.M. sempre está disponível para receber insumo, uma vez que não "topa" como já mencionado.

Outra observação a melhora ou piora do *Lead Time* médio do pedido em função do nível de atendimento do pedido é muito acentuada em qualquer caso testado. O mesmo não ocorre quando varia o recebimento do pedido. Isso se deve ao fato dos tempos de transporte marítimo, analisados como variantes das análises de sensibilidade, serem bem maiores que os do transporte rodoviário no Porto da mineradora. É certo que a variação desses tempos impacta diretamente na variação do desempenho desse indicador, pois ambos são variáveis com alto grau de correlação.

Na sensibilidade de atendimento do pedido no indicador de Taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia, avalia-se que com o encurtamento dos tempos entre as entregas do transporte marítimo, embora se gere mais viagens de navios e de menor porte, consegue-se manter os seis recursos avaliados em uso por mais tempo, em média, de modo que, conjuntamente com as reduções de ativos propostas nos testes de otimização-simulação, tende-se a encontrar uma ocupação mais efetiva desses itens. De modo geral, as melhorias na taxa de ocupação de recursos se justificam também pela continuidade operacional que o rítimo mais frequente de entregas dos pedidos imprime sobre o funcionamento da cadeia. Por outro lado, se obtêm resultados piores quando é mais demorada a chegada do pedido no estoque do Pátio de insumo bruto, mesmo que as reposições parciais de insumo sejam mais generosas. Todo esse comportamento muda quando se inicia alterações na Unidade de moinhos, a partir do caso teste U_7, momento em que não

se consegue mais identificar com clareza o comportamento desse indicador. Isso mostra como a Unidade de moinhos é o recurso mais crítico da cadeia e que merece maior atenção do gestor.

Já na sensibilidade de recebimento do pedido, o encurtamento dos tempos de movimentação portuária em vez de aumentar a utilização dos recursos, reduz a taxa de ocupação. Isso se explica pelo fato da maior parte dos recursos analisados estarem contidas no próprio Porto da Mineradora (4 dos 6 recursos) e, com o aumento da eficiência operacional dos mesmos, reduz-se o tempo de uso durante o ano. A análise aqui se contrasta com os tempos de entrega no transporte marítimo, quando se analisa a sensibilidade de forma isolada, ou seja, quando se parte da premissa que o atendimento não sofre variações nos padrões iniciais.

Na sensibilidade de atendimento do pedido no indicador de Duração total de interrupções no consumo, avalia-se que o aumento da rapidez das entregas, mesmo que em volumes menores e consequentemente em mais viagens, favorece à redução do número de interrupções, pelos mesmos motivos de se conseguir o aumento do consumo já dito em parágrafo anterior. As mesmas justificativas de melhora e de piora do desempenho do consumo se aplicam a esse indicador. E na sensibilidade de recebimento do pedido também se traduzem as mesmas causas.

Por último, o desempenho do Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto oferece um perfil arrítmico, sem precisão de correlação com as variáveis aqui analisadas, muito embora se consiga inferir que tanto no atendimento como no recebimento do pedido, as sensibilidades são mais latentes quando se iniciam os testes dos fatores de redução. No Cenário.0.C (sem mudanças na cadeia), se tem pouca variação desse desempenho em função das variações no transporte marítimo e na movimentação do Porto da Mineradora.

Em três indicadores de desempenho (consumo total, taxa de ocupação dos recursos e duração de interrupções no consumo), foram identificados que o tamanho da faixa de sensibilidade dos níveis de atendimento do pedido na situação inicial se contrasta demasiadamente com o dos testes otimizados. Percebe-se que a partir de uma simples redistribuição dos níveis de estoques nos 4 *buffers* (do caso teste U_1=M_1 em

diante) já se obtém uma menor sensibilidade desses indicadores. Isso é positivo ao ponto de minimizar a vulnerabilidade da cadeia frente às incertezas no ciclo de pedido. Isso também demonstra a correlação que existe entre esses 3 indicadores, os quais se comportam e se sensibilizam de formas semelhantes.

Da análise exposta, percebe-se que num cenário de redução de ativos, como foi a hipótese de estudo proposta, já se esperava uma piora natural dos desempenhos dos indicadores, porém muitos resultados surpreenderam com melhorias, mesmo que os recursos, equipamentos e processos testados sejam reduzidos de forma relevante. Isso mostra que nem sempre uma solução de desinvestimentos deva gerar uma supressão do desempenho.

Outro aspecto analisado diz respeito à modelagem propriamente dita. Não se pode afirmar com as premissas e parâmetros adotados na modelagem, bem como com as configurações computacionais do modelo de simulação e de otimização, que há causas iterativas do modelo computacional para a classificação dos resultados. Pode ser que se a quantidade de replicações nas corridas de simulação fossem maiores que as 20 adotadas, reclassificariam-se de forma diferente toda a análise melhores e piores resultados. O processo iterativo de otimização também, com as 170 iterações adotadas, poderia refletir em outra ordem de resultados no caso de serem aplicados menos ou mais iterações. Este estudo não consegue atingir essa discussão com firmeza, uma vez que realizou os testes de simulação-otimização a partir de configurações pré-estabelecidas e padronizadas para todo o processo experimental. Não se alcançou aqui a comparação de mudanças nos parâmetros computacionais do modelo, servindo até como proposta para estudos futuros.

CAPÍTULO 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Nesta pesquisa foi desenvolvida e empregada uma abordagem de solução de otimização em simulação na análise de um sistema complexo e foi demonstrada a sua capacidade em obter sugestões práticas por meio de extensa experimentação no sistema. Especificamente, desenvolveu-se uma metodologia de estudo para apoio à decisão na investigação de possíveis alterações numa cadeia de suprimento de insumos, no caso prático, de uma unidade de fabricação de pelotas de minério de ferro. A experimentação sugere possíveis reduções de perdas significativas num cenário de redução de ativos com ajustes nos níveis de estoque de trabalho, bem como com alterações em componentes do ciclo de pedidos de reposição de estoques.

Uma análise mais aprofundada dos resultados revela o benefício adicional de determinadas alterações ao sistema. Esta valiosa informação pode ser usada para determinar quais mudanças a serem implementadas em função da experiência prática do negócio, assim como em função da expectativa de acréscimo do potencial do consumo do insumo, que, por consequência, ofereceria menores perdas na produtividade da cadeia.

O desempenho e a facilidade de implementação da abordagem da solução proposta sugerem a sua aplicabilidade a outros ambientes complexos, contribuindo para a tomada de decisões estratégicas e operacionais diante de incertezas, muito embora se perceba que desempenhos abaixo da situação inicial também possam ser obtidos.

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a estabilidade de indicadores de desempenho da cadeia de suprimento de insumo carvão para uma indústria do segmento de mineração, possibilitando a tomada de decisões de forma planejada e que minimizem os seus efeitos negativos.

Conforme descrito, a hipótese considerada foi a existência de sazonalidade do mercado mundial de minerais metálicos, associado ao seu relevante custo logístico e de produção e à variação no preço dos insumos, sendo necessário para mitigação

das consequências desse risco, a maximização do consumo total anual do insumo carvão. Abordaran-se cenários prevendo ou não a necessidade de mudanças nos recursos, nos processos e/ou nas suas capacidades. Esses cenários foram norteadores dos experimentos realizados no decorrer do estudo.

A partir de um modelo de simulação pré-concebido em outro *case*, adaptações foram implementadas e a criação de novos modelos foram necessárias para as proposições propostas no plano experimental. As premissas e simplificações assumidas foram cruciais para as rodadas das iterações computacionais e obtenção de resultados satisfatórios.

Os resultados obtidos nos experimentos se mostraram coerentes e devem ser considerados como sugestões práticas exequíveis. Entretanto, vale ressaltar a importância de análises mais criteriosas, por parte de especialistas, antes de qualquer tomada de decisão baseada, única e simplesmente, nas informações geradas a partir dos modelos de simulação-otimização desenvolvidos neste estudo.

Delimitou-se a pesquisa aos experimentos na cadeia de suprimento de carvão mineral, em função da extensão do plano experimental proposto e também em função da suficiência dessa cadeia para se testar diferentes configurações, uma vez que nela se apresentam diversos elementos logísticos, sejam de estoques, de transporte terrestre, de transporte marítimo, de processamento de pedidos, de operações portuárias, de processamento de insumo e de produção. Não se intentou, portanto, elaborar solução para ser implementada de fato pela empresa *case*, mas somente a elaboração e validação de uma metodologia de estudo prática para a avaliação de sistemas complexos similares.

As análises e conclusões dos resultados gerados pelos testes propostos sugerem soluções ao problema tendo como finalidade a melhoria do desempenho da cadeia no máximo de indicadores possíveis. Essas sugestões são acompanhadas de propostas de nivelamento dos 4 pontos de estoques que existem nos diferentes elos da cadeia, a partir das quais já se percebe nitidamente benefícios relevantes.

Como as análises apresentadas neste trabalho, diversas outras podem ser complementadas a partir dos resultados obtidos nos experimentos. Tais análises fornecem subsídios para a cadeia decidir sobre como os desinvestimentos na cadeia de suprimentos devem ser priorizados, para que os objetivos de curto, médio e longo prazos definidos para o produto sejam atingidos.

Porém, nem de tudo tratado neste estudo gerou soluções de melhoria na gestão de estoques da cadeia de suprimento. Resultados piores que a situação inicial foram obtidos, o que indica caminhos a serem evitados. As respostas negativas trazidas pelo modelo devem ser recebidas também como pontos fortes e positivos da pesquisa, uma vez que se consegue obter cada vez o melhor de algo também após se conhecer o seu pior.

Num cenário de redução de ativos, como foi a hipótese de estudo proposta, já se esperava uma piora natural dos desempenhos dos indicadores, porém muitos resultados surpreenderam com melhorias, mesmo que os recursos, equipamentos e processos testados sejam reduzidos de forma relevante. Isso mostra que nem sempre uma solução de desinvestimentos deva gerar uma supressão do desempenho. Este estudo demonstrou que melhorias podem ser obtidas e que, mesmo diminuindo-se os resultados, a economia pode ser proporcionalmente mais vantajosa diante de dificuldades do mercado.

Como extensão deste trabalho, vale apontar algumas oportunidades de aprofundamento na metodologia desenvolvida:

Analogamente, a metodologia poderia ser testada nos outros dois insumos (bentonita e calcário), de forma individualizada ou integrada com o insumo carvão, permitindo uma análise sistêmica de toda a cadeia de suprimento de insumos do modelo simulado, embora demande maior esforço de conteúdo e prazo experimental. Uma análise comparativa entre os benefícios em cada insumo, isoladamente e juntamente considerados, pode contribuir com mais informações na tomada de decisão.

Além disso, outros prováveis cenários podem ser testados utilizando-se os mesmos modelos desenvolvidos ou por meio de novas adaptaçõe. Isto propiciaria uma análise crítica mais ampla das prováveis restrições operacionais quando submetidas a novos cenários.

Outro ponto é a adoção de mudanças nas políticas de estoques e nos processos de gestão das reposições de estoques. Isso traria novas variáveis e alternativas para o processo, além da redefinição dos níveis de trabalho nos estoques.

Uma abordagem não estendida nesta pesquisa é quanto à avaliação de causas iterativas do modelo de simulação-otimização para a classificação dos resultados, não se conseguindo afirmá-las apenas com as premissas e parâmetros adotados na modelagem, bem como com as configurações computacionais do modelo de simulação e de otimização. Este estudo realizou os testes de simulação-otimização a partir de configurações pré-estabelecidas e padronizadas para todo o processo experimental. Propõe-se a avaliação dos efeitos de mudanças nos parâmetros iterativos dos modelos de simulação e/ou de otimização para se comparar os resultados obtidos e as conclusões que podem ser feitas a partir deles.

Por fim, a metodologia desenhada nesta pesquisa poderia ser aplicada a sistemas complexos similares, não necessariamente do mesmo seguimento, contribuindo com o aumento da sua robustez e flexibilidade, com a sua aplicabilidade prática e até com o conhecimento dos limites de sua aplicação. Conclusões que abraçarem essa metodologia ou que a refutarem após testes em outros *cases*, seriam ambas frutíferas para a continuidade do tema desta pesquisa e inclusive para a ciência.

REFERÊNCIAS

AL RIFAI, Mohammad H. ; ROSSETTI, Manuel D. **An efficient heuristic optimization algorithm for a two-echelon (R, Q) inventory system**. International Journal of Production Economics, 2007, v.109, p. 195-213.

ARAS, Necati ; AKSEN, Deniz ; GÔNÛL TANUGUR, Ayse. **Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles**. European Journal of Operational Research, 2008, v.191, p. 1223-1240.

ARAS, Necati ; AKSEN, Deniz. **Locating collection centers for distance- and incentive-dependent returns**. International Journal of Production Economics, 2008, v.111, p. 316-333.

ARENA Version 14.00.00. **OptQuest for Arena User´s Guide.** Rockwell Software Inc., Limited Edition, c.2012.

_____. Rockwell Software Inc., Limited Edition, c.2012.

AZADIVAR, F. (1999). **Simulation optimization methodologies**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Anais…,** 1999. v. 1, p. 93-100.

BACHELET, Bruno ; YON, Loic. **Model enhancement**: Improving theoretical optimization with simulation. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, v.15, p. 703-715.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos e Logística Empresarial**. Tradução Raul Rubenich, 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BANKS, J. ; CARSON, J. S. ; NELSON, B. L. ; NICOL, D. M. **Discrete-event Simulation**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2005.

_____. **Discrete Event Systems Simulation**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000.

BANKS, J et al. **Discrete-Event System Simulation**. 5. Ed., Prentice Hall, 2009.

BANKS, J. **Introduction to Simulation**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000, Orlando, 2000.

BAYINDIR, Z. Pelin ; DEKKER, Rommert ; PORRAS, Eric. **Determination of recovery effort for a probabilistic recovery system under various inventory control policies**. Omega, 2006, v.34, p. 571-584.

BECERRIL-ARREOLA, Rafael ; LENG, Mingming ; PARLAR, Mahmut. **Online retailers' promotional pricing, free-shipping threshold, and inventory**

decisions: A simulation-based analysis. European Journal of Operational Research, 2013, v.230, p. 272-283.

BOUSSAID, I. ; LEPAGNOT, J. ; SIARRY, P. **A survey on optimization metaheuristics**. Information Sciences, 2013, v.237, p. 82-117.

BRICKNER, C. ; INDRAWAN, D. ; WILLIAMS, D. ; CHAKRAVARTHY, S.R. **Simulation of a stochastic model for a service system**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010, Baltimore. **Anais…,** 2010. p. 1636-1647.

BRINZA, Georgiana. **Simulation and optimization in Supply Chain**. Procedia Economics and Finance. 2012, v.3, p. 635-641.

BRITO, Thiago Barros ; SILVA, Rodolfo Celestino dos Santos ; TREVISAN, Edson Felipe Capovilla ; BOTTER, Rui Carlos. **Discrete Event Simulation Combined with Multiple Criteria Decision Analysis as a Decision Support Methodology in Complex Logistics Systems**. Discrete Event Simulations - Development and Applications, chapter 4, InTech, 2012.

BUSH, A.; BILES, W. E.; DEPUY, G. W. **Waterway, shipping, and ports**: iterative optimization and simulation of barge traffic on an inland waterway**.** In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, New Orleans. Proceedings..., 2003. p. 1751-1756.

CARDOSO, D. F. ; VINHOZA, T. T. V. ; SAMPAIO NETO, R. **A simulação como ferramenta de auxílio na avaliação de um sistema de comunicação CDMA com multiplas portadoras.** In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 2007, Rio de Janeiro, . **Anais...** 2007.

CARIS, An. **Simulation and optimization of intermodal barge transport networks**. Operational Research, 2011, v.9, p. 211-214.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2007, 228 f.

CHWIF L. ; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos:** Teoria e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Ed. dos Autores, 2007.

CHWIF, Leonardo ; PAUL, Ray J. ; BARRETTO, Marcos Ribeiro Pereira. **Discrete event simulation model reduction**: A causal approach. Simulation Modelling Practice and Theory, 2006, v.14, p. 930-944.

CONDRATCHI, Liliana Condratchi. **Logistics alternative in simulation and optimization the Supply Chain**. Scientific Papers Series: Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development, 2013, v.13, p. 87

DEMONSTRAÇÕES FINANCEIRAS EM 31 DE DEZEMBRO DE 2015. **Samarco Mineração S.A.** Disponível em: < http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2015/11/DFs-2015-portuges-final-2804.pdf >. Acesso em: 22 mai. 2016.

DIJK, Nico M. van ; SLUIS, Erik van der. **Practical optimization by OR and simulation**. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, v.16, p. 1113-1122.

ECKER, J. G. ; KUPFERSCHMID, M. **Introduction to operations research.** New York: John Wiley & Sons, 1988.

ESKANDARI, Hamidreza ; MAHMOODI, Ehsan ; FALLAH, Hamed ; GEIGER, Christopher D. **Performance analysis of comercial simulation-based optimization packages**: OptQuest and Witness Optimizer. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference, 2011, Phoenix. **Anais…,** 2011. p. 2358-2368.

EVANS, J. ; OLSON, D. L. **Introduction to simulation and risk analysis**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

FAHIMNIA, Behnam ; MOLAEI, Reza ;EBRAHIMI, Mohammad Hassan. **Integration in Logistics Planning and Optimization**. Logistics Operations and Management: Concepts and Models, 2011, p. 371-391.

FERNANDES, Laerte José ; RODRIGUEZ, Luis Alberto Osés ; CORREIA, Anderson Ribeiro ; MARINS, Fernando Augusto Silva. **Planejamento e controle da produção de cilindros para laminação**: um estudo de caso quantitativo. *Production,* 2013, v.23, n.1, p. 120-134.

FREITAS FILHO, P. J. (2001) - “Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas – com aplicações em Arena.” Florianópolis - SC, Visual Books

FU, Michael C. Feature Article: **Optimization for simulation**: Theory vs. Practice. Journal on Computing, 2002, v.14, p. 192-215.

GAVIRA, M. O. **Simulação Computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 2003, 150 f.

GLOVER, F. **Future paths for integer programming and links to artificial intelligence.** Computers & Operationsl Research, 1986, v. 13, p. 533–549.

GLOVER, F. ; LAGUNA, M. **Tabu Search.** Boston: Kluwer Academic, 1997.

GRANGER, J. ; KRISHNAMURTHY, A. ; ROBINSON, S. M. **Approximation and optimization for stochastic networks.** Berlim: Dynamic Stochastic Optimization, 2002. p. 67‑79.

GREWAL, C.S. ; ENNS, S.T. ; ROGERS, P. **Dynamic adjustment of replenishment parameters using optimum-seeking simulation**. In: WINTER

SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010, Baltimore. **Anais…,** 2010. p. 1797-1808.

GUIMARÃES, Rui C. ; KINGSMAN, Brian G. **Simulation-optimization**: The method and its application in the analysis of grain terminal operations. European Journal of Operational Research, 1989, v.41, p. 44-53.

GUMRUKCU, Seda ; ROSSETTI, Manuel D. ; BUYURGAN, Nebil. **Quantifying the costs of cycle counting in a two-echelon supply chain with multiple items**. International Journal of Production Economics, 2008, v.116, p. 263-274.

HARREL C. R. ; GHOSH B. K. ; BOWDEN R. **Simulation Using Promodel**. New York: McGraw- Hill, 2000.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006, 828 p.

HOCHMUTH, Christian A. ; KOCHEL, Peter. **How to order and transship in multi-location inventory systems**: The simulation optimization approach.(Report). International Journal of Production Economics, 2012, v.140, p. 646-654.

KELTON, W. D; SADOWSKI, R. P.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena.** 4. ed. New York: McGraw Hill, 2007.

KESKIN, Burcu B. ; MELOUK, Sharif H. ; MEYER, Ivan L. **A simulation-optimization approach for integrated sourcing and inventory decisions**. Computers and Operations Research, 2010, v..37, p. 1648-1661.

KIRKPATRICK, S. ; GELATT, C. D. ; VECCHI, M. P. **Optimization by simulated annealing.** Science, New Series, 1983, v.220, p. 671–680.

KLEIJNEN, Jack P.C. **An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis**. European Journal of Operational Research, 2005, v.164, p. 287-300.

_____. **Verification and validation of simulation models**. European Journal of Operactional Research – Theory and Methodology, 1995, v. 82, p. 145-162.

KLEIJNEN, Jack P.C. ; BEERS, Wim van ; NIEUWENHUYSE, Inneke Van. **Constrained optimization in expensive simulation**: Novel approach. European Journal of Operational Research, 2010, v.202, p. 164-174.

KLEIJNEN, Jack P.C. ; WAN, Jie. **Optimization of simulated systems**: OptQuest and alternatives. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, v.15, p. 354-362.

KÔCHEL, P. ; KÂMPF, M. **Simulation-based sequencing and lot size optimisation for a production-and-inventory system with multiple items**. International Journal of Production Economics, 2006, v.104, p. 191-200.

KÖCHEL, P. ; KUNZE, S. ; NIELÄNDER, U. **Optimal control of a distributed service system with moving resources**: application to the fleet sizing and allocation problem. International Journal Production Economics, 2003, v. 81-82, p. 443-459.

KULL, Thomas ; CLOSS, David. **The risk of second-tier supplier failures in serial supply chains**: Implications for order policies and distributor autonomy. European Journal of Operational Research, 2008, v.186, p. 1158-1174.

LAW, A. ; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3. ed. McGraw-Hill International Series, 2000.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

LOPES, Heitor S. ; DALLE MOLLE, Vilson ; LIMA, Carlos R. Erig. **Aplicação da otimização por colônia de formigas ao problema de roteamento de múltiplos veículos de capacidade limitada**. In: Simpósio Brasileiro de Inteligência Computacional, 2007, Florianópolis. **Anais ...**, 2007. p. 1-6.

MARTÍ, Rafael et al. **Heuristics and metaheuristics for the maximum diversity problem.** Journal of heuristics, 2013, v.19, p. 591-615.

MEIRELES, Reinaldo Pimentel Loyola. **Modelagem e simulação de malha ferroviária em circuito fechado da Estrada de Ferro Vitória a Minas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2010, 201 f.

MELOUK, Sharif H. ; FREEMAN, Nickolas K. ; MILLER, David ; DUNNING, Michelle. **Simulation optimization-based decision support tool for steel manufacturing**. International Journal of Production Economics, 2013, v.141, p. 269-276.

MIWA, K. ; TAKAKUWA, S. **Optimization and analysis of staffing problems at a retail store**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010, Baltimore. **Anais…,** 2010. p. 1911-1923.

MONTEVECHI, José Arnaldo Barra ; MIRANDA, Rafael de Carvalho ; FRIEND, Jonathan Daniel. **Sensitivity Analysis in Discrete Event Simulation Using Design of Experiments**. Discrete Event Simulations - Development and Applications, chapter 3, Intech, 2012.

MORESI, Eduardo. **Metodologia da Pesquisa**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação, Universidade Católica de Brasília. Brasília-DF, 2003.

MORITO, S. et al. **Simulation based constraint generation with applications to optimization of logistic system design**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999, Phoenix. **Anais…,** 1999. v. 1, p. 531-536.

NASCIMENTO, Rodrigo Meirelles ; CRUZ, Marta Monteiro da Costa. **A evolução do uso de aplicativos em simulação de cadeias de suprimentos**. In: ANPET XXVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2007, Curitiba, **Anais...** 2014.

_____. **Análise da estabilidade de indicadores de desempenho em modelo de simulação de uma cadeia de suprimentos utilizando aplicativo otimizador**. In: ANPET XXVIII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2007, Curitiba, **Anais...** 2014.

NASCIMENTO, Rodrigo Meirelles. **Modelo de otimização cadeia - maximizar consumo total anual do insumo carvão.opt**. Vitória, 10 maio 2016. 1 arquivo (254 kbytes). OptQuest for ARENA Version 14.00.00.

NOBLEPROG TRAINING MATERIALS. **Simulation Optimization**. Disponível em: <http://training-course-material.com/training/Simulation_Optimization>. Acesso em: 02 mai. 2014.

NOVAES, Antonio Galvão. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**: estratégia, operação e avaliação. Rio de Janeiro: Elsevier, 2001.

