UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

LAHERCE RIBEIRO DE CASTRO NETO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO MINÉRIO DE FERRO

São Paulo
2006

LAHERCE RIBEIRO DE CASTRO NETO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DO MINÉRIO DE FERRO

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

Área de Concentração: Sistemas Logísticos

Orientador: Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

São Paulo, 29 de setembro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Castro Neto, Laherce Ribeiro

**Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro / L.R. Castro Neto. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006.
191 p.**

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

1.Produção em cadeia (Simulação; Modelagem) 2.Minerais metálicos ferrosos 3.Simulação de sistemas 4.Planejamento da produção 5.Administração da produção I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes. Sistemas Logísticos II.t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Laherce Ribeiro de Castro Neto

Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro

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

Área de Concentração: Sistemas Logísti-
cos

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura _____

DEDICATÓRIA

A Gisela, minha esposa e a Gabriel, meu filho, com amor, admiração e gratidão pela compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

Aos meus pais e irmãs, pelas palavras de incentivo e pelas preces.

A avó Carmem (*in memoriam*), com amor, admiração e gratidão por ter sido permanente fonte de inspiração e perseverança.

A Deus, ser supremo acima de todas as coisas.

AGRADECIMENTOS

À Samarco Mineração S.A., por disponibilizar todos os recursos para que eu pudesse realizar este trabalho.

Em especial, a Alexandre Juliá e a Vinícius Teixeira Andrade, pela indispensável colaboração no decorrer deste estudo.

A Eduardo Pessotti, pela confiança, incentivo e patrocínio recebidos.

Aos colegas da Gerência Geral de Planejamento e Gestão, pela colaboração e compreensão da ausência física necessária ao desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Rui Carlos Botter, pela atenção e apoio durante todo o processo de elaboração desta dissertação.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

RESUMO

O sistema produtivo da mineração de ferro é caracterizada por um ciclo de produção longo com processo integrado em série e contínuo, desde a mina até a distribuição. Este último estágio é realizado, em grande parte, por meio do modal aquaviário. Nesse sistema dinâmico e complexo em que as operações portuárias e os processos produtivos são aleatórios, problemas logísticos podem ser identificados, acarretando custos de espera por sobreestadias de navios nos portos, traduzidos em multas, custos de manuseio e manutenção de estoques e custo de vendas perdidas pelo não-atendimento do planejamento de vendas, entre outros. Pela possibilidade da realização de experiências, da observação, da aprendizagem e da avaliação do comportamento do sistema mediante a mudança de estado das variáveis de decisão, tais como, programação da produção e nível de estoque de segurança, bem como a mudança da forma de operação, a construção de um modelo para simulação da operação desse sistema pode ser de grande utilidade na busca das possíveis soluções para maior eficiência do mesmo. O objetivo principal deste trabalho foi construir um modelo de simulação do sistema produtiva do minério de ferro que comercializa produtos acabados no mercado transoceânico e estudar o comportamento desse sistema perante mudança de estado das variáveis representadas pela seqüência de programação da produção, pelo nível de estoque de segurança no sistema e pela mudança na forma de operação. O comportamento do sistema foi avaliado por meio da análise da medida de rendimento global, definida pelo somatório dos custos de manutenção de estoques, de vendas perdidas e de multas por sobreestadia dos navios no porto no horizonte de um ano. O modelo utiliza a técnica de simulação discreta em que foi construída uma lógica para discretizar o processo produtivo, tornando possível simular o sistema contínuo sem perder a integridade dos resultados. O estudo possibilitou avaliar o “trade-off” existente entre o custo de vendas perdidas, o custo de “demurrage” e o custo de manutenção de estoques, e identificou, dentre os cenários estudados, a forma de operação para o sistema produtiva do minério de ferro que resultou no menor custo.

Palavras-chave: Sistema produtivo. Minério de ferro. Simulação.

ABSTRACT

The iron mining production system is characterized by a long production cycle with in series and continuous integrated processes, from the mine to the distribution. This last stage is largely accomplished by nautical modal. In this dynamic and complex system, which the port operations and the productive processes are aleatory, logistic problems can be identified, generating waiting expenses resulting from the ship's overstay in the harbors, turned into fines, handling and maintenance costs and lost sales due to the sales planning non-assistance, among others. The construction of a model for operation simulation of this system can be very helpful to find possible solutions for increasing the system's efficiency. It will create the possibility of accomplishing experiments, observing, learning, and evaluating its behavior, through changing the status of the decision variables, such as production schedule and safety stock level, as well as changing the operation form. The main goal of this work was to build a simulation model of the iron ore productive system, which commercializes end products in the transoceanic market. It also allows studying the behavior of this system to face status changes of the variables represented by the production schedule sequence, safety stock level in the system and change in the operation form. The system's behavior was evaluated through the analysis of the global revenue measure from the system defined by the sum of the stocks maintenance costs, lost sales and overstay fines of ships in the harbor during a whole year. The model uses a discreet simulation technique, which logic was built to detail the productive process, making possible to simulate the continuous system without losing the integrity of the results. The study enabled to evaluate the existing trade-off between the lost sales, "demurrage" and stocks maintenance cost, and it identified, among the studied scenarios, the operation form for the iron ore productive system that resulted in lower costs.

Key words: Productive System. Iron ore. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma típico de tratamento de minério	35
Figura 2 – Processo produtivo da mineração de ferro e sua variação	39
Figura 3 – Trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC).	41
Figura 4 – Variação do custo do navio no porto com o aumento do volume de tráfego.....	45
Figura 5 – Mapa com a localização das unidades.....	51
Figura 6 – Países de atuação da Samarco Mineração S.A.....	52
Figura 7 – Processo produtivo da Samarco Mineração S.A.....	58
Figura 8 – Foto do sistema de abastecimento de correias	59
Figura 9 – Foto da estação de beneficiamento da Samarco	59
Figura 10 – Foto do início do mineroduto da Samarco na Unidade de Germano em MG	60
Figura 11 e 12 – Foto dos discos de pelotamento e das usinas de pelotização da Samarco	62
Figura 13 – Processo de estocagem e embarque dos produtos acabados da Samarco	63
Figura 14 – Foto da “Stacker Reclaimer”	64
Figura 15 – Foto do sistema de carregamento de navios	66
Figura 16 – Foto do terminal marítimo de Ponta Ubu – ES.....	71
Figura 17 – Trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC).	82
Figura 18 – Trajetória de um sistema dinâmico de eventos discretos (SDED).	83
Figura 19 – Exemplo de um sistema contínuo discretizado.	83
Figura 20 – Passos num estudo de simulação.....	90
Figura 21 – Ilustração do comportamento de variáveis e atributos em um modelo de simulação.	93
Figura 22 – Maneiras de estudar um sistema	107

Figura 23 – Instantes do processo de carregamento	114
Figura 24 – Lógica da usina de concentração.....	116
Figura 25 – Lógica do mineroduto.....	117
Figura 26 – Lógica da filtragem	118
Figura 27 – Lógica da pelotização.....	119
Figura 28 – Lógica de recuperação do pellet feed do pátio para o processo	120
Figura 29 – Lógica de paradas programadas dos processos.....	121
Figura 30 – Lógica de leitura e introdução da programação de produção no modelo de simulação	124
Figura 31 – Lógica de registro dos resultados do sistema portuário em planilha Excel.....	130
Figura 32 – Lógica de registro dos resultados do sistema produtivo em planilha Excel.....	130
Figura 33 – Diferença entre as médias acumuladas dos tempos para 100 replicações.....	134
Figura 34 – Lógica de cálculo do instante de início da contagem de tempo de carregamento realizado	143
Figura 35 – Custo de manutenção de estoques em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança.....	148
Figura 36 – Custo de vendas perdidas em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança	149
Figura 37 – Custo de sobreestadia (“demurrage”) em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança.....	151
Figura 38 – Medida de rendimento global do sistema em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança.....	152
Figura 39 – Medida de rendimento global do sistema em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança com redução de 90% no valor do custo de estocagem	155
Figura 40 – Medida de rendimento global do sistema em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança com redução de 70% no valor do custo de vendas perdidas e demurrage e 30% de aumento do custo de estocagem	156
Figura 41 – Medida de rendimento global do sistema dos cenários 17, III, IV e V	157

Figura 42 – Taxa de ocupação do terminal portuário dos cenários 17, III, IV e V	158
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabelas do capítulo 1

Tabela 1.1 – Importação total de minério de ferro no mundo de 1999 a 2014 (em milhões de toneladas).....	15
Tabela 1.2 – Exportação total de minério de ferro no mundo de 1999 a 2014 (em milhões de toneladas).....	16
Tabela 1.3 – Comparativo entre produção, exportação e mercado transoceânico de minério de ferro (em milhões de toneladas).	17
Tabela 1.4 – Distribuição do mercado transoceânico de minério de ferro entre 1999 e 2014 (em milhões de toneladas).....	18
Tabela 1.5 – Produção de minério de ferro por companhia (em milhões de toneladas)	18

Tabelas do capítulo 3

Tabela 3.1 – Benefícios da simulação mais citados	87
---	----

Tabelas do capítulo 5

Tabela 5.1 – Distribuições dos tempos dos navios no sistema portuário	127
Tabela 5.2 – Distribuições utilizadas para representar o sistema produtivo.....	129
Tabela 5.3 – Consolidação dos resultados das 30 replicações do sistema produtivo no cenário de validação do modelo.....	131
Tabela 5.4 – Comparativo entre o resultado do modelo de simulação e o resultado real no ano de 2005 do terminal portuário da Samarco Mineração S.A.	137
Tabela 5.5 – Comparativo entre o resultado do modelo de simulação e o resultado real no ano de 2005 do processo produtivo da Samarco Mineração S.A.	137
Tabela 5.6 – Níveis de estoque de segurança simulado nos cenários.....	146
Tabela 5.7 – Planejamento das rodadas de simulação para experimentos I e II.....	147

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	14
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA E ESCOLHA DO TEMA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
1.4 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E DELINEAMENTO DO TRABALHO	21
2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO DO MINÉRIO DE FERRO	30
2.1 SISTEMA OBJETO DE ESTUDO - INTRODUÇÃO AO PROCESSO PRODUTIVO DO MINÉRIO DE FERRO	33
2.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA OBJETO DA PESQUISA.....	36
2.2.1 Incertezas Inerentes ao Processo de Fabricação do Minério	37
2.2.2 Custos no Processo Produtivo do Minério de Ferro	42
2.2.3 Síntese do Problema	46
2.2.4 Variáveis de Decisão que Interferem no Problema.....	47
2.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO PARA CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	50
2.3.1 A Empresa	51
2.3.2 Mercado	52
2.3.3 Fornecedores	55
2.3.4 Produtos	57
2.3.5 Instalações e Processos Produtivos.....	57
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	72
3.1 BREVE HISTÓRICO DA PESQUISA OPERACIONAL (PO)	72

3.2	APLICAÇÃO DE MODELAGEM EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS E NA MINERAÇÃO	74
3.3	TÉCNICAS UTILIZADAS PELOS AUTORES REVISADOS PARA A MODELAGEM DA CADEIA DE SUPRIMENTOS	78
3.4	REVISÃO SOBRE TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO	79
3.4.1	Conceitos de Simulação Computacional.....	80
3.4.2	Vantagens e Desvantagens da Simulação.....	85
3.4.3	Método de Condução de Simulação Computacional.....	89
3.4.4	Principais Elementos de um Modelo de Simulação.....	92
3.4.5	O Software ARENA	96
3.5	APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS	97
3.5.1	Aplicações da Simulação na Mineração	98
3.6	CONCLUSÃO PARA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	106
4	MODELAGEM POR SIMULAÇÃO – DESCRIÇÃO DO MODELO DO SISTEMA PRODUTIVO DO MINÉRIO DE FERRO.....	109
4.1	TRATAMENTO DA CHEGADA DOS NAVIOS	110
4.2	PROCESSO DE CHEGADA DOS NAVIOS AO TERMINAL PORTUÁRIO, ESCOLHA POR BERÇOS E ATRACAÇÃO	111
4.3	PROCESSO DE CARREGAMENTO	113
4.4	PROCESSO DE DESATRACAÇÃO	115
4.5	PROCESSO OPERACIONAIS	115
4.5.1	Processo Concentração	116
4.5.2	Processo de Bombeamento por Mineroduto.....	116
4.5.3	Processo Filtragem.....	117
4.5.4	Processo Pelotização	118
4.5.5	Recuperação de “Pellet Feed” do Pátio de Estocagem para o Processo Produtivo	120
4.5.6	Paradas Programadas dos Processos Produtivos	120
4.5.7	Programação da Produção	121

5 APLICAÇÃO DA MODELAGEM.....	125
5.1 DADOS DE ENTRADA DO MODELO: OBTENÇÃO E UTILIZAÇÃO.....	125
5.1.1 Análise dos Dados do Sistema Portuário	125
5.1.2 Análise dos Dados do Sistema Produtivo	128
5.2 EXTRAÇÃO DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DOS RELATÓRIOS DE RESULTADOS	129
5.3 RESULTADOS A SEREM OBTIDOS PELO MODELO	131
5.4 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO.....	133
5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS DO ANO DE 2005	135
5.6 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA MEDIDA DE RENDIMENTO GLOBAL PARA ESTUDO DOS CENÁRIOS	139
5.6.1 Custo de Manutenção de Estoque	140
5.6.2 Custo das Vendas Perdidas.....	140
5.6.3 Custo das Multas por Sobreestadia dos Navios	141
5.7 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS	143
5.7.1 Experimentos I e II	145
5.7.2 Análise de Sensibilidade para os Experimentos I e II.....	154
5.7.3 Experimentos III, IV e V	156
5.8 CONCLUSÃO PARA O CAPÍTULO.....	158
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	160
REFERÊNCIAS.....	163
ANEXOS	169

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O sistema produtivo da mineração de ferro é caracterizada por um ciclo de produção longo, integrado, em série e contínuo, desde a mina, passando pelo beneficiamento, transporte, aglomeração, quando for o caso, estocagem de produtos acabados e distribuição, que em grande parte é realizada através do modal aquaviário.

Nesse sistema dinâmico e complexo em cujas operações portuárias existe aleatoriedade e em cujos processos produtivos existe variabilidade, problemas logísticos podem ser identificados, no que se refere principalmente a custo de espera por sobreestadias de navios nos portos, traduzido em multas, custo de manuseio e manutenção de estoques e custo de vendas perdidas pelo não-atendimento do planejamento de vendas, entre outros.

A construção de um modelo utilizando a técnica de simulação computacional torna possível a realização de experiências, a observação, a aprendizagem e a avaliação do comportamento do sistema mediante a mudança de estado das variáveis de decisão, tais como, programação da produção e nível de estoque de segurança no sistema, bem como a mudança da forma de operação, permitindo assim encontrar soluções efetivas na busca da minimização dos custos resultantes da operação desse sistema.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA E ESCOLHA DO TEMA

“The Annual Outlook for Iron” Ore - TAOPIO (2004) disponibiliza, nas Tabelas 1.1 e 1.2 a perspectiva de importação e exportação de minério de ferro para o período de 1999 a 2014.

Tabela 1.2 – Exportação total de minério de ferro no mundo de 1999 a 2014 (em milhões de toneladas)

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2014	Average Annual Growth 1999-2014
Austria	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Belgium	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Finland	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
France	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Germany	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Italy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Netherlands	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Norway	0.54	0.60	0.60	0.46	0.59	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	2.2%
Portugal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Spain	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Sweden	13.88	15.92	13.58	14.31	16.22	16.75	17.08	17.32	18.72	19.62	20.62	2.7%
UK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Eastern Europe	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
CIS	23.21	27.93	32.23	29.09	26.68	32.65	32.28	30.93	31.04	30.82	30.95	1.9%
Canada	28.60	28.37	22.32	26.36	28.03	24.80	27.00	27.60	28.20	28.85	29.35	0.2%
Mexico	0.00	0.13	0.51	0.31	0.62	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10	0.10	0.0%
USA	6.12	5.87	5.51	6.61	6.67	8.67	9.23	8.79	8.94	8.94	9.43	2.9%
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Argentina	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Brazil	139.87	160.19	157.71	171.44	183.84	199.45	219.40	235.75	253.01	267.66	331.38	5.9%
Chile	6.00	6.10	5.97	6.01	5.81	5.64	5.64	5.64	6.14	6.64	9.64	3.2%
Colombia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Peru	3.63	3.47	4.13	4.36	5.08	5.39	5.27	5.35	5.35	5.35	5.53	2.9%
Venezuela	6.61	6.88	6.86	6.68	7.67	7.67	7.13	7.73	7.63	7.63	8.03	1.3%
Other	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Mauritania	11.04	11.07	10.09	10.46	9.63	10.50	10.40	10.92	11.44	11.44	11.50	0.3%
South Africa	20.92	21.35	23.54	25.21	25.28	26.72	27.87	29.12	31.28	33.44	66.24	8.0%
Other Africa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
China	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
India	30.76	32.56	36.98	40.67	50.87	72.90	69.93	62.28	64.45	70.49	85.47	7.0%
Indonesia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Japan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Malaysia	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
South Korea	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Taiwan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Turkey	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0%
Middle East	2.80	3.81	3.14	3.17	4.03	4.09	4.09	4.09	4.09	4.09	7.09	6.4%
Other Asia	3.54	4.31	3.72	3.60	4.37	4.37	4.29	4.16	4.16	4.00	4.00	0.8%
Australia	146.29	164.55	167.39	176.25	195.53	214.31	240.37	261.46	277.68	294.24	351.24	6.0%
New Zealand	0.91	0.65	0.78	0.91	0.52	0.65	0.64	0.62	0.62	0.59	0.59	-2.8%
Total	444.73	493.75	495.07	525.89	571.44	635.81	681.86	712.60	753.78	794.84	971.90	5.4%
of which:												
Western Europe	14.42	16.52	14.18	14.77	16.81	17.50	17.83	18.07	19.47	20.37	21.37	2.7%
Eastern Europe & CIS	23.21	27.93	32.23	29.09	26.68	32.65	32.28	30.93	31.04	30.82	30.95	1.9%
North America	34.72	34.37	28.33	33.27	35.33	33.97	36.72	36.49	37.23	37.88	38.88	0.8%
South America	156.11	176.65	174.68	188.50	202.40	218.15	237.44	254.47	272.32	287.47	354.58	5.6%
Africa	31.96	32.42	33.64	35.67	34.91	37.22	38.27	40.04	42.72	44.88	77.73	6.1%
Asia	37.11	40.67	43.84	47.44	59.27	81.36	78.30	70.52	72.71	76.58	96.56	6.6%
Oceania	147.20	165.20	168.17	177.16	196.05	214.96	241.01	262.08	278.29	294.63	351.83	6.0%

Na Tabela 1.3 é mostrado o comparativo da quantidade de minério de ferro que é produzido, que é comercializado entre os países (importação e exportação) e o que é comercializado no mercado transoceânico no período previsto de 2001 a 2007.

Tabela 1.3 – Comparativo entre produção, exportação e mercado transoceânico de minério de ferro (em milhões de toneladas).

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Produção Total Global	1044	1114	1207	1343	1440	1524	1600
Exportação Total Global	495,07	525,89	571,44	635,81	681,86	712,6	753,78
Mercado Transoceânico	439,6	474	521,2	585	628	661,2	702,4
Participação do Mercado Transoceânico no Total Produzido	42%	43%	43%	44%	44%	43%	44%
Participação do Mercado Transoceânico na Exportação	89%	90%	91%	92%	92%	93%	93%

Fonte: TAOFIO (2004) e “Iron Ore Outlook” IOO – (2005).

Observa-se que em torno de 43% da produção total de minério de ferro e aproximadamente 91% das exportações e importações são comercializados no mercado transoceânico.

TAOFIO (2004) informa, na Tabela 1.4, a quantidade de minério de ferro comercializada no mercado transoceânico desde 1999 até 2004 e a expectativa desse mercado até 2014. Analisando-se essas informações, observa-se uma tendência de crescimento na quantidade de minério de ferro comercializada no mercado transoceânico até o ano de 2014 na ordem de 5,5% ao ano.

Essa projeção pode ser traduzida em um aumento do volume global no tráfego que, segundo a “United Nations Conference on Trade and Development” – UNCTAD (1985, p. 29), levará a um aumento no tempo de espera dos navios para atracação nos portos e, conseqüentemente, a um aumento do custo de sobreestadia (“demurrage”¹) na cadeia produtiva do minério do ferro para os próximos anos, caso

¹ Multa determinada em contrato a ser paga pelo contratante de um navio, quando este demora mais do que o acordado nos portos de embarque ou de descarga.

não ocorra aumento da capacidade de embarque e desembarque do minério nos portos.

Esse aumento no mercado levará também a um aumento na produção de minério de ferro nas companhias produtoras, estimativa também observada em TAOFIO (2004) mostrada na Tabela 1.5 a seguir. Em consequência, haverá uma pressão para elevação da produtividade nos processos produtivos de minério de ferro das companhias produtoras.

Tabela 1.4 – Distribuição do mercado transoceânico de minério de ferro entre 1999 e 2014 (em milhões de toneladas)

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2014	Média de Crescimento Anual
Sinter/DR Fines	236,1	255,0	264,6	283,4	307,1	343,7	372,7	396,3	423,2	449,2	553,2	5,8%
Lump	77,4	85,6	86,2	92,0	106,9	123,3	134,6	140,5	148,9	158,1	200,6	6,6%
Pellets	63,4	75,8	64,8	72,3	78,8	85,8	87,2	88,3	92,6	96,1	109,2	3,7%
Pellet Feed	13,1	12,9	16,3	18,3	19,7	22,9	24,0	26,4	27,7	29,0	41,5	8,0%
Granulado	0,9	0,7	0,8	0,9	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	-2,8%
Sinter	3,5	4,3	3,7	3,6	4,4	4,4	4,3	4,2	4,2	4,2	4,0	0,8%
Outros	15,5	20,0	3,3	3,5	3,8	4,3	4,6	4,9	5,3	5,6	6,9	-5,2%
Total	409,9	454,3	439,7	474,0	521,2	585,1	628,0	661,2	702,5	742,8	916,0	5,5%

Fonte: TAOFIO (2004).

Tabela 1.5 – Produção de minério de ferro por companhia (em milhões de toneladas)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
CVRD	143	166	196	218	237	258	282
Rio Tinto	116	118	134	139	154	165	180
BHP Billiton	78	82	91	102	113	122	128
Caemi *	36	36					
Cleveland Cliffs	26	28	31	35	45	48	47
Kumba	28	29	30	30	30	33	35
LKAB	19	20	22	22	23	23	24
Total Maiores Produtores	446	479	504	546	602	649	696
Outros	598	635	703	797	838	875	904
Total Global	1044	1114	1207	1343	1440	1524	1600

*Caemi controlada pela CVRD a partir de 2003.