ÓLAFSSON, Sigurdur ; kIM, Jumi. **Simulation Optimization**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002, San Diego. **Anais…,** 2002. p. 79-84.

OLIVEIRA JÚNIOR, Roberto. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para identificação de gargalos na cadeia de suprimentos de uma empresa de mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2011, 178 f.

_____. **SC_HLT_Aumento Consumo 2 - Insumo 3.doe**. Vitória, 25 agosto 2011. 1 arquivo (888 kbytes). ARENA Version 14.00.00.

OPTEK SYSTEMS, INC. **Partners**. Disponível em: <http://opttek.com/partners>. Acesso em: 20 mai. 2014.

_____. **Simulation Optimization**. Disponível em: <http://opttek.com/simulation-optimization>. Acesso em: 20 mai. 2014.

PAPADRAKAKIS, Manolis ; LAGAROS, Nikos D. **Reliability-based structural optimization using neural networks and Monte Carlo simulation**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, v.191, p. 3491-3507.

PARAGON. **Modelos determinísticos e estocásticos**. Disponível em: <http://www.paragon.com.br/padrao.aspx?downloads_content_lst_2062__.aspx>. Acesso em: 11 mai. 2014.

PÉREZ, Cinthia ; GEUNES, Joseph. **A (Q, R) inventory replenishment model with two delivery modes**. European Journal of Operational Research, 2014.

PFIFFER, E. A. **Adequação estratégica dos processos de fusões e aquisições no setor de minério de ferro:** estudo de caso da Companhia Vale do Rio Doce. . Dissertação (Mestrado em Administração de Empresasl) – Programa de Pós-Graduação em Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2004, 228 f.

PICHITLAMKEN, Juta ; NELSON, Barry, L. **A combined procedure for optimization via simulation**. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 2003, v.13, p. 155-179.

PIERREVAL, Henri ; PARIS, Jean Luc. **From 'simulation optimization to simulation configuration' of systems**. Simulation Modelling Practice and Theory, 2003, v.11, p. 5-19.

PINHO, Alexandre Ferreira de et al. **Evaluation of a proposed optimization method for discrete-event simulation models**. Pesquisa Operacional, 2012, v.32, n.3, p. 543-560.

PINTO JUNIOR, O. P. F. **Simulação e otimização**: desenvolvimento de uma ferramenta de análise de decisão para suprimento de refinarias de petróleo através de uma rede de oleodutos**.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2001, 125 f.

PRAJOGO, Daniel ; OLHAGER, Jan. Int. J. ProductionEconomics. **Supply chain integration and performance**: The effects of long-term relationships, information technology and sharing, and logistics integration, 2012, p. 514-522

PRITEE Ray ; MAMATA Jenamani. **Sourcing under supply disruption with capacity-constrained suppliers**. Journal of Advances in Management Research, 2013, v.10, p. 192-205.

RAGSDALE, Cliff T. **Spreadsheet Modeling and Decision Analysis:** A Practical Introduction to Management Science. 5. ed. Virginia: South Western College, 2007.

RELATÓRIO ANUAL DE SUSTENTABILIDADE 2014. **Samarco Mineração S.A.** Disponível em: < http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2015/11/Relatorio-Anual-de-Sustentabilidade-20142.pdf >. Acesso em: 22 mai. 2016.

ROCKWELL AUTOMATION. Arena Simulation Software. **OptQuest for Arena**. Disponível em: < http://www.arenasimulation.com/Products_OptQuest.aspx>. Acesso em: 11 mai. 2014.

_____. **Professional Edition**. Disponível em: <http://www.arenasimulation.com/Products_Professional_Edition.aspx>. Acesso em: 21 mai. 2014.

_____. **Standard Edition**. Disponível em: < http://www.arenasimulation.com/Products_Standard_Edition.aspx>. Acesso em: 21 mai. 2014.

RODRIGUES JUNIOR, Amilton Dias. **Um modelo de otimização da política de reabastecimento para transportadores rodoviários de carga.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2011, 88 f.

ROSEN, Scott L. ; HARMONOSKY, Catherine M. ; Traband, Mark T. **Optimization of systems with multiple performance measures via simulation**: Survey and recommendations. Computers & Industrial Engineering, 2008, v.54, p. 327-339.

SALIBY, E. **Repensando a simulação:** a amostragem descritiva. São Paulo: Atlas, SP. São Carlos da Universidade de São Paulo, 1989.

SAMARCO. **Desenvolvimento**. Disponível em: < http://www.samarco.com.br>. Acesso em: 18 jun. 2014.

SANG, Haixia ; TAKAKUWA, Soemon. **A simulation-based approach for obtaining optimal order quantities of short-expiration date items at a retail store**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 2012, Berlin. **Anais…,** 2012. p. 1-12.

SILVA, André Luís Ludolfo da. **Análise da Capacidade Operacional de um terminal portuário de importação de fertilizantes por meio da simulação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2011, 92 f.

SUMÁRIO MINERAL 2015, vol. 35. Departamento Naional de Produção Mineral, Brasil. Disponível em: < http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015 >. Acesso em: 22 mai. 2016.

SWAIN, James J. **'Gaming' reality**: biennial survey of discrete-event simulation software tools.(Software Survey). OR/MS Today, 2005, v.32, p. 44-55.

SWISHER, James R. ; HYDEN, Paul D. ; JACOBSON, Sheldon H. ; SCHRUBEN, Lee W. **A survey of recent advances in discrete input parameter discrete-event simulation optimization**. IIE Transactions, 2004, v.36, p. 591-600.

YANG, Xin-She. **Review of Metaheuristics and Generalized Evolutionary Walk Algorithm.** Int. J. Bio-Inspired Computation, 2011, v.3, p. 77-84.

YOUNG YUN, Won ; MI LEE, Yu ; SEOK CHOI, Yong. **Optimal inventory control of empty containers in inland transportation system**. International Journal of Production Economics, 2011, v.133, p. 451-457.

ZHANG, Guoqiang. ; EDDY PATUWO, B. ; HU, Michael Y. **Forecasting with artificial neural networks:** The state of the art. International Journal of Forecasting, 1998, v.14, p. 35-62.

APÊNDICE A – ALGORÍTMOS BÁSICOS DE MÉTODOS META-HEURÍSTICOS

Os algoritmos computacionais dos métodos meta-heurísticos apresentados neste Apêndice foram extraídos de Boussaid et al. (2013). São eles:

- **Apêndice A1**. Algoritmo básico para o método meta-heurístico *Tabu Search*
- **Apêndice A2**. Algoritmo básico para o método meta-heurístico *Simulated Annealing*
- **Apêndice A3**. Algoritmo básico para o grupo de métodos meta-heurísticos *Evolutionary Algorithm – Evolutionary Computation*
- **Apêndice A4**. Algoritmo básico para o método *Scatter Search*

```
TS
Choose, at random, an initial solution s in the search space
TabuList ← ∅
while the stopping criterion is not satisfied do
    Select the best solution s' ∈ N(s) \ TabuList
    s ← s'
    Update TabuList
end
return the best solution met
```

Apêndice A1. Algoritmo básico para o método meta-heurístico *Tabu Search*

```
SA
Choose, at random, an initial solution s for the system to be optimized
Initialize the temperature T
while the stopping criterion is not satisfied do
    repeat
        Randomly select s' ∈ N(s)
        if f(s') ≤ f(s) then
            s ← s'
        else
            s ← s' with a probability p(T, f(s'), f(s))
        end
    until the "thermodynamic equilibrium" of the system is reached
    Decrease T
end
return the best solution met
```

Apêndice A2. Algoritmo básico para o método meta-heurístico *Simulated Annealing*

```
EC
Initialize the population with random individuals
Evaluate each individual
repeat
    Select parents
    Recombine pairs of parents
    Mutate the resulting offspring
    Evaluate new individuals
    Select individuals for the next generation
until a termination condition is satisfied
```

Apêndice A3. Algoritmo básico para o grupo de métodos meta-heurísticos *Evolutionary Algorithm - Evolutionary Computation*

```
SSPL
Initial Phase:
SeedGeneration()
repeat
    DiversificationGenerator()
    Improvement()
    ReferenceSetUpdate()
until The reference set is of cardinality n
Scatter Search/Path Relinking Phase:
repeat
    SubsetGeneration()
    SolutionCombination()
    Improvement()
    ReferenceSetUpdate()
until a termination condition is achieved
```

Apêndice A4. Algoritmo básico para o método *Scatter Search*

APÊNDICE B – MODELO COMPUTACIONAL DE SIMULAÇÃO ADAPTADO PARA OTIMIZAÇÕES E PARA SIMULAÇÕES COMPLEMENTARES

O modelo de simulação desenvolvido por Oliveira Júnior (2011) no *software Arena*® 8.0 foi editado no *software Arena*® 14.0 com adaptações de *Assigns*, variáveis e marcadores visuais para permitir o controle e acompanhamento das variáveis de decisão (Estoques) e outras respostas operacionais e de desempenho que interessam ao presente estudo. Segue abaixo o sumário dos modelos experimentais que sofreram alterações:

Insumo – Carvão Mineral

Módulo A – Fornecedor

• Submódulo A.1 – Produção no fornecedor

• Submódulo A.2 – Movimentação Mina-Porto

Módulo B – Fornecedor / Transportadora

• Submódulo B.1 – Atendimento do pedido

Módulo C – Cliente

• Submódulo C.1 – Recebimento do pedido

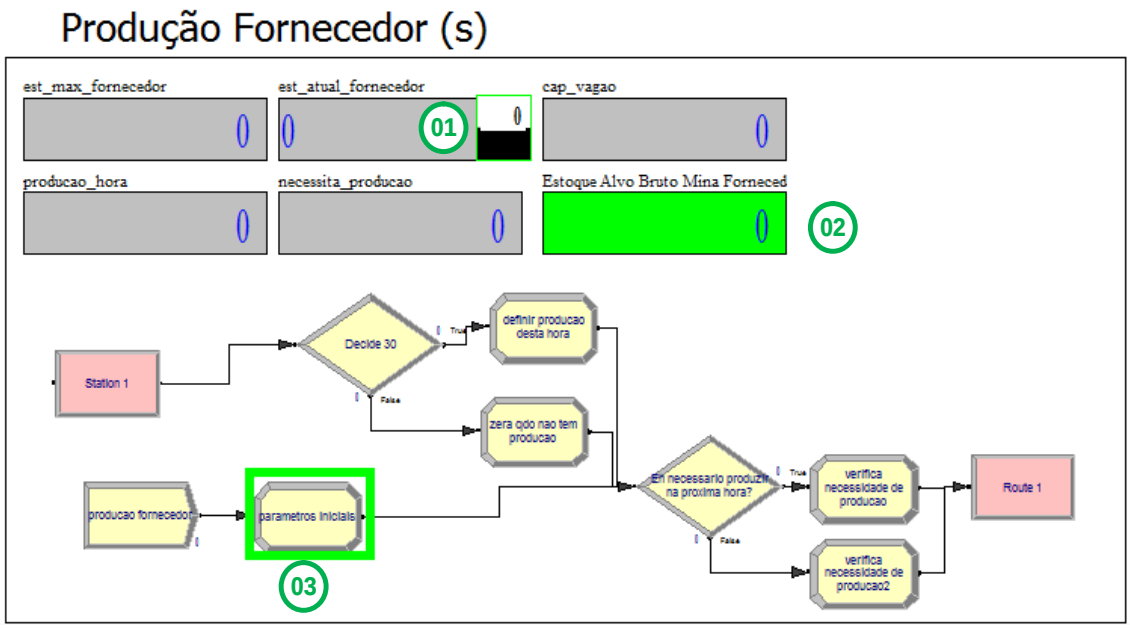
• Submódulo C.2 – Preparação do insumo

• Submódulo C.3 – Consumo cliente

• Submódulo C.4 – Cria pedido

Alterações implementadas: 23

A seguir, seguem os novos desenhos do modelo no *software*:



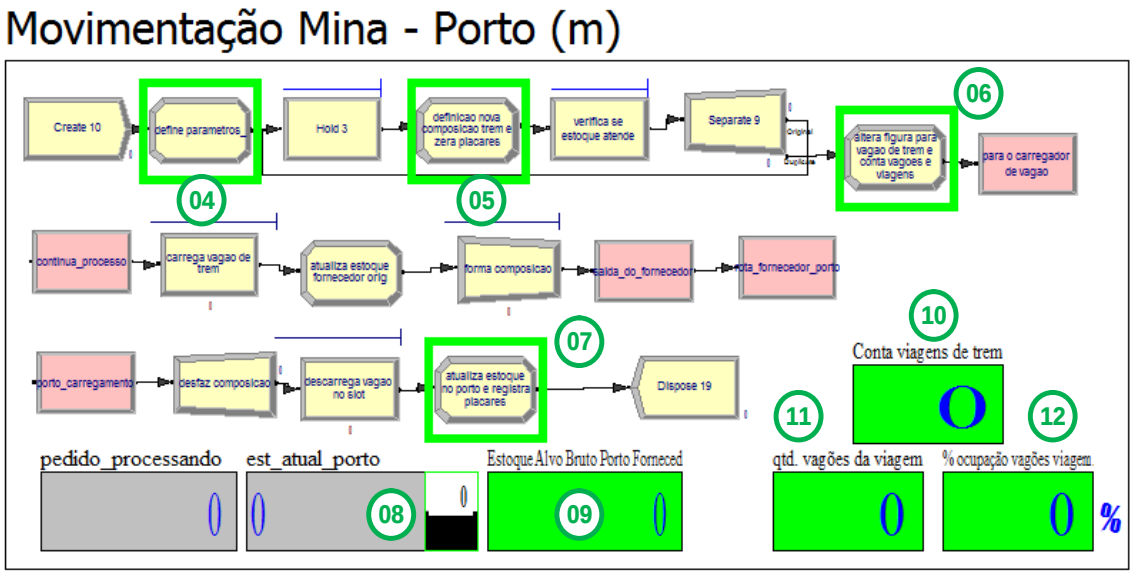
Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

Alterações implementadas:

01. Inclusão de um medidor do percentual de estoque atualizado em relação ao estoque máximo de insumo bruto na Mina do Fornecedor.

02. Inclusão de placar de registro do nível de estoque de trabalho do insumo bruto na Mina do Fornecedor.

03. Adaptação da variável est_alvo_fornecedor para torná-la variável de controle na otimização e permitir a entrada de diferente valores pelo otimizador. Originalmente essa variável era igual a uma constante.



Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

Alterações implementadas:

04. Adaptação da variável est_alvo_porto para torná-la variável de controle na otimização e permitir a entrada de diferentes valores pelo otimizador. Originalmente essa variável era igual a uma constante. Criação também da variável *vagões_disponiveis* para permitir manipulação dos valores de capacidade dos recursos de transporte ferroviário variando os níveis do fator correspondente nos testes de otimização.

05. Inclusão de expressões para zerar os placares que registram a quantidade de vagões utilizados e o percentual de uso dos vagões disponíveis em determinada viagem entre a Mina e o Porto do Fornecedor, permitindo renovação em “looping” e individualização dos registros a cada viagem de trem.

06. Inclusão de expressão para a contagem da ordem das viagens de trem entre a Mina e o Porto do Fornecedor e inclusão de expressão para multiplicar dados amostrais para a geração de média estatística da quantidade de vagões utilizados por viagem nos relatórios do simulador. Inclusão de expressão que calcula o percentual de uso dos vagões disponíveis da viagem de trem em seguida.

07. Inclusão de expressão para multiplicar mais dados amostrais suficientes para a geração de média estatística da quantidade de vagões utilizados por viagem e do percentual de uso dos vagões disponíveis nos relatórios do simulador. Inclusão de expressões de registro da quantidade de vagões utilizados e do percentual de uso dos vagões disponíveis de determinada viagem de trem.

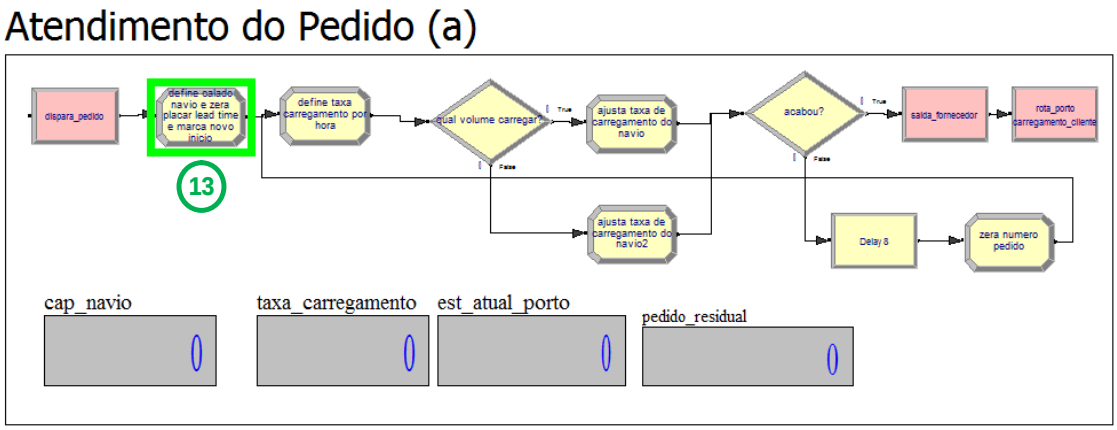
08. Inclusão de um medidor do percentual de estoque atualizado em relação ao estoque máximo de insumo bruto no Porto do Fornecedor

09. Inclusão de placar de registro do nível de estoque de trabalho do insumo bruto no Porto do Fornecedor.

10. Inclusão de placar de registro da contagem da ordem das viagens de trem entre a Mina e o Porto do Fornecedor.

11. Inclusão de placar de registro da quantidade de vagões utilizados em cada viagem.

12. Inclusão de placar de registro do percentual de uso de vagões disponíveis em cada viagem.

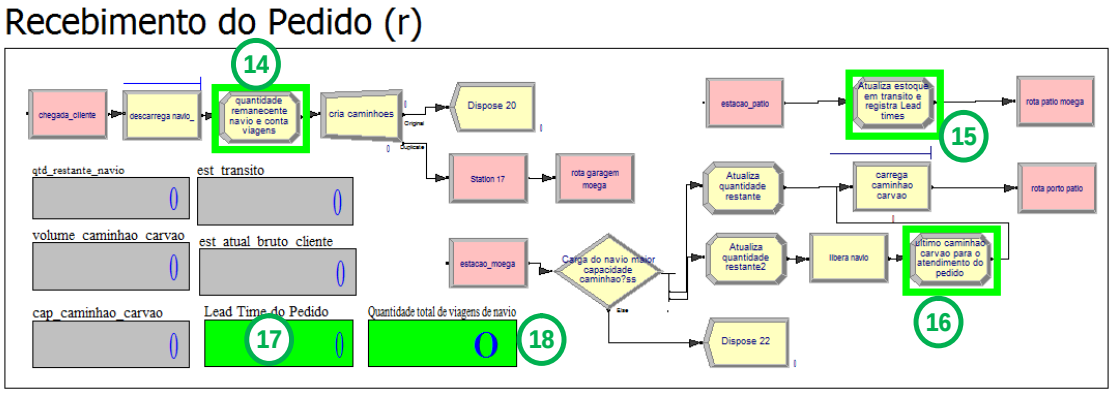


Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

Alterações implementadas:

13. Inclusão de expressão que zera o placar de registro do *Lead Time* de atendimento de pedido (duração entre o pedido do Gestor do Estoque do Pátio de

insumo bruto e a efetiva entrega do pedido no Pátio), permitindo renovação em “looping” e individualização de registro a cada viagem de navio.



Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

Alterações implementadas:

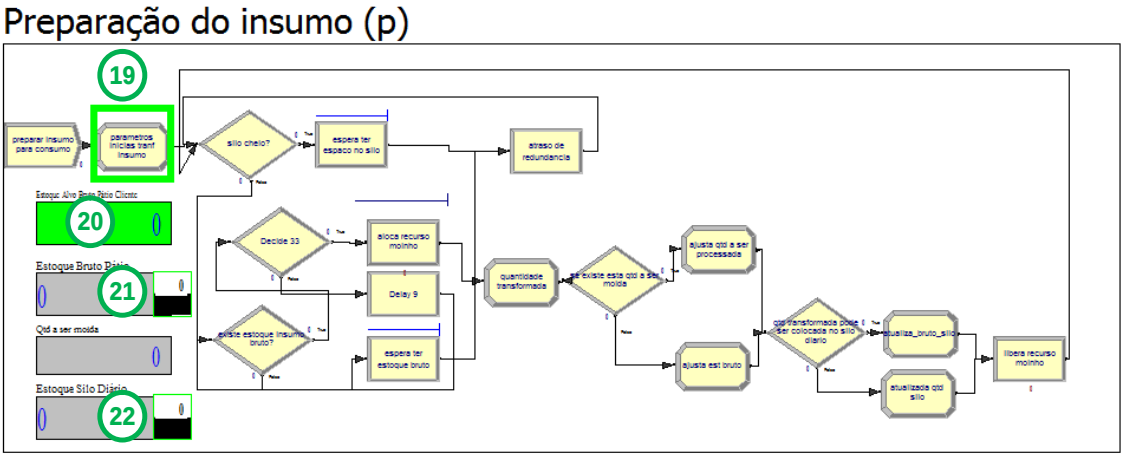
14. Inclusão de expressão para a contagem da ordem das viagens de navio entre o Porto do Fornecedor e o Porto da Mineradora.

15. Inclusão de expressão para cálculo do *Lead Time* de atendimento do pedido para cada caminhão de carvão que entrega insumo bruto no Pátio da Mineradora.

16. Rearranjo da expressão de cálculo do *Lead Time* do pedido para o item 14. Substituição pela expressão para contagem dos encerramentos das operações de entrega e descarregamento dos caminhões de carvão no Pátio de Insumo Bruto da Mineradora.

17. Inclusão de placar de registro da duração do *Lead Time* do Pedido por entrega de caminhão de carvão no Pátio de Insumo Bruto da Mineradora.

18. Inclusão de placar de registro da contagem da ordem das viagens de navio entre o Porto do Fornecedor e o Porto da Mineradora.



Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

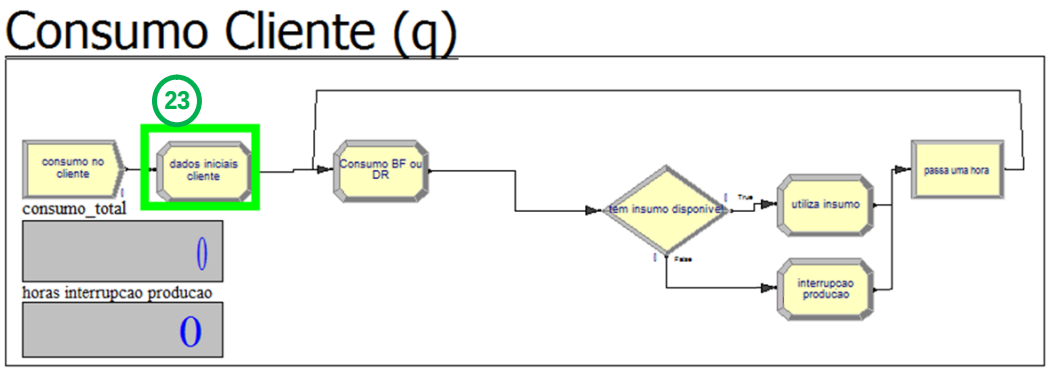
Alterações implementadas:

19. Adaptação da variável est_alvo_bruto_cliente para torná-la variável de controle na otimização e permitir a entrada de diferentes valores pelo otimizador. Originalmente essa variável era igual a uma constante.

20. Inclusão de placar de registro do nível de estoque de trabalho do insumo bruto no Pátio de insumo bruto da Mineradora.

21. Inclusão de um medidor do percentual de estoque atualizado em relação ao estoque máximo de insumo bruto no Pátio de insumo bruto da Mineradora.

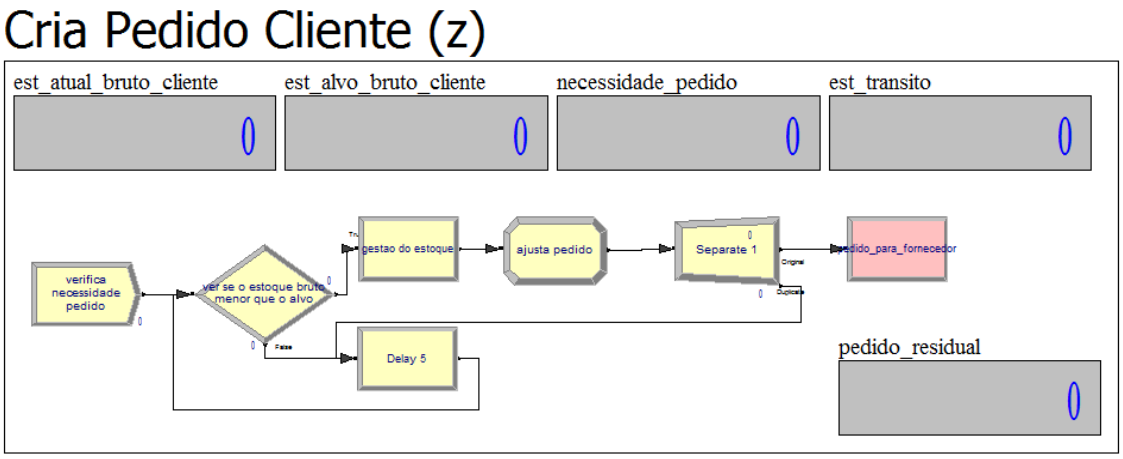
22. Inclusão de um medidor do percentual de estoque atualizado em relação ao estoque máximo de insumo moído nos Silos Diários da Mineradora.



Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

Alterações implementadas:

23. Adaptação da variável est_max_cliente para torná-la variável de controle na otimização e permitir a entrada de diferentes valores pelo otimizador. Originalmente essa variável era igual a uma constante.

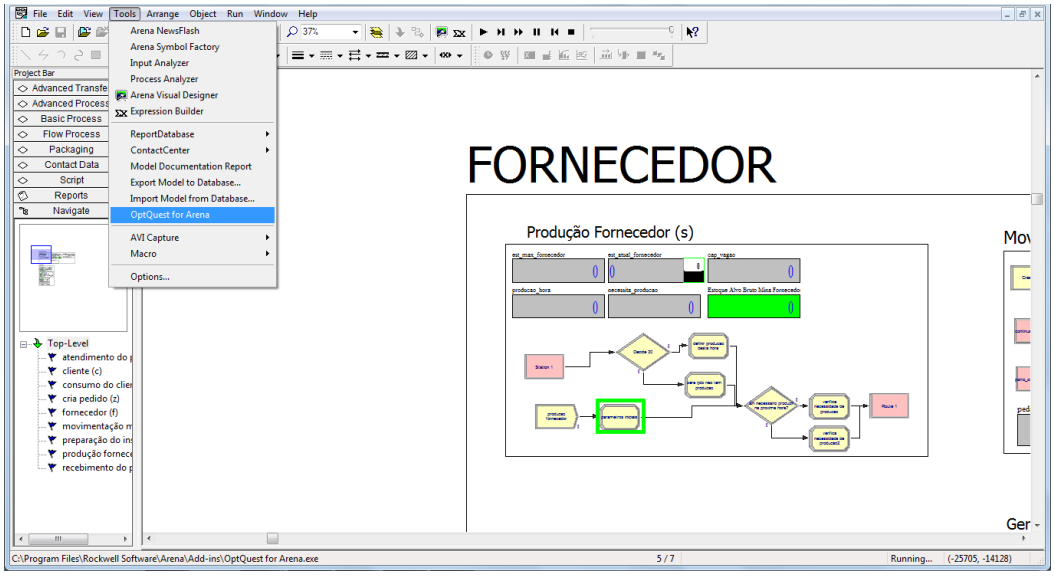


Fonte: *Arena*® Version 14.00.00

Nenhuma Alteração implementada.

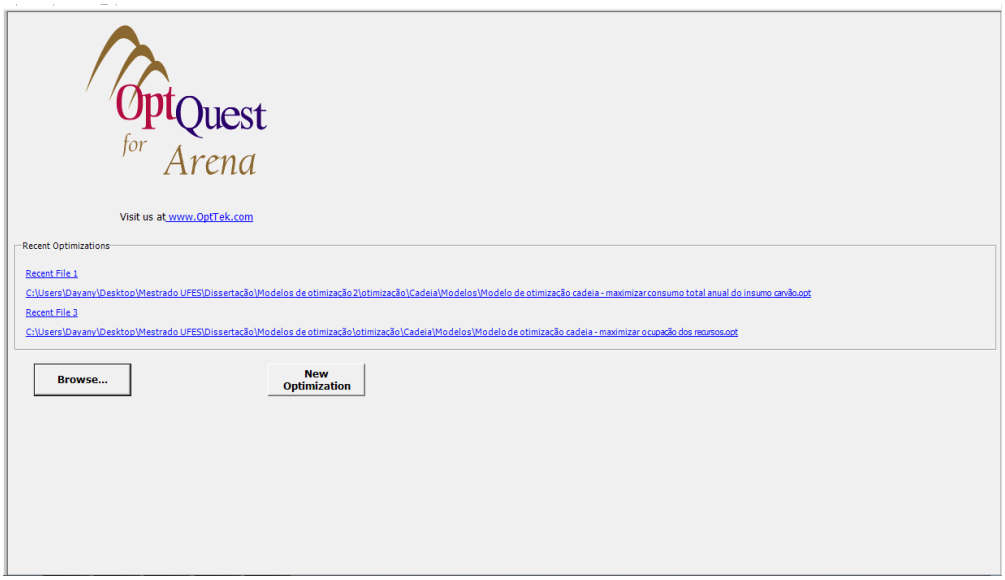
APÊNDICE C – MODELOS COMPUTACIONAIS DA OTIMIZAÇÃO

Este Apêndice apresenta o passo-a-passo de acesso e elaboração do modelo de otimização no *OptQuest*® *for Arena*®, bem como os modelos computacionais elaborados para uso nesta dissertação.



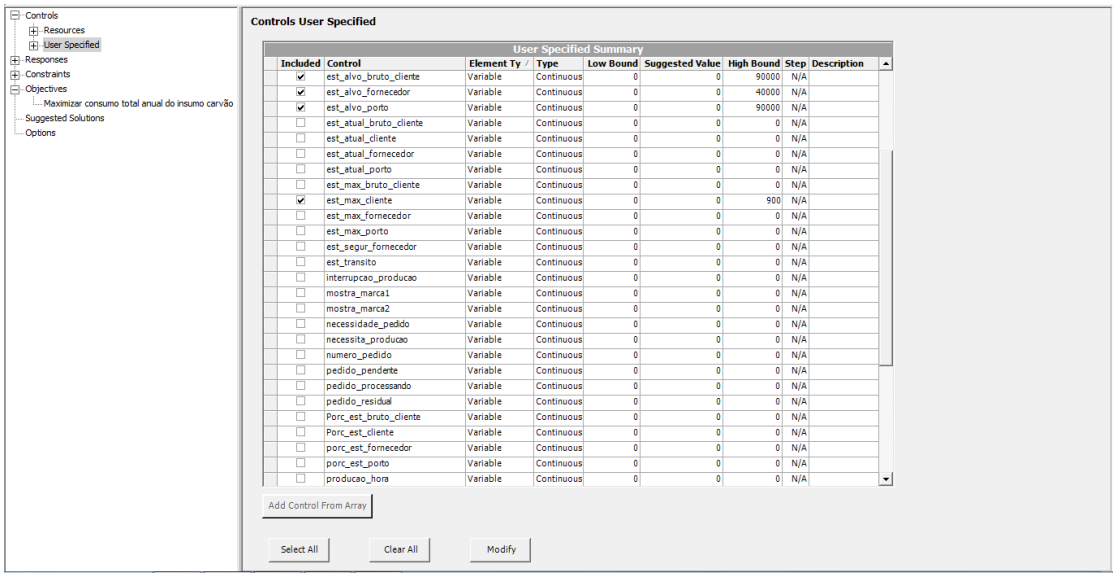
Inicializando o aplicativo *OptQuest*® *for Arena*®

Fonte: *Arena*® Version 14.00.00



Criando modelo de otimização no aplicativo *OptQuest*® *for Arena*®

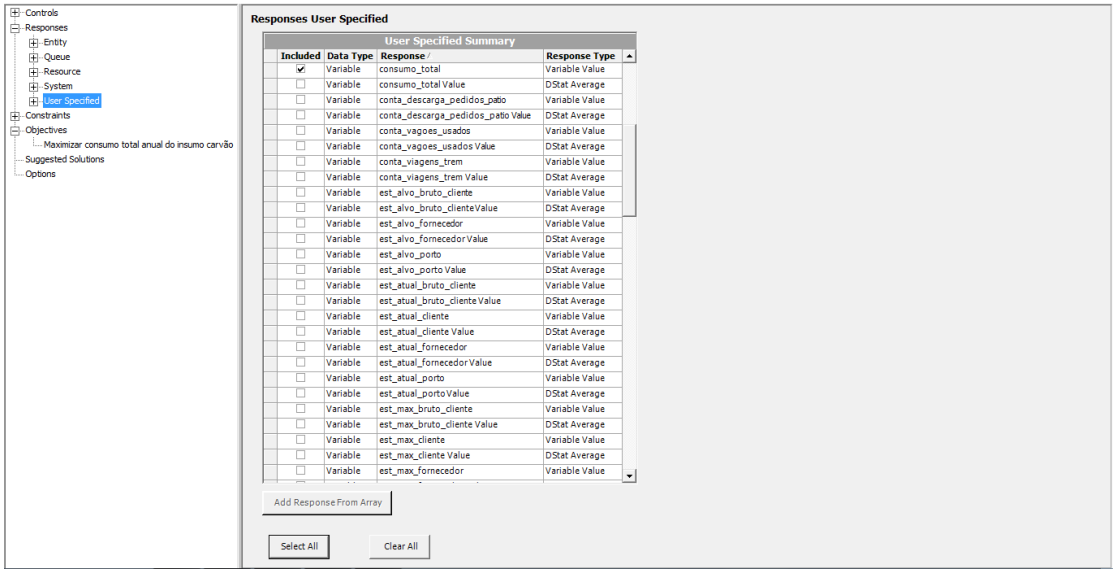
Fonte: OptQuest® for *Arena*® Version 14.00.00



Included	Control	Element Ty	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
☑	est_alvo_bruto_cliente	Variable	Continuous	0	0	90000	N/A	
☑	est_alvo_fornecedor	Variable	Continuous	0	0	40000	N/A	
☑	est_alvo_porto	Variable	Continuous	0	0	90000	N/A	
☐	est_atual_bruto_cliente	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_atual_cliente	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_atual_fornecedor	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_atual_porto	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_max_bruto_cliente	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☑	est_max_cliente	Variable	Continuous	0	0	900	N/A	
☐	est_max_fornecedor	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_max_porto	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_segur_fornecedor	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	est_transito	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	interrupcao_producao	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	mostra_marca1	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	mostra_marca2	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	necessidade_pedido	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	necessita_producao	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	numero_pedido	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	pedido_pendente	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	pedido_processando	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	pedido_residual	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	Porc_est_bruto_cliente	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	Porc_est_cliente	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	porc_est_fornecedor	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	porc_est_porto	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	
☐	producao_hora	Variable	Continuous	0	0	0	N/A	

Definindo as variáveis de controle no aplicativo *OptQuest® for Arena®*

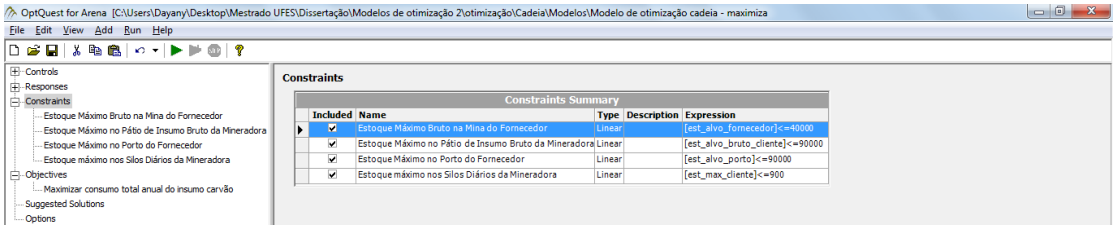
Fonte: OptQuest® for *Arena®* Version 14.00.00



Included	Data Type	Response	Response Type
☑	Variable	consumo_total	Variable Value
☐	Variable	consumo_total Value	DStat Average
☐	Variable	conta_descarga_pedidos_patio	Variable Value
☐	Variable	conta_descarga_pedidos_patio Value	DStat Average
☐	Variable	conta_vagoes_usados	Variable Value
☐	Variable	conta_vagoes_usados Value	DStat Average
☐	Variable	conta_viagens_trem	Variable Value
☐	Variable	conta_viagens_trem Value	DStat Average
☐	Variable	est_alvo_bruto_cliente	Variable Value
☐	Variable	est_alvo_bruto_clienteValue	DStat Average
☐	Variable	est_alvo_fornecedor	Variable Value
☐	Variable	est_alvo_fornecedor Value	DStat Average
☐	Variable	est_alvo_porto	Variable Value
☐	Variable	est_alvo_porto Value	DStat Average
☐	Variable	est_atual_bruto_cliente	Variable Value
☐	Variable	est_atual_bruto_cliente Value	DStat Average
☐	Variable	est_atual_cliente	Variable Value
☐	Variable	est_atual_cliente Value	DStat Average
☐	Variable	est_atual_fornecedor	Variable Value
☐	Variable	est_atual_fornecedor Value	DStat Average
☐	Variable	est_atual_porto	Variable Value
☐	Variable	est_atual_porto Value	DStat Average
☐	Variable	est_max_bruto_cliente	Variable Value
☐	Variable	est_max_bruto_cliente Value	DStat Average
☐	Variable	est_max_cliente	Variable Value
☐	Variable	est_max_cliente Value	DStat Average
☐	Variable	est_max_fornecedor	Variable Value

Definindo as respostas (processos, recursos ou variáveis) no aplicativo *OptQuest® for Arena®*

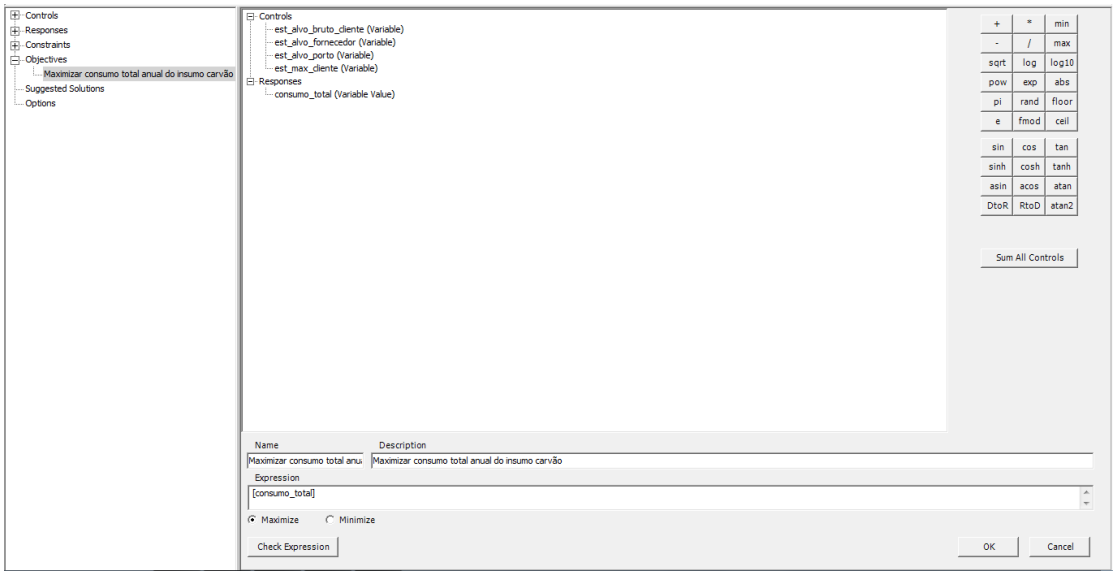
Fonte: *OptQuest® for Arena®* Version 14.00.00



Included	Name	Type	Description	Expression
☑	Estoque Máximo Bruto na Mina do Fornecedor	Linear		[est_alvo_fornecedor]<=40000
☑	Estoque Máximo no Pátio de Insumo Bruto da Mineradora	Linear		[est_alvo_bruto_cliente]<=90000
☑	Estoque Máximo no Porto do Fornecedor	Linear		[est_alvo_porto]<=90000
☑	Estoque máximo nos Silos Diários da Mineradora	Linear		[est_max_cliente]<=900

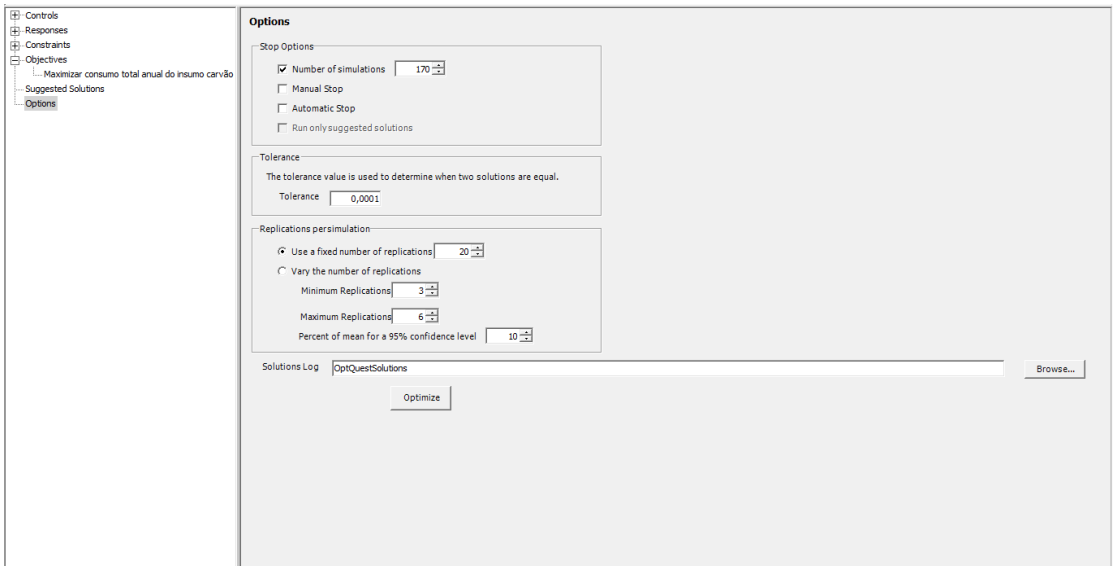
Definindo as restrições do modelo no aplicativo *OptQuest® for Arena®*

Fonte: *OptQuest® for Arena®* Version 14.00.00



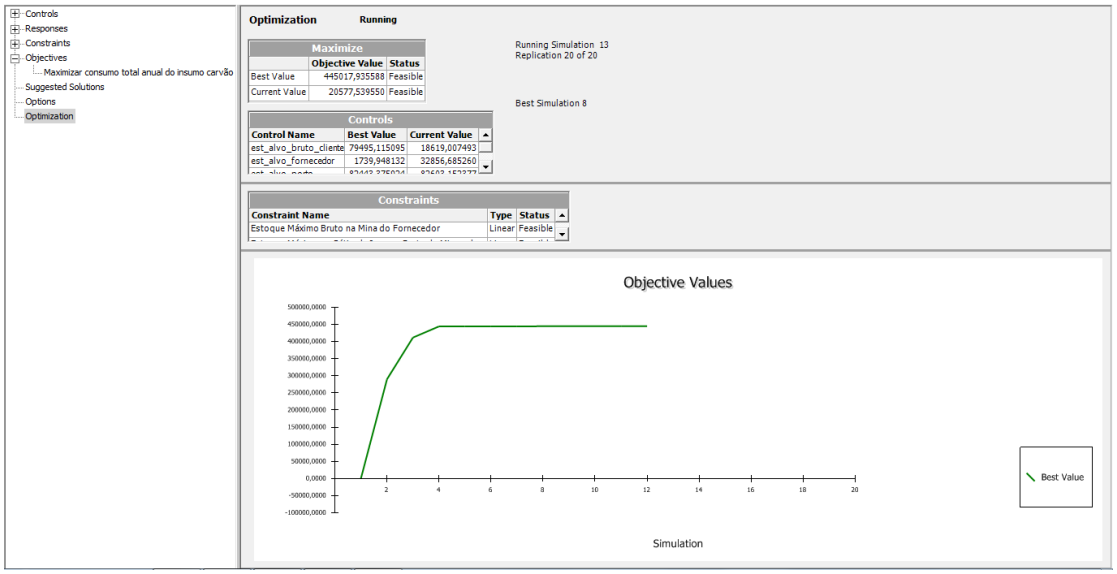
Definindo a função-objetivo no aplicativo *OptQuest® for Arena®*

Fonte: *OptQuest® for Arena®* Version 14.00.00



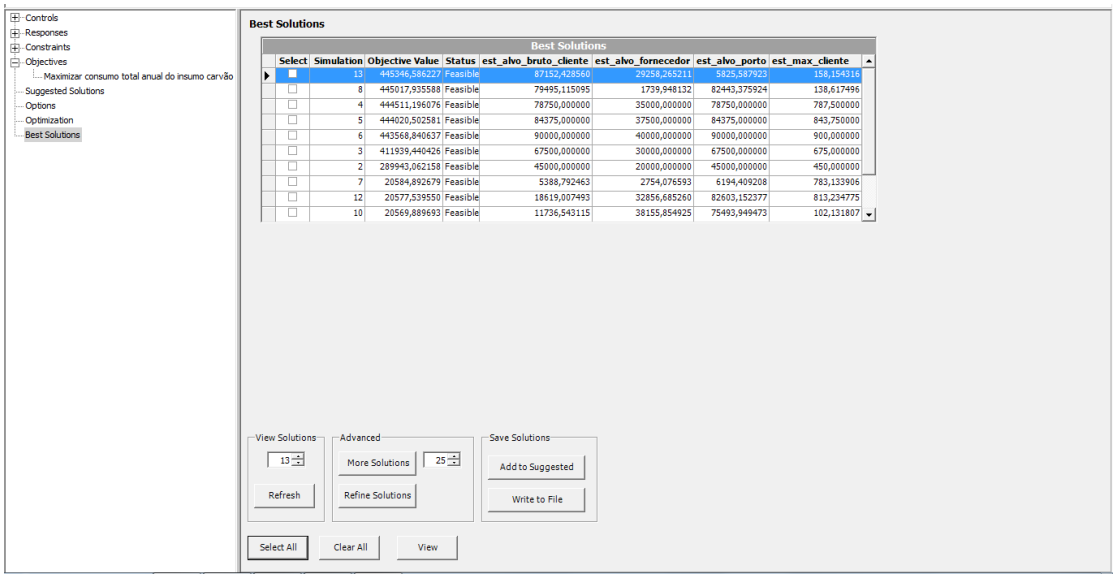
Definindo parâmetros de iterações no aplicativo *OptQuest® for Arena®*

Fonte: *OptQuest® for Arena®* Version 14.00.00



Executando iterações no aplicativo *OptQuest® for Arena®*

Fonte: *OptQuest® for Arena®* Version 14.00.00



Resultados do aplicativo *OptQuest® for Arena®*

Fonte: *OptQuest® for Arena®* Version 14.00.00

Modelo de otimização criado:

Objetivo: Maximizar o consumo total anual do insumo carvão

Controls

Controls Summary

Included	Category	Control	Element Type	Type	Low Bound	Suggested Value	High Bound	Step	Description
☑	User Specified	est_alvo_bruto_cliente	Variable	Continuous	0	0	90000	N/A	
☑	User Specified	est_alvo_fornecedor	Variable	Continuous	0	0	40000	N/A	
☑	User Specified	est_alvo_porto	Variable	Continuous	0	0	90000	N/A	
☑	User Specified	est_max_cliente	Variable	Continuous	0	0	900	N/A	

Variáveis de controle do problema de otimização
Fonte: Nascimento (2016)
OptQuest® for *Arena*® Version 14.00.00

Objectives

Objectives Summary

Select	Name	Linear	Goal	Description	Expression
☑	Maximizar consumo total anual do insumo carvão	NonLinear	Maximize	Maximizar consumo anual total do insumo carvão	[consumo_total]

Função-objetivo do problema de otimização
Fonte: Nascimento (2016)
OptQuest® for *Arena*® Version 14.00.00

Constraints

Constraints Summary

Included	Name	Type	Description	Expression
☑	Estoque Máximo Bruto na Mina do Fornecedor	Linear		[est_alvo_fornecedor]<=40000
☑	Estoque Máximo no Pátio de Insumo Bruto da Mineradora	Linear		[est_alvo_bruto_cliente]<=90000
☑	Estoque Máximo no Porto do Fornecedor	Linear		[est_alvo_porto]<=90000
☑	Estoque máximo nos Silos Diários da Mineradora	Linear		[est_max_cliente]<=900

Restrições do problema de otimização
Fonte: Nascimento (2016)
OptQuest® for *Arena*® Version 14.00.00

APÊNDICE D – DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÂO-OTIMIZAÇÃO E DAS SIMULAÇÕES NA SITUAÇÃO ÓTIMA

Os testes de otimização e as simulações de resultados operacionais e de desempenho na situação ótima foram segregados em dois cenários: sem mudanças, identificada pela sigla Cen.0.C, e com mudanças, identificada como Cen.1.C. Os experimentos sem mudanças foram realizados sem otimização (U_0 e M_0) e com otimização (U_1 e M_1). Já nos testes com mudanças, todos foram realizados com otimização (U_2 à U_8 e M_2 à M_{13}).