Fonte: IOO (2005)

Reduzir os custos envolvidos nesse sistema é um desafio para as companhias que produzem e comercializam o minério de ferro através do mercado transoceânico.

Como será visto no capítulo 2, o sistema produtivo do minério de ferro cujos produtos são comercializados no mercado transoceânico apresenta características que proporcionam um nível elevado de incerteza e complexidade ao sistema, o que caracteriza o processo de natureza estocástica.

Dessa forma, é necessário que os tempos do processo do porto, como, por exemplo, atracação, desatracação, suspensão do processo devido a problemas relacionados ao navio e a problemas relacionados ao sistema de estocagem e embarque, como também a quantidades produzidas diariamente no processo produtivo e a taxa de carregamento, sejam todos tratados como variáveis aleatórias e não como valores determinísticos.

Ter em mão um modelo de simulação que permita estudar o comportamento geral do sistema, considerando sua natureza estocástica, e permita realizar testes de hipóteses para a busca de melhores decisões que não reflitam em custos extremamente dispendiosos é uma oportunidade de grande potencial na busca das soluções para redução de custo de manutenção de estoques, de custo de vendas perdidas, de custo de vendas futuras perdidas e de custo de multas por sobreestadia no sistema produtivo do minério de ferro.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é dividido em duas partes:

- a) construir um modelo de simulação do sistema produtivo do minério de ferro que comercializa produtos acabados no mercado transoceânico; e

- b) estudar o comportamento desse sistema perante mudança de estado das variáveis representadas pela seqüência de programação da produção, pelo nível de estoque de segurança no sistema, e pela mudança na forma de operação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo de simulação que represente o sistema produtivo do minério de ferro que utiliza o modal aquaviário para distribuição de seus produtos.
- Avaliar a aplicabilidade de um sistema de simulação a eventos discretos para simular o processo contínuo em estudo.
- Comparar cenários alternativos para o processo produtivo e avaliar a viabilidade de novas formas de operação.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este item foi inserido na dissertação por recomendação da banca examinadora devido ao fato de entender que o tema "Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro" é muito abrangente, englobando todo o sistema de mineração desde o conjunto de produtores de minério de ferro, toda interação entre eles, todo o sistema de distribuição, abrangendo também os clientes deste processo.

O estudo aqui proposto delimita-se na modelagem do processo produtivo de um produtor de minério de ferro desde o beneficiamento do minério, transporte, aglomeração, estocagem e embarque deste em um terminal portuário. Como será visto posteriormente no item 2.3, trata-se de um estudo de caso da empresa Samarco Mineração S.A..

Os examinadores também chamaram a atenção com relação à medida de avaliação utilizada para comparação dos cenários estudados denominada de "Medida de Rendimento Global do Sistema" que representou no estudo o somatório dos custos de vendas perdidas, do custo de manutenção de estoques e de multas por sobre estadia dos navios no porto. Como existem outros custos envolvidos neste sistema, e que não foram considerados no estudo, o termo Medida de Rendimento Global do Sistema apresentou-se abrangente segundo os membros da banca. Desta forma ficou mais aderente ao objetivo da pesquisa o termo Medida de Avaliação do Sistema no lugar de Medida de Rendimento Global do Sistema.

Não foi objetivo da pesquisa estudar as especificidades técnicas de cada processo de mineração devido ao problema ser relacionado a problemas logísticos e de estoques. Desta forma os processos operacionais foram modelados com foco somente em produção.

1.4 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA E DELINEAMENTO DO TRABALHO

“A elaboração de um projeto de pesquisa e o desenvolvimento da própria pesquisa, seja ela uma dissertação ou tese, necessitam, para que seus resultados sejam satisfatórios, estar baseados em planejamento cuidadoso, reflexões conceituais sólidas e alicerçados em conhecimentos já existentes” (SILVA; MENEZES, 2001, p. 29).

Com base na abordagem acima, buscou-se uma metodologia para orientar o planejamento da pesquisa e a elaboração da dissertação, de forma que os resultados fossem satisfatórios e consistentes.

Silva e Menezes (2001) apresentam uma metodologia para pesquisa e elaboração de dissertação que será utilizada como suporte na construção deste trabalho.

Os autores citam Goldemberg (1999, p. 106) que diz:

[...] que a pesquisa é a construção de conhecimento original de acordo com certas exigências científicas. Para que o estudo seja considerado científico, deve obedecer aos critérios de coerência, consistência, originalidade e objetivação. É desejável que uma pesquisa científica preencha os seguintes requisitos: a) a existência de uma pergunta que se deseja responder; b) a elaboração de um conjunto de passos que permitam chegar à resposta; e c) a indicação do grau de confiabilidade na resposta obtida [...] (Goldemberg, 1999, p.106, apud Silva; Menezes, 2001, p. 22).

Segundo Silva e Menezes (2001), o planejamento de uma pesquisa dependerá basicamente de três fases:

- Fase decisória: referente à escolha do tema, à definição e à delimitação do problema de pesquisa.
- Fase construtiva: referente à construção de um plano de pesquisa e à execução da pesquisa propriamente dita.
- Fase redacional: referente à análise dos dados e informações obtidos na fase construtiva. É a organização das idéias de forma sistematizada, visando à elaboração do relatório final.

Pesquisa científica seria, portanto, a realização concreta de uma investigação planejada e desenvolvida de acordo com as normas consagradas pela metodologia científica, entendida como um conjunto de etapas ordenadamente dispostas que se devem vencer na investigação de um fenômeno. Nessas etapas se incluem a escolha do tema, o planejamento da investigação, o desenvolvimento metodológico, a coleta e a tabulação de dados, a análise dos resultados, a elaboração das conclusões e a divulgação de resultados.

Ainda segundo Silva e Menezes (2001), realizar uma pesquisa com rigor científico pressupõe a escolha de um tema e a definição de um problema para ser investigado, a elaboração de um plano de trabalho e, após a execução operacional desse plano, a construção de um relatório final apresentado de forma planejada, ordenada, lógica e conclusiva.

De acordo com o que foi revisto acima, este trabalho seguiu as seguintes etapas:

- a) escolha do tema;
- b) definição do problema;
- c) revisão de literatura;
- d) apresentação do método de pesquisa;

- e) modelagem conceitual e construção do modelo computacional;
- f) planejamento da investigação
- g) análise dos resultados e elaboração das conclusões;
- h) recomendações finais

a) Escolha do Tema

Na escolha do tema, Silva e Menezes (2001) sugerem que se proponha a pergunta: “O que se pretende abordar?” O tema é um aspecto ou uma área de interesse de um assunto que se deseja provar ou desenvolver. Escolher um tema significa eleger uma parcela delimitada de um assunto, estabelecendo limites ou restrições para o desenvolvimento da pesquisa pretendida.

Silva e Menezes (2001, p. 30) citam Barros e Lehfeld (1999) que dizem “[...] a definição do tema pode surgir com base na sua observação do cotidiano, na vida profissional, em programas de pesquisa, em contato e relacionamento com especialistas, no feedback de pesquisas já realizadas e em estudo da literatura especializada.”

Para Silva e Menezes (2001), a escolha do tema de uma pesquisa, em um curso de Pós-Graduação, está relacionada à linha de pesquisa à qual o pesquisador está vinculado ou à linha de seu orientador. Deve-se levar em conta, para a escolha do tema, sua atualidade e relevância, o conhecimento a respeito, a preferência e a aptidão pessoal para lidar com o tema escolhido.

A escolha do tema deste trabalho está relacionada à linha de pesquisa 1, “Modelagem, Projetos e Análise de Sistemas Logísticos” do Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, linha que abrange o desenvolvimento e o uso de métodos quantitativos para projeto, geração e análise econômico-operacional de sistemas logístico. Está relacionado também ao projeto 1.4 “Simulação de Sistemas Logísticos”, que abrange o desenvolvimento de modelos de simulação estocástica e determinística para análise, dimensionamento e operação de sistemas logísticos. São orientadores deste trabalho o professor Dr. Rui Carlos Botter e o professor Dr. Miguel Cezar Santoro.

O tema proposto para a pesquisa, Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro, está abordado no subitem 1.1 do capítulo 1 deste trabalho, “Motivação e Justificativa da Pesquisa e Escolha do Tema”, em que se apresenta a geração de custos na operação do sistema produtivo como um problema a ser enfrentado pelas empresas que comercializam o minério de ferro no mercado transoceânico e mostra que um modelo para simulação da operação desse sistema pode ser de grande utilidade na busca das possíveis soluções para o problema.

b) Definição do Problema

Para Silva e Menezes (2001), na literatura da área de metodologia científica, podem-se encontrar muitas recomendações a respeito da formulação do problema de pesquisa. Os autores citam Gil (1999) que considera que as recomendações não devem ser rígidas e devem ser observadas como parâmetros para facilitar a formulação de problemas. Algumas dessas recomendações estão descritas abaixo:

- problema deve ser formulado como pergunta, para facilitar a identificação do que se deseja pesquisar;
- problema tem que ter dimensão viável: deve ser restrito para permitir a sua viabilidade, uma vez que se for formulado de forma ampla, poderá tornar inviável a realização da pesquisa;
- problema deve ter clareza: os termos adotados devem ser definidos para esclarecer os significados com que estão sendo usados na pesquisa;
- problema deve ser preciso: além de definir os termos é necessário que sua aplicação esteja delimitada.

No capítulo 2, “Caracterização do Sistema Produtiva do Minério de Ferro”, deste trabalho, será apresentada toda a caracterização do problema de pesquisa, contendo a descrição do sistema objeto de estudo, a identificação do problema de pesquisa e a descrição do sistema usado para construção e validação do modelo computacional.

De forma resumida, a formulação do problema pode ser apresentada pela seguinte indagação: “Como se comportam os custos de manutenção de estoques,

de multa por sobreestadia e de vendas perdidas com a variação do nível de estoque do sistema e com a variação do tamanho mínimo de campanha de produção do processo produtivo, bem como a alteração da forma de operação no que se refere à capacidade de carregamento e à configuração dos berços de atracação no terminal portuário?”.

c) Revisão de Literatura

Silva e Menezes (2001, p. 30) fazem valiosas considerações a respeito da revisão bibliográfica:

Nesta fase deve-se responder às seguintes questões: quem já escreveu e o que já foi publicado sobre o assunto, que aspectos já foram abordados, quais as lacunas existentes na literatura. Pode objetivar determinar o “estado da arte”, ser uma revisão teórica, ser uma revisão empírica ou ainda ser uma revisão histórica.

A revisão de literatura é fundamental, porque fornecerá elementos para se evitar a duplicação de pesquisas sobre o mesmo enfoque do tema. Favorecerá a definição de contornos mais precisos do problema a ser estudado.

Sendo uma das etapas mais importantes de um projeto de pesquisa a revisão de literatura refere-se à fundamentação teórica que será adotada para tratar o tema e o problema de pesquisa. Por meio da análise da literatura publicada será traçado um quadro teórico e será feita a estruturação conceitual que dará sustentação ao desenvolvimento da pesquisa.

A revisão de literatura resultará do processo de levantamento e análise do que já foi publicado sobre o tema e sobre o problema de pesquisa escolhidos. Permitirá um mapeamento do que já foi escrito sobre o tema e/ou problema da pesquisa e de quem o escreveu.

A revisão de literatura deverá elucidar o tema, proporcionar melhor definição do problema de pesquisa, servir de sustentação ao processo de formulação das hipóteses e contribuir na análise e discussão dos resultados.

A revisão de literatura será apresentada no capítulo 3 “Revisão Bibliográfica”. Consistiu de consultas a artigos, periódicos, anais, livros, páginas especializadas da internet e outros trabalhos de pós-graduação, por meio das quais foi possível fazer um levantamento das aplicações de modelagem em cadeias de suprimentos, das técnicas utilizadas pelos autores para modelagem e das características envolvidas, como também de conceitos e métodos de condução de projetos de simulação.

d) Método de Pesquisa

Segundo Gavira (2003), nos últimos anos, as empresas começaram a enfrentar constantes mudanças no seu modo gerencial. Dentre as principais medidas adotadas por elas para sobressair ante seus concorrentes e obter lucro por um longo período, tem-se a utilização de novas formas de gestão, de novas técnicas de apoio à gestão e, principalmente, a busca pelo aprimoramento de suas operações. Segundo o autor, uma abordagem importante de apoio à análise e ao aprimoramento de operações é a Pesquisa Operacional (PO). O autor ainda argumenta que, por causa da necessidade de incorporação de dados numéricos e de outros eventos objetivos, os modelos de PO são quase sempre matemáticos e, portanto, requerem uma análise que emprega métodos matemáticos.

Otimização e incertezas são temas constantes nos estudos de PO, e a necessidade de se fazerem escolhas ótimas nessas situações determina duas categorias principais de métodos matemáticos usados na pesquisa operacional: a) otimização, que engloba as técnicas de programação linear, não linear, inteira, dinâmica, entre outras; e b) probabilidade aplicada, que engloba as técnicas de teoria das filas, modelos de estoques, simulação de eventos discretos e outras.

Law e Kelton (1991) discorrem que as soluções analíticas utilizam técnicas tradicionais de matemática e de estatística para realizar a análise e obter informações exatas sobre o sistema modelado. No entanto, de acordo com os autores, se a complexidade do modelo for grande, torna-se inviável a utilização de soluções analíticas, pois as relações matemáticas ficam muito extensas e o cálculo fica complexo. Nesse caso, procura-se utilizar a simulação. Isso porque a simulação consegue modelar as características complexas do sistema, inclusive seu aspecto estocástico (ou probabilístico) e dinâmico, sem tornar o modelo difícil de ser estudado.

Botter et al. (2004) referenciam o trabalho desenvolvido por Chowdhury (1989), que propõe a simulação como ferramenta ideal para estudar sistemas grandes, complexos, em que ocorrem interações entre atividades (ou entre modais) que dificultam a modelagem analítica.

Segundo Gavira, (2003) umas das técnicas mais utilizadas pela PO, muito útil na resolução de problemas complexos, de alta dose de aleatoriedade, é a simulação.

Como será visto no capítulo 2, “Caracterização do Sistema Produtivo do Minério de Ferro”, o problema proposto envolve o sistema produtivo do minério de ferro que utiliza o modal aquaviário para distribuição de seus produtos, que tem como parte integrante desse sistema, o processo portuário de um terminal exportador de minério de ferro.

Segundo Batista (2005), esse tipo de problema não pode ser abordado simplesmente pela teoria das filas, devido às características que proporcionam um nível elevado de incerteza e complexidade ao sistema. Parte do processo tem natureza estocástica, sendo necessário que os dados (inputs) do modelo, tais como os tempos de atracação, desatracação, paradas do carregamento devido a questões relativas ao navio como também ao sistema de estocagem e embarque, e taxa de carregamento dos navios, sejam tratados como variáveis aleatórias e não como valores médios. O autor ainda menciona que, além disto, a simulação em sistemas dinâmicos como esses, permite a detecção de gargalos no fluxo de operações e teste de hipóteses para a otimização do processo, sem que reflita em custos extremamente dispendiosos.

De acordo com Gonzalez e Botter (2002), tradicionalmente o tempo em fila de um navio é utilizado para cálculo do custo de “demurrage”, como poderá ser visto no detalhamento adiante. Segundo os autores, a tarefa do cálculo do tempo despendido por navios em portos há muito tempo vem sendo realizada com o apoio da Teoria de Filas, porém essa técnica oculta vícios no cálculo do tempo em fila, sempre representado pela média. Esses vícios podem mascarar a avaliação do custo de sobreestadia. Ainda segundo os autores, as técnicas de simulação avaliam de forma mais consistente as esperas dos navios e contribuem para um cálculo mais realista do “demurrage”.

O grau de incerteza, de aleatoriedade e de complexidade referenciado no texto acima pelos autores Law e Kelton (1991), Botter et al. (2004), Gavira (2003), Batista (2005) e Gonzalez e Botter (2002) será detalhado adiante, no capítulo 2.

Com base no que foi exposto neste item e com o que foi constatado na revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 3, é consistente a evidência da utilização da técnica de simulação como método matemático mais adequado para tratamento do problema.

e) Modelagem Conceitual e Construção do Modelo Computacional

Após a caracterização do problema e a revisão bibliográfica será descrito no capítulo 4 “Modelagem por Simulação – Descrição do Modelo do Sistema Produtivo do Minério de Ferro”, o modelo conceitual representando o sistema produtivo do minério de ferro.

f) Planejamento da Investigação

No capítulo 5 “Aplicação da Modelagem”, será apresentado por completo o planejamento da investigação que está resumido a seguir.

A fim de simular o sistema produtivo do minério de ferro e de obter os resultados necessários para atingir os objetivos traçados para a pesquisa, foram planejado os seguintes experimentos com o modelo de simulação construído:

- Validação – Validação do modelo com base nos dados do ano de 2005 do processo produtivo da empresa Samarco Mineração S.A.
- Experimentos I, II, III, IV e V – Avaliação do comportamento da medida global do sistema que representa o somatório dos custos de manutenção de estoques, custo de multa por sobreestadia e custo de vendas perdidas no horizonte de estudo mediante as seguintes hipóteses:
 - variação do nível de estoque de segurança dos produtos;
 - mudança da programação da produção com diferentes configurações da restrição de tamanho mínimo de campanha de produção (entende-se por campanha um período ininterrupto de produção de um mesmo produto);

- mudança da operação do sistema de um para dois carregadores de navio (“Shiploader”);
- mudança da operação do sistema de um para dois berços de atracação de navios “capesize”, que são navios que têm capacidade de carregamento acima de 75.000 toneladas; e
- mudança da operação do sistema de um para dois berços de atracação de navios “capesize”, que são navios que tem capacidade de carregamento acima de 75.000 toneladas e de um para dois carregadores de navio (“Shiploader”).

g) Análise dos Resultados, Elaboração das Conclusões e Recomendações

Nesta etapa será feita a interpretação e análise dos dados que foram tabulados e organizados na etapa anterior. Segundo Silva e Menezes (2001), a análise deve ser feita para atender aos objetivos da pesquisa e para comparar e confrontar dados e provas, com o objetivo de confirmar ou rejeitar a(s) hipótese(s) ou os pressupostos da pesquisa.

Os autores ainda argumentam que, nessa etapa, já se tem condições de sintetizar os resultados obtidos com a pesquisa. Deve-se explicitar se os objetivos foram atingidos, se a(s) hipótese(s) ou os pressupostos foram confirmados ou rejeitados. Principalmente, deve-se ressaltar a contribuição da pesquisa para o meio acadêmico ou para o desenvolvimento da ciência e da tecnologia.

Essas considerações estarão apresentadas no capítulo 5 Aplicação da modelagem e capítulo 6 “Conclusões e Recomendações” deste trabalho.

2 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO DO MINÉRIO DE FERRO

Segundo dados obtidos na Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) (2005), 99% do minério de ferro produzido é utilizado na produção de aço e de ferro fundido. Suas aplicações mais comuns ocorrem na construção civil, na indústria automotiva e na produção de eletrodomésticos.

Devido ao baixo valor unitário da tonelada de minério de ferro, as operações de beneficiamento do produto somente se tornam economicamente viáveis quando realizadas em grande escala (ordem de milhões de toneladas/ano), o que requer equipamentos de grande porte e elevada capacidade instalada. Apesar de, usualmente, esses processos de beneficiamento serem relativamente simples, se comparados com os utilizados para outros minérios mais complexos, como alguns fosfatos, minérios de cobre e sulfetos polimetálicos (cobre, zinco, ouro, chumbo), é fundamental que todas as etapas do processamento sejam devidamente dimensionadas e controladas em função dos volumes processados, de modo a minimizar os custos e assegurar a qualidade dos produtos. Os produtos de minério de ferro não são definidos apenas pelos teores mínimos de ferro (Fe) e máximos das impurezas sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fósforo (P), perda por calcinação (PPC) entre outras, mas também pelas classes de frações granulométricas rigidamente controladas. Isso requer que, mesmo para minérios de alto teor e baixo nível de impurezas, o processo seja controlado de tal forma que os produtos gerados atendam às especificações granulométricas. Para tanto, é necessário um rígido controle nas etapas de peneiramento e classificação.

Segundo Lamoso (2001), o minério de ferro é basicamente classificado em minério bruto e minério beneficiado. O minério bruto é comercializado na forma de granulado, já o beneficiado pode ser como “pellets”, “sinter feed” e “sinter”.

Pfiffer (2004, p. 85) descreve que, embora o minério de ferro possa variar em função de suas características químicas, físicas e metalúrgicas, normalmente, ele é classificado inicialmente em quatro tipos, de acordo com sua granulometria, conforme apresentado a seguir:

- **Granulado ou Lump:** é o minério de ferro cujas partículas mais grossas variam de 6,35 mm a 50 cm de diâmetro. Pode ser utilizado como carga direta nos altos-fornos.
- **Finos de minério de ferro ou “sinter feed”:** refere-se ao minério de ferro com partículas que variam de 0,15 mm a 6,35 mm de diâmetro, utilizado como matéria-prima para o processo de sinterização.
- **Ultrafinos de minério de ferro ou “pellet feed”:** são partículas de minério de ferro finas e ultrafinas (inferiores a 0,15 mm), geradas nas etapas de lavra, classificação, manuseio e transporte do minério de ferro, que não têm aplicação prática direta na indústria siderúrgica. Este produto é matéria-prima do processo de pelletização.
- **Pelotas ou “pellets”:** são partículas finas e ultrafinas de minério de ferro aglomeradas na forma esférica, com tamanho e qualidade apropriados aos processos específicos de siderurgia. As pelotas geralmente são classificadas entre 6,3 e 18 mm ficando 90% entre 8,0 e 16,0 mm.

As reservas naturais de minério de ferro de grandes dimensões e altos teores encontram-se predominantes em países como Brasil e Austrália. Nessas localidades, é possível encontrar uma parcela expressiva dos produtos sendo gerada apenas por etapas de britagem e classificação. Esse é o caso de Carajás (PA), no Brasil, por exemplo. No Quadrilátero Ferrífero, sudeste do Brasil, por sua vez, em função da redução das reservas de hematita (Fe_2O_3) e da abundância das reservas de itabiritos², faz-se necessária a concentração de determinadas frações do minério para a geração de produtos, “sinter feed” e “pellet feed”, que atendam às especificações cada vez mais rígidas dos compradores. A necessidade da utilização de etapas de concentração deve-se ao fato de que, por processos simples de separação por tamanho, não se consegue obter produtos com elevados teores de ferro. De uma forma geral, a sílica, a alumina e os demais contaminantes aumentam de teor na direção das frações mais finas. Essa característica permite que a fração grosseira gere um produto de maior pureza, por exemplo, um minério granulado

² Tipos de minérios compostos principalmente por hematita (Fe_2O_3) e sílica (SiO_2).

bitolado. Essas informações estão disponíveis na CVRD (2005) e na Samarco (2005).