Após a realização dos testes e obtidos os resultados em cada cenário e em cada experimento, os dados foram planilhados e organizados de forma a permitir a comparação das diferenças e das evoluções na experimentação, conforme a Tabela deste Apêndice. As figuras por sua vez representam os gráficos de evolução dos resultados operacionais e de desempenho da cadeia, em relação aos casos teste.

Tabela de resultados dos testes de simulação-otimização e das simulações na situação ótima

RESULTADOS DOS TESTES DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

Fator	Caso Teste	fator e nível	Estoques				Objetivo	Recursos						Modal Ferroviário	Modal Marítimo	Variáveis de desempenho da cadeia			
								Fornecedor		Mineradora									
			Estoque M.F. (ton)	Estoque P.F. (ton)	Estoque P.B.M. (ton)	Estoque S.D.M. (ton)	Maximização do Consumo total anual do insumo carvão (ton/ano)	% ocupação carreg. vagões	% ocupação descarreg. vagões	% ocupação descarreg. navio	% ocupação moegas	% ocupação caminhão carvão	% ocupação moinhos	% médio do uso de vagões por viagem (% / viagem)	quantidade de viagens por ano (unid./ano)	Lead Time médio pedido (h)	Taxa média de ocupação do conjunto de recursos da cadeia (%)	Interrupções de produção pelotas por ano (h/ano)	Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto (%)
Cenário.0.C																			
---	$U_0 = M_0$	_____	30.000	60.000	60.000	900	383.680	5,5%	8,7%	10,6%	10,7%	6,1%	68,8%	64,0%	8	609	18,4%	3.044	19,5%
Único e Múltiplo	*Simulação-Otimização OptQuest **							*Simulação Arena ***											
	$U_1 = M_1$	*fcmp0= fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	30.312	13.166	88.910	308	447.720	7,1%	10,9%	12,7%	12,8%	7,4%	85,9%	32,9%	10	745	22,8%	1.567	36,7%
Cenário.1.C																			
	*Simulação-Otimização OptQuest **							*Simulação Arena ***											
Único	U_2	*fcmp1*	37.697	72.400	89.810	897	449.154	7,1%	11,0%	12,7%	12,8%	7,3%	85,9%	54,1%	10	600	22,8%	1.593	46,1%
	U_3	*fcmp2*	36.711	88.428	84.282	836	452.262	7,1%	11,0%	12,7%	12,7%	7,3%	86,1%	60,1%	10	594	22,8%	1.469	39,1%
	U_4	*fcmp3*	31.966	88.780	80.082	374	449.624	6,9%	10,7%	12,6%	12,7%	7,3%	85,8%	69,1%	10	600	22,7%	1.510	34,2%
	U_5	*fcd1*	40.000	25.682	90.000	891	447.169	7,0%	16,1%	12,8%	12,9%	7,4%	85,7%	65,5%	10	744	23,6%	1.573	38,8%
	U_6	*fcd2*	16.151	26.874	89.347	428	441.788	6,9%	31,9%	13,1%	13,2%	7,6%	85,6%	66,0%	10	809	26,4%	1.690	34,0%
	U_7	*fcm1*	32.321	9.644	86.905	452	331.599	5,0%	7,7%	9,4%	9,5%	5,4%	85,8%	23,0%	7	761	20,4%	3.387	45,4%
	U_8	*fcm2*	16.656	34.970	85.884	900	186.315	2,7%	4,2%	5,4%	5,4%	3,1%	85,9%	67,3%	5	702	17,8%	5.640	58,0%
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	30.560	73.210	69.516	744	331.042	4,7%	11,0%	9,9%	10,0%	5,7%	85,8%	48,4%	7	591	21,2%	3.380	31,4%
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	27.899	24.758	83.812	549	186.206	2,9%	6,8%	5,4%	5,4%	3,1%	85,9%	53,9%	5	752	18,2%	5.650	53,6%
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	35.497	36.264	86.506	871	326.970	4,8%	22,0%	9,9%	9,9%	5,7%	85,7%	57,0%	7	728	23,0%	3.439	46,5%
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	24.105	42.956	89.839	898	186.329	2,7%	12,9%	5,7%	5,7%	3,3%	85,9%	51,7%	5	656	19,4%	5.649	62,9%
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	27.762	87.329	90.000	395	330.524	5,1%	11,8%	9,2%	9,2%	5,3%	85,9%	62,9%	8	595	21,1%	3.364	55,6%
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	39.955	21.141	86.489	900	186.255	2,8%	6,5%	5,6%	5,6%	3,2%	85,9%	52,7%	5	756	18,3%	5.645	56,9%
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	35.410	90.000	85.488	900	327.191	4,8%	22,0%	9,6%	9,6%	5,5%	85,8%	61,4%	7	608	22,9%	3.484	49,9%
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	35.692	4.267	89.933	881	185.997	2,7%	12,4%	5,6%	5,6%	3,2%	85,8%	25,6%	5	994	19,2%	5.655	54,9%
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	25.912	46.998	72.409	530	330.952	4,7%	11,0%	10,0%	10,0%	5,8%	86,0%	67,9%	7	638	21,2%	3.396	33,2%
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	40.000	19.258	90.000	900	186.230	2,7%	6,2%	5,8%	5,8%	3,3%	85,8%	63,4%	5	741	18,3%	5.660	60,9%
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	10.200	82.383	86.854	900	327.783	4,7%	21,9%	9,6%	9,6%	5,5%	85,9%	72,7%	8	587	22,9%	3.435	52,7%
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	36.763	13.187	89.251	808	186.188	2,8%	12,8%	5,3%	5,3%	3,0%	85,9%	65,3%	5	896	19,2%	5.653	56,4%

* Modelo de otimização configurado para uma corrida de 170 iterações, cada uma com 20 replicações de simulação.

** Modelo de simulação ajustado e configrurado para corrida de 20 replicações, *warm up* de 60 dias e cada replicação com duração de 360 dias.

Fonte: o autor

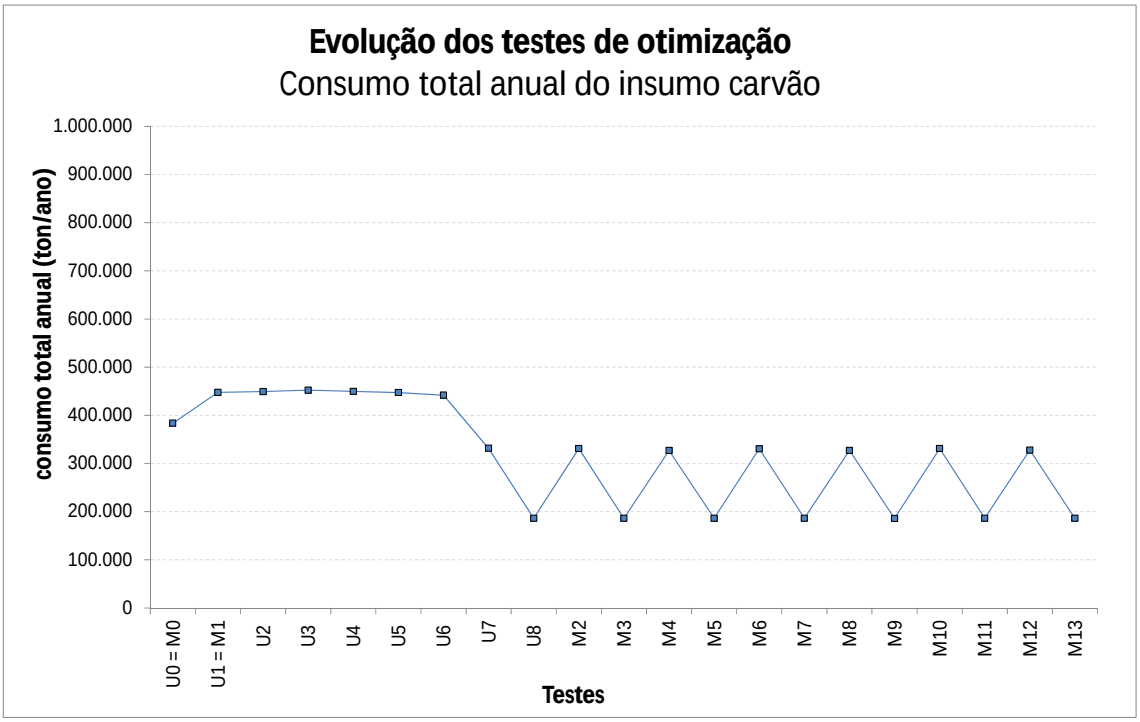


Gráfico de evolução dos resultados dos testes de otimização – Maximização do consumo total anual do insumo carvão

Fonte: o autor

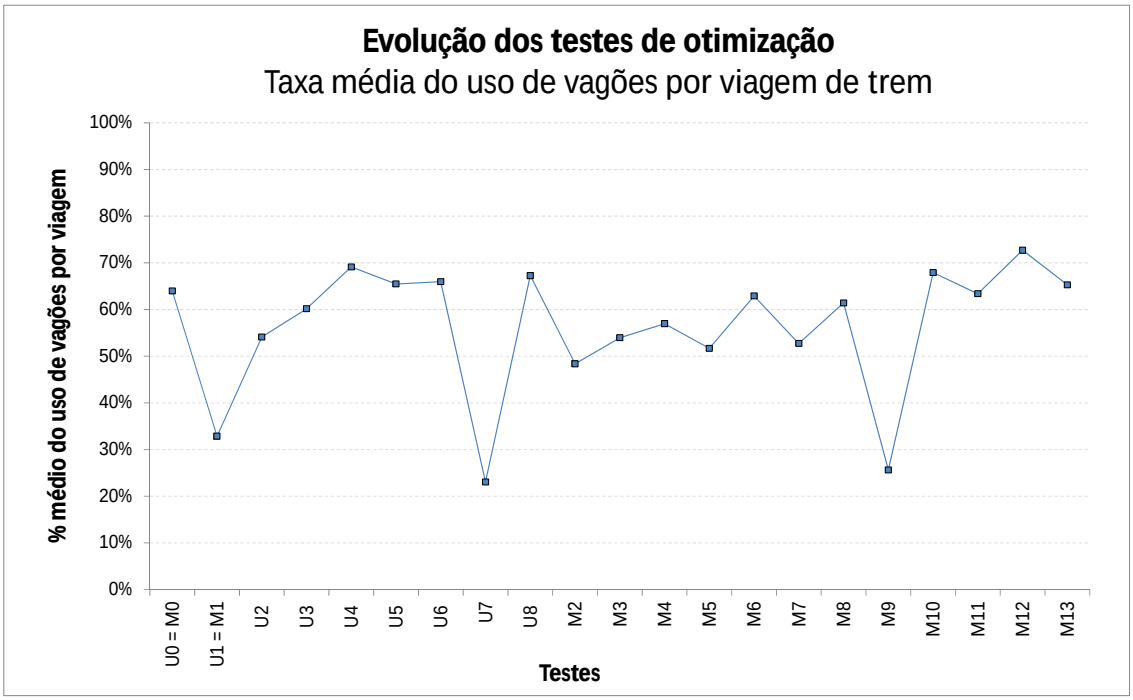


Gráfico de evolução dos resultados das simulações das situações ótimas – Taxa média do uso de vagões por viagem de trem

Fonte: o autor

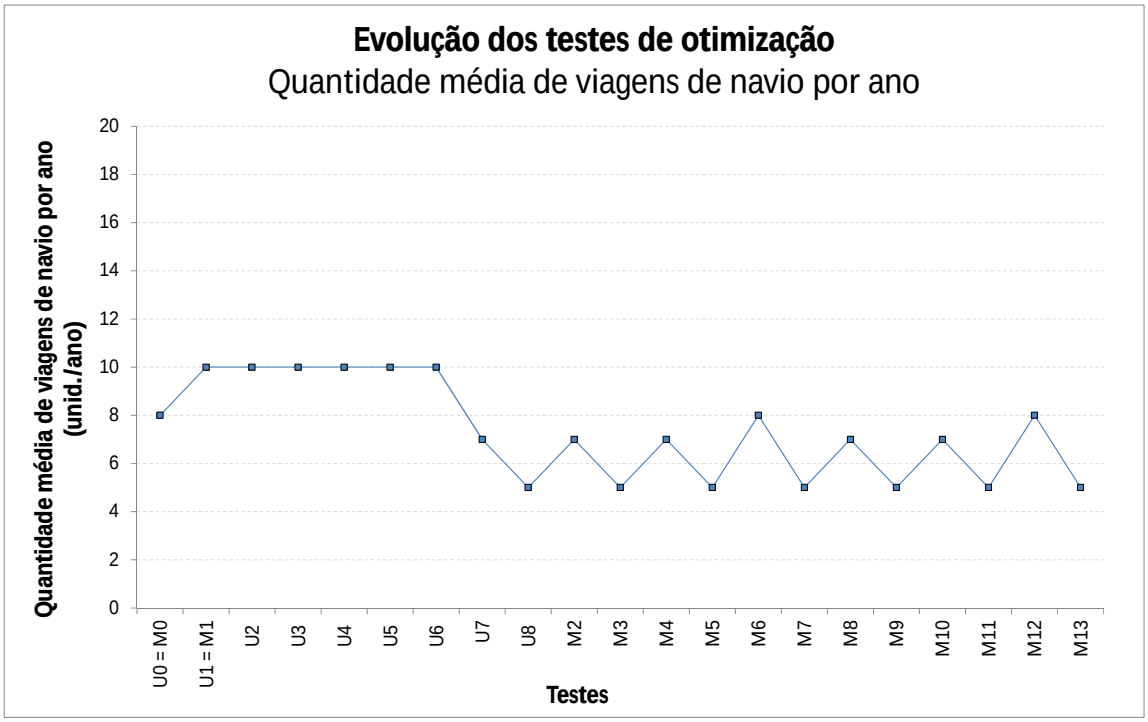


Gráfico de evolução dos resultados das simulações das situações ótimas – Quantidade média de viagens de navio por ano

Fonte: o autor

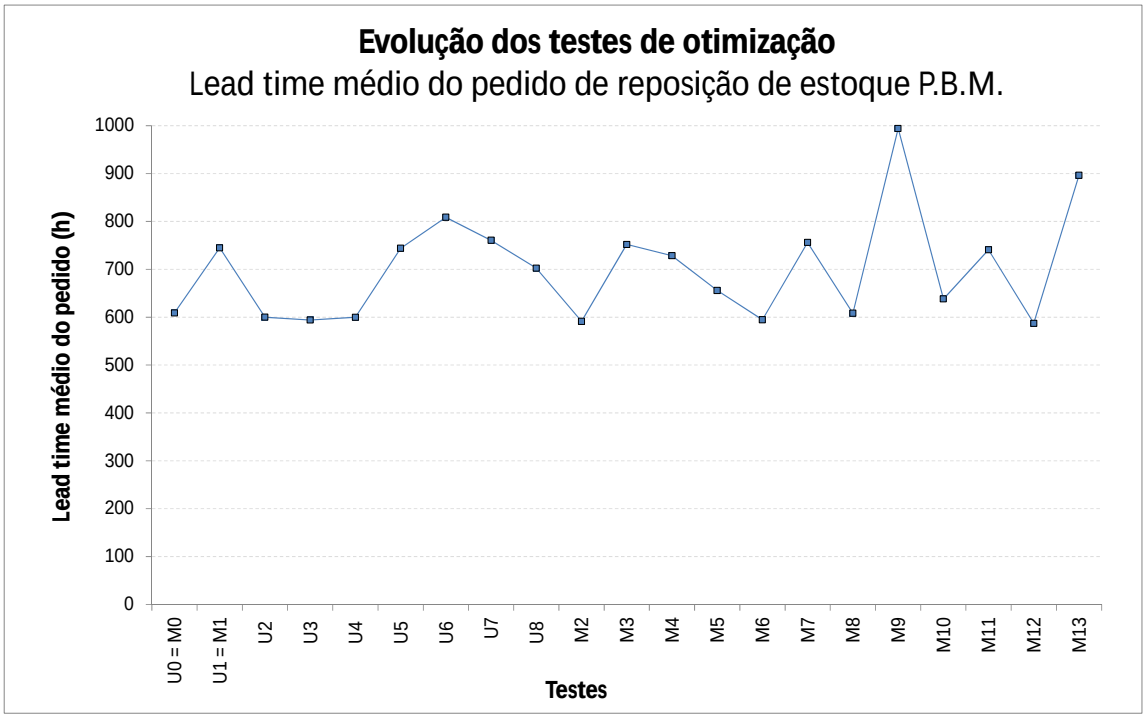


Gráfico de evolução dos resultados das simulações das situações ótimas – Lead time médio do pedido

Fonte: o autor

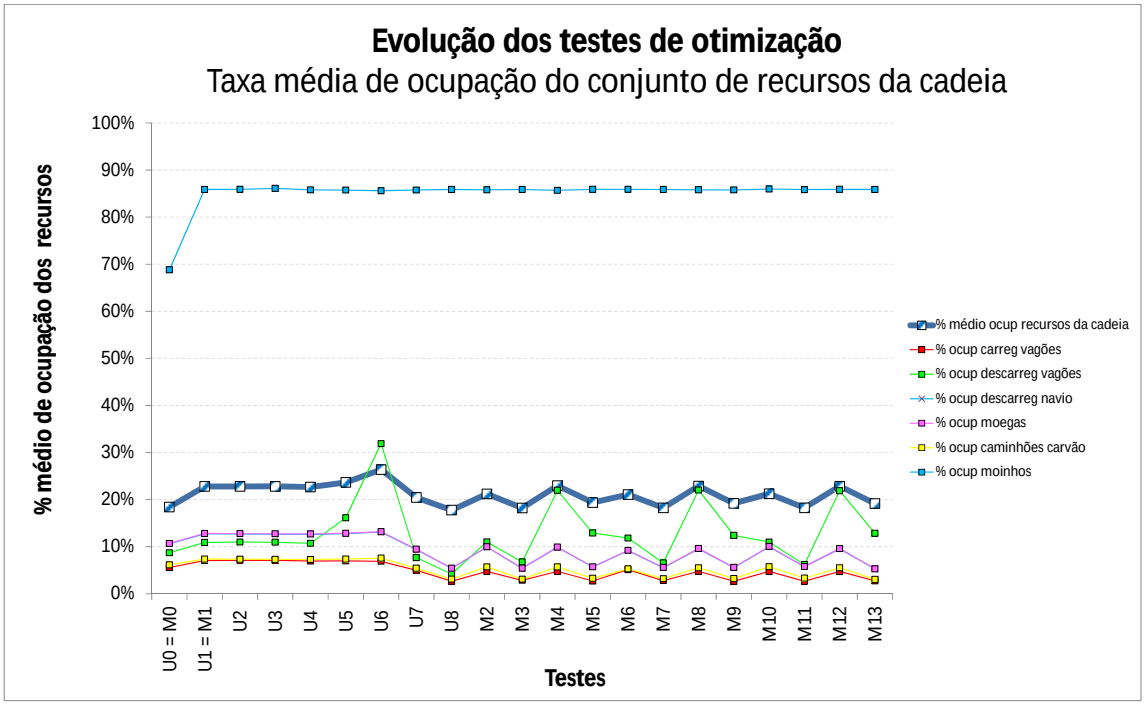


Gráfico de evolução dos resultados das simulações das situações ótimas – Taxa média de ocupação de recursos da cadeia

Fonte: o autor

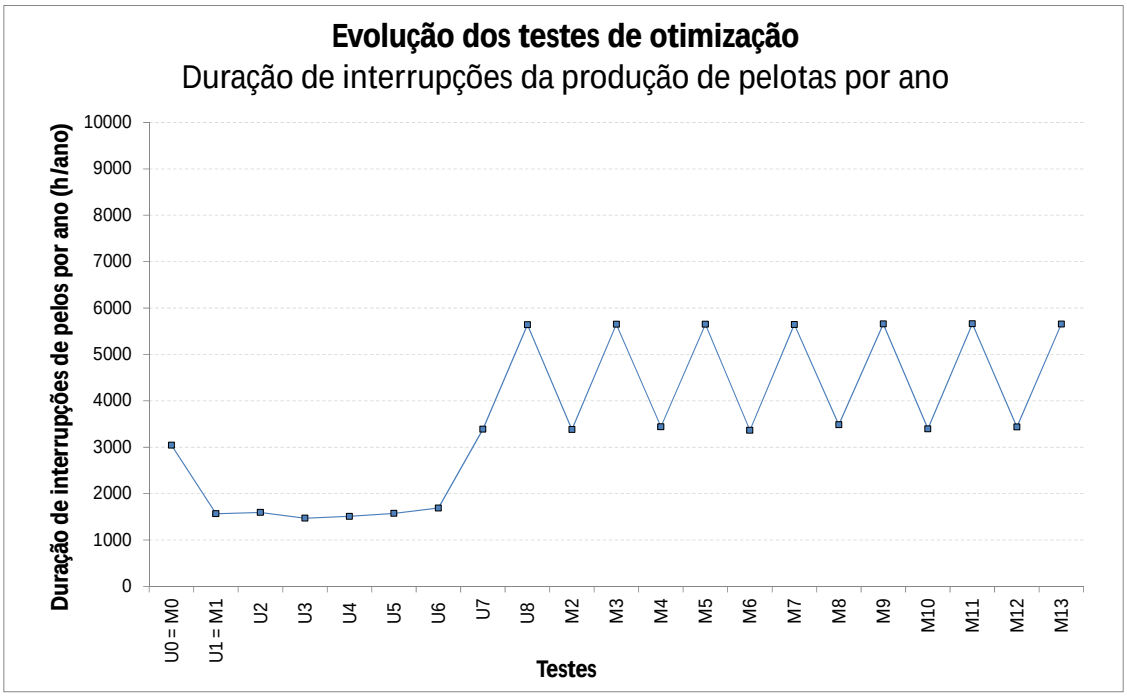


Gráfico de evolução dos resultados das simulações das situações ótimas – Duração de interrupções da produção de pelotas de ferro por ano

Fonte: o autor

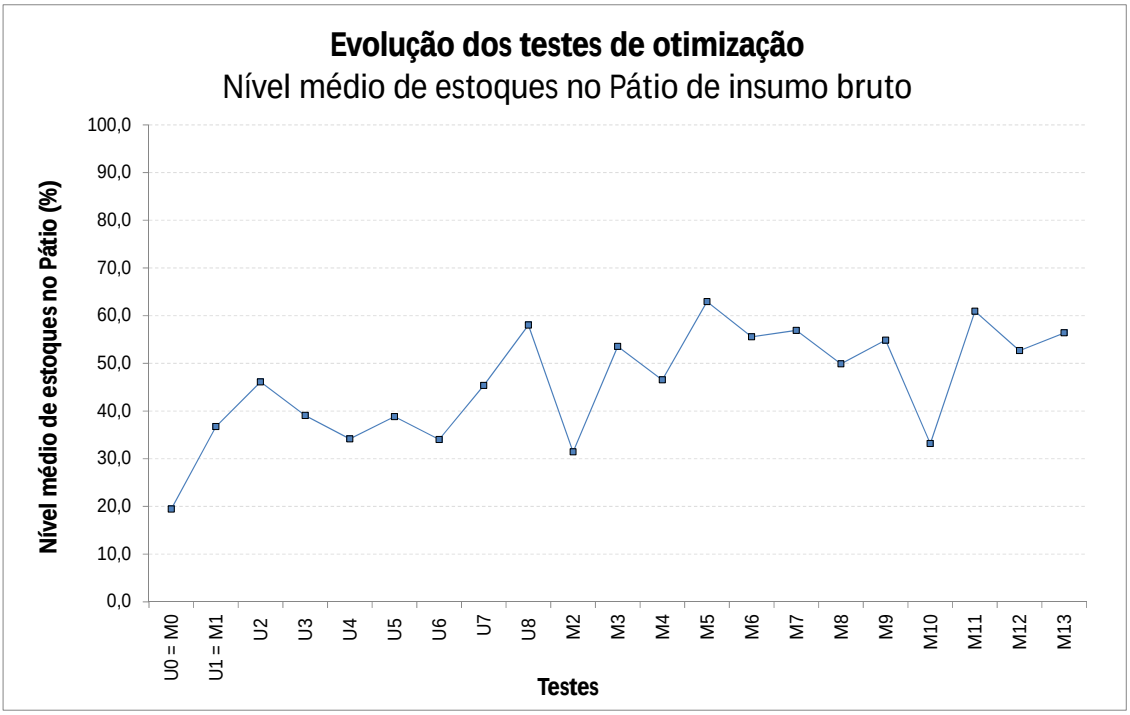


Gráfico de evolução dos resultados das simulações das situações ótimas – Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto

Fonte: o autor

APÊNDICE E – DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE

Os testes de sensibilidade foram realizados para todos os testes de simulação-otimização e para duas análises de incertezas: mudanças no atendimento do pedido pela Transportadora e no recebimento do pedido pelo Porto da Mineradora.

Após a realização dos testes e obtidos os resultados ótimos em cada cenário e em cada experimento, os dados foram planilhados e organizados de forma a permitir a comparação das sensibilidades de variáveis de desempenho da cadeia em relação às capacidades de fato dos processos produtivos.

As Tabelas se complementam e apresentam os resultados dos testes de sensibilidade sob o efeito da variação no modo de atendimento do pedido e sob o efeito da variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido no Porto da Mineradora. Nele se detalham os valores de cada um dos quatro estoques, da função objetivo e das variáveis de desempenho analisadas, segregados por faixa de variação das capacidades dos processos produtivos relacionados ao atendimento e ao recebimento do pedido de reposição de estoques no Pátio de insumo bruto.

As Figuras apresentam os gráficos de sensibilidade na evolução dos resultados de cada indicador de desempenho em função dos casos teste e os gráficos de sensibilidade de cada indicador dentro do range de variações em cada caso teste, para mudanças no atendimento do pedido e mudanças no recebimento do pedido.

Tabela de resultados dos testes de sensibilidade: variação no modo de atendimento do pedido - Testes de Simulação-Otimização no *OptQuest*

RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE
Variação no modo de atendimento do pedido
- Testes de Simulação-Otimização no *OptQuest* -

Fator	Caso Teste	fator e nível	Estoques																				Objetivo				
			Estoque M.F. (ton)					Estoque P.F. (ton)					Estoque P.B.M. (ton)					Estoque S.D.M. (ton)					Maximização do Consumo total do insumo por ano (ton/ano)				
			Variação no atendimento					Variação no atendimento					Variação no atendimento					Variação no atendimento					Variação no atendimento				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%
Cenário.0.C																											
----	$U_0 = M_0$	_____	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	900	900	900	900	900	452.411	399.134	383.680	339.636	324.766
Único e Múltipio																							*Simulação-Otimização OptQuest **				
	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	40.000	11.443	30.312	39.397	38.761	17.365	42.923	13.166	90.000	88.601	90.000	89.661	88.910	83.989	89.926	307	900	308	840	886	464.486	462.834	447.720	450.642	434.323
Cenário.1.C																											
																							*Simulação-Otimização OptQuest **				
Único	U_2	*fcmp1*	14.398	18.071	37.697	37.882	18.702	48.990	56.060	72.400	84.563	90.000	90.000	83.262	89.810	84.954	83.669	561	604	897	853	440	463.690	463.244	449.154	450.102	436.229
	U_3	*fcmp2*	18.953	2.390	36.711	37.312	33.884	63.363	85.278	88.428	83.765	64.118	83.550	79.475	84.282	84.079	89.982	428	158	836	843	216	465.233	465.255	452.262	452.064	438.035
	U_4	*fcmp3*	25.491	40.000	31.966	17.072	37.961	67.796	90.000	88.780	48.982	86.308	83.561	90.000	80.082	89.750	90.000	587	900	374	880	889	464.631	464.714	449.624	449.225	437.961
	U_5	*fcd1*	34.823	40.000	40.000	37.492	1.765	73.561	5.826	25.682	89.886	89.874	76.507	88.033	90.000	87.390	90.000	749	158	891	900	896	463.651	462.030	447.169	443.885	430.393
	U_6	*fcd2*	17.065	38.982	16.151	40.000	39.441	53.816	90.000	26.874	48.369	87.229	83.438	89.302	89.347	90.000	89.222	286	353	428	313	900	465.472	466.158	441.788	432.063	415.012
	U_7	*fcm1*	40.000	35.000	32.321	40.000	0	90.000	90.000	9.644	89.981	90.000	67.500	79.868	86.905	84.862	87.208	900	883	452	833	900	338.507	337.850	331.599	332.046	320.982
	U_8	*fcm2*	17.383	10.432	16.656	32.404	12.317	36.956	46.372	34.970	21.808	78.342	84.890	79.843	85.884	87.792	83.086	228	140	900	392	403	188.752	188.505	186.315	188.245	187.456
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	40.000	29.464	30.560	28.700	39.161	46.109	89.659	73.210	76.035	89.534	85.260	90.000	69.516	83.955	88.451	800	668	744	886	879	338.368	337.566	331.042	332.525	322.129
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	25.978	38.045	27.899	27.335	40.000	47.419	90.000	24.758	5.826	86.612	82.277	77.708	83.812	89.794	78.638	892	868	549	158	900	188.747	189.025	186.206	188.094	187.763
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	34.367	29.774	35.497	0	1.740	66.219	90.000	36.264	83.043	81.754	88.892	90.000	86.506	79.269	89.092	900	513	871	130	139	337.451	336.216	326.970	323.222	315.515
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	40.000	35.890	24.105	26.605	2.651	54.704	32.465	42.956	16.629	72.028	90.000	75.760	89.839	89.282	84.816	322	337	898	333	149	188.551	188.326	186.329	188.787	185.443
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	34.682	32.352	27.762	29.103	40.000	73.425	62.278	87.329	61.249	53.475	77.213	73.928	90.000	86.583	89.151	752	870	395	864	180	338.590	338.415	330.524	334.667	324.343
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	35.886	32.017	39.955	37.744	38.906	90.000	44.797	21.141	41.434	22.661	77.454	87.435	86.489	89.380	89.167	885	452	900	173	188	188.607	188.807	186.255	188.882	187.451
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	30.000	24.571	35.410	40.000	31.446	67.500	46.036	90.000	90.000	49.604	67.500	90.000	85.488	84.375	88.234	675	900	900	844	888	338.245	339.578	327.191	327.944	319.146
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	11.621	5.437	35.692	25.275	27.762	49.470	19.579	4.267	29.219	89.777	85.494	67.279	89.933	90.000	84.174	324	764	881	900	708	188.817	188.652	185.997	187.813	186.102
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	28.102	39.248	25.912	39.897	40.000	80.962	88.340	46.998	82.484	5.826	80.605	88.965	72.409	90.000	87.495	810	879	530	319	158	337.797	338.295	330.952	327.724	321.794
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	34.947	25.861	40.000	21.456	29.473	78.725	50.289	19.258	32.465	66.501	69.251	85.874	90.000	84.422	90.000	786	871	900	900	900	189.214	188.118	186.230	188.647	188.043
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	34.111	40.000	10.200	36.264	27.837	34.459	90.000	82.383	83.617	85.158	76.868	84.375	86.854	86.275	85.960	639	900	900	851	870	338.954	338.051	327.783	330.468	319.954
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	12.140	40.000	36.763	24.875	27.890	62.838	78.595	13.187	46.313	65.774	90.000	78.738	89.251	90.000	85.153	805	900	808	898	887	188.167	188.435	186.188	187.989	187.295

* Modelo de otimização configurado para uma corrida de 170 iterações

Fonte: o autor

Tabela de resultados dos testes de sensibilidade: variação no modo de atendimento do pedido - Testes de Simulação no Arena

RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE
Variação no modo de atendimento do pedido
- Testes de Simulação no Arena -

Fator	Caso Teste	fator e nível	Variáveis de desempenho da cadeia																			
			Lead Time médio do pedido (h)					Taxa média de ocupação do conjunto de recursos (%)					Interrupções de produção pelotas por ano (h/ano)					Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto (ton)				
			Variação no atendimento					Variação no atendimento					Variação no atendimento					Variação no atendimento				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%
Cenário.0.C																						
---	$U_0 = M_0$	_____	305	475	609	789	1.018	22,6%	19,5%	18,4%	17,1%	16,3%	1.339	2.199	3.044	3.163	3.398	19,7%	18,1%	19,5%	22,5%	26,9%
Único e Múltiplo																						*Simulação Arena ***
	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	348	493	745	749	931	23,1%	22,8%	22,8%	23,1%	23,2%	1.148	1.171	1.567	1.369	1.624	49,8%	36,9%	36,7%	38,0%	40,2%
Cenário.1.C																						
																						*Simulação Arena ***
Único	U_2	*fcmp1*	289	437	600	692	860	22,8%	23,1%	22,8%	23,1%	22,7%	1.160	1.165	1.593	1.382	1.606	63,2%	38,5%	46,1%	39,7%	36,6%
	U_3	*fcmp2*	276	418	594	769	870	22,9%	23,1%	22,8%	22,9%	22,4%	1.132	1.138	1.469	1.355	1.583	35,8%	37,1%	39,1%	36,4%	41,5%
	U_4	*fcmp3*	241	445	600	781	862	23,2%	23,4%	22,7%	23,4%	22,9%	1.138	1.143	1.510	1.398	1.586	49,7%	50,1%	34,2%	40,4%	43,2%
	U_5	*fcd1*	273	661	744	784	927	24,0%	24,0%	23,6%	23,6%	24,0%	1.163	1.188	1.573	1.487	1.693	38,8%	29,5%	38,8%	36,2%	40,3%
	U_6	*fcd2*	296	436	809	817	971	26,5%	26,7%	26,4%	26,4%	25,9%	1.132	1.119	1.690	1.668	1.943	50,1%	38,0%	34,0%	36,6%	41,6%
	U_7	*fcm1*	290	432	761	793	960	20,5%	20,6%	20,4%	21,1%	20,9%	3.170	3.172	3.387	3.269	3.445	26,6%	42,8%	45,4%	45,6%	50,4%
	U_8	*fcm2*	286	387	702	950	939	18,1%	18,0%	17,8%	18,6%	17,4%	5.576	5.586	5.640	5.594	5.602	52,1%	51,3%	58,0%	58,8%	61,8%
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	334	431	591	731	957	21,4%	22,8%	21,2%	22,1%	21,6%	3.171	3.199	3.380	3.260	3.423	41,9%	54,8%	31,4%	48,4%	50,7%
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	291	465	752	1.019	972	18,2%	18,4%	18,2%	19,1%	18,0%	5.581	5.579	5.650	5.592	5.595	49,6%	44,7%	53,6%	58,8%	57,6%
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	288	431	728	728	961	23,1%	22,8%	23,0%	23,4%	23,6%	3.183	3.199	3.439	3.411	3.537	52,1%	54,8%	46,5%	43,9%	50,3%
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	290	516	656	1.065	991	19,3%	19,5%	19,4%	20,2%	19,1%	5.583	5.593	5.649	5.580	5.639	66,7%	45,1%	62,9%	55,9%	65,0%
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	298	421	595	711	1.018	21,4%	21,1%	21,1%	21,4%	21,3%	3.166	3.180	3.364	3.271	3.397	47,3%	36,4%	55,6%	53,9%	47,1%
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	288	409	756	841	1.137	18,5%	18,1%	18,3%	18,6%	18,0%	5.580	5.581	5.645	5.578	5.601	49,3%	58,8%	56,9%	66,2%	62,9%
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	247	463	608	751	1.120	23,4%	23,2%	22,9%	24,0%	23,3%	3.169	3.151	3.484	3.335	3.477	29,3%	49,8%	49,9%	48,4%	42,1%
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	286	670	994	951	958	19,4%	19,2%	19,2%	20,0%	19,1%	5.578	5.578	5.655	5.592	5.627	52,9%	30,3%	54,9%	60,3%	64,6%
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	253	489	638	762	1.190	21,5%	20,9%	21,2%	21,4%	20,7%	3.170	3.238	3.396	3.341	3.428	51,1%	26,0%	33,2%	54,8%	38,3%
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	296	424	741	890	952	18,1%	17,8%	18,3%	19,0%	18,0%	5.569	5.593	5.660	5.582	5.594	33,6%	55,3%	60,9%	55,3%	67,8%
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	271	458	587	780	898	22,5%	23,7%	22,9%	23,6%	23,4%	3.160	3.175	3.435	3.292	3.459	35,6%	48,2%	52,7%	51,0%	54,1%
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	271	429	896	973	907	19,4%	19,0%	19,2%	19,9%	18,8%	5.588	5.586	5.653	5.593	5.604	64,0%	49,0%	56,4%	62,7%	62,0%

** Modelo de simulação ajustado e configrurado para corrida de 20 replicações, warm up de 60 dias e cada replicação com duração de 360 dias.

Fonte: o autor

Tabela de resultados dos testes de sensibilidade: variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido - Testes de Simulação-Otimização no *OptQuest*

RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido
- Testes de Simulação-Otimização no *OptQuest* -

Fator	Caso Teste	fator e nível	Estoques																				Objetivo				
			Estoque M.F. (ton)					Estoque P.F. (ton)					Estoque P.B.M. (ton)					Estoque S.D.M. (ton)					Maximização Consumo total do insumo por ano (ton/ano)				
			Variação no recebimento					Variação no recebimento					Variação no recebimento					Variação no recebimento					Variação no recebimento				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%
Cenário.0.C																											
----	$U_0 = M_0$	_____	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	60.000	900	900	900	900	900	379.959	387.477	383.680	380.817	371.575
Único e Múltiplo																											*Simulação-Otimização OptQuest **
	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	34.234	39.948	30.312	40.000	25.298	71.223	83.706	13.166	90.000	56.037	85.457	82.766	88.910	87.679	86.783	800	798	308	885	866	453.972	454.502	447.720	452.969	454.581
Cenário.1.C																											
																											*Simulação-Otimização OptQuest **
Único	U_2	*fcmp1*	19.448	36.579	37.697	20.981	19.773	27.984	84.047	72.400	33.411	27.983	90.000	79.262	89.810	85.474	89.385	900	796	897	900	900	462.552	456.014	449.154	458.678	462.634
	U_3	*fcmp2*	31.608	38.431	36.711	39.709	37.105	81.214	82.969	88.428	90.000	84.257	90.000	90.000	84.282	87.432	84.328	855	830	836	862	838	462.425	461.476	452.262	463.238	460.829
	U_4	*fcmp3*	35.000	37.680	31.966	37.595	37.865	78.750	84.734	88.780	46.806	88.043	79.705	83.790	80.082	81.727	85.976	788	885	374	730	846	456.907	464.751	449.624	464.340	466.066
	U_5	*fcd1*	1.740	33.187	40.000	39.413	28.214	88.284	13.995	25.682	5.826	6.173	79.495	86.302	90.000	89.802	87.143	139	501	891	896	334	448.332	457.861	447.169	451.801	450.323
	U_6	*fcd2*	37.205	36.156	16.151	26.887	35.853	85.373	73.969	26.874	61.926	77.501	85.284	81.858	89.347	87.432	85.459	844	746	428	900	853	450.769	451.082	441.788	451.937	451.344
	U_7	*fcm1*	4.188	0	32.321	21.279	33.163	83.579	90.000	9.644	44.667	81.812	82.196	87.351	86.905	87.140	69.133	152	115	452	888	694	336.699	337.816	331.599	335.143	334.766
	U_8	*fcm2*	29.258	26.952	16.656	21.302	33.067	5.826	38.995	34.970	26.763	16.693	87.152	81.644	85.884	84.905	85.808	158	900	900	900	238	188.458	189.202	186.315	188.853	188.590
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	34.565	34.863	30.560	26.705	23.737	75.013	69.447	73.210	47.610	39.986	79.677	79.149	69.516	90.000	90.000	745	749	744	900	900	335.796	335.867	331.042	337.788	335.680
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	22.977	17.072	27.899	25.151	34.422	43.521	42.952	24.758	45.974	84.431	87.829	87.619	83.812	78.174	87.150	882	880	549	719	872	189.136	188.153	186.206	188.987	188.320
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	19.256	8.124	35.497	31.561	16.729	89.266	68.273	36.264	9.683	22.499	88.757	81.547	86.506	85.066	89.944	894	470	871	723	900	334.267	335.573	326.970	330.490	331.707
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	40.000	35.353	24.105	35.000	12.707	85.469	46.005	42.956	78.750	6.051	78.963	89.142	89.839	90.000	87.003	875	900	898	788	900	188.104	188.259	186.329	188.443	188.713
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	35.000	35.000	27.762	35.160	35.000	78.750	78.750	87.329	79.673	78.750	78.856	79.009	90.000	80.515	78.750	788	788	395	807	788	336.870	337.852	330.524	337.126	337.627
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	11.581	40.000	39.955	25.373	29.888	74.903	46.036	21.141	90.000	63.853	83.158	72.666	86.489	90.000	67.974	381	728	900	900	675	188.659	188.392	186.255	188.790	188.492
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	20.180	31.631	35.410	22.829	22.594	88.097	63.585	90.000	57.711	87.147	80.821	82.801	85.488	85.854	86.069	512	828	900	900	198	335.695	333.799	327.191	335.724	333.955
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	39.958	38.809	35.692	39.836	6.052	79.875	87.198	4.267	79.823	30.050	79.660	87.203	89.933	82.851	66.986	893	872	881	900	841	189.055	189.129	185.997	189.195	188.379
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	40.000	35.000	25.912	40.000	40.000	89.814	78.750	46.998	90.000	88.730	90.000	78.750	72.409	77.386	78.489	900	788	530	828	900	337.616	336.133	330.952	336.929	337.997
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	23.611	19.860	40.000	35.940	27.851	42.894	28.573	19.258	84.027	45.057	89.347	89.256	90.000	84.370	87.056	900	461	900	842	881	188.658	188.749	186.230	188.964	189.987
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	35.131	30.408	10.200	34.992	23.553	76.430	65.967	82.383	78.722	40.687	83.607	84.057	86.854	74.822	90.000	832	900	900	788	900	333.721	336.153	327.783	333.492	336.807
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	24.203	19.880	36.763	33.159	23.855	20.977	90.000	13.187	78.093	60.862	66.751	80.894	89.251	67.500	79.719	328	900	808	691	493	188.870	188.687	186.188	188.680	189.055

* Modelo de otimização configurado para uma corrida de 170 iterações

Fonte: o autor

Tabela de resultados dos testes de sensibilidade: variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido - Testes de Simulação no Arena

RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido
- Testes de Simulação no Arena -

Fator	Caso Teste	fator e nível	Variáveis de desempenho da cadeia																			
			Lead Time médio do pedido (h)					Taxa média de ocupação do conjunto de recursos (%)					Interrupções de produção pelotas por ano (h/ano)					Nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto (%)				
			Variação no recebimento					Variação no recebimento					Variação no recebimento					Variação no recebimento				
			-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%	-50%	-25%	0%	+25%	+50%
Cenário.0.C																						
---	$U_0 = M_0$	_____	551	530	609	603	667	16,7%	18,3%	18,4%	20,5%	20,7%	2.515	2.391	3.044	2.490	2.640	22,9%	21,8%	19,5%	18,4%	18,4%
Único e Múltiplo																						*Simulação Arena ***
	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	575	538	745	622	655	20,2%	21,4%	22,8%	24,4%	25,8%	1.315	1.305	1.567	1.325	1.307	43,3%	41,1%	36,7%	42,5%	39,2%
Cenário.1.C																						
																						*Simulação Arena ***
Único	U_2	*fcmp1*	652	621	600	697	721	20,2%	21,5%	22,8%	24,6%	25,8%	1.180	1.291	1.593	1.242	1.167	37,1%	30,7%	46,1%	34,1%	36,5%
	U_3	*fcmp2*	547	537	594	630	625	20,2%	21,9%	22,8%	24,7%	25,2%	1.177	1.195	1.469	1.154	1.304	47,3%	58,0%	39,1%	40,1%	37,2%
	U_4	*fcmp3*	525	558	600	656	601	20,2%	21,8%	22,7%	24,4%	26,0%	1.268	1.140	1.510	1.148	1.117	39,7%	38,5%	34,2%	30,8%	40,3%
	U_5	*fcd1*	516	720	744	836	860	20,8%	22,5%	23,6%	25,5%	26,4%	1.480	1.257	1.573	1.340	1.372	35,2%	32,9%	38,8%	32,9%	25,8%
	U_6	*fcd2*	551	590	809	654	679	24,1%	24,9%	26,4%	27,7%	28,9%	1.367	1.361	1.690	1.347	1.360	39,5%	34,6%	34,0%	41,6%	37,6%
	U_7	*fcm1*	583	573	761	653	628	18,4%	19,8%	20,4%	21,8%	23,2%	3.193	3.181	3.387	3.272	3.226	44,8%	48,2%	45,4%	50,0%	31,1%
	U_8	*fcm2*	706	732	702	773	796	17,0%	17,7%	17,8%	18,6%	19,2%	5.587	5.575	5.640	5.576	5.581	58,6%	56,9%	58,0%	54,5%	57,0%
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	504	542	591	609	724	18,9%	20,0%	21,2%	21,8%	22,9%	3.209	3.206	3.380	3.171	3.209	45,4%	41,8%	31,4%	52,6%	49,5%
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	670	674	752	613	640	17,2%	18,0%	18,2%	18,8%	20,4%	5.572	5.588	5.650	5.574	5.587	59,4%	58,1%	53,6%	52,7%	58,6%
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	538	530	728	647	916	20,8%	21,9%	23,0%	24,7%	25,4%	3.232	3.205	3.439	3.294	3.278	53,7%	45,4%	46,5%	48,4%	43,1%
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	532	565	656	552	1.089	18,2%	19,3%	19,4%	19,7%	20,6%	5.595	5.588	5.649	5.587	5.590	54,9%	62,8%	62,9%	68,2%	48,9%
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	581	580	595	595	675	19,1%	20,0%	21,1%	22,5%	22,9%	3.190	3.172	3.364	3.190	3.178	45,2%	42,0%	55,6%	42,5%	39,9%
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	608	650	756	589	686	16,4%	17,7%	18,3%	18,7%	19,4%	5.585	5.588	5.645	5.571	5.587	61,5%	44,7%	56,9%	65,2%	40,4%
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	523	567	608	579	636	21,0%	21,9%	22,9%	23,9%	24,8%	3.208	3.237	3.484	3.207	3.240	48,7%	46,4%	49,9%	49,6%	64,3%
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	543	587	994	584	928	18,2%	19,1%	19,2%	20,0%	20,4%	5.576	5.573	5.655	5.572	5.582	55,0%	62,8%	54,9%	56,8%	32,5%
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	522	552	638	561	706	19,5%	20,0%	21,2%	21,7%	23,4%	3.176	3.203	3.396	3.191	3.168	64,5%	44,5%	33,2%	42,7%	38,8%
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	563	638	741	587	730	16,5%	17,7%	18,3%	18,8%	20,4%	5.581	5.578	5.660	5.576	5.556	67,5%	62,0%	60,9%	65,1%	58,5%
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	517	549	587	674	733	21,0%	21,9%	22,9%	24,4%	25,0%	3.241	3.197	3.435	3.242	3.191	48,5%	50,5%	52,7%	36,3%	62,0%
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	707	644	896	721	627	17,9%	18,9%	19,2%	19,7%	20,7%	5.580	5.583	5.653	5.584	5.579	33,1%	56,4%	56,4%	36,7%	55,9%

** Modelo de simulação ajustado e configrurado para corrida de 20 replicações, warm up de 60 dias e cada replicação com duração de 360 dias.