Segundo as fontes TAOFIO (2004) e “Iron Ore Outlook” – IOO (2005), as maiores empresas produtoras de minério de ferro atualmente são as seguintes:

- CVRD: tem sede no Brasil e é a maior empresa mundial de minério de ferro, com uma produção total, em 2004, de 218 milhões de toneladas.
- Rio Tinto: Com escritório central em Londres, Inglaterra, as principais operações estão localizadas na América do Norte e Austrália, com atuações também na América do Sul, África e Europa. O Grupo opera em mais de 20 países produzindo minério de ferro, cobre, alumínio, carvão, dióxido de titânio, boro, talco, urânio, diamantes, e ouro. A produção total de minério de ferro, em 2004, foi de 139 milhões de toneladas.
- BHP Billiton: é uma companhia com sede na Austrália. Em 2004, produziu 102 milhões de toneladas de minério de ferro.
- Cleveland Cliffs: é a maior produtora de pelotas de minério de ferro na América do Norte . Vende a maior parte de sua produção para companhias integradas de aço nos Estados Unidos e Canadá. Sua produção de minério de ferro, em 2004, foi de 35 milhões de toneladas.
- Kumba Resources: é uma companhia com sede na África do Sul. Produziu, em 2004, o equivalente a 30 milhões de toneladas de minério de ferro.
- LKAB: é uma companhia do governo sueco com produção de minério de ferro, em 2004, da ordem de 22 milhões de toneladas.
- Samarco Mineração S.A.: assume a posição de segunda maior exportadora de pelotas de minério de ferro no mercado transoceânico com 14 milhões de toneladas transportadas. É uma companhia controlada pela CVRD e pela BHP Billiton, cada uma detendo 50% de seu controle acionário. Produziu, em 2004, 15,4 milhões de toneladas de minério de ferro, entre “pellets” e “sinter feed”.

No capítulo 1, foi mostrada a Tabela 1.5 – Produção de Minério de Ferro por Companhia (em milhões de toneladas), contendo a distribuição anual de produção

de minério de ferro pelos maiores e mais importantes produtores mundiais, com projeção até o ano de 2007.

2.1 SISTEMA OBJETO DE ESTUDO - INTRODUÇÃO AO PROCESSO PRODUTIVO DO MINÉRIO DE FERRO

Segundo Chaves (2002), o objetivo da atividade mineradora é a descoberta, a lavra e o beneficiamento de minérios. Nesse sentido, as atividades executadas dentro da mineração consistem em

- descobrir os recursos minerais existentes no subsolo;
- trazer o bem mineral do subsolo até à superfície; e
- colocar esse bem mineral em condições de ser utilizado pela indústria metalúrgica, cerâmica ou química.

Luz et al. (2004) definem:

- **mineral** como todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre;
- **minério** como toda rocha constituída de mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, possíveis de serem aproveitados economicamente denominados minerais-minério. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado ganga.
- **estéril** é outro termo muito usado na mineração, definido em Dias (2001, p. 95) como todo material sem valor econômico extraído para permitir a lavra do mineral útil, o minério.

Chaves (2002) diz que o processamento do minério consiste em uma seqüência de operações industriais que se denominam operações unitárias, assim chamadas devido ao fato de somente variar a combinação e a seqüência dessas operações para atender a um determinado objetivo, ou para atender às

características específicas de um determinado minério. De uma maneira geral, as operações unitárias podem ser esquematicamente agrupadas em

- **operações de cominuição** que são basicamente os sucessivos estágios de britagem e moagem das partículas minerais para colocá-las no tamanho adequado a que se destinam; são sempre auxiliadas por operações de separação de tamanhos, geralmente em peneiras classificadoras, ciclones e/ou outro tipo de separadores por tamanho;
- **operações de concentração** que visam separar as partículas não só por diferentes espécies minerais, mas também por distintos níveis de pureza;
- **operações auxiliares** que armazenam e/ou transportam os diferentes produtos intermediários entre uma operação unitária e outra, além de permitir a separação da água contida nesses produtos; são classificadas em transporte de sólidos particulados, transporte de sólidos em suspensão em água (em polpa), estocagem e homogeneização em pilhas, estocagem em silos, espessamento, filtração e secagem.

Ainda segundo Chaves (2002), nunca uma operação unitária sozinha é suficiente para fornecer um produto final. Geralmente são necessárias várias operações unitárias que, ao serem combinadas, constituem processos que abrangem desde o minério inicial ao produto final.

Luz et al. (2004) apresentam um fluxograma típico de tratamento de minérios na Figura 1, em que operações unitárias são assim classificadas:

- **cominuição:** britagem e moagem;
- **classificação:** peneiramento, ciclonação e classificador espiral;
- **concentração:** gravítica, eletrostática, por flotação e outros;
- **desaguamento:** espessamento e filtração;
- **secagem:** secador rotativo e secador de leito fluidizado; disposição de rejeito .

Figura 1 – Fluxograma típico de tratamento de minério

O processo produtivo do minério de ferro, analogicamente aos conceitos colocados por Chaves (2002) e Luz et al (2004), é constituído por uma seqüência de operações unitárias, a saber:

- **lavra do minério:** que abrange uma combinação das operações de extração do minério, cominuição e auxiliares;
- **beneficiamento:** que corresponde a uma combinação das operações de cominuição, concentração e auxiliares;

- **transporte:** que compreende a operação de transporte do minério até a unidade industrial onde ele será utilizado e processado para agregação de valor;
- **aglomeração:** que tem como finalidade a agregação de valor ao minério de ferro através da criação de características especiais, que tornam o produto muito mais atrativo no processo de fabricação do ferro primário a que são destinados os aglomerados na indústria siderúrgica; compreendem os processos de sinterização e/ou pelletização, que geralmente são combinados com operações de cominuição e auxiliares; e
- **estocagem e embarque:** que integram o processo produtivo de uma parcela significativa das empresas de mineração que exportam seus produtos através de transporte marítimo. Nesse sentido, as operações de estocagem, embarque e portuárias tornam-se parte integrante do processo produtivo em uma parcela significativa das empresas de mineração.

Como exemplo dos processos que constituem o processo produtivo do minério de ferro, citem-se CVRD (2005) e Samarco (2005).

2.2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA OBJETO DA PESQUISA

Operar o sistema produtivo da mineração do ferro objetivando minimizar os custos resultantes de multas por sobreestadia, custos de manutenção de estoques e custos de vendas perdidas é um desafio para as companhias que produzem o minério de ferro e o comercializam através do mercado transoceânico.

Como será visto em sequência, o processo produtivo do minério de ferro apresenta características que proporcionam um nível elevado de incerteza e complexidade ao sistema, o que caracteriza a natureza estocástica do processo.

Operar esse sistema com o menor custo possível é um problema inerente à indústria da mineração de ferro.

2.2.1 Incertezas Inerentes ao Processo de Fabricação do Minério

As incertezas inerentes ao processo produtivo do minério de ferro podem ser classificadas em:

- a) Variações no Processo Produtivo da Mineração do Ferro
- b) Incerteza na Confiabilidade da Quantificação dos Fluxos do Processo Produtivo da Mineração do Ferro
- c) Incerteza na Quantidade Entregue ao Cliente

a) Variações no Processo Produtivo da Mineração do Ferro

Juran (1998) define

- **processo** como qualquer combinação de máquinas, ferramentas, métodos, materiais e pessoas empregadas para atingir qualidades específicas em um produto ou serviço; teoricamente uma mudança em qualquer desses componentes deve a rigor resultar em um novo processo;
- **controle de processo** como uma avaliação de retorno pela qual são realizadas a medição do desempenho atual, a comparação com o desempenho padrão e alguma ação sobre a diferença; e
- **controle estatístico de processo** como a aplicação de técnicas estatísticas para medir e analisar as variações de processos.

Segundo Juran (1998), todos os processos industriais exibem alguma variação composta por uma componente permanente no tempo, inerente aos processos, e por uma outra intermitente. São atribuídas à componente permanente, chamada de variação aleatória, causas acidentais e indetermináveis, e à componente intermitente, causas determináveis. O autor também diz que essa variação pode ser convenientemente quantificada por amostragem dos dados de

saída dos processos e pela estimativa dos parâmetros de sua distribuição estatística.

Belém (2000) diz que todos os resultados apresentam variação e que esta é função de causas comuns e especiais. As causas comuns provocam no efeito uma variação previsível e natural dos processos. Nesses processos, é possível antecipar os limites dentro dos quais variará o resultado. As causas especiais provocam no efeito uma variação peculiar ou fora do esperado, não natural ao processo. Nesse caso, não é possível antecipar qual a magnitude de variação.

Com base nas informações introdutórias sobre o processo produtivo do minério de ferro e o que foi revisto em Juran (1998) e Belém (2000), pode-se afirmar que existe variação nas operações de lavra do minério, de beneficiamento, de transporte, de aglomeração e de estocagem, embarque e portuárias.

Essa seqüência constitui o processo produtivo da mineração do ferro, o que evidencia a existência de variação no processo produtivo global. A existência dessa variação caracteriza a existência de aleatoriedade nesse sistema, que pode ser traduzida em uma incerteza de mensuração dos resultados, sendo essa incerteza inerente ao processo produtivo.

Como já visto anteriormente, de acordo com Juran (1998), as variações nos processos podem ser quantificadas pela construção da distribuição estatística dos resultados (“outputs”) da variável resposta em questão.

Desta forma, por meio identificação dos resultados das variáveis relevantes para o estudo na saída de cada operação, é possível mensurar a variação dentro e na saída do processo produtivo da mineração do ferro.

Segundo CVRD (2005), Samarco (2005) e Chaves (2002), algumas variáveis que podem ser consideradas como resultados dos processos são,

- **na operação de lavra do minério**, a quantidade diária produzida de minério lavrado, o teor dos elementos estabelecidos como parâmetro de controle do processo, a relação estéril/minério, dentre outros específicos de cada unidade produtiva;

- **na operação de concentração**, a quantidade diária de minério concentrado, o teor de ferro do concentrado, o teor dos elementos tidos como impurezas e a granulometria do concentrado;
- **na operação de transporte**, a quantidade diária transportada; no caso do transporte de polpa, a sua densidade ou o percentual de sólidos;
- **na operação de aglomeração**, a quantidade diária produzida, indicadores de qualidade do produto em função da operação de aglomeração e a granulometria;
- **nas operações de estocagem, embarque e portuárias**, a quantidade diária estocada, a quantidade diária embarcada, indicadores de qualidade do produto embarcado, tempo entre chegada dos navios, posição do instante de chegada dos navios dentro da janela de tempo prevista para chegada (“layday”³) e taxa de carregamento.

Na Figura 2 é mostrado o fluxograma esquemático do processo produtivo do minério de ferro com a variabilidade inerente a cada processo.

Figura 2 – Processo produtivo da mineração de ferro e sua variação

³ Período de tempo, com datas de início e fim definidas, em que é prevista a chegada do navio ao terminal portuário. Quando o navio é contratado para o transporte da carga, o instante de chegada é definido com base nesse período de tempo.

b) Incerteza na Confiabilidade da Quantificação dos Fluxos do Processo Produtivo da Mineração do Ferro

Martins, Pereira e Silva (2003) argumentam que para a avaliação da performance de uma usina de beneficiamento de minério e controle da sua operação são necessários dados confiáveis dos diversos fluxos em termos de taxas mássicas⁴ e de seus constituintes metalúrgicos. É importante que se tenha um balanço de massas e metalúrgico obtido mediante o tratamento estatístico adequado dos diversos dados medidos durante a operação em um período determinado. Esses dados podem ser medidos continuamente ou obtidos por meio de amostragens dos diversos produtos e analisados em laboratório.

Segundo os mesmos autores, normalmente, em uma indústria mineral, ocorrem erros de medidas dos instrumentos que permitem contabilizar de forma contínua as taxas mássicas dos diversos fluxos. Esses erros podem ser maiores ou menores, dependendo de vários fatores, como da própria limitação de precisão do instrumento de medição, da periodicidade de aferição ou até mesmo dos defeitos. Outros dados relativos aos vários fluxos de uma planta podem ser obtidos por meio de amostragem sistemática, que podem conter desvios dos valores reais devido a erros de amostragem, preparação e análises em laboratório.

Cardoso et al. (1994), definem sistemas contínuos como sendo aqueles sistemas nos quais as variáveis de estado mudam continuamente no tempo, e que, a grosso modo, pode-se dizer que a cada fração de segundo elas assumem novos valores. A Figura 3 mostra uma representação esquemática de um sistema contínuo.

⁴ É a mensuração da quantidade de material processado por unidade de tempo. Por exemplo, toneladas por hora.

Figura 3 – Trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC).

Com base nas informações de Martins, Pereira e Silva (2003), de Cardoso et al. (1994) e pela natureza das operações em grande escala (milhões de toneladas por ano), o processo produtivo da mineração de ferro é caracterizado como um sistema contínuo, com fluxos de massas em larga escala. Esse fato leva a uma tendência de ampliação dos fatores que são causadores dos erros de medidas dos instrumentos que contabilizam de forma contínua as taxas mássicas.

A existência desse erro traduz-se em uma incerteza na quantidade real que está sendo processada a cada instante em comparação com a quantidade que está sendo contabilizada pelos instrumentos de medição.

Não será objetivo desta pesquisa o estudo da influência dessa incerteza no sistema produtivo do minério de ferro, e, assim sendo, a lógica representativa dessa incerteza não será incluída no modelo de simulação. O estudo da influência da variação dessa incerteza na medida de rendimento global do sistema, representada pelo somatório dos custos de estoque, sobreestadia e vendas perdidas, será sugerido como oportunidade para futuras pesquisas no capítulo 6 “Conclusões e Recomendações” deste trabalho.

c) Incerteza na Quantidade Entregue ao Cliente

Segundo entrevista técnica realizada na área de faturamento e contratos da Gerência Geral de Marketing da Samarco Mineração S.A., a incerteza na quantidade

entregue ao cliente é caracterizada pela tolerância de carregamento. É prática comum no afretamento de granéis sólidos, como minério e carvão, o armador ter a opção de exercer o direito de 10% de tolerância na quantidade da carga a ser transportada. Essa flexibilidade, estipulada em contrato, garante ao armador a possibilidade de balanceamento das cargas para otimizar a utilização do navio e gera uma incerteza na quantidade real entregue ao cliente, que pode ser traduzida em uma entrega com quantidade maior ou menor que a planejada. A seqüência de vários desbalanceamentos no processo de carregamento configura problema, ou de falta de estoque e aumento do tempo de sobreestadia decorrente de uma sucessão de entregas em quantidades maiores que a planejada, ou de geração indevida de estoque, decorrente de entregas em quantidades menores que as planejadas.

Como no item anterior, a influência da incerteza referente à quantidade embarcada em função da tolerância de carregamento também não será objetivo desta pesquisa e será incluída nas recomendações para futuros estudos no capítulo 6 “Conclusões e Recomendações”.

2.2.2 Custos no Processo Produtivo do Minério de Ferro

Neste item, pretende-se mostrar que, na operação do processo produtivo do minério de ferro, é inerente a geração de custos, e que redução desses custos é um problema na gestão das empresas produtoras.

Dentre todos os custos envolvidos, somente será objetivo da pesquisa avaliar os custos associados à gestão de estoques e associados à sobreestadia dos navios no terminal portuário.

a) Custos Relevantes Associados ao Estoque

Para Balou (2001), estoques são pilhas de matérias-primas, insumos, componentes, produtos em processo e produtos acabados que aparecem em numerosos pontos por todos os canais logísticos e de produção da empresa. Ter estoques em mão pode custar entre 20 e 40% de seus valores por ano.

Segundo Balou (2001), existem três tipos de custos associados ao estoque, que estão em conflito ou em compensação uns com os outros:

- Custos de obtenção, que são os custos associados com a aquisição de mercadorias para o reabastecimento de estoques. Incorrem em custos relacionados ao processamento, ao ajuste, à transmissão, ao manuseio e ao pedido de compra. No sistema em estudo, podem-se enxergar custos na manutenção dos estoques em processo, custos de mudança de produção de um determinado tipo de produto para outro e custos de manuseio ao longo do processo.
- Custos de manutenção de estoque, que resultam da estocagem ou manutenção dos bens por um período de tempo e são aproximadamente proporcionais à quantidade média dos bens mantidos. Esses custos incorrem no sistema em estudo pela formação e manutenção de estoques de produtos acabados nas unidades produtoras (fábricas) ou nos centros de distribuição. Como exemplo, pode-se citar o atraso no carregamento de um navio, causando geração de estoque do produto a ser entregue, ou ainda um erro positivo de quantificação da carga produzida⁵, gerando estoque em virtude de a quantidade real estocada ser maior que a carga informada pelo sistema de informação.
- Custos de falta de estoque, que são os que incorrem quando um pedido é colocado, mas não pode ser preenchido do estoque ao qual foi designado. Nessa categoria está o custo de vendas perdidas, que ocorre quando o cliente retira o pedido por causa da ausência de estoque para atendê-lo, e o custo de pedidos em aberto que ocorre quando um cliente tem que esperar seu pedido ser preenchido, de modo que a venda não está

⁵ Este tipo de problema foi detalhado no item 1.2.1 deste capítulo “Incertezas Inerentes ao Processo de Fabricação do Minério”, na letra b “Incerteza na Confiabilidade da Quantificação dos Fluxos do Processo Produtivo da Mineração do Ferro”.

perdida, apenas prolongada. Estão incluídos nessa categoria também os custos intangíveis referentes às vendas futuras perdidas. Esses custos podem ser identificados no sistema em estudo pela prorrogação de uma entrega em decorrência do acúmulo de atrasos em seqüência de entregas⁶. Como exemplo pode-se citar o atraso na entrega de um pedido por produção abaixo da planejada, gerando falta de estoque, a variação negativa da taxa de carregamento, causando atraso na entrega do pedido, ou, ainda, a reprogramação da seqüência de entrega dos pedidos (embarques), gerando falta de estoque para um determinado pedido.

De acordo com Bowersox e Closs (2001), do ponto de vista da logística, decisões que envolvem estoques são de alto risco e de alto impacto. O comprometimento com determinado nível de estoque e a subsequente expedição de produtos para mercados, em antecipação a vendas futuras, acarretam várias atividades logísticas. Sem um estoque adequado à atividade de “marketing” poder-se-ão detectar perdas de vendas e declínio da satisfação dos clientes, o que pode ser traduzido no custo de vendas perdidas. Por outro lado, o planejamento de estoque também tem papel crítico para a produção. Falta de matérias-primas pode parar linhas de produção ou alterar programações da produção, o que, por sua vez, aumenta os custos e a possibilidade de falta de produto acabado. Além de falta, que pode prejudicar tanto o planejamento de “marketing” quanto as operações de produção, o estoque excessivo também gera problemas: aumenta custos e reduz a lucratividade, em razão de armazenagem mais longa, imobilização de capital de giro, deterioração, custos de seguro e obsolescência.

b) Custos Relacionados a Multas por Sobreestadia (“Demurrage”)

Em COMEXNET (2005) é encontrada a definição de “demurrage” como a multa ou indenização paga pelo afretador⁷ ao armador⁸ por ter o primeiro

⁶ Acúmulo de atrasos devido a uma seqüência de navios em atraso.

⁷ Pessoa ou firma que, mediante compensação em dinheiro, utiliza uma embarcação mercante ou os serviços dela.

ultrapassado o prazo estipulado num contrato de afretamento por viagem para as operações de carregamento e/ou de descarga do navio. Esses custos também podem ser identificados no sistema em estudo em decorrência dos atrasos nos carregamentos ou por outros motivos que forcem o navio a permanecer parado no porto. Como exemplo pode-se citar o atraso do carregamento por falta de estoque, por causa da fila de navios em espera ou por causa da reprogramação da sequência de embarques.

Segundo UNCTAD (1995), o tempo de espera dos navios para atracação nos portos aumenta com o aumento do volume do tráfego de navios. Em altas ocupações de berço, esse tempo de espera dos navios para atracação é bastante dramático. Essa mesma fonte disponibiliza na Figura 4 abaixo essa informação.

Figura 4 – Variação do custo do navio no porto com o aumento do volume de tráfego

Para o sistema em estudo, esse fato tem grande relevância, se for considerado que o tempo de espera dos navios para atracar tem relação direta com os custos de “demurrage” e é função do planejamento de vendas e da capacidade do terminal marítimo, ou seja, o volume de vendas como também a sua distribuição ao longo do horizonte de planejamento são relacionados diretamente com os custos de “demurrage”.

⁸ Pessoa ou firma que, à sua custa, equipa, mantém e explora comercialmente embarcação mercante, podendo ser ou não o seu proprietário.

Com objetivo de anular a interferência de diferentes configurações de vendas no resultado das hipóteses que serão estudadas na pesquisa, será utilizado, em todos os cenários, o mesmo plano de vendas estabelecido para a verificação e a validação do modelo de simulação

Não é objetivo da pesquisa o estudo da interferência de diferentes configurações do plano de venda⁹ na medida de rendimento global do sistema, representada pelo somatório dos custos de estoque, sobreestadia e vendas perdidas.

2.2.3 Síntese do Problema

Como visto no decorrer deste capítulo, pode ser o processo produtivo da mineração do ferro um sistema contínuo e em série, a operação desse processo interagindo com

- a) as incertezas referentes ao próprio processo produtivo traduzidas em variações dos fluxos de massas diários, variações no tempo entre chegadas dos navios e variações do instante de chegada dos navios em relação ao seu “layday”;
- b) a possibilidade de erros na quantificação dos fluxos de massas, gerando incerteza na quantidade real de estoque ao longo de cada ponto do processo produtivo; e
- c) a tolerância de carregamento, gerando incerteza na quantidade entregue ao cliente,

ocasiona a geração de custos, sendo estes de manutenção de estoques, de vendas perdidas, de vendas futuras perdidas e de multas por sobreestadia dos navios no terminal portuário.

⁹ Para exemplificar diferentes configurações do plano de vendas pode-se citar a configuração do plano de vendas com diferentes tamanhos de “laydays” e a aleatoriedade do instante de chegada dos navios em relação ao seu respectivo “layday.”

A operação desse sistema com o mínimo custo é um problema inerente à indústria da mineração de ferro.

2.2.4 Variáveis de Decisão que Interferem no Problema

Neste item serão discutidas as variáveis de decisão que influenciam diretamente no problema para as situações em que caso ocorra mudança de estado, haja variação na medida de rendimento global do sistema em estudo.

- **Distribuição de vendas por cliente e tamanho do lote de entrega**

A distribuição de vendas por cliente para o período de estudo é caracterizada pela escolha dos clientes que são considerados no plano de vendas, pela quantidade de venda por cliente e pelo tamanho da janela de tempo de previsão de chegada dos navios no terminal portuário.