Fonte: o autor

Tabela de resultados dos testes de sensibilidade da taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos – variação no modo de atendimento do pedido

RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE
- Taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos -
Variação no modo de atendimento do pedido

Fator	Caso Teste	fator e nível	Objetivo: Maximização do Consumo total do insumo por ano (10^3 ton/ano) – Variação no atendimento -50%	-25%	0%	+25%	+50%	Recurso: Taxa média de ocupação do recurso moinho (%) – Variação no atendimento -50%	-25%	0%	+25%	+50%
Cenário.0.C												
----	$U_0 = M_0$	_____	452.411	399.134	383.680	339.636	324.766	84,5%	74,3%	68,8%	65,3%	63,9%
Único e Múltiplo			*Simulação-Otimização OptQuest **					*Simulação Arena ***				
	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	464.486	462.834	447.720	450.642	434.323	86,5%	86,4%	85,9%	86,9%	86,9%
Cenário.1.C												
			*Simulação-Otimização OptQuest **					*Simulação Arena ***				
Único	U_2	*fcmp1*	463.690	463.244	449.154	450.102	436.229	86,4%	86,3%	85,9%	87,2%	85,2%
	U_3	*fcmp2*	465.233	465.255	452.262	452.064	438.035	86,9%	86,7%	86,1%	86,1%	86,2%
	U_4	*fcmp3*	464.631	464.714	449.624	449.225	437.961	86,7%	86,8%	85,8%	85,9%	86,1%
	U_5	*fcd1*	463.651	462.030	447.169	443.885	430.393	86,7%	86,6%	85,7%	86,8%	86,4%
	U_6	*fcd2*	465.472	466.158	441.788	432.063	415.012	86,8%	87,2%	85,6%	85,2%	86,2%
	U_7	*fcm1*	338.507	337.850	331.599	332.046	320.982	87,2%	86,9%	85,8%	86,8%	86,1%
	U_8	*fcm2*	188.752	188.505	186.315	188.245	187.456	87,0%	86,9%	85,9%	86,6%	86,4%
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	338.368	337.566	331.042	332.525	322.129	86,6%	86,2%	85,8%	87,2%	86,4%
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	188.747	189.025	186.206	188.094	187.763	87,0%	87,4%	85,9%	86,9%	86,9%
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	337.451	336.216	326.970	323.222	315.515	86,7%	86,2%	85,7%	86,7%	86,4%
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	188.551	188.326	186.329	188.787	185.443	87,0%	86,8%	85,9%	87,0%	86,8%
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	338.590	338.415	330.524	334.667	324.343	86,6%	86,5%	85,9%	86,1%	86,7%
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	188.607	188.807	186.255	188.882	187.451	86,7%	87,3%	85,9%	86,5%	86,5%
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	338.245	339.578	327.191	327.944	319.146	87,0%	87,5%	85,8%	86,6%	86,5%
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	188.817	188.652	185.997	187.813	186.102	87,4%	87,3%	85,8%	86,5%	86,7%
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	337.797	338.295	330.952	327.724	321.794	87,1%	85,7%	86,0%	86,3%	85,5%
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	189.214	188.118	186.230	188.647	188.043	87,1%	86,6%	85,8%	86,6%	86,4%
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	338.954	338.051	327.783	330.468	319.954	87,2%	87,1%	85,9%	87,0%	86,1%
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	188.167	188.435	186.188	187.989	187.295	86,5%	86,7%	85,9%	86,8%	86,1%

* Modelo de otimização configurado para uma corrida de 170 iterações

** Modelo de simulação ajustado e configrurado para corrida de 20 replicações, warm up de 60 dias e cada replicação com duração de 360 dias.

Fonte: o autor

Tabela de resultados dos testes de sensibilidade da taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

RESULTADOS DOS TESTES DE SENSIBILIDADE
- Taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos -
Variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fator	Caso Teste	fator e nível	Objetivo: Maximização do Consumo total do insumo por ano (10^3 ton/ano) – Variação no atendimento -50%	-25%	0%	+25%	+50%	Recurso: Taxa média de ocupação do recurso moinho (%) – Variação no atendimento -50%	-25%	0%	+25%	+50%
Cenário.0.C												
----	$U_0 = M_0$	_____	379.959	387.477	383.680	380.817	371.575	71,2%	73,0%	68,8%	71,4%	69,3%
Único e Múltiplo			*Simulação-Otimização OptQuest **					*Simulação Arena ***				
	$U_1 = M_1$	*fcmp0 = fcd0 = fcm0 = fcpp0.fcd0.fcm0*	453.972	454.502	447.720	452.969	454.581	86,8%	86,9%	85,9%	86,8%	86,9%
Cenário.1.C												
			*Simulação-Otimização OptQuest **					*Simulação Arena ***				
Único	U_2	*fcmp1*	462.552	456.014	449.154	458.678	462.634	86,5%	86,0%	85,9%	86,2%	86,3%
	U_3	*fcmp2*	462.425	461.476	452.262	463.238	460.829	86,2%	86,8%	86,1%	87,2%	85,6%
	U_4	*fcmp3*	456.907	464.751	449.624	464.340	466.066	86,4%	86,8%	85,8%	86,4%	87,1%
	U_5	*fcd1*	448.332	457.861	447.169	451.801	450.323	85,1%	86,5%	85,7%	86,2%	85,3%
	U_6	*fcd2*	450.769	451.082	441.788	451.937	451.344	87,0%	86,8%	85,6%	87,2%	87,0%
	U_7	*fcm1*	336.699	337.816	331.599	335.143	334.766	86,4%	86,7%	85,8%	86,0%	86,6%
	U_8	*fcm2*	188.458	189.202	186.315	188.853	188.590	86,9%	86,7%	85,9%	86,7%	87,1%
Múltiplos Combinados	M_2	*fcmp1 . fcd1 . fcm1*	335.796	335.867	331.042	337.788	335.680	86,5%	86,3%	85,8%	86,8%	86,6%
	M_3	*fcmp1 . fcd1 . fcm2*	189.136	188.153	186.206	188.987	188.320	86,8%	86,5%	85,9%	86,6%	86,9%
	M_4	*fcmp1 . fcd2 . fcm1*	334.267	335.573	326.970	330.490	331.707	86,3%	86,7%	85,7%	86,8%	86,6%
	M_5	*fcmp1 . fcd2 . fcm2*	188.104	188.259	186.329	188.443	188.713	86,7%	86,7%	85,9%	86,6%	86,8%
	M_6	*fcmp2 . fcd1 . fcm1*	336.870	337.852	330.524	337.126	337.627	86,4%	86,7%	85,9%	86,2%	86,7%
	M_7	*fcmp2 . fcd1 . fcm2*	188.659	188.392	186.255	188.790	188.492	86,9%	86,6%	85,9%	86,7%	86,5%
	M_8	*fcmp2 . fcd2 . fcm1*	335.695	333.799	327.191	335.724	333.955	86,5%	86,5%	85,8%	87,2%	86,8%
	M_9	*fcmp2 . fcd2 . fcm2*	189.055	189.129	185.997	189.195	188.379	86,7%	87,2%	85,8%	86,9%	86,7%
	M_{10}	*fcmp3 . fcd1 . fcm1*	337.616	336.133	330.952	336.929	337.997	86,6%	86,8%	86,0%	86,5%	86,9%
	M_{11}	*fcmp3 . fcd1 . fcm2*	188.658	188.749	186.230	188.964	189.987	86,7%	86,8%	85,8%	87,0%	87,4%
	M_{12}	*fcmp3 . fcd2 . fcm1*	333.721	336.153	327.783	333.492	336.807	86,8%	86,7%	85,9%	86,5%	87,2%
	M_{13}	*fcmp3 . fcd2 . fcm2*	188.870	188.687	186.188	188.680	189.055	86,9%	87,1%	85,9%	86,8%	87,1%

* Modelo de otimização configurado para uma corrida de 170 iterações

** Modelo de simulação ajustado e configrurado para corrida de 20 replicações, warm up de 60 dias e cada replicação com duração de 360 dias.

Fonte: o autor

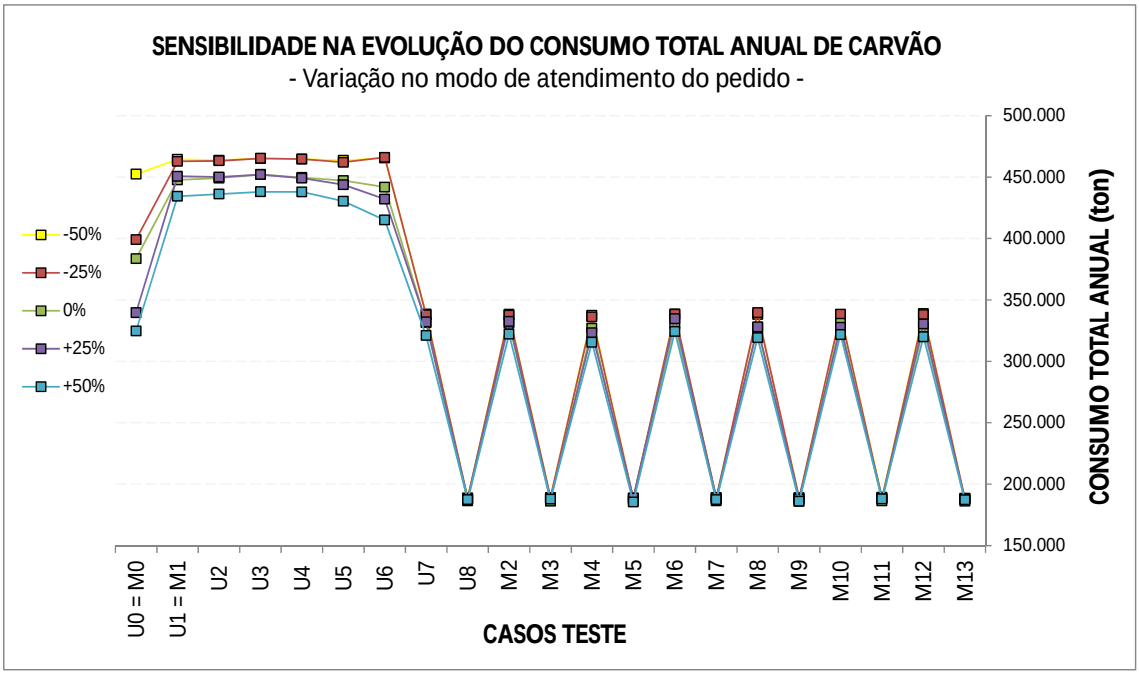


Gráfico de sensibilidade na evolução do consumo total anual de carvão – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

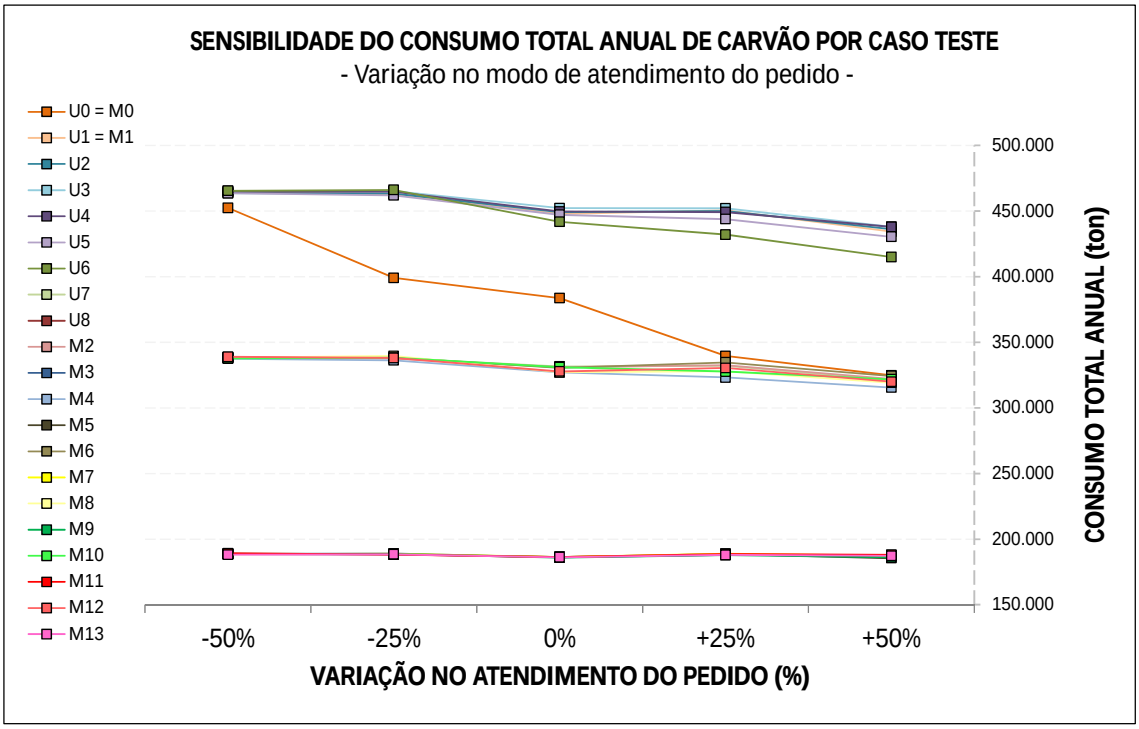


Gráfico de sensibilidade do consumo total anual de carvão por caso teste – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

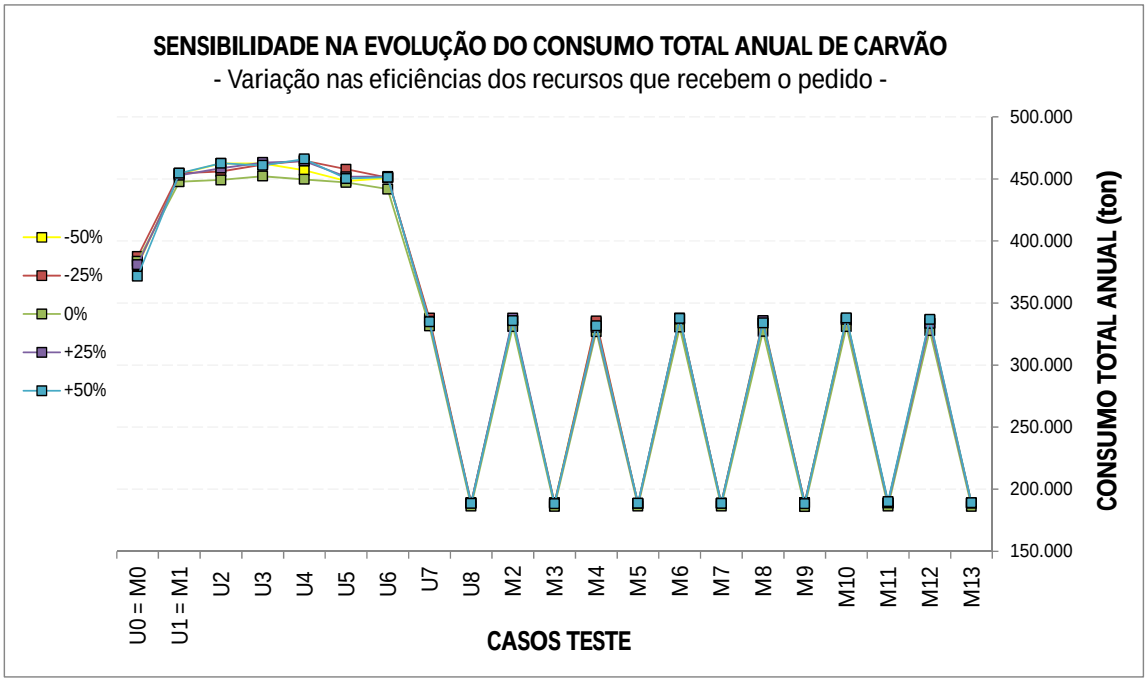


Gráfico de sensibilidade na evolução do consumo total anual de carvão – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

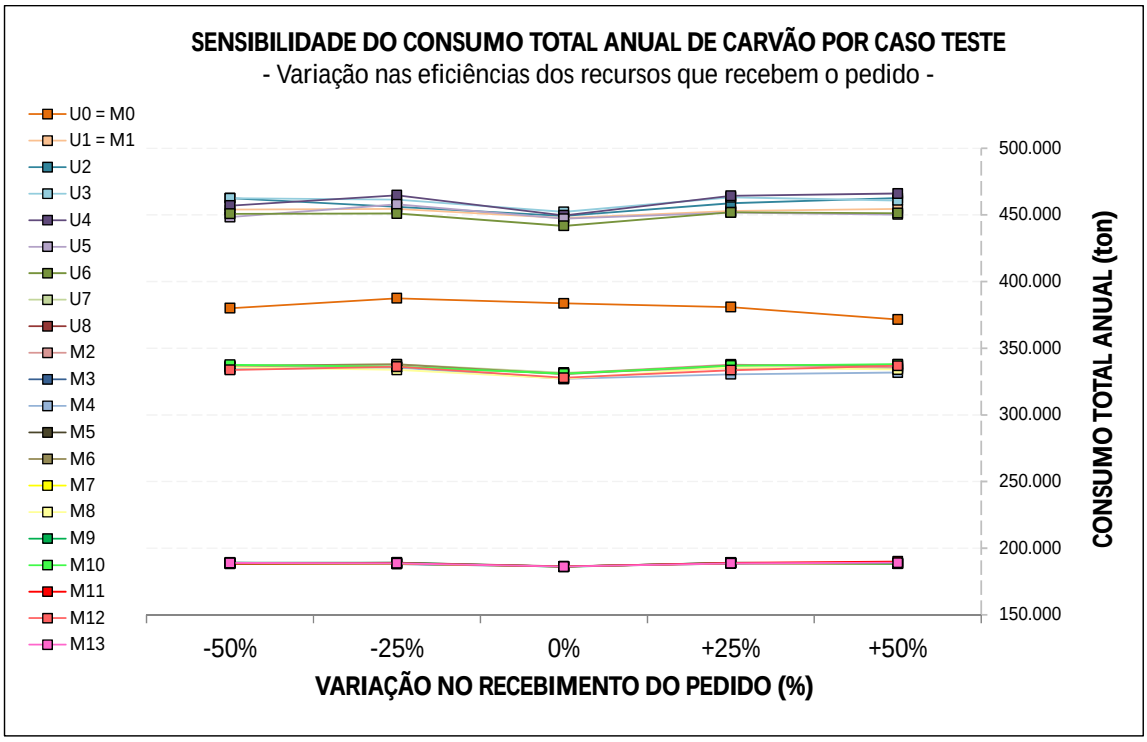


Gráfico de sensibilidade do consumo total anual de carvão por caso teste – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

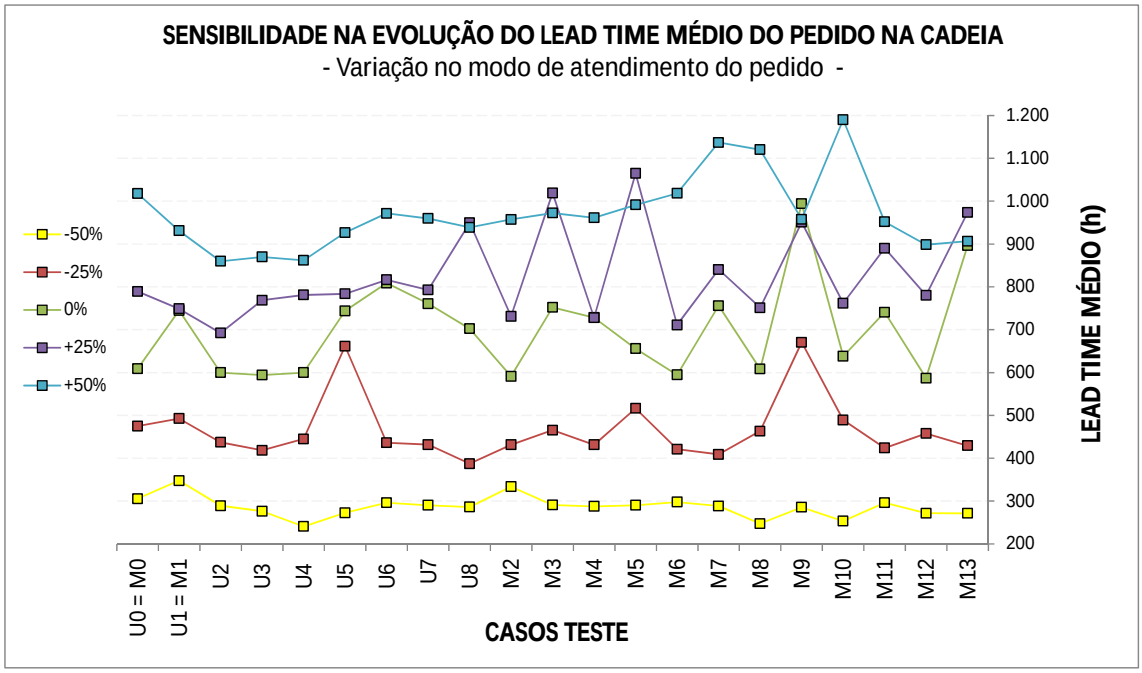


Gráfico de sensibilidade na evolução do *lead time* médio do pedido na cadeia – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

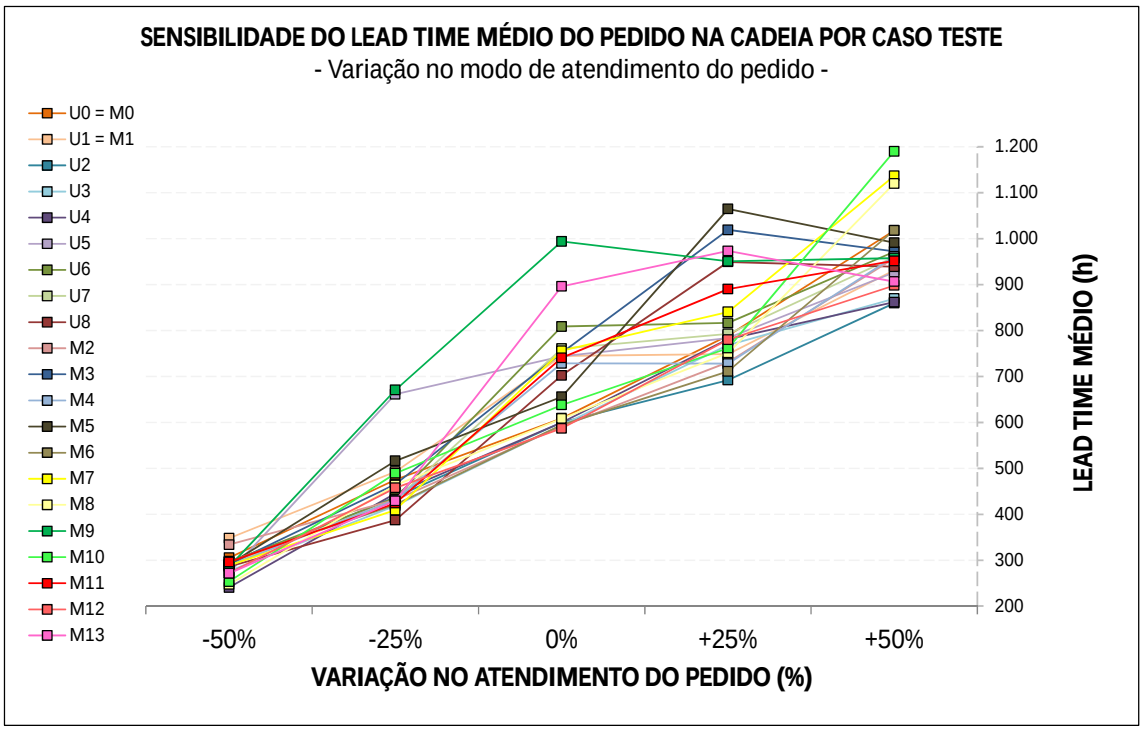


Gráfico de sensibilidade do *lead time* médio do pedido na cadeia por caso teste – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