O tamanho do lote de entrega é caracterizado pela definição da quantidade a ser entregue aos clientes por pedido. No caso da indústria de minério de ferro que utiliza o mercado transoceânico para comercialização de seus produtos, o tamanho do lote de entrega é definido pela escolha do navio que irá transportar o produto até o cliente.

Como já comentado anteriormente, não é objetivo desta pesquisa a investigação da influência da variação destas variáveis na medida de desempenho global do sistema em estudo.

- **Taxa de carregamento e sua variabilidade**

Esta variável de decisão é definida pelos parâmetros que configuram a distribuição de probabilidade da taxa de carregamento dos navios. Nesse caso, foi considerada como variável de decisão a distribuição de probabilidade da taxa de carregamento pelo fato de que tanto a taxa de carregamento como a sua variação

são decisões que podem ser tomadas pelos administradores do sistema e também pelo fato de essas decisões influenciarem de alguma forma o objetivo do problema.

Para este estudo será considerada a curva de distribuição da taxa de carregamento utilizada para validação do modelo e não é objetivo da pesquisa o estudo da influência desta variável no sistema.

- **Produção diária dos processos produtivos do sistema e suas variabilidades**

As distribuições de probabilidade das quantidades diárias produzidas obtidas ao longo do processo produtivo do minério de ferro representam as variações nesse processo e são caracterizadas como variáveis de decisão pelos parâmetros de definição da curva de distribuição.

- **Programação da produção no processo produtivo do minério de ferro**

Será visto no capítulo 4 “Modelagem por Simulação – Descrição do Modelo do Sistema Produtivo do Minério de Ferro”, que as informações sobre “o quê” e “quando” produzir serão entradas do modelo e tratadas como variáveis de decisão para o modelo de simulação. Segundo Shapiro (2001, p. 17-19), descobrir “o quê” e “quando” produzir é um problema de programação de produção e requer decisões de planejamento multiperíodo e multifase. Existem técnicas e metodologias embasadas em programação matemática e meta-heurísticas para tratar tal problema.

O seqüenciamento da produção é uma das variáveis que afetam fortemente a medida de rendimento global do sistema devido ao fato de ser definido na fase de planejamento e programação da produção, sendo a sua construção baseada em dados determinísticos, sem se considerar a parcela de aleatoriedade que é peculiar ao sistema. Como na realidade, as incertezas começam a aparecer com o programa de produção distanciando-se da seqüência ideal de produção, começam a ocorrer atrasos nos embarques por falta de estoque e ou por geração indevida de estoque por ocorrência de produção antes da entrega. Esse fato gera, de uma forma contínua, o aumento dos custos de manutenção de estoques, custo por sobreestadia

dos navios e custo de vendas perdidas, quando, no final do horizonte que foi planejado, algumas entregas tenham que ser postergadas para o período seguinte.

Não é objetivo desta pesquisa resolver o problema de sequenciamento da produção do processo produtivo do minério de ferro. A programação da produção será tratada como dado de entrada para o modelo de simulação. O método utilizado para gerar o programa de produção para o processo produtivo do minério de ferro em estudo será comentado no capítulo 5, “Modelagem por Simulação”.

É objetivo deste estudo a investigação de diferentes configurações de sequenciamento de produção em função da restrição de tamanho mínimo de campanha e sua influência na medida de rendimento global do sistema.

- **Quantidade de estoque de segurança no sistema**

A quantidade de estoque de segurança é uma decisão de responsabilidade dos administradores do sistema produtivo e influencia diretamente na medida de desempenho global do sistema por se tratar da decisão de se iniciar a operação em um determinado período, objetivando reduzir os riscos de problemas inesperados no processo produtivo que venham a causar falta de estoque. Essa decisão gera inicialmente custo de construção e manutenção desse estoque até o momento que ele venha a ser consumido. Por outro lado, ele reduz a possibilidade de geração de custo por sobreestadia em uma eventual falta de estoque.

É objetivo desta pesquisa investigar a influência da variação do nível de estoque de segurança em combinação com a variação das diferentes configurações de sequenciamento da produção. No capítulo 5, “Aplicação da Modelagem”, será mostrado com mais detalhes o planejamento dos testes e suas configurações para os cenários a serem estudados.

2.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO PARA CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Segundo Botter (2001), a definição do sistema é a etapa em que ocorre a determinação das fronteiras e das restrições a serem usadas e a investigação sobre o funcionamento do sistema.

Como já visto no capítulo 2, o sistema objeto de estudo é caracterizado por um ciclo de produção longo com processo integrado em série e contínuo, desde a mina, passando pelo beneficiamento, transporte, aglomeração, quando for o caso, estocagem de produtos acabados e distribuição, que em grande parte é realizada através do modal aquaviário.

Pegden et al. (1995) argumentam que verificação e validação são etapas essenciais do processo e consistem na confirmação de que o modelo operará da forma como o analista pretendia, e que a saída do modelo é confiável e representativa de um sistema real. A verificação busca mostrar que o programa computacional desempenhou como esperado e pretendido, fornecendo, dessa maneira, uma correta representação lógica do modelo. A validação, por outro lado, estabelece que o comportamento do modelo representa, de forma válida, o sistema do mundo real que está sendo simulado.

Assim ter acesso ao sistema real para obtenção dos dados é condição indispensável para a validação do modelo computacional.

Ante a necessidade de escolher um sistema real para modelagem, que se caracterizasse conforme o sistema objeto de estudo e atendesse a condição necessária de permissão de acesso aos dados reais para validação do modelo, optou-se pelo sistema produtivo da Samarco Mineração S/A que será descrito por completo a seguir.

No anexo J é mostrado o fluxograma completo do processo produtivo da Samarco Mineração S.A..

2.3.1 A Empresa

A SAMARCO MINERAÇÃO S.A. é uma empresa de lavra, beneficiamento, pelotização e exportação de minério de ferro. Em 2005, foi a segunda maior exportadora de pelotas de minério de ferro no mercado transoceânico, comercializando 100% de seus produtos para mais de 15 países na Europa, Ásia, África/Oriente Médio e Américas.

Com sede e escritório central em Belo Horizonte (MG), a empresa mantém unidades industriais em dois estados brasileiros: Minas Gerais, nos municípios de Mariana e Ouro Preto, onde se localiza a Unidade de Germano, de lavra e beneficiamento; e Espírito Santo, no município de Anchieta, onde está a Unidade de Ponta Ubu, que compreende a pelotização e o porto. O transporte do concentrado de minério de ferro entre Germano e Ponta Ubu é feito por um mineroduto de 396 km de extensão. A empresa também possui escritório na cidade de Vitória (ES) para operações de comércio exterior e câmbio, além de escritórios de vendas em Amsterdã e Hong Kong.

O controle acionário da Samarco pertence à CVRD (maior exportadora de minério de ferro do mundo) e à BHP Billiton (terceira maior produtora mundial de minério de ferro), cada uma delas detendo 50% das ações.

Figura 5 – Mapa com a localização das unidades

2.3.2 Mercado

Atualmente, a empresa fornece seus produtos para os processos de fabricação de ferro primário para clientes localizados em todo o mundo. A Figura 6 abaixo destaca os países de atuação da empresa.

Figura 6 – Países de atuação da Samarco Mineração S.A.

Entre seus principais clientes estão:

- **SHAOGUAN IRON & STEEL GROUP:** A Shaogan foi fundada em 1966. Tem capacidade para produzir 1,5 milhões de toneladas de aço por ano. Localizada na província de Guangdong, suas especialidades são fio-máquina, vergalhões e eletrodos, além de diversos tipos de barras, que correspondem aos produtos planos. A empresa, que conta com cerca de 19 mil empregados, é de propriedade do governo da China.
- **ANDSK:** Fundada em 1982, a Alexandria National Iron & Steel Co (ANSK) está localizada na cidade de Alexandria, no norte do Egito, às margens do mar Mediterrâneo. Quarenta por cento da empresa pertence ao governo egípcio e sessenta por cento ao grupo Al-Ezz. Certificada pela ISO 14.001 e pela ISO 9.002, a ANDSK exporta para a Europa e para os Estados Unidos, além de atender ao mercado interno. Desde 1986, a empresa compra da Samarco pelotas do tipo redução direta.

- **KRAKATAU STEEL:** A Krakatau, situada na ilha de Java, é uma empresa estadual com cerca de dez subsidiárias e outras dez associadas. Começou a operar em 1970 e hoje tem capacidade para produzir 2,2 milhões de toneladas de aço por ano. Dentre os produtos oferecidos estão DRI, placas laminadas a quente, tarugos e fio-máquina. A Krakatau começou a importar pelotas para redução direta da Samarco em 1979. Desde então, a empresa já comprou quase 10 milhões de toneladas de minério. Possui cerca de 6 mil funcionários.
- **HADEED:** A Saudi Iron And Steel Company (Hadeed) foi fundada em 1979 pelo grupo estatal Saudi Basic Industries Corp. (SABIC) e está instalada na cidade de Al Jubail, no do Golfo Árabe. Hoje, o mesmo grupo mantém 100% do controle acionário da empresa, que é a mais lucrativa entre todas as controladas da SABIC. A produção anual de aço da Hadeed, onde trabalham cerca de 2,5 mil empregados, chega a 2,54 milhões de toneladas. A empresa compra pelotas para redução direta da Samarco desde 1984.
- **HANGZHOU IRON & STEEL GROUP CO.:** Fundada em 1957, a Hangzhou Iron & Steel Group Co. está situada no distrito de Gongshu, cidade de Hangzhou, província de Zhejiang, sudeste da China. A produção concentra-se em barras, trilhos, tubos de aço carbono, barras, tiras e aço inox.
- **SIDERCA:** Pertencente ao grupo Tenaris, a Siderca está situada em Campana, a 80 km de Buenos Aires. Sua capacidade de produção é de 1,1 milhão de toneladas de aço e de 820 mil toneladas de tubos sem costura, dos quais é uma das maiores produtoras do mundo. Setenta por cento da produção é exportada para cerca de 60 países. Desde 1987, a Siderca compra pelotas para redução direta da Samarco, totalizando, até o momento, 3,8 milhões de toneladas métricas naturais.
- **AMSTEEL:** A Amsteel, uma das empresas do Lion Group, iniciou suas operações em 1978. Atualmente está entre as empresas mais modernas que mais crescem na Malásia. Possui localização estratégica, a apenas 35 km do principal porto do país, e exporta para mais de 18 países. A planta industrial dispõe de três laminadores e tem uma capacidade de produção de 1,5 milhão de toneladas de aço por ano. Dentre os principais produtos da Amsteel destacam-se barras de seção circular, fio-máquina e bobinas de barras deformadas. Desde 1991, a

Amsteel já comprou mais de 2 milhões de toneladas de pelotas para redução direta da Samarco.

Entre seus principais concorrentes podem-se destacar:

- CVRD: CVRD é uma das maiores empresas de produção e exportação de minério de ferro “in natura” e de pelotas de minério de ferro em âmbito mundial. Subdivide-se em três grandes setores: sistema norte, sistema sul e pelotização.
- LKAB: A mineradora Luossavaara Kiirunavaara AB (LKAB), da Suécia, é líder na produção de pelotas e finos¹⁰ para o continente europeu e tem uma particularidade: sua lavra é subterrânea. Fundada em 1890, a LKAB tem um papel significativo na história da indústria sueca. O governo do país assumiu o controle de 50% das ações da empresa em 1907. Em 1976, com a compra do restante das ações, a LKAB passou a ser 100% estatal. A empresa destina 80% do carregamento exportado para as siderúrgicas européias. É a única exportadora de minério de ferro em toda a União Européia, sendo chamada de “a mina doméstica da Europa”. A LKAB possui minas subterrâneas em Kiruna e em Malmberget. O minério é transformado em finos, pelotas e produtos especiais nas usinas de processamento de Kiruna, Svappavaara e Malmberget. Em seguida, é transportado por trem para os terminais marítimos em Luleå e para a cidade norueguesa de Narvik. De lá, são embarcados para clientes de todo o mundo.
- IOC: A Iron Ore Company of Canadá (IOC) foi criada em 1949, mas só realizou seu embarque de pelotas seis anos depois, em 1954. Uma mina na cidade de Labrador, na província de Terre-Neuve et Labrador, e uma usina e um terminal marítimo em Sept-Îles, no estado de Québec, formam a estrutura da IOC. A cada ano pode exportar 20 milhões de toneladas de minério, o que, mantendo-se esse ritmo, garante reservas por pelo menos mais cem anos. A empresa possui aproximadamente 2 mil empregados. Pertencem à Rio Tinto 58,72% das ações, à Mitsubishi Corporation, 26,18% e à Labrador Iron Ore Royalty Income Funds, 15,1%.

¹⁰ Finos é a caracterização que se dá aos produtos da mineração de ferro com granulometria menor que 6,3 mm. Geralmente o pellet feed e o sinter feed.

- QCM: A Québec Cartier Mining (QCM) foi criada em 1957. Fica na cidade de Port-Cartier, no estado do Québec. O transporte dos 9 milhões de toneladas de minério produzidos a cada ano é realizado por trem, da mina ao porto (420 km). Pertencente à Caemi (50%) e à Dofasco (50%), a QCM é responsável por metade da produção de pelotas para redução direta e alto-forno do Canadá, e suas reservas garantem mais de 50 anos de operações.

2.3.3 Fornecedores

O minério de ferro é considerado a única matéria-prima da produção de pelotas que é abastecida em sua integralidade pela mina de propriedade da Samarco.

Com relação aos principais insumos e materiais utilizados na Samarco, temos: calcário, carvão, bentonita, óleo combustível e energia elétrica. A seguir são citados os principais fornecedores desses insumos e materiais.

a) Fornecedor de carvão mineral antracito: Glencore do Brasil

A Glencore do Brasil, é uma empresa brasileira participante do grupo Glencore International AG, cuja “holding” tem sede na cidade de Baar, Suíça, mantendo filiais em mais de 50 países. Com cerca de 6 mil funcionários, atua, mundialmente, como “trading company”, nas principais commodities de origem vegetal, mineral, inclusive petróleo, metais e produtos industrializados.

Além de “trading company”, a Glencore vem-se especializando, nos últimos anos, em atividades de exploração e produção de materiais e produtos de sua área de atuação, principalmente em minas de carvão mineral distribuídas no continente Africano (República da África do Sul), Sulamericano (Colômbia) e Oceania (Austrália), produzindo atualmente cerca de 40 milhões de toneladas por ano.

Ao todo, a Empresa tem onze minas, onde são explorados dois tipos de carvão mineral, o energético (“steam coal”) com 20 a 36% de matérias voláteis, e o antracítico comum (“coal”) com 5 a 17% de matérias voláteis. A capacidade de produção é de 20 milhões de toneladas por ano.

O carvão exportado para clientes do mundo inteiro é proveniente de minas próprias e também de minas pertencentes a outras empresas.

b) Fornecedores de calcário: Cal Brasil e Mibral

A empresa Cal Brasil, situada em Gironda, no município de Cachoeiro do Itapemirim, estado do Espírito Santo, tem, como ativo, equipamentos de moagem no valor de 3 milhões de reais e, em jazidas próprias, 10 milhões. Tem duas jazidas arrendadas. No processo a Empresa conta com dois britadores, dois re-britadores e dois moinhos de martelo. Tem capacidade de produção de 100 t/h. Seus produtos são calcário calcítico e calcário dolomítico. Como clientes tem SAMARCO, CST, cooperativas e agricultores. Emprega quatro funcionários diretos e 20 indiretos.

A Mibral, empresa situada em Itaóca no município de Cachoeiro do Itapemirim, estado do Espírito Santo, a Mibral tem como ativo equipamentos de moagem no valor de R\$ 4.500.000,00 e em jazidas próprias (2 jazidas) R\$ 12.000.000,00 . Possui reserva estimada de 25.000.000 m³. O processo é composto por dois britadores, dois re-britadores, dois moinhos de martelo e um moinho de bolas. Tem capacidade de Produção de 200 t/h. Seus produtos são calcário calcítico e calcário dolomítico. Como clientes têm Samarco, CST, MIZU, CVRD, cooperativas e agricultores. Emprega 49 funcionários diretos e 80 indiretos.

c) Fornecedor de bentonita: Bentonit União do Nordeste S.A – BUN

Com escritório Central em São Paulo (SP), a BUN tem duas unidades de produção, uma situada em Campina Grande, outra, em Boa Vista, ambas na Paraíba. Tem como ativo jazidas próprias com extração e moagem. Sua capacidade de produção é de 22 mil t/mês. Seus produtos são bentonita para pelletização, fundição, construção civil, perfuração de poço artesiano, perfuração de poços petrolíferos e indústria química. Seus principais clientes são Samarco, CVRD, FERTECO, FundaçãoTupi, GM do Brasil, Gessy Lever, FIAT do Brasil e PETROBRAS. Emprega 285 funcionários nas duas unidades.

d) Fornecedor de óleo combustível: Shell do Brasil

A Shell dispõe de um posto de trabalho dentro das instalações da Samarco, com capacidade de estocagem de 21 mil metros cúbicos. Fornece para a Samarco dois tipos de óleo pesado: 2A e 7A. Recebe seu abastecimento através do porto de Ubu e por caminhões.

2.3.4 Produtos

Os produtos da Samarco são pelotas de minério de ferro e finos de minério de ferro “sinter-feed” e “pellet feed”. As definições dessa classificação estão no capítulo 2 deste trabalho.

As pelotas são subdivididas em duas categorias, que se distinguem pela sua finalidade de utilização no processo de fabricação do aço. São as pelotas para o processo de fabricação do ferro gusa nos “Altos Fornos”, de denominação na Samarco de “Pelotas Alto Forno (PBF)”, e as pelotas para o processo de fabricação do ferro esponja, nos reatores de Redução “Direta”, de denominação na Samarco de “Pelotas de Redução Direta (PDR)”.

O “pellet feed”, da mesma forma que as pelotas, é subdividido nas categorias “Alto Forno” e “Redução Direta” e denominado na Samarco respectivamente de “Pellet Feed” de Sílica Norma (PFN) e “Pellet Feed” de Sílica Baixa (PFL).

O “sinter feed”, conhecido também como “Pellet Screening” (PSC), não tem subdivisão; é um sub-produto do processo de produção das pelotas, gerado na etapa de peneiramento.

2.3.5 Instalações e Processos Produtivos

O processo produtivo da Samarco inicia-se nas Minas de Alegria da Unidade de Germano, em Mariana – MG, onde o minério lavrado é encaminhado através de correias para as Usinas de Beneficiamento, para que a granulometria e a

composição química sejam ajustadas, constituindo o concentrado final. Esse concentrado é, então, transportado pelo mineroduto, de extensão de 396km, até a Unidade de Ponta Ubu, em Anchieta – ES.

Em Ubu, o concentrado passa pelas Usinas de Pelotização para a produção dos diferentes tipos de pelota. As pelotas são estocadas e, posteriormente, embarcadas, no porto da própria empresa, para clientes do mundo todo. A Figura 7 a seguir ilustra todo o processo.

Figura 7 – Processo produtivo da Samarco Mineração

Em seguida será detalhado todo o processo produtivo.

2.3.5.1 Lavra

As reservas minerais da empresa situam-se no chamado Complexo Alegria, localizado na região leste do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais.

A lavra por correias representa atualmente cerca de 70% da movimentação total de minério. Seu custo operacional é menor do que o custo de lavra convencional, já que esse método dispensa a utilização de caminhões, envolvendo assim uma menor quantidade de equipamentos e permitindo que o consumo de diesel por tonelada de minério movimentada diminua em relação ao da lavra convencional.

Figura 8 – Foto do sistema de abastecimento de correias

2.3.5.2 Beneficiamento

A capacidade de processamento de minério de ferro é de 16 milhões de toneladas. Esse minério, proveniente da mina, é composto, primordialmente, por partículas de quartzo e de hematita. As partículas de quartzo são indesejáveis nos processos siderúrgicos subseqüentes, portanto o minério deve ser processado para que ocorra a remoção dessas partículas. Além disso, a granulometria do minério é reduzida, visando ajustá-lo para posterior transporte via mineroduto e fabricação de pelotas. Desse processo, resultam dois produtos: um concentrado, que é transportado para a Unidade de Ponta Ubu, e um rejeito, que é depositado em barragens. O concentrado subdivide-se em dois tipos: concentrado de sílica alta e concentrado de sílica normal, ambos utilizados como matéria-prima no processo de pelotização.

Figura 9 - Foto da estação de beneficiamento da Samarco

2.3.5.3 Transporte por Mineroduto

Com capacidade para bombear 15,5 milhões de toneladas por ano de concentrado de minério de ferro, o mineroduto da Samarco é um dos maiores do mundo para transporte de minério de ferro e liga a Unidade de Germano, em Minas Gerais, à Unidade de Ponta Ubu, no Espírito Santo, atravessando centenas de propriedades em 24 municípios.

Figura 10 – Foto do início do mineroduto da Samarco na Unidade de Germano em MG

2.3.5.4 Pelotização

Na Unidade de Ponta Ubu, situam-se as Usinas de Pelotização para a produção dos diferentes tipos de pelota da empresa. As pelotas são estocadas e, posteriormente, são exportadas, em porto próprio, para clientes em todo o mundo. Com capacidade de produção anual de 13,8 milhões de toneladas de pelotas de minério de ferro, a primeira planta iniciou sua operação em 1977. A partir de dezembro de 1997, a Samarco duplicou sua capacidade de produção de pelotas com o início de operação de sua segunda usina de pelotização.

A polpa de minério concentrado que chega ao mineroduto é recebida nos espessadores, que têm a função de desaguamento, elevando em 5% o percentual de sólidos da polpa. Nessa etapa, são utilizados os produtos flocculante e o dióxido de carbono (CO₂). O flocculante tem como função aumentar a eficiência do processo

espessamento mediante o aumento da velocidade de sedimentação das partículas de minério, e o CO₂ tem como função corrigir o pH da polpa e clarificar a água descartada nos espessadores.

Em seguida, a polpa é direcionada para a filtragem, onde 26 filtros à vácuo e 16 bombas de vácuo trabalham em conjunto para retirar a água utilizada no transporte pelo mineroduto. Os filtros são compostos por setores, canecas e tecidos filtrantes, que retêm o minério e deixam passar a água. A redução da umidade ocorre pela sucção da água, provocada pelas bombas de vácuo. O produto da filtragem é chamado de “pellet feed” e é descarregado pelos filtros em correias transportadoras, para ser enviado para a fase seguinte do processo, a mistura, ou, eventualmente, para o pátio de estocagem. Nesse caso o “pellet feed” passa a ser considerado produto acabado e é embarcado para os clientes.

O “pellet feed” é armazenado em silos próprios, assim como o calcário, o carvão e os aglomerantes (bentonita). Dosagens preestabelecidas de cada um desses insumos, misturadas e homogeneizadas nos misturadores mecânicos, criam condições favoráveis para a formação das pelotas durante o pelotamento, fornecendo as características físicas, químicas e metalúrgicas adequadas ao produto final. O calcário fornece o óxido de cálcio que, junto com as gangas ácidas contidas no “pellet feed”, formará a escória, que atua como uma cola, unindo os grãos do minério e é determinante para as características físicas e metalúrgicas das pelotas. Os aglomerantes são responsáveis pela aglomeração das partículas minerais na produção das pelotas cruas, conferindo bom acabamento e controle granulométrico. O carvão é utilizado como fonte de energia térmica para a queima das pelotas no forno.

Com teor de umidade adequado, o “pellet feed”, já misturado aos insumos, é transportado para 20 discos de pelotamento, que produzem as pelotas cruas. Nessa fase, é fundamental um controle rigoroso do processo de aglomeração, como condição básica para se ter um produto final que atenda as necessidades e desejos de qualidade do cliente. O controle da faixa granulométrica é requisito essencial para o processo de fabricação do aço dos clientes da Samarco.

Para que as pelotas cruas, formadas nos discos, possam resistir às operações de manuseio e transporte até o cliente e para que suportem as pressões e os choques térmicos dentro dos reatores siderúrgicos durante a transformação do

ferro gusa (alto forno) ou do ferro esponja (redução direta), torna-se necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, proporcionando-lhes às mesmas resistências física e mecânica apropriadas. Essa operação é realizada nos fornos de pelletização de grelha contínua. Esses fornos são compostos por uma seqüência de carros, que se movimentam por trilhos em circuito fechado. Os carros são compostos por barras de grelhas, onde são depositadas as pelotas cruas para a queima. O processo de queima é feito através da passagem de um fluxo de ar aquecido a temperaturas da ordem de 1.360°C pelo leito de pelotas cruas. O ar é aquecido por queimadores dispostos em câmaras de combustão localizadas ao longo do forno. Os dutos onde passa o ar e as câmaras de combustão são revestidos por material refratário para resistir às altas temperaturas requeridas no processo. Como combustível, é utilizado óleo pesado, tipo 2A e 7A nos queimadores.

As pelotas queimadas são então transportadas por correias até uma estação de peneiramento, onde é realizado o ajuste final da granulometria, para eliminação das partículas menores que 6,3 mm. Em seguida, as pelotas são enviadas ao pátio de estocagem, de capacidade para 2 milhões de toneladas, para serem no tempo certo, recuperadas e enviadas para os clientes, conforme planejamento das vendas.

A fração fina das pelotas que são separadas no processo de peneiramento é denominada “pellet screening”. Este material é um subproduto do processo de produção de pelotas e tem valor comercial. A medida que é gerado no processo de peneiramento, o “pellet screening” também é estocado no pátio separado das pelotas e do “pellet feed”, e é recuperado e embarcado para os clientes, conforme plano de vendas.

Figura 11 e 12 – Foto dos discos de pelletamento e das usinas de pelletização da Samarco

2.3.5.5 Estocagem e Embarque

O processo de Estocagem e Embarque tem como objetivo dar um tratamento adequado aos produtos acabados¹¹ na fase de estocagem no pátio, de modo a propiciar a recuperação e assegurar a manutenção da qualidade desses produtos para o embarque.

O processo de estocagem e embarque dos produtos acabados é constituído pelas etapas de empilhamento, recuperação e embarque.

Figura 13 – Processo de estocagem e embarque dos produtos acabados da Samarco

No empilhamento, os produtos acabados são depositados em dois pátios de estocagem de 1.160 m por 62,20 m denominado “Pátio A”, e 1.160 m por 82,70 m, denominado “Pátio B”, com capacidade para armazenar 2,5 milhões de toneladas.

Os equipamentos disponíveis para a operação de empilhamento são:

a) Empilhadeira 1 – “Stacker”

- capacidade: 1700 t/h;

¹¹ Entende-se por produtos acabados as pelotas, “pellet feed” e o “pellet screening”.

- altura máxima de empilhamento: 18,7m para “pellet feed” e 14,85m para pelotas;
- velocidade da correia da lança (42"): 180 m/min;
- velocidade da correia da empilhadeira (36"): 200 m/min;
- velocidade de içamento da lança: 8°/min.

b) Empilhadeira 02 – “Stacker”

- capacidade: 1.600 t/h para “pellet feed”;
- altura máxima de empilhamento: 14m;
- velocidade da correia da lança (48"): 120 m/min;
- velocidade da correia da empilhadeira (48"): 151,20 m/min;
- velocidade de içamento da lança 7° 24'/min.

c) Empilhadeira Recuperadora – “Stacker Reclaimer”

- capacidade: 1.700 t/h para “pellet feed” e 1.500 t/h para pelotas;
- altura máxima de empilhamento: 13m;
- velocidade da correia da lança (78"): 240 m/min;
- velocidade da correia da recuperadora (72"): 275 m/min;
- velocidade de içamento da lança: 8°/min;

Figura 14 – Foto da “Stacker Reclaimer”

Para a operação de recuperação, o equipamento disponível é a Empilhadeira Recuperadora “Stacker Reclaimer”. Para essa operação suas características são:

- capacidade: 7.000 t/h;
- velocidade da correia da lança (78"): 240 m/min;
- velocidade da transportadora C-1 (72"): 275 m/min;
- velocidade de içamento da lança: 8°/min;
- velocidade de translação: 7,5 a 30 m/min;
- velocidade de giro: 0 a 50°/min;
- ângulo de giro: 110° para cada lado em alinhamento com a C-1;
- raio do giro: 35m a partir do centro da estrutura;
- velocidade da roda de caçamba: 0 a 6 r.p.m..

Durante a recuperação, é possível enviar material direto das usinas de pelotização para o navio, desde que a pelota produzida esteja compatível com a especificação do produto a ser embarcado, bastando ajustar o “damper”¹² existente na empilhadeira recuperadora que direciona os produtos para empilhamento ou recuperação na posição de recuperação. O objetivo dessa operação é aumentar a taxa de carregamento em toneladas por hora.

Na operação de carregamento, o equipamento disponível é o carregador de navios “Shiploader”. Suas características são:

- capacidade: 9.000 t/h;
- comprimento da lança: 41,6 m;
- alcance da lança: 22 m;
- velocidade da correia da lança: 275 m/min;
- velocidade de translação: 25 a 30 m/min;
- velocidade do giro: 0,1 r.p.m.;
- velocidade de içamento da lança (72"): 22°/min;
- ângulo de giro: 280°

¹² Válvula de fluxo de material

Figura 15 – Foto do sistema de carregamento de navios

O processo de carregamento tem suporte no Plano de Carga, fornecido pelo comandante do navio a ser carregado. Na elaboração do Plano de Carga, leva-se em consideração a distribuição dos momentos atuantes sobre a estrutura do navio. Isso quer dizer que, quando se coloca carga no porão de um navio, o peso dessa carga força a estrutura da embarcação naquele ponto. Sendo assim, a carga deve ser distribuída nos porões de forma a equilibrar essas forças, mantendo a estrutura do navio em equilíbrio. A distribuição da carga dentro de um porão também deve ser uniforme, de modo a manter o navio com inclinação de 0° em relação ao seu eixo longitudinal. O “Shiploader” tem um bico móvel na descarga da correia da lança, que permite essa distribuição.

A tonelagem real embarcada e a distribuição da carga embarcada nos porões dos navios é checada através de freqüentes leituras de calado e arqueações, cujos resultados servirão como base para possíveis correções no Plano de Carga.

Fazer arqueação de um navio é determinar, através de leituras de calado, fórmulas e tabelas, o volume de água deslocado pelo navio. O cálculo desse volume é baseado no Princípio de Arquimedes: "Todo corpo, parcial ou totalmente submerso em um líquido, sofre um empuxo vertical de baixo para cima, igual ao peso do volume do líquido deslocado por aquele corpo".

Em outras palavras, o peso correspondente ao volume da água deslocada pelo navio é exatamente igual ao peso total do navio. As fórmulas e tabelas fornecem a tonelagem de produto que foi embarcada.

Os navios têm, em sua estrutura externa, escalas de profundidade, dadas em metros. A leitura de calados para determinar a metragem submersa em diferentes partes dos navios é exatamente a leitura dessas escalas.

Durante os embarques, são feitas amostragens em um sistema automático, para acompanhamento da qualidade dos produtos embarcados e para a produção de um composto representativo de cada carregamento, o qual é arquivado por um ano, servindo como material para eventuais análises de cada carregamento. O sistema de amostragem automático e a amostragem propriamente dita seguem as especificações da norma internacional ISO-3.082 .

2.3.5.6 Terminal Marítimo

O porto de Ponta Ubu é um terminal marítimo privado, de uso misto, de propriedade da Samarco Mineração S.A., situado na costa sul do Espírito Santo, no município de Anchieta, a aproximadamente 40 milhas náuticas de Vitória, correspondendo sua localização geográfica a 20° 46' 48" S e 40° 34' 40" W. Consiste num píer de concreto com 313m de comprimento e 22m de largura, com dois berços de atracação, denominados Berço Oeste e Berço Leste. O píer é protegido por um quebra-mar de formato em "L" e um pequeno atracadouro junto ao berço leste, denominado "Píer dos Rebocadores", este com comprimento de 55m, altura de 3,5m e profundidade mínima de 7m, utilizado em operações de carga e descarga de "supply boats" ¹³. O Berço Oeste é utilizado para navios com capacidade de 80 mil até 200 mil toneladas, denominados navios tipo "Capesize". Esse Berço tem comprimento de 308m, largura de 58m, profundidade de 18,7m e calado¹⁴ de 16,8m. O Berço Leste é utilizado para navios com capacidade de até 80 mil toneladas denominados navios tipo "Panamax". Tem comprimento de 240m, largura de 32m, profundidade de 15m e calado de 13m. De 1977 até 1993 a Samarco utilizou o Porto de Ponta Ubu exclusivamente para operações de carregamento de minério de ferro.

¹³ Embarcações que prestam serviços de apoio logístico às operações em mar aberto, neste caso apoio às operações da Petrobras.

¹⁴ Distância entre a superfície da água e a face inferior da quilha da embarcação.

A partir de 1993, com a lei de modernização dos portos, a Samarco iniciou o desenvolvimento de operações de carga e descarga de grânéis sólidos e cargas gerais, soltas ou unitizadas em fardos ou “big-bags”.

Os dois berços são alimentados pelo carregador de navios “Shiploader” que está interligado a uma correia transportadora, que pode ser alimentada, tanto pela recuperadora “Stacker Reclaimer” como pela produção das usinas de pelotização diretamente.

O carvão mineral, utilizado como insumo energético no processo produtivo das pelotas, é importado e recebido no terminal portuário de Ponta Ubu, por meio de uma operação de descarga de carvão. Esse processo de descarga geralmente é independente do processo de carregamento de minério de ferro, porém ocupa o sistema portuário, no que se refere à ocupação de canal e berço, nas operações de atracação e desatracação, mas não o sistema de carregamento. Devido a isso, esse processo de descarga de carvão será considerado na modelagem do sistema produtivo da Samarco.

No porto de Ponta Ubu são desenvolvidas também atividades de apoio logístico para embarcações de empresas contratadas pela Companhia Petrobras de prestação de serviços às plataformas marítimas localizadas nas Bacias de Campos do Espírito Santo e de apoio às atividades “Off Shore”¹⁵ com carregamento de tubos em “Supply Boat” para plataforma de perfuração, também da Petrobras. Essas atividades não interferem nas operações de carregamento de minério de ferro, pois são utilizados intervalos de tempos em que não há navios graneleiros nem programação prevista para o período dessas operações, de modo que estas atividades não prejudiquem as operações da atividade fim, que é a exportação de minério de ferro.

A contratação dos navios pode ser feita pelo “contratante”, neste caso a Samarco, quando o regime de venda é “CFR”¹⁶, ou é nomeado pelo cliente, quando o regime de venda é “FOB”¹⁷. No primeiro caso, a Samarco exige um “layday” de 10

¹⁵ Operações em mar aberto.

¹⁶ Em inglês Cost and Freight, ou Custo e Frete em português. Significa que, no preço de venda do produto, estará incluído o custo do frete.

¹⁷ Em inglês Free On Board, ou Preço sem Frete Incluso (posto a bordo) em português, e significa que no preço de venda não está incluso o custo do frete.

dias do navio. No segundo caso, o “layday” inicial é de 15 dias e passa para 10 dias a um mês da chegada do navio ao porto. Como os contratos de venda são de longo prazo (no mínimo de 1 ano), a previsão de os navios chegarem ao porto é baseada inicialmente em “layday” fixo de 15 dias. Mudanças de navios e de “layday” podem ser feitas desde que não ocorram muito próximas às programações de outros navios e que não venham acarretar um aumento nas multas por sobreestadia.

O cálculo das multas por “demurrage” tem como base os contratos com os clientes e as faixas de carregamento.

O navio, ao chegar próximo ao porto de Ponta Ubu pode fundear¹⁸ em áreas já especificadas pelas administrações dos portos, que, no caso da Samarco, é o Departamento de Porto. Para isso, foi publicado um documento denominado “Resolução”, o qual é de conhecimento da comunidade internacional. Não existem restrições quanto ao número de navios fundeados. A Samarco tenta disciplinar o local ideal desse fundeio para que não seja gasto tempo desnecessariamente no processo de atracação.

Já foram registradas ocasiões em que, devido a fortes ventos¹⁹, a barra é fechada e o navio só atraca no dia seguinte. Navios maiores que 250 metros só atracam no berço oeste durante o dia. Problemas com a maré, seja na atracação seja na desatracação, estão refletidos nos dados dessa atividade.

A data do aceite do navio em geral coincide com a data de chegada, mas pode haver ocorrências de navios com mais de 18 anos que necessitem de inspeção do Departamento de Portos e Costa (DPC), o que impede que o aceite seja dado pela Samarco logo na chegada. Nesse caso, o prejuízo de tempo é do próprio armador, pois o tempo para cálculo das operações e multas só é contado a partir desse aceite.

¹⁸ Ancorar.

¹⁹ O vento nordeste, que é o predominante na região.

A entrada do prático²⁰ a bordo e todas as operações de amarração de rebocadores, trânsito e amarração ao cais até a colocação da escada são consideradas uma única atividade de atracação.

Durante a operação, podem ocorrer paradas devido a problemas mecânicos, elétricos, operacionais, hidráulicos, de instrumentação, vulcanização e controle de qualidade bem como de falta de carga. A taxa de carregamento pode variar devido ao fato de a correia transportadora estar sendo alimentada pelo pátio e ou pela usina. No caso de ser alimentada diretamente pela usina, a taxa poderá cair para 1.500 t/h, quando um valor aceitável de limite é de 7.000 t/h.

Terminada a operação, ocorrem as inspeções “draft-survey”²¹ e o envio de documentos a bordo, possibilitando que o navio desatraque.

Não há atracação de outro navio concomitante com desatracação do anterior, pois somente um prático opera no porto, além de não ser permitido movimentação simultânea de navios no canal de acesso. Sempre que um navio for atracar após a saída de outro, o procedimento é conduzido pelo mesmo prático, pois a Samarco tem em seu porto somente um canal de acesso.

Uma base de dados dos anos de 2004 e 2005 foi disponibilizada para esta pesquisa, contendo informações importantes, tais como nome do navio, número da carga programada, carga real embarcada, data de início e final de “layday”, bandeira, comprador, destino, agência, quantidade de carga, percentual de umidade, tipo de produto, berço de atracação, instante de chegada, instante de atracação, instante de início de carregamento, instante de término de carregamento, instante de desatracação, calado, tempo de operação, tempo de paralisação de carregamento, taxa global de carregamento, taxa efetiva de carregamento e ocupação.

²⁰ Piloto que detém o conhecimento de atracar e desatracar os navios nos portos. A responsabilidade pela manobra de atracação e desatracação deixa de ser do comandante do navio e passa a ser do prático.

²¹ Inspeção da profundidade da quilha de uma embarcação abaixo da linha de água, especialmente quando a embarcação está carregada.

Figura 16 – Foto do terminal marítimo de Ponta Ubu – ES

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta pesquisa tem como base a revisão bibliográfica de artigos, periódicos e anais, e visa buscar exemplos de modelagem de cadeias de suprimentos, como um todo, e na mineração, fazer um levantamento das técnicas utilizadas para modelagem da cadeia de suprimentos e estudar a simulação como método de modelagem da cadeia de suprimentos da indústria de mineração de ferro.

3.1 BREVE HISTÓRICO DA PESQUISA OPERACIONAL (PO)

Com base na revisão dos trabalhos de Carvalho (2003), Gavira (2003) e Prado (1999b), foi construído um breve histórico sobre a PO.

Durante a Segunda Guerra Mundial, diante de grandes dificuldades nas operações militares e na administração de recursos escassos, os exércitos americano e inglês contrataram matemáticos, objetivando a resolução de diversos problemas relacionados à administração dos recursos disponíveis. Esses matemáticos criaram então a PO.

Após a guerra, as novas técnicas passaram a ser adotadas em diversos segmentos da sociedade e aplicadas principalmente na indústria, no comércio e no governo. As equipes que haviam participado das operações de guerra e outros cientistas, que se interessaram pelo assunto, intensificaram as pesquisas. Importantes avanços no estado da arte foram realizados. Ainda em 1947, George Dantzig, usando o método Simplex, resolvia problemas de programação linear.

Em 1951, a PO já estava bastante desenvolvida na Inglaterra e iniciava-se então o processo de desenvolvimento nos Estados Unidos. No final da década de 50, algumas ferramentas de PO, como programação linear, programação dinâmica, teoria das filas e teoria de estoques, já eram bem conhecidas e aplicadas em vários países.

Os avanços nas técnicas de PO intensificaram-se ainda mais com o advento dos computadores digitais, uma vez que a PO lida com problemas complexos que envolvem grande quantidade de cálculos. Resolver tais problemas à mão seria praticamente inviável, ou muito caro e extremamente moroso.

Com o grande crescimento, em tamanho e complexidade, das organizações atuais e a capacidade sempre crescente dos computadores digitais, a PO passou a ser aplicada como apoio à tomada de decisão. Por isso é que a maioria das grandes organizações mantém uma equipe de PO cuidando apenas da solução de problemas, definindo o ponto ótimo de operação e estudando alternativas de desenvolvimentos futuros. A complexidade, quantidade e custo das atividades envolvidas e o enorme potencial de ganhos para as médias e grandes organizações justificam tal medida.

As técnicas de PO continuaram a evoluir. Como exemplos, podem-se citar alguns dos problemas em cuja solução são empregadas tais ferramentas:

- Programação linear: resolução de problemas de mistura (como, por exemplo, a determinação do ritmo de produção de frentes de lavra), alocação e transporte de materiais e pessoal.
- Programação dinâmica: planejamento de gastos com propaganda, esforços de venda e programação de produção.
- Teoria das filas: problemas de tráfego urbano, programação de tráfego aéreo, operação de hospital, programação de produção e outros que envolvam filas.
- Simulação: a simulação abriu um enorme campo de aplicação pelo fato de utilizar ferramentas probabilísticas e conseguir representar as variações que ocorrem em sistemas industriais, como será visto mais adiante.

Em suma, a PO está envolvida com a gestão do processo de tomada de decisão e modelagem de sistemas que se originam da vida real.

3.2 APLICAÇÃO DE MODELAGEM EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS E NA MINERAÇÃO

Segundo Min e Zhou (2002), nenhum modelo pode capturar todos os aspectos dos processos da cadeia de suprimentos. O escopo do modelo deveria direcionar-se para refletir as dimensões do mundo real e não ser tão complicado para resolver. Os autores concluem que, embora os numerosos benefícios dos conceitos da cadeia de suprimentos integrada sejam evidentes, ferramentas analíticas que podem explorar esses benefícios são escassas, o que pode ser atribuído à confusão oriunda dos conceitos de cadeia de suprimentos e à complexidade inerente à modelagem integrada. Afirmam que reinventar as ferramentas analíticas tradicionais não será a resposta para muitas questões gerenciais que envolvem problemas de cadeia de suprimentos do mundo real, questões essas que podem incluir resistência organizacional para a mudança, conflitos interfuncionais e interorganizacionais, planejamento de produção conjunta, previsão de demanda dinâmica, lucro compartilhado, gerenciamento de relacionamento com clientes, informação compartilhada, comunicação em tempo real etc.

Min e Zhou (2002) também fornecem várias diretrizes para o desenvolvimento e implementação bem sucedidos dos modelos de cadeia de suprimentos:

- As aplicações das técnicas de programação matemática tradicional para integração interfuncional devem continuar explorando questões de multi-período.
- Os modelos futuros devem focar novos problemas associados à modelagem “soft”, tais como gerenciamento de relações e resolução de conflitos entre parceiros potenciais da cadeia.
- O modelo de simulação em modelagem de processos logísticos de larga escala deve ser utilizada.
- As pesquisas futuras podem explorar novas metodologias com a “Teoria das Restrições” para simplificar a complexidade da cadeia de suprimentos,.

Umeda (2001) comenta que modelagem por simulação é uma potente ferramenta para suportar a previsão do desempenho de fabricação e do desempenho de sistemas logísticos e que várias aplicações disso são mostradas em ,e.g., Proceedings of Wintre Simulation Conference, SCS, 1998,1999.

Persson e Olhager (2002) apresentaram um estudo de modelagem para um caso real na indústria móvel das comunicações, com os seguintes objetivos; primeiro, avaliar estruturas de cadeias de suprimentos alternativas com relação à qualidade, “lead-times” e custos, como parâmetros-chave de desempenho, no intuito de, principalmente, determinar as formas das curvas, indicando a natureza do impacto dos níveis de qualidade e “lead times” sobre os custos; segundo aumentar o entendimento das inter-relações entre estes e outros parâmetros relevantes para o desenho da estrutura da cadeia de suprimentos.

Sen, Pokharel e YuLei (2004) desenvolveram um modelo matemático para ajudar as empresas a melhorar as estratégias de suas cadeias de suprimentos. O modelo está baseado na necessidade de integração por duas estratégias de posicionamento da cadeia de suprimentos, isto é, “build-to-stock” e “build-to-order”. O efeito do pequeno ciclo de vida do produto, as mudanças de preço e o nível de serviço ao cliente são também estimados no modelo, e isso deve estar o mais perto do ambiente empresarial atual possível.