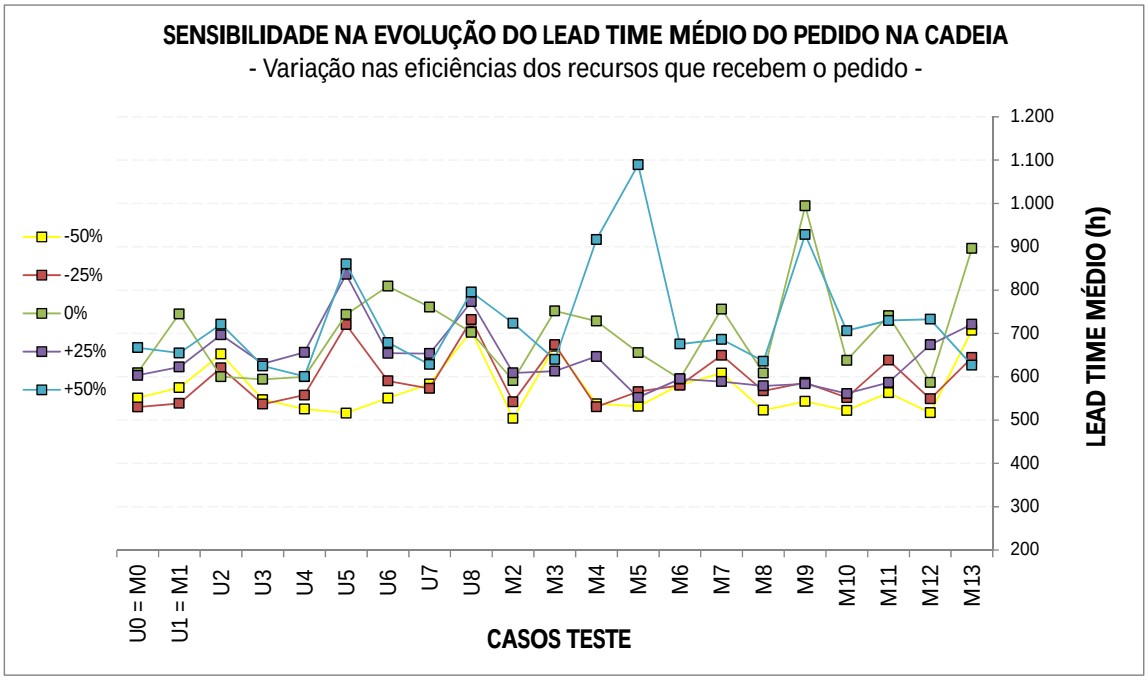


Gráfico de sensibilidade na evolução do *lead time* médio do pedido na cadeia – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

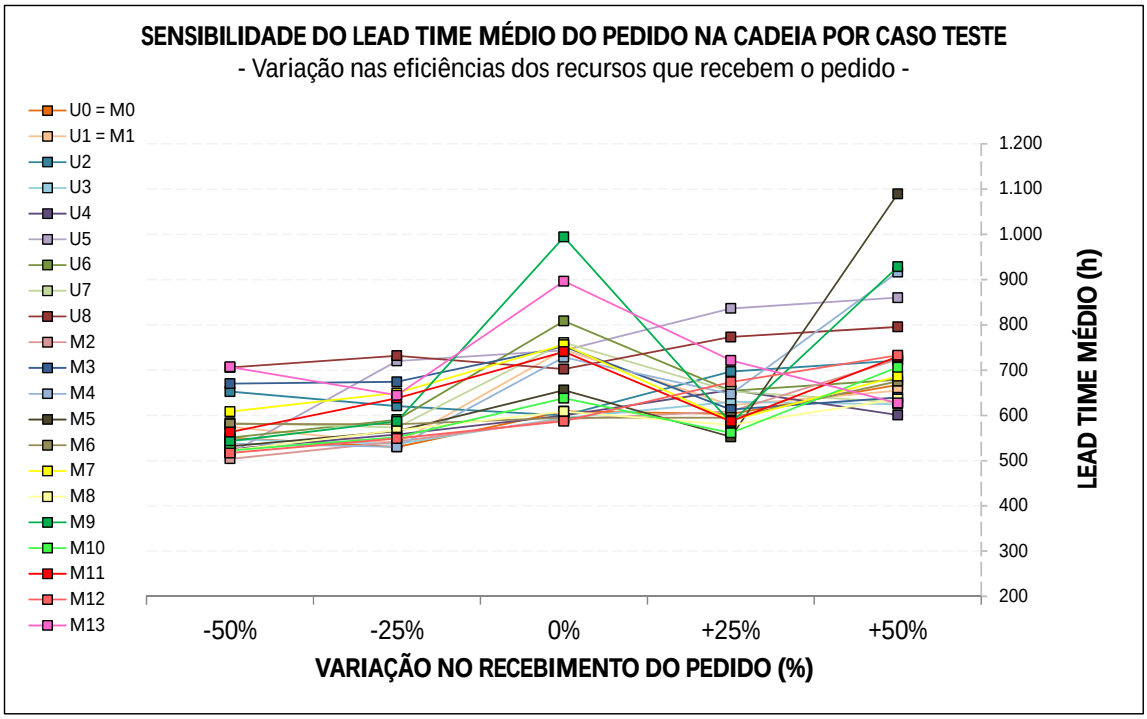


Gráfico de sensibilidade do *lead time* médio do pedido na cadeia por caso teste – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

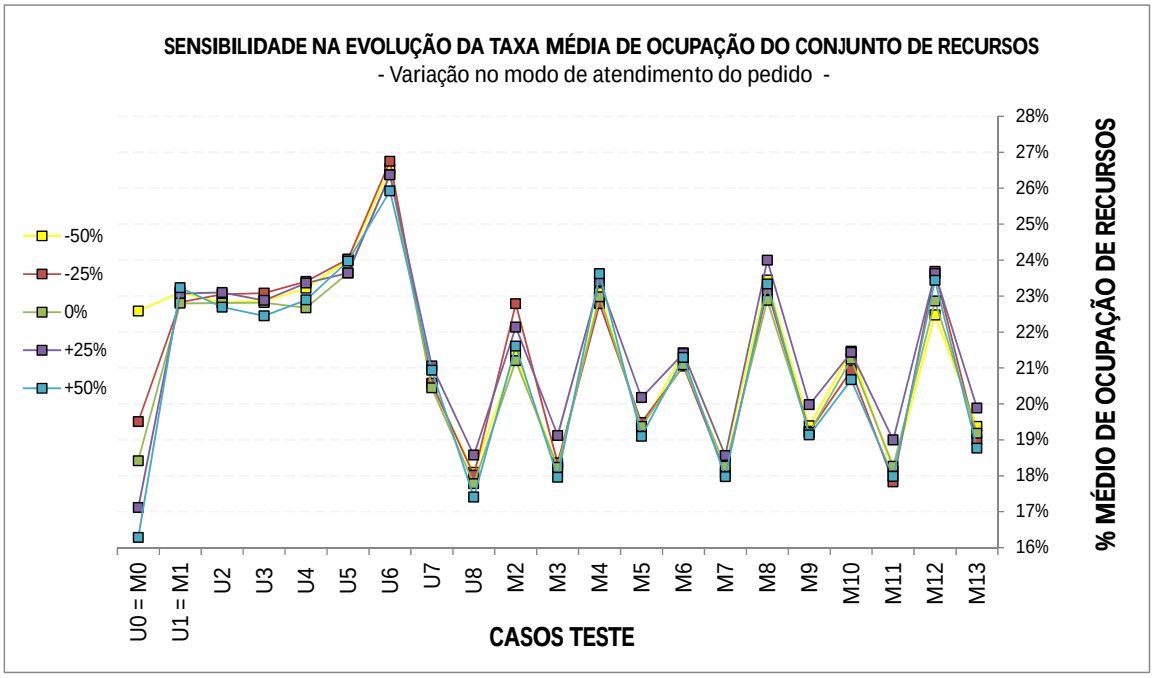


Gráfico de sensibilidade na evolução da taxa de ocupação do conjunto de recursos da cadeia – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

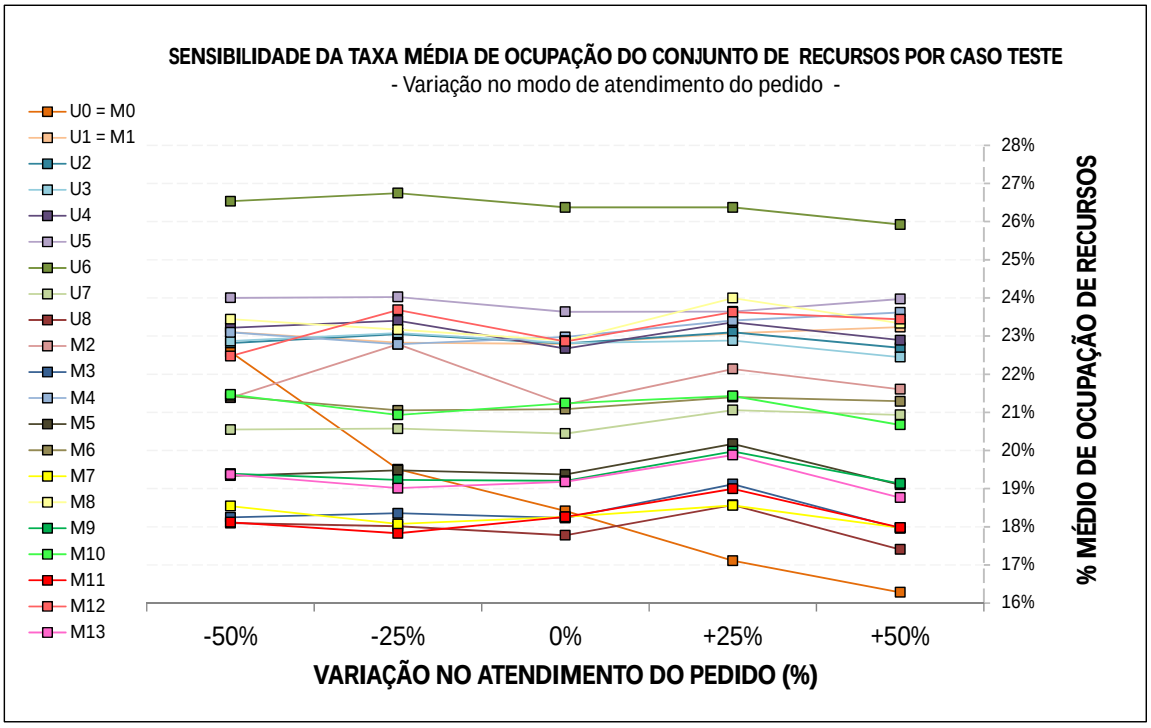


Gráfico de sensibilidade da taxa de ocupação do conjunto de recursos da cadeia por caso teste – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

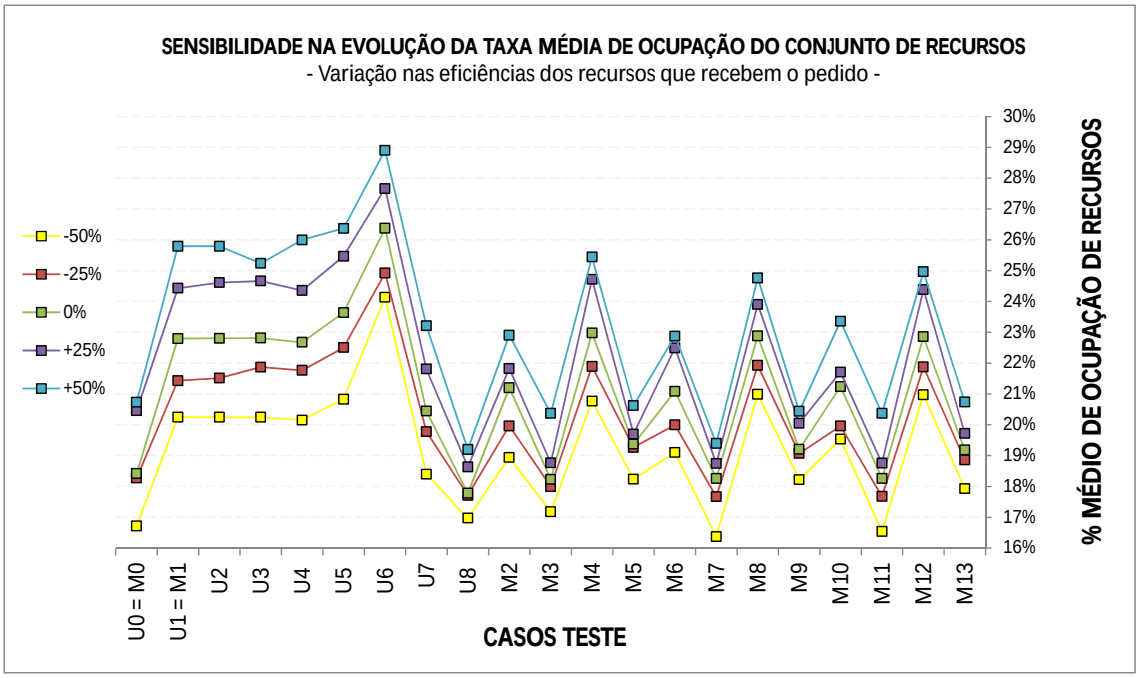


Gráfico de sensibilidade na evolução da taxa de ocupação do conjunto de recursos da cadeia – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

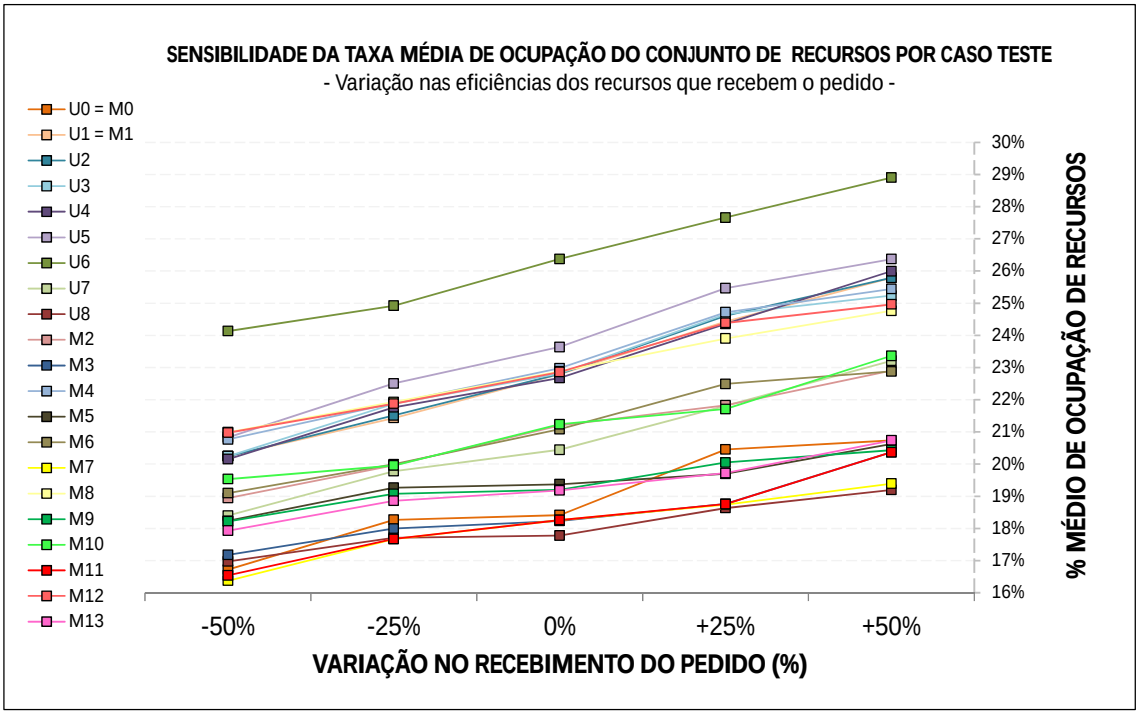


Gráfico de sensibilidade da taxa de ocupação do conjunto de recursos da cadeia por caso teste – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

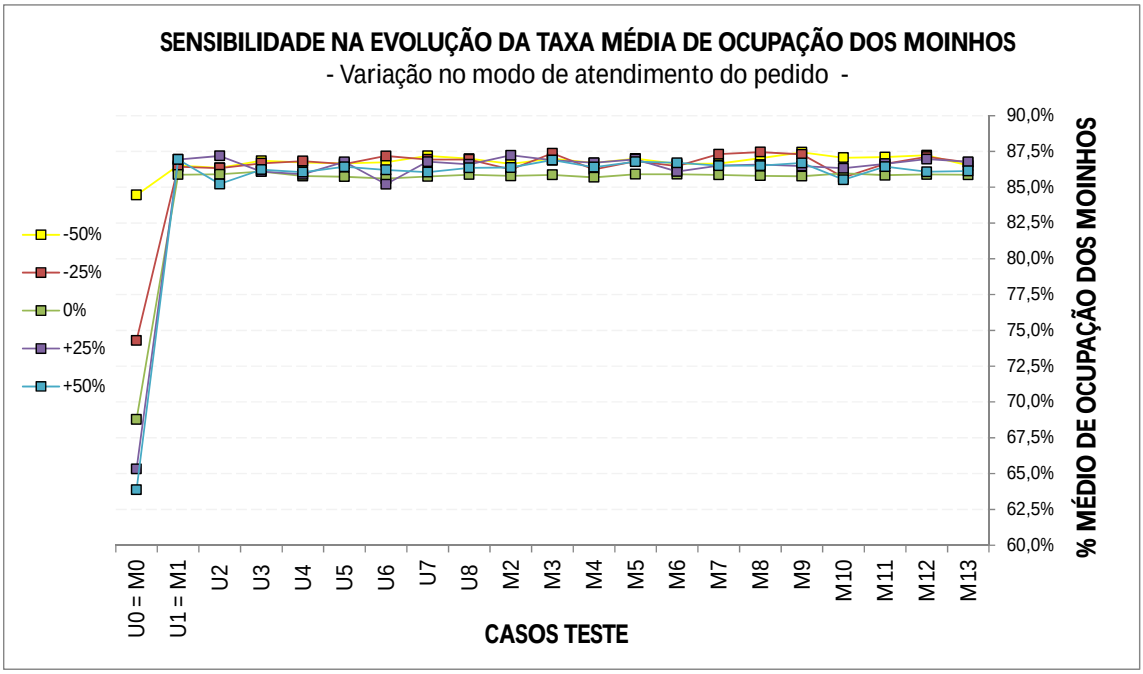


Gráfico de sensibilidade na evolução da taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

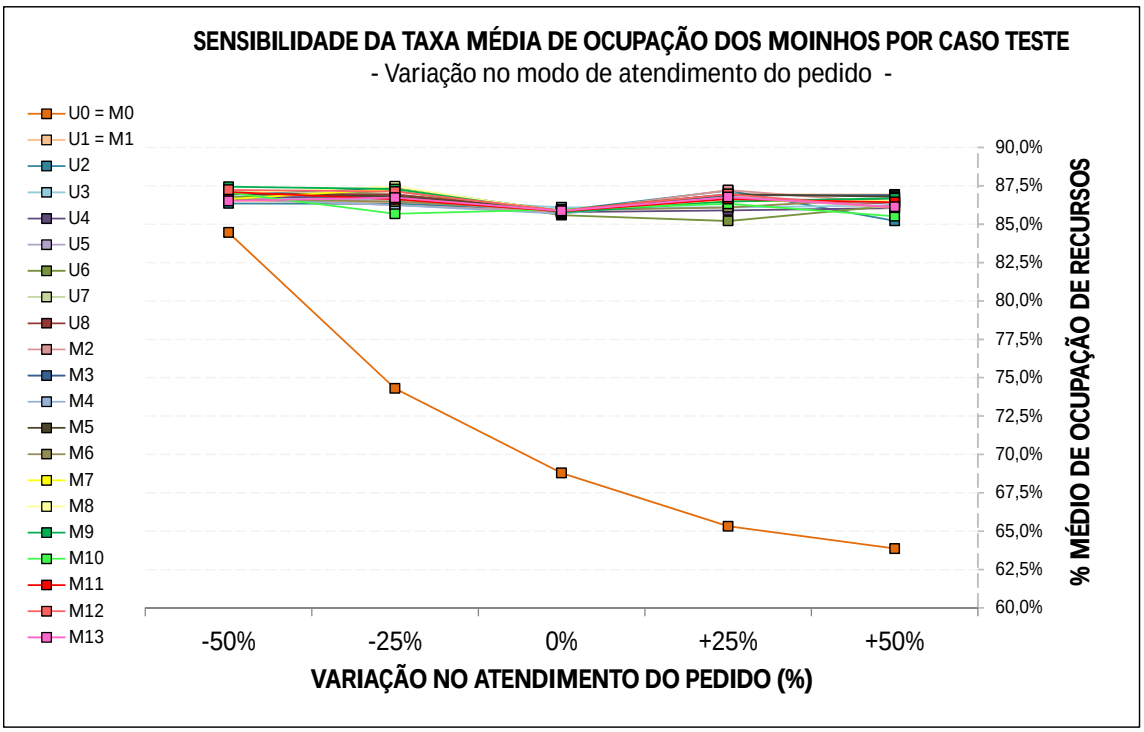


Gráfico de sensibilidade da taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos por caso teste – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

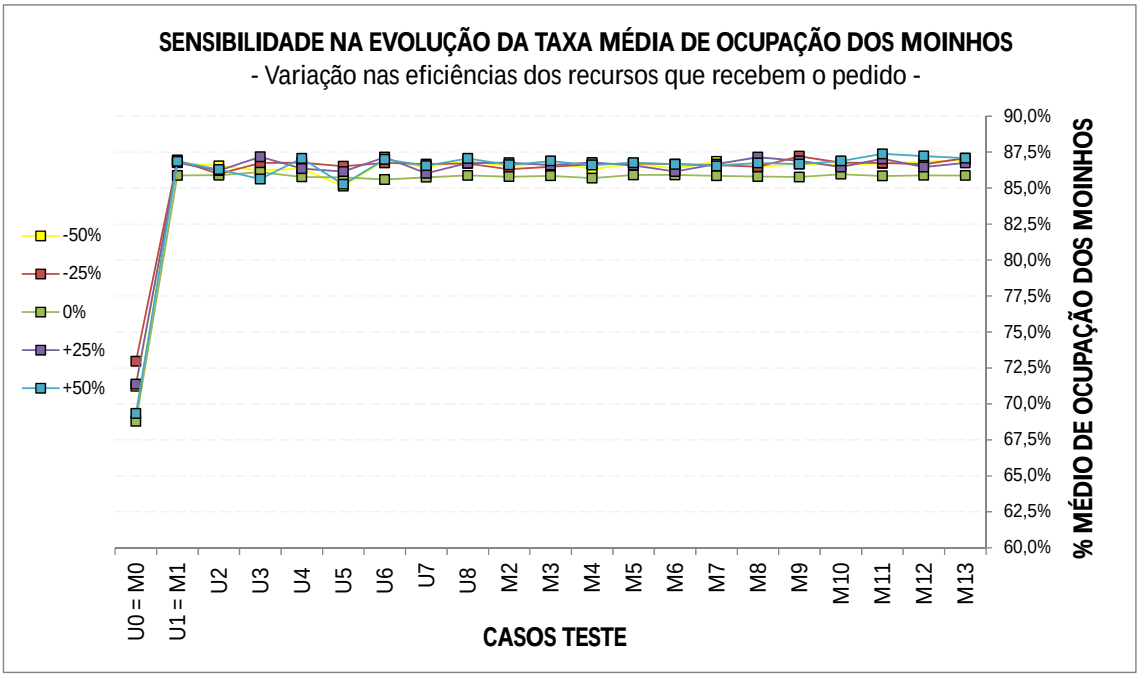


Gráfico de sensibilidade na evolução da taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