Segundo Maruta, Ikkai e Komoda (1999), uma cadeia de suprimentos consiste de muitos fatores os quais têm complicados relacionamentos, de forma que existem dificuldades em analisar uma cadeia de suprimentos como um todo. Primeiramente, muitos fatores incertos são incluídos, como, por exemplo, demanda dos clientes no mercado e paradas de máquinas nas fábricas; segundo, cada companhia tem sua própria estratégia de produção ou plano de vendas; terceiro, uma cadeia de suprimentos é uma complexidade em larga escala e, por último, não existe critério absoluto que indique o desempenho da cadeia de suprimentos. Maruta, Ikkai e Komoda (1999) propõem também uma modelagem pela qual é possível expressar uma complexa cadeia de suprimentos. Eles dividem a modelagem em cinco modelos parciais como se segue:

- “Bill of Material Model” – Define a estrutura da lista de materiais, incluindo a família de produtos;

- “Physical Model” – representa restrições físicas, fatores de incerteza e estoques que cada companhia tem;
- “Information Model” – representa fluxos de informações e correspondentes fatores de incerteza necessários para operar atividades típicas de uma cadeia de suprimentos entre unidades organizacionais nas companhias;
- “Demand Model” – define demandas dos clientes;
- “Decision Making Model” – também expresso em forma executável, gera comandos ou parâmetro de cálculos necessários para a tomada de decisão que surgem.

Lendermann et al. (2003) construíram um modelo para a cadeia de suprimentos da indústria de semicondutores, que consiste de duas unidades fabris, uma instalação de montagem e testes, um centro de distribuição, um armazém, um módulo de planejamento da cadeia de suprimentos, um provedor logístico e clientes.

Lee e Kim (2002) consideram que modelos analíticos têm sido desenvolvidos para resolver problemas integrados de produção e distribuição no gerenciamento da cadeia de suprimento, e que uma das maiores restrições nesses modelos, principalmente o tempo de operação, tem sido conhecida ou desconsiderada. Entretanto consideram também que, em sistemas reais, devido aos vários tipos de fatores de incerteza, tais como atrasos inesperados, filas, paradas de equipamentos, o tempo de operação em modelos analíticos não pode representar corretamente o comportamento dinâmico do tempo real de operação. Para resolver esse problema, Lee e Kim (2002) propõem uma abordagem híbrida, combinando o modelo analítico e o de simulação. No modelo analítico, o tempo de operação é considerado como um fator dinâmico, que é ajustado pelos resultados do modelo de simulação independentemente desenvolvido, o qual inclui características gerais de distribuição e produção. Eles afirmam que, pela natureza estocástica da interação do procedimento híbrido, obtêm-se com mais realidade planos ótimos de produção e distribuição para o sistema integrado de cadeia de suprimentos.

Minegishi e Thiel (2000) modelaram a cadeia de suprimentos da indústria alimentícia fresca na França. Segundo Minegishi e Thiel (2000), esse setor é bastante significativo no setor industrial francês, em que os principais produtos comercializados são a carne, o leite e seus derivados. Comparado com outras

indústrias, esse setor apresenta algumas particularidades, como as características das matérias-primas e dos produtos acabados, no que diz respeito a restrições de prazos finais de consumo e de duração de armazenamento limitada, bem como as embalagens que têm que contar com legislação e estilos do mercado consumidor. Por estas razões, essa indústria tem que organizar os seus sistemas de produção de acordo com a filosofia Just in Time (JIT), o que a torna sujeita à pressão crescente de trabalhar por pedido, fazendo com que essa cadeia fique mais vulnerável aos riscos internos e externos.

Chan et al. (2001) desenvolveram um modelo para investigar redes logísticas, fornecendo uma visão holística da cadeia de suprimentos de modo a prevenir subotimização. O foco principal foi dado em melhorar o serviço de atendimento ao cliente através da liberação de ordens mais efetiva na cadeia de suprimentos. Um aspecto moderno neste trabalho é a aplicação de técnicas de simulação e teoria de liberação de ordem que foi desenvolvida para avaliar linhas industriais no gerenciamento da cadeia de suprimentos.

Hameri e Paatela (1995) descreveram um sistema de planejamento logístico estratégico com uma abordagem multidimensional para facilitar às empresas tomarem decisões assertivas nas operações logísticas. Concluíram que, provendo gerenciamento com múltiplas abordagens para entender a rede logística existente e habilitando o estudo de soluções alternativas, o modelo gera uma variedade de resultados para melhorar o desempenho logístico.

Foi objetivado neste item a revisão pesquisar aplicação de modelagem em cadeias de suprimentos, incluindo a cadeia de suprimentos da mineração. Dentre os autores pesquisados não foi encontrado estudo sobre cadeia de suprimentos em mineração.

3.3 TÉCNICAS UTILIZADAS PELOS AUTORES REVISADOS PARA A MODELAGEM DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Umeda (2001) desenvolveu um sistema de simulação que representa o comportamento dos processos de negócio e transações de materiais da cadeia de suprimentos de um sistema discreto de manufatura com montagem final, fábrica do produto principal, fornecedores, armazenagem de produtos, logística de terceira parte, distribuidores, varejistas e sede do produtor principal.

Persson e Olhager (2002) desenvolveram um modelo de simulação no qual utilizaram o “software” Taylor II para simulação de eventos discretos. Os experimentos foram conduzidos com uma conexão ao Microsoft Excel, mediante o modo “batch run” no Taylor II.

Sen, Pokharel e YuLei (2004) construíram modelos de simulação baseados no modelo matemático para ajudar as empresas a melhorar suas estratégias de cadeia de suprimentos.

Maruta, Ikkai e Komoda (1999) projetaram uma ferramenta de simulação para uma cadeia de suprimentos, usando cinco modelos parciais para a execução da simulação.

Lendermann et al. (2003) integraram um grupo independente de modelos de simulação com processo Planning and Scheduling Systems (APS) aplicados na indústria de semicondutores.

O modelo de simulação desenvolvido por Lee e Kim (2002) utilizou a ferramenta de simulação em C++ chamada ARENA.

Minegishi e Thiel (2000) utilizaram, no modelo de simulação, princípios de sistemas dinâmicos e cibernética.

Chan et al. (2001) construíram o modelo de simulação, usando o pacote de simulação comercial “Simprocess”.

Observa-se que dentre as técnicas utilizadas pelos autores para modelagem da cadeia de suprimentos, em sua grande maioria foi utilizada a técnica de simulação.

3.4 REVISÃO SOBRE TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO

Segundo Saliby (1989), a simulação surgiu a partir da evolução das técnicas de PO. Precisamente, ela teve sua origem como uma extensão do método de Monte Carlo, que foi proposto por Von Neumann e Ulam, em 1940, durante a Segunda Guerra Mundial, em pesquisas realizadas no laboratório de Los Alamos, para um projeto chamado Manhattan, cujo objetivo era a invenção da bomba atômica. Por razões de sigilo, o código “Monte Carlo” foi adotado.

De acordo com Freitas (2001), em 1949 essa técnica foi divulgada em um artigo científico intitulado “The Monte Carlo Method”. Na aplicação da técnica, os dados são gerados por meio de gerador de números aleatórios (GNA) e uma distribuição de frequências da variável de interesse. Esses são dois pontos fundamentais na aplicação dessa técnica e na sua posterior aplicação em programas de simulação.

Segundo o mesmo autor, um GNA é um programa computacional capaz de gerar números aleatórios independentes e uniformemente distribuídos, isto é, todos com a mesma probabilidade de ocorrência, no intervalo de 0 a 1.

Saliby (1989) cita Marshall que, em 1956, se referiu ao Método de Monte Carlo como “a idéia intrigante, segundo a qual podemos utilizar métodos de amostragem aleatória para a solução de problemas matemáticos de natureza determinística”.

Após a euforia inicial que caracteriza toda descoberta, o método, que se baseava na solução de integrais múltiplas através de amostragem aleatória, caiu em desuso por causa da grande quantidade de trabalho computacional e da baixa precisão dos resultados.

Embora o método de Monte Carlo tenha surgido na década de 40, a amostragem aleatória já era utilizada pelos estatísticos. Entre 1925 e 1935, W. S.

Gosset, também conhecido por Student, deduziu, a partir de observações empíricas, a expressão da distribuição amostral do coeficiente de correlação.

3.4.1 Conceitos de Simulação Computacional

A técnica de simulação computacional é conceituada de diversas maneiras por diferentes autores, porém todos convergem para o fato de que a simulação é útil na resolução de problemas muito complexos nas organizações. A seguir, são mostrados alguns desses conceitos.

Segundo Botter et al. (2004), a escolha da simulação como método, em primeiro lugar, tem como referência o trabalho desenvolvido por Chowdhury (1989) o qual propõe a simulação como ferramenta ideal para estudar sistemas grandes, complexos, em que ocorrem interações entre atividades (ou entre modais) que dificultam a modelagem analítica.

Schriber (1974) define simulação, conforme pode ser visto no clássico “Simulation Using GPSS”, da seguinte maneira: “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo”. Nessa definição, Schriber não especifica se o modelo tem necessariamente que ser computacional. O motivo é que, na época, ainda era comum a utilização de modelos analógicos e físicos para analisar o comportamento de sistemas.

Atualmente, simulação é quase sinônimo de simulação computacional digital. Shannon (1975) dá a seguinte definição para esse tipo de modelo: “um modelo computacional é um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que ele representa”.

Szymankiewci, Mcdonald e Turner (1988) conceituam simulação da seguinte maneira: “simulação é uma das mais poderosas técnicas disponíveis para a solução de problemas. Ela consiste na construção de um modelo matemático, correspondente ao sistema real, que pode ser experimentado e avaliado, quando submetido a diversos cenários de ação”.

Pegden et al. (1995) definem simulação como “o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Hollocks (1992) dá a seguinte definição: “simulação é uma técnica de Pesquisa Operacional que envolve a criação de um programa computacional que represente alguma parte do mundo real de forma que experimentos no modelo são uma antevisão do que acontecerá na realidade”.

Segundo Prado (1999a), “simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema, usando um computador digital”.

Apesar da existência de linguagens de simulação com propósito definido e pacotes de sistemas para facilitar a tarefa do usuário, algumas simulações podem requerer longos programas de computador com certa complexidade. Daí, em determinadas situações, produzir resultados úteis de uma simulação pode ser um processo moroso. Diante disso, Pidd (1998) defende a idéia de que simulação em computador deveria ser considerada como um último recurso, para ser usado se todos os outros métodos falharem. Contudo, há casos em que o emprego da simulação pode ser a única maneira de abordar determinados problemas, em particular, aqueles que envolvam variáveis aleatórias.

Para melhor aplicar a técnica de simulação é necessário, primeiramente, classificar e entender os sistemas do mundo real. Tais sistemas podem ser classificados como

- determinísticos: aqueles cujo comportamento pode ser totalmente predito; podem-se citar, por exemplo, os ciclos de um robô em uma linha de montagem;
- estocásticos: aqueles cujos comportamentos podem ser preditos somente em termos de distribuições de probabilidades; também são chamados probabilísticos.

Quanto ao comportamento dos sistemas em relação ao tempo, eles podem ser classificados como

- estáticos: aqueles que não se alteram com o tempo; por exemplo, simulação geoestatística, aplicações do método de Monte Carlo no cálculo de integrais;
- dinâmicos: aqueles que variam ao longo do tempo; normalmente, para esses modelos, é criada uma variável chamada relógio da simulação, cuja função é controlar a sequência de eventos de acordo com o avanço do tempo, por exemplo, simulação de atendimento em uma central telefônica, simulação do fluxo de clientes nos caixas de um supermercado.

Um sistema dinâmico pode ainda ser classificado como discreto ou contínuo, de acordo com o seu comportamento em relação à passagem do tempo. Um exemplo de simulação contínua, talvez a primeira, são os chamados modelos dinâmicos desenvolvidos por Forrester (1971).

A seguir, são mostradas as definições de sistemas contínuos e discretos, segundo Cardoso et al. (1994).

Sistemas contínuos são aqueles nos quais as variáveis de estado mudam continuamente no tempo. Grosso modo, pode-se dizer que, a cada fração de segundo, elas assumem novos valores. A Figura 17 mostra uma representação esquemática de um sistema contínuo.

Figura 17 – Trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC)

Como visto na Figura 17, a trajetória de um SDVC está constantemente mudando com o estado, e é capaz de representar o comportamento do sistema, em um instante qualquer, a partir de um instante inicial.

Sistemas discretos são sistemas nos quais as variáveis de estado mudam só num conjunto discreto de pontos no tempo. Por exemplo: O banco é um exemplo de sistema discreto, uma vez que a variável de estado, o número de clientes, muda só

quando um cliente chega, ou quando o serviço prestado a um cliente é concluído (Figura 18).

Figura 18 – Trajetória de um sistema dinâmico de eventos discretos (SDED).

Para que um sistema contínuo possa ser estudado, é necessário que ele seja transformado em um sistema discreto, com o objetivo de adequá-lo aos “softwares” de simulação existentes hoje. Após essa transformação, cria-se um novo tipo de sistema dinâmico, que é o sistema discretizado.

Sistemas discretizados são sistemas estudados somente em instantes precisos. Trata-se, portanto, de sistemas contínuos observados em instantes discretos (sistemas amostrados). As variáveis de estado evoluem de maneira contínua, sem mudança brusca de comportamento, mas é somente a instantes discretos que há um interesse no seu valor. A Figura 19 mostra um exemplo de sistema contínuo discretizado.

Figura 19 – Exemplo de um sistema contínuo discretizado.

Apenas como ilustração, visando esclarecer a diferença entre os três tipos de sistemas dinâmicos, apresenta-se o seguinte exemplo: o enchimento de uma caixa com água, que pode ser realizado de duas maneiras diferentes. A partir do sistema podem-se imaginar três modelos distintos:

- usando-se uma mangueira, tem-se um sistema contínuo, pois a variável de estado, volume de água dentro da caixa, estará mudando de valor continuamente e assumindo um novo valor a cada instante;
- usando-se um balde de 5 litros, tem-se um sistema discreto, pois a variável, volume de água dentro da caixa, muda de valor somente em pontos discretos do tempo, de 5 em 5 litros, ou seja, o volume permanece inalterado enquanto se busca outro balde com água;
- usando-se a mesma mangueira da alternativa 1, sabendo-se a sua vazão em litros por minuto e estabelecendo-se os pontos, no tempo, em que o volume dentro da caixa aumenta, por exemplo, de 1 litro, tem-se um sistema discretizado.

Freitas (2001) classifica ainda os sistemas em terminais e não-terminais. Os terminais apresentam condições iniciais fixas (condições estas que o sistema volta a assumir ao início de cada rodada de simulação) e um evento que determina o fim natural para o processo de simulação. Como exemplos de sistemas terminais podem-se citar serviços, tais como bancos, restaurantes, lojas comerciais. Os sistemas classificados como não-terminais não possuem condições iniciais fixas, nem um evento que determine o fim do processo de simulação. São exemplos de sistemas não-terminais os hospitais, os sistemas de comunicação e os sistemas que operam 24 horas por dia.

Segundo Pidd (1998), as variáveis que são incluídas em um modelo de simulação podem ter seus valores mudados de quatro maneiras:

- continuamente, a qualquer ponto do tempo, como ocorre, por exemplo em refinaria de petróleo, em usina de tratamento de minérios;
- continuamente, mas somente a pontos discretos do tempo, como, por exemplo, com operação de uma esteira transportadora de minério

automática, de funcionamento intermitente, comandada por alguma variável do sistema;

- discretamente, a qualquer ponto do tempo, como, por exemplo, a chegada de espectadores em um teatro;
- discretamente, mas somente a pontos discretos do tempo, como, por exemplo, a simulação financeira.

É mais comum, e também mais fácil, a simulação de um sistema discreto, pois os simuladores existentes hoje foram desenvolvidos para esse tipo de sistema. Para simular um sistema contínuo é necessária a discretização do mesmo no modelo. Há autores que consideram inviável a simulação de um sistema totalmente contínuo.

Carvalho (2003) cita Arcaute et al. (2001), “a simulação de um sistema contínuo, usando um simulador a eventos discretos, é possível, porém simplificações se aplicam ao modelo, especialmente no manuseio de recursos e entidades. Os resultados são limitados se comparados aos de um sistema discreto”.

3.4.2 Vantagens e Desvantagens da Simulação

Há diversidade de opinião de autores a respeito da simulação. Para alguns, ela é sempre possível, e para outros, em se tratando de processo contínuo, ela é impossível ou, no mínimo, limitada. A seguir, são mostradas algumas vantagens e desvantagens da simulação.

Pegden et al. (1995) apontam as seguintes vantagens da simulação:

- uma vez criado, um modelo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos e políticas propostas;
- a metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação de um sistema proposto, mesmo que os dados de entrada estejam, ainda, na forma de “esquemas” ou rascunhos;

- a simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que os métodos analíticos;
- enquanto modelos analíticos requerem um número muito grande de simplificações para torná-los, matematicamente, tratáveis e analisam um número limitado de medidas de desempenho, a simulação não necessita de tantas simplificações para analisar qualquer medida concebível;
- uma vez que os modelos de simulação podem ser quase tão detalhados quanto os sistemas reais, novas políticas e procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação, e outros podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado;
- hipóteses sobre como e por que certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação;
- o tempo pode ser controlado, pode ser comprimido ou expandido, permitindo reproduzir os fenômenos de maneira acelerada ou lenta, para que se possa melhor estudá-los;
- pode-se compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação ao desempenho e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema;
- a identificação de “gargalos”, preocupação maior no gerenciamento operacional de inúmeros sistemas, tais como fluxos de materiais, de informações e de produtos, pode ser obtida de forma facilitada, principalmente com a ajuda visual;
- um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira como que todos pensam que ele opera;
- novas situações sobre as quais se tenha pouco conhecimento e experiência podem ser tratadas, de tal forma que se possa ter, teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos. A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: “o que aconteceria se...?”

Cassel (1996) cita uma pesquisa realizada por Hollocks (1992), de acordo com a qual 65 empresas do Reino Unido, que utilizavam ou já haviam utilizado a

simulação, informaram sobre os principais benefícios obtidos com o uso dessa técnica. Os benefícios mais citados são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Benefícios da simulação mais citados

Benefícios	% das Empresas
Redução de risco	80
Melhor entendimento	75
Redução dos custos operacionais	72
Redução do tempo em processo	72
Mudanças mais rápidas da planta	52
Redução dos custos de capital	48

Fonte: (Hollocks, 1992).

Segundo Cassel (1996), aplicações da simulação já foram realizadas com sucesso em várias empresas, e as cifras poupadas por elas foram muito altas, por exemplo, Northern Research and Engineering Corp., US\$750.000,00, Exxon, US\$ 1,4 milhões, Draw Tite Inc., US\$ 80.000,00.

De acordo com diversas pesquisas, verificou-se que a simulação é uma das técnicas quantitativas mais empregadas. Segundo Saliby (1989), os motivos de tamanha aplicabilidade são os seguintes:

- Maior disponibilidade de recursos computacionais: a cada ano ocorre alguma novidade envolvendo tecnologias de informática voltadas para simulação, o que contribui sobremaneira para a sua crescente aplicação em diversos segmentos sociais.
- Modelos mais realistas: a simulação não nos obriga a enquadrar um problema em determinado molde, como ocorre em programação linear. Assim, em lugar de soluções exatas para problemas aproximados, tem-se soluções aproximadas para problemas reais.
- Soluções rápidas: no ambiente dinâmico e conturbado de hoje, principalmente no caso do Brasil, soluções rápidas são mais úteis que morosas soluções exatas.

- Processo de modelagem evolutivo: um modelo de simulação normalmente não é estanque, permitindo ajustes e aperfeiçoamentos que se tornam necessários com a evolução do sistema.
- Facilidade de comunicação: é muito mais fácil entender uma simulação do que um conjunto de complicadas equações matemáticas. Atualmente, já existe a simulação visual, que mostra em um vídeo uma imagem animada do problema.
- Problemas mal-estruturados: a simulação é uma das poucas ferramentas para o estudo desse tipo de problema. Mas deve-se tomar cuidado com a solução obtida.

Em relação aos problemas mal-estruturados, Simon (1969) afirma que “uma simulação nunca será melhor que suas próprias premissas”. As premissas às quais ele se refere constituem a definição do problema. Portanto, é de suma importância que o usuário conheça o sistema e saiba definir com precisão o problema e os objetivos da simulação.

Cassel (1996) enumera as seguintes desvantagens para a simulação:

- devido à sua natureza estocástica, os modelos de simulação devem ser rodados várias vezes antes que se possa prever o desempenho do sistema;
- normalmente os modelos de simulação são caros e consomem muito tempo para serem desenvolvidos e analisados;
- a simulação é muito dependente da validade do modelo desenvolvido;
- a simulação não fornece o resultado ótimo para o problema, ela só testa as alternativas dadas pelo usuário.

3.4.3 Método de Condução de Simulação Computacional

Law e McComas (1992) mostram oito elementos fundamentais para o sucesso de um projeto de simulação. Eles estão divididos em três classes: a classe técnica, a classe gerencial e a classe de precisão dos dados.

Classe Técnica:

- conhecer a metodologia de simulação, os modelos estocásticos de pesquisa operacional e a teoria das probabilidades e estatística;
- modelar a aleatoriedade do sistema de maneira razoável;
- escolher o “software” de simulação adequado e utilizá-lo corretamente;
- usar procedimentos estatísticos apropriados para interpretar os dados de entrada e saída da simulação.

Classe Gerencial:

- formular corretamente o problema;
- empregar técnicas de gerenciamento de projetos.

Classe de Precisão dos Dados:

- obter boa informação sobre os procedimentos de operacionalização do sistema e na lógica de controle;
- estabelecer a validade e a credibilidade do modelo.

Levando-se em consideração esses elementos, deve-se seguir um método no estudo de simulação. Law e Kelton (1991) desenvolveram uma estrutura para gerenciar as diferentes etapas do trabalho. A Figura 20 ilustra a seqüência de etapas a serem consideradas. Em seguida, uma breve explicação de cada etapa.

Figura 20 – Passos num estudo de simulação.

a) Formulação do problema e planejamento do estudo – Todo estudo deve começar com o estabelecimento claro de seu objetivo principal e dos pontos específicos a serem verificados. Nesta etapa também se definem as alternativas a serem testadas e os pressupostos a serem adotados.

b) Coleta de dados e formulação do modelo conceitual – As informações e os dados de interesse devem ser coletados e usados para esclarecer os procedimentos operacionais e definir as distribuições de probabilidades para as variáveis utilizadas no modelo.

c) Validade – É necessário que o usuário interaja com as pessoas que conhecem o processo intimamente para verificar se seu modelo é válido em termos conceituais e nos dados coletados.

d) Construção de um programa computacional e verificação – Nessa etapa deve-se escolher um software de simulação e transformar o modelo teórico em um programa computacional. A escolha do software dependerá das características que se deseja dele. Depois de o programa estar pronto, deve-se verificá-lo, mediante técnicas de verificação, para checar se há erros de lógica e sintaxe.

e) Replicação piloto – As rodadas piloto são necessárias para validar o programa na fase seguinte.

f) Validação – A validação é adotada para atestar se as rodadas piloto têm como saída informações que refletem o sistema real.

g) Planejamento do experimento – Como a simulação tem uma natureza estocástica, ela apenas estima o comportamento do sistema para determinados parâmetros. Por isso é necessário planejar o experimento definitivo. É importante salientar a importância da definição do período de tempo para que os parâmetros estejam em condições apropriadas para a simulação daquele instante. Esse intervalo de tempo é conhecido como aquecimento, e seus resultados são desprezados.

h) Fazer rodadas produtivas – Considerando-se os parâmetros estabelecidos na etapa anterior, fazem-se as rodadas para levantamento dos resultados dos cenários escolhidos.

i) Análise dos dados de saída – Técnicas estatísticas devem ser utilizadas para analisar os dados de saída. Nos casos de várias alternativas, escolhe-se a melhor opção.

j) Documentação, apresentação e implementação – Como os projetos de simulação quase sempre são usados novamente, é necessário documentar todo o projeto, a fim de poder utilizá-lo no futuro. Para que o estudo seja um sucesso, é preciso que o mesmo seja apresentado e implementado.