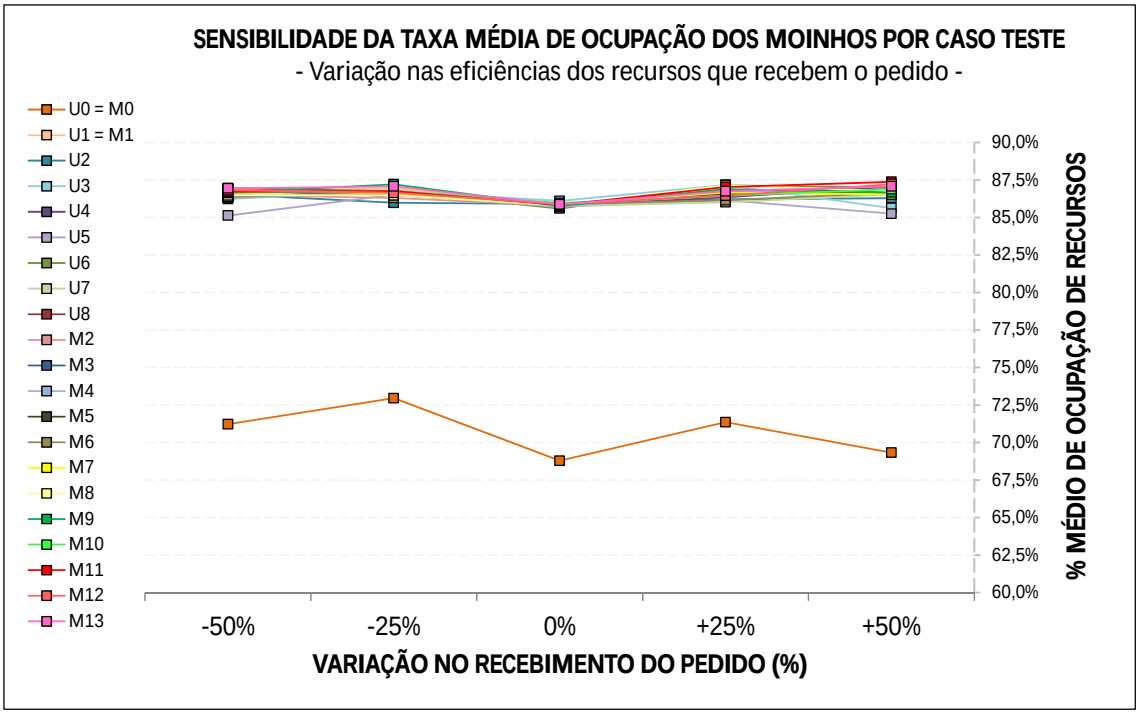


Gráfico de sensibilidade da taxa média de ocupação do recurso Unidade de moinhos por caso teste – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

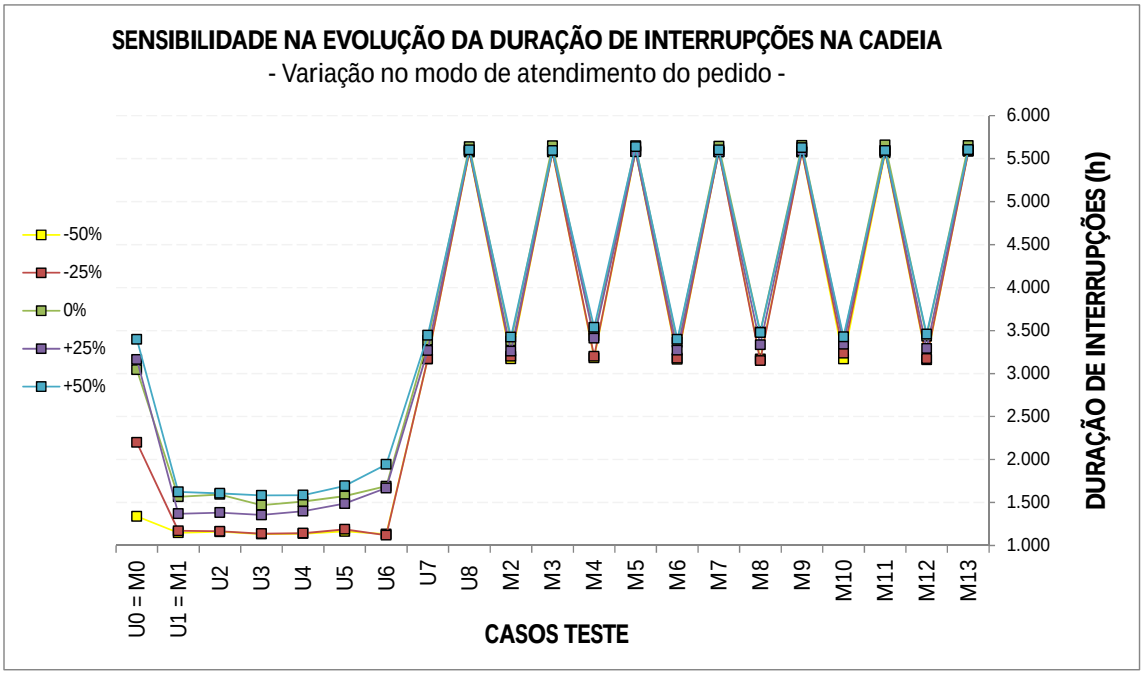


Gráfico de sensibilidade na evolução da duração de interrupções na cadeia – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

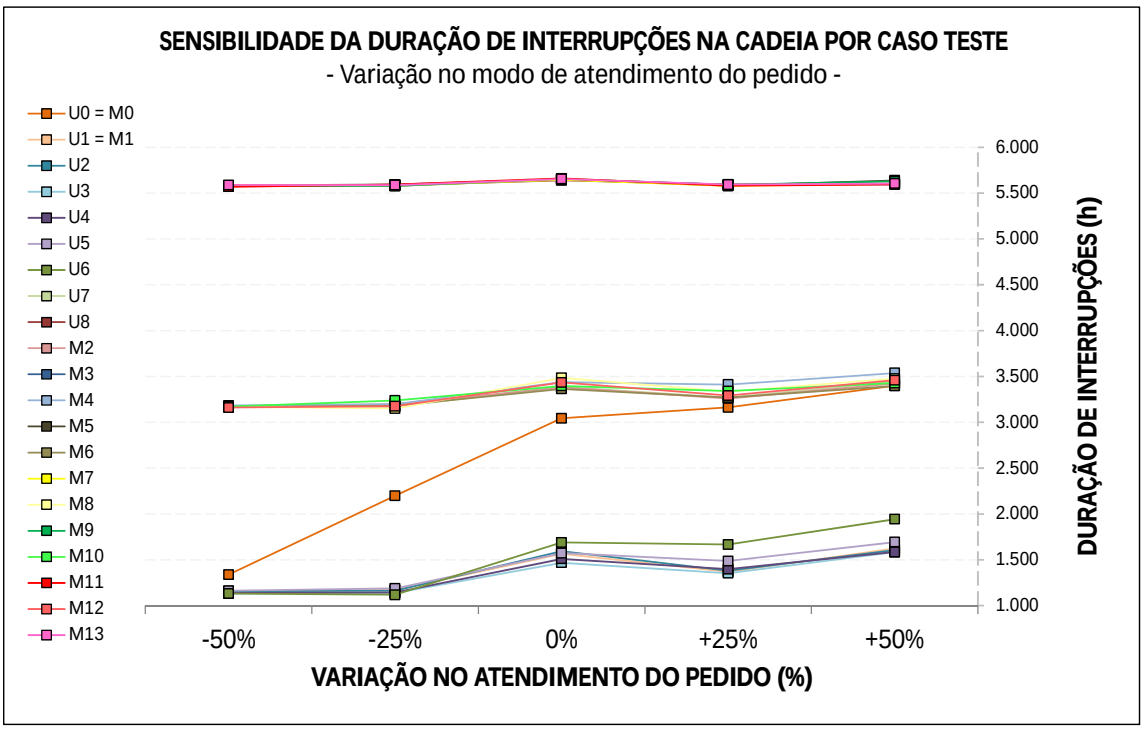


Gráfico de sensibilidade da duração de interrupções na cadeia por caso teste – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

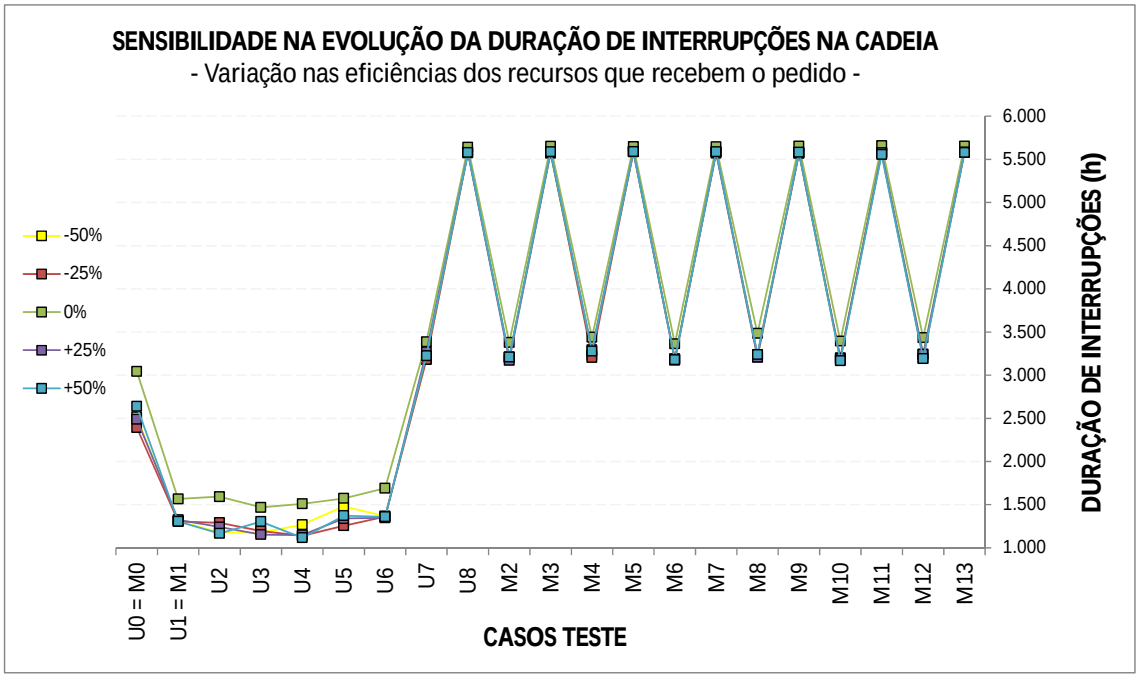


Gráfico de sensibilidade na evolução da duração de interrupções na cadeia – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

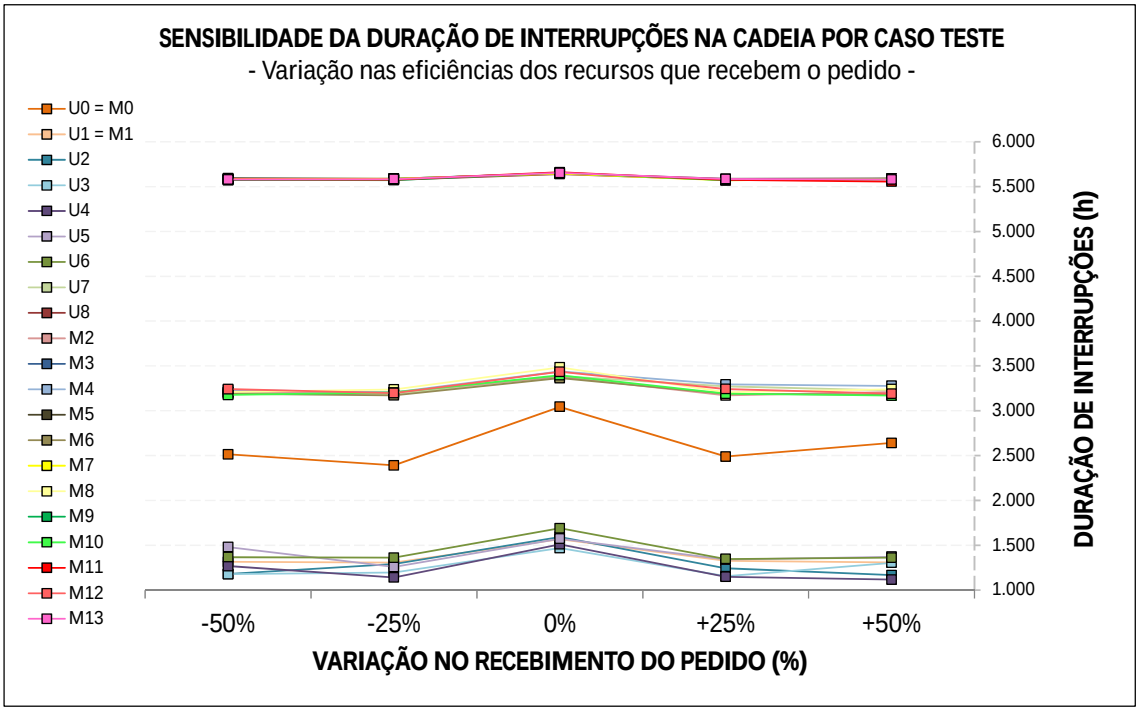


Gráfico de sensibilidade da duração de interrupções na cadeia por caso teste – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

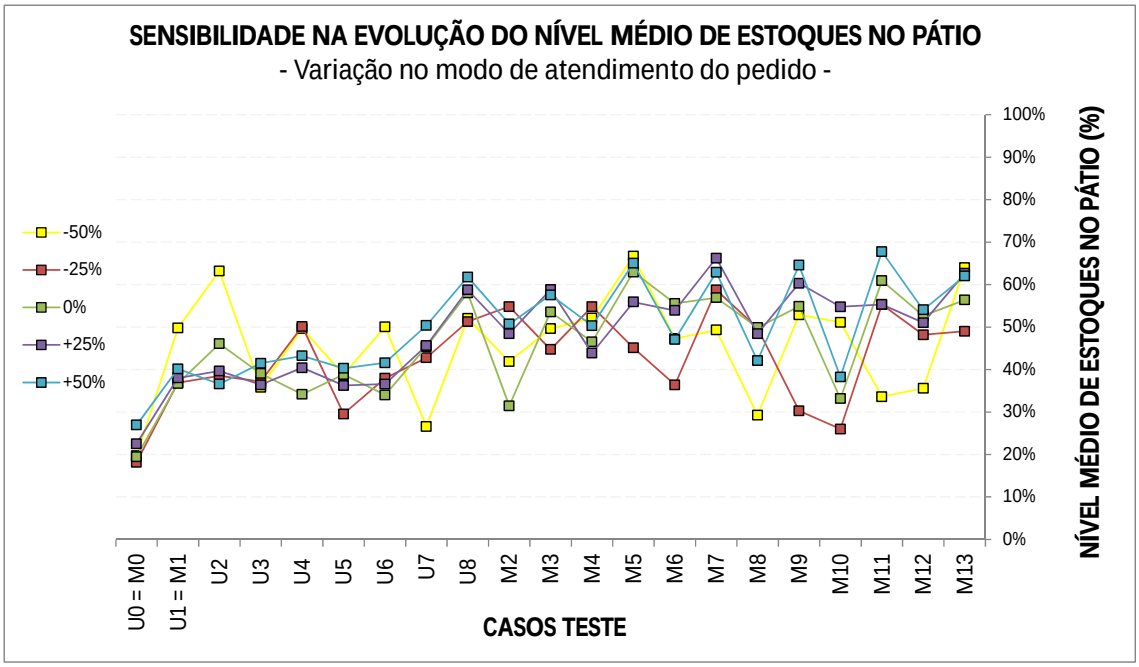


Gráfico de sensibilidade na evolução do nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

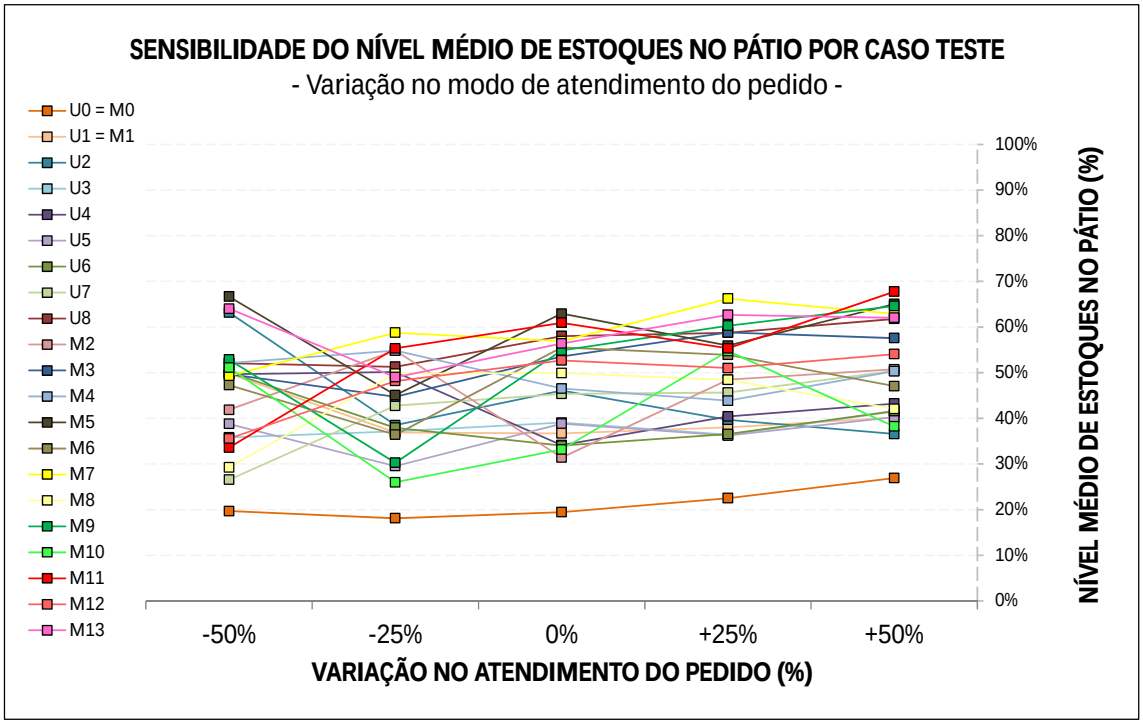


Gráfico de sensibilidade do nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto por caso teste – variação no modo de atendimento do pedido

Fonte: o autor

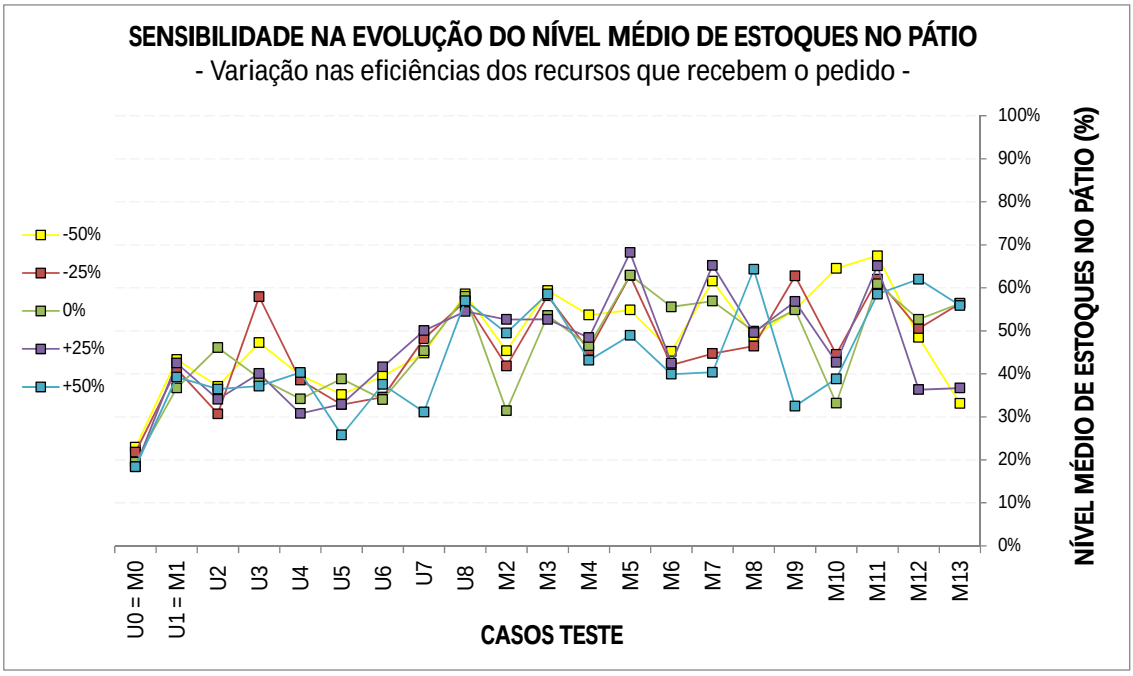


Figura 87. Gráfico de sensibilidade na evolução do nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor

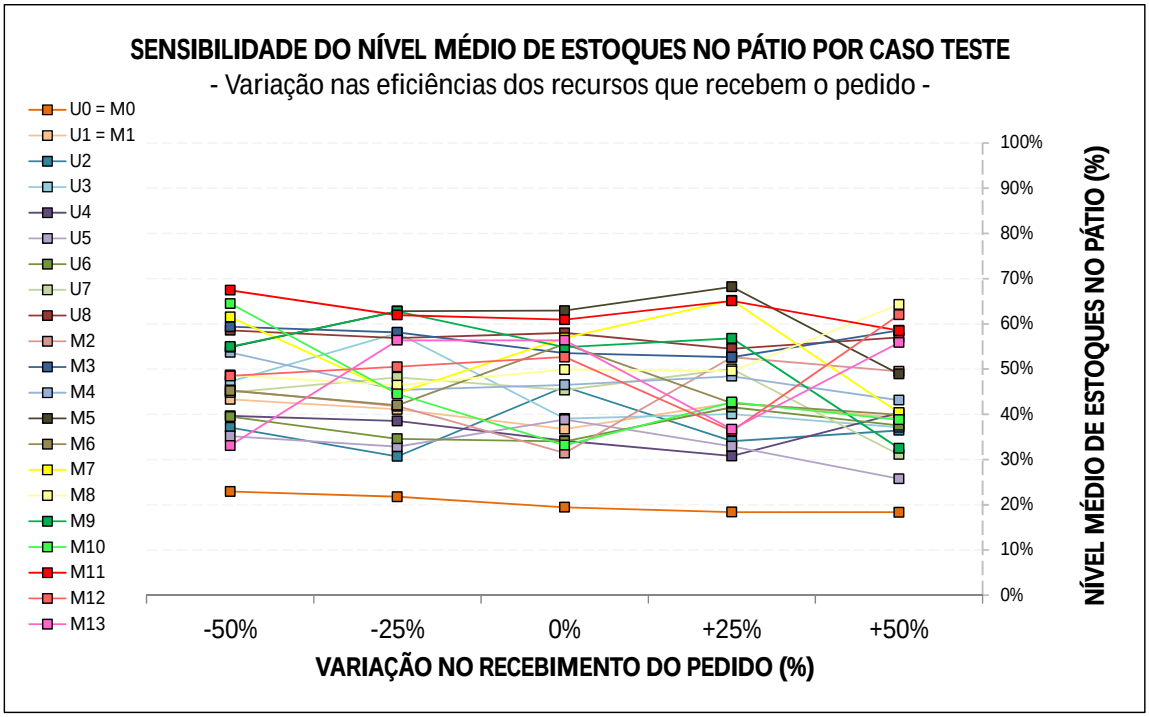


Figura 88. Gráfico de sensibilidade do nível médio de estoques no Pátio de insumo bruto por caso teste – variação nas eficiências dos recursos que recebem o pedido

Fonte: o autor