3.4.4 Principais Elementos de um Modelo de Simulação

Segundo Kelton et al. (2002), os principais elementos que fazem parte de um modelo de simulação estão descritos a seguir.

a) Modelo

Modelo é a representação de um sistema. Existem várias formas de se classificarem modelos. Os modelos são tipificados como icônicos (representação fiel do sistema, geralmente em escala diferente da real), analógicos (as propriedades do sistema são representadas por outras equivalentes) e simbólicos (as propriedades do sistema são representadas por símbolos).

Outro tipo de classificação distingue os modelos em estáticos e dinâmicos. Os modelos estáticos não consideram explicitamente a variável tempo, possuem relações determinísticas e são, normalmente, tratados por técnicas analíticas. Os modelos dinâmicos tratam com interações variáveis no tempo (o estudo do sistema em um certo instante interfere no estado do sistema no instante seguinte).

Também existe uma caracterização importante para os modelos, que diz respeito às situações discreta e contínua. Um modelo discreto sofre alterações repentinas no tempo. As mudanças no estado do sistema são expressas com base no estado do sistema no início do período. As mudanças durante um intervalo de tempo são calculadas e é deduzido um novo estado do sistema para o final desse período e para o início do seguinte. Um modelo contínuo sofre constantes e suaves alterações no tempo. Uma situação bastante comum é tratar um sistema contínuo como uma sequência de pequenas alterações discretas no tempo.

Por fim, também são diferenciados os modelos determinísticos dos estocásticos. Os modelos determinísticos não tratam variáveis randômicas, e as características operacionais envolvem relações exatas. Quando pelo menos uma variável do sistema se comporta de forma probabilística, diz-se tratar de um modelo estocástico.

b) Entidade

Também chamada de transação, a entidade é um elemento essencial para o modelo. Cada tipo de entidade (pessoa ou objeto) possui um ciclo de vida, no qual estados ativos e passivos se alternam. Uma entidade pode ser classificada como temporária ou permanente. As entidades temporárias entram no sistema, percorrem o seu ciclo de vida e o abandonam. As entidades permanentes executam a sua função sem abandonar o sistema. A chegada de entidades ao sistema é gerada por um procedimento externo, ou por uma necessidade imposta pelo estado do sistema. Na visão da simulação discreta convencional, as entidades temporárias são criadas primeiro. Elas participam de atividades e requisitam recursos. Uma vez terminada a atividade, a entidade é removida. Trata-se de uma transação passiva, onde nenhum mecanismo considerado “inteligente” é assumido ou modelado.

c) Atributo

Atributos são as propriedades características de cada entidade. O uso de variáveis e atributos permite uma maior personalização do modelo, em termos tanto de estatística como de lógica. Variáveis e atributos são ambos meios de armazenamento de valores, com apenas uma diferença fundamental: variáveis guardam valores que ficam disponíveis para todo o modelo, e atributos guardam valores individuais para cada entidade. A Figura 21 mostra um diagrama que representa graficamente a área de abrangência de variáveis e atributos em uma simulação.

Figura 21 – Ilustração do comportamento de variáveis e atributos em um modelo de simulação.

Portanto, cada entidade tem os seus próprios valores de atributo, enquanto o valor das variáveis é o mesmo para todo o modelo e para todas as entidades.

d) Atividade

Atividade é a designação dada a uma seqüência de procedimentos que causa mudança no sistema. A atividade corresponde a um estado ativo, comum a uma ou mais entidades (ou classe de entidades). A duração de uma atividade pode ser determinística ou estocástica. Assume-se que uma atividade é indivisível: uma vez iniciada, ela não mais é interrompida. Segundo Reddy (1995), as atividades podem ser físicas ou cognitivas. As atividades físicas são as formas convencionais de atividades, em torno das quais a simulação tem sido desenvolvida. As atividades cognitivas são formas de tomada de decisão racional e inteligente. Como as atividades físicas, também as atividades cognitivas tem tempo finito de duração, que pode ser randômico ou dependente das informações e/ou decisões do sistema.

e) Evento

As atividades são iniciadas e terminadas por eventos. Eventos são instantes no tempo, ao passo que atividades tem durações no tempo. Evento é o ponto no tempo no qual acontece alguma mudança no sistema modelado. O processamento de um evento é realizado por uma rotina. Normalmente, a ocorrência de um evento dispara a ocorrência de outro(s) evento(s). Da mesma forma que as atividades, os eventos podem ser físicos ou cognitivos. As rotinas associadas aos eventos físicos são análogas às rotinas dos eventos tradicionais da simulação discreta. Os eventos cognitivos envolvem processamento de conhecimento análogo ao procedimento cognitivo desempenhado pelo tomador de decisão. Rotinas de eventos cognitivos vão conter conhecimentos, representados por regras de produção e heurísticas, que serão processados quando uma decisão precisar ser tomada (Reddy, 1995).

f) Acumuladores

Acumuladores são variáveis que permitem medir o desempenho do sistema. Têm esse nome porque vão acumulando valores no tempo, para depois receberem tratamento de análise e gerar as estatísticas da simulação.

g) Relógio

Relógio é a variável que marca o tempo de simulação do sistema. Por exemplo, o modelo tem um tempo real de execução de dez horas, mas o relógio marcará o tempo do período simulado.

h) Lista de Eventos Futuros

A lista de eventos futuros é a estrutura de dados que armazena os eventos previstos para ocorrer no futuro. Esses eventos são armazenados por ordem cronológica de ocorrência.

i) Cenário

O cenário é uma experimentação estruturada, com um conjunto de configurações de dados e de entidades do sistema. Podem-se construir vários cenários para testar várias hipóteses.

j) Aquecimento

O aquecimento é o período inicial da simulação, no qual todas as estatísticas geradas são expurgadas pelo simulador, uma vez que, devido a uma variação excessiva, elas são inadequadas à análise. O tempo de aquecimento é dimensionado para terminar no momento em que a simulação inicia a fase de estabilidade.

k) Replicação

Replicação é a execução do modelo no computador. Representa o período de tempo de início e fim de um ciclo de eventos da simulação. Não inclui o período de aquecimento.

l) Rodada ou corrida

Rodada ou corrida é o período compreendido entre o início e o fim da simulação. Envolve o período de aquecimento e todas as replicações.

m) Variáveis de Estado

Variáveis de estado é o conjunto de variáveis que identifica o estado do sistema em um determinado instante de tempo.

n) Recurso

O recurso é uma entidade do modelo (equipamento ou pessoa) que serve entidades dinâmicas. Esse atendimento pode ser feito simultaneamente por várias entidades. Uma entidade pode solicitar parte da capacidade ou a capacidade total do recurso.

o) Filas

As filas são os estados passivos pelos quais as entidades passam. Constituem locais de espera onde as entidades dinâmicas esperam sua vez de seguir através do sistema. As filas podem ser chamadas de áreas de espera ou pulmões (“buffers”). Depois de dar entrada na fila, a entidade é retirada, seguindo algum tipo de critério, por exemplo, “first in first out” (FIFO) – o primeiro a entrar é o primeiro a sair, “last in first out” (LIFO) – o último a entrar é o primeiro a sair, “high value first” (HVF) – o maior valor primeiro, “lower value first” (LVF) – o menor valor primeiro, ou um critério préestabelecido.

3.4.5 O Software ARENA

O ARENA é um sistema de simulação para eventos discretos, que analisa o cenário operacional, focando os processos existentes no sistema em estudo. O ARENA usa uma interface gráfica para o usuário – “Graphical User Interface”(GUI) – que automatiza o processo através do uso do “mouse”, reduzindo a necessidade do teclado do microcomputador.

O ARENA foi desenvolvido pela empresa Systems Modeling, em 1993, como sucessor do SIMAN e CINEMA, que foram desenvolvidos em 1982 e 1984, respectivamente. O SIMAN é uma evolução do GPSS, lançado pela IBM em 1961. O CINEMA foi o primeiro “software” de animação para PC.

O ARENA é uma aplicação do Microsoft Windows, e todas as características e operações usuais estão dentro do padrão Windows. Por esse motivo, ele é

totalmente compatível com outros “softwares” Windows, como processadores Word, planilhas e pacotes CAD.

O ARENA é, ao mesmo tempo, uma linguagem de simulação e um ambiente de trabalho e experimentação, que podem ser usados para testar o modelo e fazer a apresentação de seus resultados, por meio de avançados recursos de animação.

Compondo o mesmo pacote do ARENA, o “software” Input Analyzer realiza o tratamento estatístico dos dados de entrada, adequando-os às seguintes distribuições de probabilidades: Beta, Empírica Contínua, Empírica Discreta, Erlang, Exponencial, Gamma, Johnson, Lognormal, Normal, Poisson, Triangular, Uniforme e Weibull.

O processo de modelagem (construção do modelo) nada mais é do que o ato de “explicar” ao ARENA como funciona o sistema. Essa “explicação” é feita por uma linguagem de fácil entendimento, semelhante a um fluxograma.

O fluxograma é constituído de formas geométricas que representam procedimentos, decisões a serem tomadas, início e término de processos, entre outros. No ARENA, essas formas geométricas são substituídas pelos “templates”, que são os campos que reúnem os módulos básicos e avançados usados para a construção do fluxo de processo. A construção do modelo dentro do ARENA é feita através dos elementos disponibilizados nos “templates”.

Ao rodar a simulação, o ARENA coleta informações estatísticas padrões sobre os vários elementos do modelo, como filas (tempo de espera na fila, quantidade na fila, etc.), recursos (utilização, número de paradas, etc.) e outros. O usuário também tem a possibilidade de criar sua própria coleta de dados. Os dados coletados constituem um relatório ao término da simulação.

3.5 APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Dentre as vantagens da simulação, destacam-se a flexibilidade e facilidade de emprego e utilização. Segundo Menezes e Rodrigues (1995), “a flexibilidade

envolvida na modelagem é a característica talvez mais importante de um pacote de simulação”.

A simulação abriu um enorme campo de aplicação pelo fato de utilizar ferramentas probabilísticas e conseguir representar as variações que ocorrem em sistemas industriais. Menezes e Rodrigues (1995) afirmam que existem duas grandes classes de softwares de simulação: a linguagem de simulação gráfica e os simuladores.

Na linguagem de simulação, um modelo é desenvolvido por meio de um programa que usa modelos construtivos da linguagem, como entidades, atributos, recursos e filas. A grande vantagem das linguagens é a capacidade de modelar quase todos os tipos de sistemas de manufatura. As suas desvantagens, se comparadas com as de alguns simuladores, são a necessidade de um bom programador e possivelmente o grande período de tempo gasto para codificar e depurar o programa, cuja complexidade é proporcional à complexidade do sistema de manufatura. Exemplos de linguagem de simulação: GPSS, MODSIM II, SIMAN/Cinema IV, SLAMSYSTEM.

Os sistemas a serem simulados não precisam ser programados, eles são selecionados escolhendo-se os itens no menu. A grande vantagem dos simuladores de manufatura é que o tempo de programação necessário é bem menor que o tempo necessário para uma linguagem de simulação. Outra vantagem é a maior facilidade de utilização por parte de um leigo em programação. A maior desvantagem dos simuladores básicos é a sua limitação em modelar outras configurações de manufaturas. Exemplos de simuladores: FACTOR/AIM, Micro-Saint, ProModelPC, WITNESS, SIMFACTORY.

3.5.1 Aplicações da Simulação na Mineração

Sturgul (1999) levantou em uma seqüência cronológica as aplicações mais relevantes de simulação na mineração, listadas a seguir:

- Em 1961, Rist descreveu um modelo para determinar o número ótimo de trens no transporte de uma mina subterrânea, usando técnicas de Monte Carlo.
- Em 1964, o modelo de Rist foi ampliado por Harvey.
- Em 1965, Sanford desenvolveu uma dissertação de mestrado sobre simulação de correias transportadoras.
- Em 1965, Calder e Waring apresentaram uma discussão sobre um pacote computacional de simulação desenvolvido para a mina de Carol no Canadá.
- Em 1967, O'Neil e Manula usaram um modelo de simulação para manuseio de material em uma mina a céu aberto.
- Em 1967, Manula e Venkataraman simularam um sistema de carga e transporte em uma mina a céu aberto.
- Em 1968, Bucklen, Suboleski et al. voltaram a discutir a questão da simulação de transporte por trens em minas subterrâneas.
- Em 1969, Cross e Williamson, assumindo que todos os tempos eram determinísticos, construíram um modelo computacional para estudar alocação fixa versus alocação dinâmica de caminhões, em uma mina de cobre nos Estados Unidos.
- Em 1969, Suboleski e Lucas criaram um programa denominado Simulator 1, que simulava operações em minas subterrâneas que operavam no método de câmaras e pilares.
- Em 1973, Bauer e Calder mostraram as vantagens do uso de GPSS para simular operações em minas a céu aberto.
- Em 1976, Bobilier, Kahan et al. usaram GPSS para simular transporte por trens em minas subterrâneas.
- Em 1982, Steiker também usou GPSS para simular sistema de transporte em minas subterrâneas.
- Em 1987, Sturgul e Yi basearam-se no estudo de Cross e Williamson e construíram um modelo em GPSS, assumindo um processo estocástico,

ao invés de determinístico, para o cálculo dos tempos. Sturgul mostrou como GPSS pode ser usado na simulação de problemas de mineração.

- Em 1989, Sturgul e Harrison usaram GPSS para simular uma operação de lavra com o objetivo de selecionar métodos de lavra e equipamentos.

Além dos trabalhos citados acima, Basu e Baafi (1999), Knights e Bonates (1999), Konyukh, Galiyev e Li (1999), Panagiotou (1999), Sturgul e Li (1997) e Vagenas (1999) relacionaram uma série de trabalhos de simulação em mineração, que são mostrados a seguir.

- Em 1964, Elbrond desenvolveu um modelo de simulação de um sistema de transporte por trens para a mina subterrânea de ferro da LKAB, em Kiruna, Suécia.
- Em 1970, Wilke relatou o desenvolvimento de um modelo de simulação para estudar um sistema de transporte por trens em uma mina subterrânea de carvão na Alemanha.
- Em 1975, Redling usou um pacote conhecido como SIGUT para a modelagem de sistemas de correias transportadoras e carregamento e transporte, tratando dados de natureza estocástica, em minas subterrâneas de carvão na Alemanha.
- Em 1976, Wilke et al. descreveram trabalho de simulação realizado para determinar se o critério de despacho melhoraria a eficiência de um sistema subterrâneo de carregamento e transporte por trens.
- Em 1982, Wilke descreveu o desenvolvimento de um programa de computador para simular a Mina Bong, na Libéria. O objetivo principal do simulador era minimizar custos com carregamento e transporte.
- Em 1984, Nogueira descreveu a aplicação de um modelo de simulação para melhorar a operação de escavadeiras e caminhões na mina a céu aberto de ferro Cauê, da CVRD, em Itabira/MG.
- Em 1984, White e Jones divulgaram sete programas desenvolvidos nos Estados Unidos para simular operações de lavra, em minas de carvão a céu aberto, com aplicação de escavadeira de arrasto.

- Em 1990, Braga et al. descreveram a aplicação de um modelo de simulação para determinação dos limites da cava final e seqüência de remoção de blocos da mina de fosfato da Arafertil, em Araxá/MG.
- Em 1990, Tavares e Rúbio descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação usado para prever o desempenho de recuperação de carvão e determinar o teor de cinzas da alimentação em uma planta de beneficiamento da Companhia Riograndense de Mineração.
- Em 1991, Baunach, Grimson e Wagstaff, usando SIMAN e CINEMA, identificaram gargalos de produção em um sistema de manuseio de material, envolvendo seis minas de carvão.
- Em 1992, Vagenas et al. descreveram o desenvolvimento do METAFORA, um simulador para controle de despacho de sistemas de carregamento e transporte com escavadeiras e caminhões para minas a céu aberto. O programa foi escrito em Turbo Pascal e usava CAD para a visualização do movimento dos caminhões.
- Em 1992, Tsiflakos et al. apresentaram um método interativo para modelagem de sistemas de mineração por simulação que usava modelagem orientada a objeto e visualização gráfica.
- Em 1992, Lanna et al. desenvolveram um modelo de simulação para dimensionamento da frota de caminhões da mina de asbesto Cana Brava, da SAMA, em Goiás.
- Em 1992, Pereira descreveu um modelo de simulação para estudar o efeito de alocação dinâmica na produtividade, comparado ao do modelo convencional de despacho, na mina de ferro Conceição, da CVRD, em Itabira/MG.
- Em 1992, Faria desenvolveu um modelo de simulação para avaliar a operação de transporte por caminhões e determinar o custo adicional envolvido nas operações de blendagem, da mina de ferro da Ferteco Mineração, em Minas Gerais.

- Em 1992, Hoare e Willis, usando SIMAN e CINEMA, simularam um sistema de caminhões e britadores, variando o número de caminhões, numa mina de chumbo e zinco no oeste da Austrália.
- Em 1993, Mutagwaba et al. descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação, escrito em C++, usando técnicas de projeto orientado a objeto, para servir como ferramenta para tomada de decisão em sistemas de transporte de mina.
- Em 1993, Espinoza relatou os resultados obtidos no desenvolvimento de aproximadamente vinte projetos de simulação para a mina de cobre El Teniente, da Codelco, no Chile.
- Em 1994, Mevorach desenvolveu um simulador para operações de “stackers” e correias transportadoras em uma mina de linhito, na Grécia.
- Em 1994, Bustamante, Giacamen e Barra desenvolveram um modelo de simulação em GPSS/H e Proof Animation para a usina de fundição de cobre de El Teniente, da Codelco, no Chile. Esse modelo foi uma interessante contribuição, pois usou simulação discreta para um sistema com variáveis inerentemente contínuas.
- Em 1994, Kolonja e Mutmanský usaram modelos de simulação e animação para avaliar a eficiência de vários procedimentos de despacho de caminhões em uma mina a céu aberto.
- Em 1994, Hunt usou SLAMSYSTEM para simular um sistema de transporte numa mina subterrânea do Colorado (EUA).
- Em 1995, Sturgul et al. aplicaram GPSS/H e PROOF Animation em Cabillo e Rawhide (minas de carvão a céu aberto), Wyoming (EUA), para responder a questões do tipo “o que aconteceria, se”, visando ao aumento de produção.
- Em 1995, Jacobsen et al. usaram modelos de simulação e animação para determinar o número ótimo de caminhões, escavadeiras e barcas no estágio de projeto da mina e para determinar quando um novo caminhão deveria ser adicionado à frota durante a operação da mina de Lihir (mina de ouro a céu aberto), em Papua, Nova Guiné.

- Em 1995, Sturgul fez uma abordagem superficial sobre aplicações de simulação e animação na mineração. Nesse trabalho, ele cita a existência de alguns sistemas de simulação e animação, tais como SIMAN, CINEMA e ARENA, GPSS/H e PROOF Animation, SLAMSYSTEM, MODSIM III / SIMFACTORY / SIMPROCESS e WITNESS. Cita também aplicações desses sistemas na simulação de alguns modelos específicos para mineração.
- Em 1996, Sturgul e Tecsá usaram modelos de simulação e animação para prever a produção de uma variedade de combinações de carregadeiras e caminhões com um sistema de despacho em Hibbing (mina de ferro a céu aberto), Minnesota (EUA).
- Em 1996, Sturgul, Jacobsen e Tecsá usaram modelos de simulação e animação para analisar tráfego em duas mãos, num plano inclinado, em The Greens Creek Mine, Alaska.
- Em 1996, Baafi e Ataee pour, usando ARENA, construíram modelos de simulação e animação para comparar a produtividade de um sistema caminhão e escavadeira com e sem despacho.
- Em 1996, Runciman, Vagenas e Newson, usando WITNESS, simularam diversas operações em uma mina subterrânea, superando as expectativas.
- Em 1997, Galiyev usou simulação de mina para analisar alternativas de combinações de tecnologias e equipamentos, estudar os melhores trajetos para transporte, locais de escavadeiras, previsão de produção e pesquisar a confiabilidade do equipamento, no Kazaquistão.
- Em 1997, Panagiotou et al. apresentaram um conjunto de programas chamado STRAPAC 2, que foi desenvolvido para assistir aos engenheiros no planejamento e análise de operações de escavadeiras e caminhões em minas a céu aberto. O simulador foi escrito em MS – Visual C++, enquanto o modelo de simulação de máquina foi escrito em GPSS/H.
- Em 1997, Medved et al. descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação escrito em GPSS/H para estudar o sistema de transporte de caminhões, na mina de urânio Zirovski Vrh., na Eslovênia. O modelo foi

usado para analisar distintos cenários de padrões de tráfego, utilização dos caminhões e custo operacional.

- Em 1997, Erdem et al. apresentaram uma série de modelos de simulação por computador que foram desenvolvidos como parte de um sistema inteligente para otimizar a operação de escavadeiras de arrasto em minas de carvão a céu aberto.
- Em 1997, Bazante desenvolveu um modelo para avaliar a eficácia do sistema de escavadeiras e caminhões na mina de asbesto Cana Brava, da SAMA, em Goiás.
- Em 1997, Vargas descreveu um modelo de simulação discreta para analisar a viabilidade de instalação de uma pilha de homogeneização no projeto de mineração de níquel de Minorco's Lomas, na Venezuela.
- Pavlovic, em 1997 e Lazic et al. Em 1998 simularam operações contínuas em uma mina de linhito, na Iugoslávia, utilizando programas em FORTRAN.
- Em 1998, Agioutantis et al descreveram o desenvolvimento de um simulador para estudar o desempenho de equipamentos, na mina a céu aberto de linhito de Northern Field, na Grécia. Um pacote de simulação visual chamado Micro Saint também foi usado.
- Em 1998, uma equipe de simulação da Fluor Daniel, coordenada por Rod Hoare, simulou operações na interface mina/planta de beneficiamento e ferrovia/porto e também realizou estudos de expansão de capacidade de várias instalações e estudos de aumento de áreas de armazenagem.
- Em 1998, Konyukh usou GPSS/H e Proof Animation para escolher a tecnologia de transporte mais produtiva e compor o sistema sem gargalos, para minas subterrâneas da Rússia.
- Em 1998, Rakishev, em Almaty, Kazaquistão, simulou um sistema de escavadeira/ferrovia, no qual fatores, tais como confiabilidade de equipamento e duração de processos, foram introduzidos aleatoriamente.
- Em 1998, Li desenvolveu, na China, um ambiente de simulação visual, sem programação, para sistemas de mineração.

- Em 1998, Sturgul e Knights desenvolveram um modelo de simulação, usando a linguagem GPSS/H, para verificar estimativas de produção para o primeiro ano de operação da mina de cobre El Abra, no Chile.
- Em 1998, Knights e Muñoz usaram a linguagem de simulação SLAM – II, para modelar o tempo perdido em filas, em um sistema de carregamento e transporte semi-automatizado de uma mina subterrânea.
- Em 1998, Quesada et al usaram as linguagens de simulação e animação SIMAN e ARENA para modelar a produtividade de LHD's em operações de uma mina subterrânea.
- Dubiel e Laing, em 1998, Vagenas et al., em 1998, e Yazici e Baiden em 1999, registraram desenvolvimento e aplicações de simulação a eventos discretos em companhias de mineração pelo Inco Limited e Noranda e Falconbridge Limited.
- Em 1999, Runciman et al. relataram aplicações das ferramentas de simulação Witness pelo Lanner Group e Auto Mod pelo Autosimulations Inc., nos Estados Unidos.

É pertinente mencionar mais dois casos de aplicação de simulação em minerações da região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

- Em 1995, Pinto citou, resumidamente, o uso do SIMUL na construção de um modelo para simulação de perfuração numa mina pertencente às Minerações Brasileiras Reunidas (MBR).
- Em 1997, Carvalho e Duarte, usando um simulador da Nordberg, estudaram várias alternativas para operar, totalmente a seco a planta de peneiramento e britagem da Samarco Mineração S.A. Atualmente, a planta está funcionando da maneira prevista, confirmando os resultados da simulação.

Como se pode notar pelas citações acima, a evolução da modelagem e simulação para mineração foi muito rápida, porém, segundo Pinto (1999), o número de aplicações ainda é muito pequeno devido a duas limitações básicas:

- inflexibilidade dos modelos tipo “pacotes computacionais fechados;

- falta de adequação das linguagens atualmente existentes.

3.6 CONCLUSÃO PARA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem é uma abordagem fundamental para o melhor entendimento das complexas relações existentes em um processo empresarial. Essa modelagem é desenvolvida em vários níveis, desde o planejamento estratégico global até a programação fina. Ao longo desses diferentes níveis de planejamento, uma série de técnicas de modelagem pode ser utilizada, na tentativa de compreensão do processo produtivo e de apoio à tarefa de tomada de decisões.

Para tanto, a modelagem matemática procura descrever um sistema real, a partir de um conjunto de restrições de capacidade, financeiras, de suprimento, de transporte, mercadológicas, entre outras, e, conforme um determinado objetivo de maximização de lucro ou minimização de custo, procura uma solução ótima para o modelo desenvolvido. Entretanto, essa abordagem apresenta alguns pressupostos, que são o determinismo dos dados, as informações estáticas e a consistência dos dados.

A simulação computacional procura romper com esses pressupostos pelo reconhecimento da variabilidade do sistema. Ela leva em conta não somente médias ou padrões determinísticos, mas também a distribuição estatística associada ao fenômeno estudado, aproximando o modelo ao mundo real, o qual é estocástico. A simulação também considera as informações sob um ponto de vista sistêmico e dinâmico, ou seja, os eventos reais são percebidos mediante a observação de suas seqüências temporais, possibilitando, inclusive, vários níveis de detalhamento do sistema real. Entretanto, essa técnica tem uso adequado mais para aplicações estratégicas e táticas do que para as de níveis operacionais e repetitivas.

Em termos operacionais, a modelagem computacional de sistemas produtivos proporciona a efetivação de uma série de atividades inerentes ao processo industrial como por exemplo o cálculo de capacidade e o seqüenciamento da produção. Devido à complexidade dessas atividades, a utilização de modelos torna-se fundamental para a gestão dos modernos sistemas produtivos.

Uma das fases desse processo é a da criação de uma ferramenta que auxilie a fortalecer e agilizar as tomadas de decisões na cadeia produtiva do minério de ferro, que estão aumentando a uma velocidade considerável e exigindo maior qualidade e rapidez nas respostas.

Law e Kelton (1991) apresentam, na Figura 22, uma das maneiras mais compreensíveis de se visualizar onde a técnica de simulação está inserida no estudo de um sistema genérico qualquer.

Figura 22 – Maneiras de estudar um sistema

Existem muitas maneiras de estudar um sistema; uma delas é modificá-lo em sua forma real e analisar o seu desempenho, mas o grande problema pode ser o tempo e os gastos envolvidos nessa operação. Outra forma pode ser a construção de modelos físicos representativos, que, além de dispendiosos, não conseguiriam representar um cenário particular.

A iniciativa para a construção de um simulador para a cadeia produtiva do minério de ferro é baseada nas justificativas apresentadas por Law e Kelton (1991) e Botter (2004), que suportam a criação de modelos matemáticos que representem as lógicas e relações quantitativas, podendo ser manipulados e analisados por meio de simulação.

Segundo Law e Kelton (1991),

As soluções analíticas utilizam técnicas tradicionais de matemática e de estatística para realizar a análise e obter informações exatas sobre o sistema modelado. No entanto, se a complexidade do modelo for grande, torna-se inviável a utilização de soluções analíticas, pois as relações matemáticas ficam muito extensas e o cálculo das mesmas fica complexo. Neste caso, procura-se utilizar a simulação. Isto porque a simulação consegue modelar as características complexas do sistema, inclusive seu aspecto estocástico (ou probabilístico) e dinâmico, sem tornar o modelo difícil de ser estudado.

De acordo com Botter (2004),

A escolha da simulação como método, em primeiro lugar, tem como referência o trabalho desenvolvido por Chowdhury (1989) o qual propõe a simulação como sendo ferramenta ideal para estudar sistemas grandes, complexos, em que ocorrem interações entre atividades (ou entre modais) que dificultam a modelagem analítica.

Com base no exposto acima, será desenvolvido um modelo de simulação para descrever e analisar a cadeia produtiva do minério de ferro. Nos capítulos 4, 5 e 6, serão apresentados a modelagem conceitual, o tratamento dos dados de entrada, a validação do modelo, as hipóteses que serão testadas e a análise e avaliação dos resultados.

4 MODELAGEM POR SIMULAÇÃO – DESCRIÇÃO DO MODELO DO SISTEMA PRODUTIVO DO MINÉRIO DE FERRO

Segundo Botter (2001), um modelo conceitual deve expressar as considerações sobre o sistema a ser codificado em alguma linguagem de simulação, explicitar as hipóteses que foram contempladas e as relações entre os subsistemas.

O modelo conceitual de simulação do processo produtivo do minério de ferro está dividido nas seguintes partes:

- a) tratamento das chegadas dos navios;
- b) processo de chegada dos navios no terminal portuário, escolha por berços e atracação;
- c) processo de carregamento;
- d) processo de desatracação;
- e) processos operacionais.

É importante ressaltar que, durante um processo de simulação, existem dois tempos distintos: o tempo real simulado e o tempo de processamento da modelagem, ou tempo de simulação. A diferença básica entre esses tempos é que o primeiro representa o tempo do sistema real simulado e o segundo representa o tempo necessário à execução de um experimento no computador. Como exemplo, no sistema produtivo do minério de ferro, o tempo real simulado refere-se ao período de um ano. Já o tempo de simulação, ou o tempo que o computador gasta para simular esse período, é de apenas 2 minutos. No modelo construído para representar o sistema produtivo do minério de ferro existem lógicas que consomem tempo de processamento, porém o tempo real simulado fica parado. Por exemplo, na lógica construída para realizar o tratamento da chegada dos navios no terminal portuário, todo o processamento consome tempo de processamento computacional, mas no instante zero do sistema real.

4.1 TRATAMENTO DA CHEGADA DOS NAVIOS

O processo de chegada dos navios está baseado na ordem de chegada a um terminal portuário. Para o estudo, foi utilizada a relação de chegadas dos navios da Samarco Mineração S.A., no ano de 2005. Sobre essas chegadas, são fornecidas, por meio de uma planilha Excel, as seguintes informações:

- número de identificação do navio: identifica o navio em qualquer parte ou ponto da simulação;
- tipo do navio: informa se o navio é “panamax”, “capesize” ou de carvão mediante a numeração 1, 2 ou 3 respectivamente;
- cliente: informa qual é o cliente da entrega (carregamento);
- produto: informa qual é o tipo de produto da entrega (carregamento): o número 1 representa o produto PBF; o número 2 o produto PDR; o número 3, o produto PFN; o número 4, o produto PFL, e o número 5, o produto PSC;
- carga do navio: informa o tamanho da entrega com relação à quantidade de carga no embarque;
- instante de chegada: informa a hora e data em que o navio chegou ao terminal portuário de Ponta Ubu;
- início do “layday”: Informa o instante de início do “layday” do navio;
- final de “layday”: Informa o instante de final do “layday” do navio.

Um conjunto de blocos de leitura de dados faz com que a entidade leitora leia estas informações e as configure como atributos para cada entidade gerada. O Anexo A mostra a planilha Excel com as informações utilizadas no modelo para as chegadas dos navios.

As entidades, após receberem essas informações, representam a relação completa de chegada dos navios no terminal portuário, no período de estudo. As entidades geradas ficam em fila até o final da leitura de toda a planilha de dados. Em seguida, através de uma lógica de ordenação, a sequência de chegada dos navios é

organizada em ordem crescente em função do instante de chegada dos navios. As entidades, já representando a ordem dos navios por data de chegada ao terminal portuário, entram em uma fila e aguardam o início do processo de chegada dos navios ao porto. Essa fila é chamada de Ordem de Chegada dos Navios ao Porto.

Durante essa etapa de tratamento, a simulação consome somente tempo de processamento, e não tempo real do sistema simulado que representa o processo de chegada dos navios ao porto. Todo o processamento ocorre antes de se iniciar a contagem do tempo real do sistema em estudo.

4.2 PROCESSO DE CHEGADA DOS NAVIOS AO TERMINAL PORTUÁRIO, ESCOLHA POR BERÇOS E ATRACAÇÃO

Nesta etapa, os navios ficam na fila de ordem de chegada até que o tempo de simulação seja igual ao instante da chegada. Quando ocorre esse evento, o navio que está no momento de chegar ao porto, sai da fila, é classificado por tipo (“capesize”, “panamax” ou carvão) e por tipo de produto (pelota ou finos) e entra na fila Chegada dos Navios ao Porto. Os navios tipo 1 (“panamax”) recebem dois sinais (sinais 1 e 2) que indicam que este tipo de navio pode atracar em ambos os berços. Os navios tipo 2 (“capesize”) recebem o sinal 2, indicando que ele pode somente atracar no Berço Oeste. Os navios de carvão recebem o sinal 1, indicando que ele pode somente atracar no Berço Leste.

Antes de o navio entrar na fila de chegada ao porto, é registrado o instante Chegada do Navio ao Porto. Nessa etapa, é também atribuído aos navios a taxa de carregamento que será efetuada durante o processo de carregamento. Essa taxa é uma informação fornecida ao modelo como dado de entrada e será atribuída aos navios por uma distribuição de probabilidade que sorteará um valor segundo o tipo de navio (“capesize” ou “panamax”) e o tipo de produto (pelota ou finos). O modelo recebe quatro distribuições de probabilidade, uma para cada quatro combinações possíveis entre os tipos de navio e os tipos de produto.

A etapa seguinte é regida por uma lógica de escolha dos berços para atracação. Primeiramente, a lógica verifica constantemente se existem navios na fila de chegada e berço disponível para atracação. Caso existam, a lógica checa se o navio da vez pode atracar no berço disponível mediante a informação do tipo do navio. Os navios tipo “panamax” podem atracar em ambos os berços; os “capesize”, somente no Berço Oeste e os navios de carvão, somente no Berço Leste.

Em seguida, para os navios tipo 1 e 2, verifica-se qual o produto que vão levar e se existe estoque disponível para carregamento. Caso não exista, o navio continuará na fila de chegada aguardando condição favorável para atracação. Esse instante é registrado como Início de Espera por Carga do Navio. A lógica continua a procurar na fila de chegada ao porto algum navio que atenda as condições acima mencionadas. Caso exista estoque suficiente para carregamento, é então subtraída do estoque do produto do navio a quantidade referente à carga para carregamento. Nesse momento, o berço onde o navio vai atracar passa para a condição de indisponível.

Em seguida, a lógica verifica se o canal de acesso ao píer está ocupado. O navio então sai da fila Chegada de Navios ao Porto e entra na fila Espera por Canal Livre. Caso o canal esteja livre, é registrado o instante de Início de Atracação.

Até o momento, essa lógica de escolha por berço para atracação consumiu somente tempo de processamento, ficando o tempo de simulação congelado.

No instante de início da atracação, o navio entrará no processo de atracação. Esse procedimento consumirá um tempo que é atribuído ao processo de atracação por uma distribuição de probabilidade que representará a variação desse processo. A distribuição de probabilidade relaciona-se ao tipo de navio (“panamax”, “capesize” ou de carvão). Essas três distribuições são informadas ao modelo como dado de entrada.

Decorrido o tempo de atracação, tem início o processo de carregamento do navio. Então o navio libera o canal de acesso e ocupa o carregador de navios “shiploader”, momento em que é registrado o instante de Fim de Atracação e Início de Carregamento.

É objetivo também deste estudo avaliar a operação do terminal portuário com os dois berços de atracação tendo a mesma capacidade. Isso é dizer que não

haverá restrição de atracação nos berços em função do tipo do navio. Ambos poderão receber navios tipo “capesize”, “panamax” ou de carvão. Esta condição é considerada no modelo e é habilitada, retirando a condição de a atracação nos berço ficar na dependência do tipo do navio. Desse modo, qualquer navio poderá atracar em qualquer berço.

4.3 PROCESSO DE CARREGAMENTO

Uma vez o navio atracado, dá-se início ao processo de carregamento propriamente dito do navio. A modelagem do processo de carregamento foi construída levando-se em consideração os seguintes subprocessos:

- Preparação do carregamento – Compreende todos os tempos gastos do instante final de atracação até o início de carregamento efetivo. A representação desse tempo no modelo é dada por uma distribuição de probabilidade que representa a variabilidade desse subprocesso.
- Carregamento efetivo – Compreende todo o tempo de carregamento sem considerar qualquer tipo de parada. Somente é contabilizado o tempo durante o qual acontece a operação de carregamento efetivo do navio. Esse tempo é atribuído ao navio pela razão entre a carga do navio e a taxa de carregamento já definida no processo de chegada dos navios ao terminal portuário.
- Tempo ocioso do navio – É a soma de todos os tempos de paralisação do carregamento cuja causa for relacionada ao navio.
- Tempo ocioso do sistema de carregamento - É a soma de todos os tempos de paralisação do carregamento cuja causa for relacionada ao sistema de carregamento.
- Preparação para desatracação – Compreende o período de tempo em que o navio estiver parado esperando o processo de desatracação. Nesse período, são feitas as inspeções “draft-survey” e o envio de documentos a bordo, habilitando o navio a desatracar. O início da contagem desse tempo

acontece após ter decorrido o tempo de carregamento efetivo, o tempo ocioso do navio e o tempo ocioso do sistema de carregamento.

A representação dos tempos no modelo é dada por distribuição de probabilidade, que representa a variabilidade de cada um desses tempos por navio. As distribuições são função do tipo do navio 1 e 2, ou seja, para cada tempo existem duas distribuições, uma para navio tipo “panamax” e outra para navio tipo “capesize”. Essas informações são fornecidas ao modelo como dado de entrada do processo de simulação.

Não existe distribuição para navio de carvão devido ao fato de que esse tipo de navio não participa do processo de carregamento de minério. Nesse caso, após o final do processo de atracação, a lógica do modelo separa esse tipo de navio, que passa por um processo de descarregamento de carvão, no qual o tempo de processamento é calculado em função de uma distribuição de probabilidade que representa a variação do tempo das descargas de carvão no período de simulação.

O registro dos instantes no processo de carregamento é realizado para cada navio, no início e no fim de cada subprocesso. A Figura 23 mostra a relação dos momentos do processo de carregamento com os instantes em que são registrados.

Figura 23 – Instantes do processo de carregamento

Ao final do processo de carregamento, o navio libera o carregador de navios “shiploader”. Nesse momento, são registrados os instantes de Fim de Carregamento e Fim de Preparação para Desatracação.

4.4 PROCESSO DE DESATRACAÇÃO

Com o final do processo de carregamento inicia-se o processo de desatracação, que compreende a saída do berço, a manobra e o trânsito do navio pelo canal de acesso até a saída do terminal portuário. No início desse processo, o navio ocupa o canal de acesso ao porto para a saída e libera o berço que estava ocupando. Esse instante também é registrado como Início de Desatracação.

O tempo de duração desse processo é sorteado mediante uma distribuição de probabilidade que representa a variação desse tempo entre todas as operações de desatracação no horizonte de simulação. Essa distribuição é fornecida ao modelo como dado de entrada e é diferenciada por tipo de navio (“capesize”, “panamax” ou de carvão).

Ao final da desatracação, a lógica faz com que o navio desocupe o canal de acesso, e esse instante é registrado.

4.5 PROCESSOS OPERACIONAIS

Conforme comentado no item xxx, os processos operacionais foram modelados com foco em produção. Para representar a realidade dos processos operacionais em um sistema dinâmico, foi construída uma série de instruções lógicas. Algumas simplificações foram necessárias para representar um processo contínuo em um sistema de simulação de eventos discretos. O processo foi discretizado em espaços de 10 minutos. No modelo, o tamanho do espaço a ser discretizado é variável e pode ser definido na configuração dos dados de entrada.

Todas as informações necessárias para configuração de um cenário de simulação do processo produtivo do minério de ferro são disponibilizadas em uma planilha Excel e introduzidas no modelo por meio de um conjunto de blocos de leitura de dados que, no instante zero de simulação, faz com que uma entidade leitora leia as referidas informações e as configure como variáveis do modelo. Essas informações bem como a sua estruturação estão mostradas no Anexo B.

4.5.1 Processo Concentração

A lógica abaixo, mostrada na Figura 24, controla a produção da usina de concentração baseada na capacidade dos tanques de estocagem localizados no final do fluxo produtivo desse processo. Se a produção exceder a capacidade do tanque de armazenamento, o pacote de produção sorteado é rejeitado. Essa condição representa redução da produtividade da usina de concentração.

Figura 24 – Lógica da usina de concentração

4.5.2 Processo de Bombeamento por Mineroduto

A lógica abaixo, mostrada na Figura 25, regula a produção bombeada através do mineroduto baseada no estoque dos tanques de estocagem da usina de

concentrado e na capacidade de estocagem dos tanques que recebem o concentrado, chamados de tanques de material homogeneizado. No caso de o estoque nos tanques de estocagem de concentrado ser menor do que o limite mínimo, ou a soma do pacote sorteado de bombeado do mineroduto com o estoque nos tanques de estocagem de homogeneizado exceder a capacidade de estocagem, a produção é rejeitada, significando redução da vazão do mineroduto.

Figura 25 – Lógica do mineroduto

4.5.3 Processo Filtragem

A lógica abaixo, mostrada na Figura 26, regula o processamento de material dos tanques de estocagem de homogeneizado para os silos de pelotização mediante o processo de filtragem. O objetivo nesse processo é priorizar o abastecimento de “pellet feed” para as usinas de pelotização. Caso a produção de “pellet feed” na filtragem seja maior do que a quantidade necessária ao processo de pelotização, o excedente é direcionado ao pátio de estocagem e contabilizado como produção de “pellet feed” para estoque.

A lógica faz com que, caso o estoque dos tanques de homogeneizado seja menor que seu limite mínimo e/ou o limite máximo do pátio de estocagem seja

atingido, o pacote de produção sorteado é rejeitado. Outra condição que deve ser atendida no modelo é que, quando o limite máximo de estocagem dos silos de “pellet feed” for atingido, o pacote de produção sorteado seja contabilizado como produção para o pátio de estocagem; caso contrário, contabilizado como produção de “pellet feed” para abastecimento das usinas de pelotização.

Figura 26 – Lógica da filtragem

4.5.4 Processo Pelotização

A lógica abaixo, mostrada na Figura 27, regula a produção de pelotas. O objetivo é priorizar o “pellet feed” para a produção de pelotas, ao invés do “pellet feed” para o pátio de estocagem. Foram considerados a capacidade de produção projetada e o coeficiente de variação. Neste caso, uma atenção especial foi dada em dois pontos particulares e críticos do processo: 1) a taxa de conversão de “pellet feed” e 2) a inerente produção de “pellet screening” pelo rejeito da etapa de peneiramento das pelotas queimadas. Minimizando a taxa de conversão, o processo

é levado a uma maior produção de pelotas; minimizando-se o coeficiente de variação, obtém-se redução da produção de “pellet screening”.

Na lógica de produção de pelotas é sorteado um pacote de produção no espaçamento de tempo que foi definido como tempo de discretização do modelo. A curva de distribuição que caracteriza variação da produção é função do tipo do produto e da usina, e é dado de entrada do modelo. Caso o estoque de “pellet feed” no silo de estocagem esteja abaixo do limite mínimo e/ou o estoque de pelotas tenha atingido o limite máximo, o pacote de produção de pelotas nas usinas é rejeitado. Se ocorrer o contrário, é contabilizada a produção de pelotas conforme tipo de pelota e usina. Também é retirada do silo de “pellet feed” a quantidade de “pellet feed” necessária para a produção de pelota na quantidade do pacote sorteado. Essa relação é dada pelo fator de consumo de “pellet feed” para produção de pelotas, o qual é um dado de entrada do modelo.

Para cada pacote de produção contabilizado como produção de pelotas é gerada uma quantidade do subproduto “pellet screening” por meio da multiplicação da quantidade do pacote gerado pelo fator de geração de “pellet screening”, que também é dado de entrada do modelo.

Figura 27 – Lógica da pelotização

4.5.5 Recuperação de “Pellet Feed” do Pátio de Estocagem para o Processo Produtivo

Esta lógica, mostrada na Figura 28, permite recuperar “pellet feed” do pátio de estocagem para suprir eventual falta de “pellet feed” no processo de produção de pelotas, decorrente de restrições dos processos anteriores. Nessa lógica, se o estoque de “pellet feed” no silo de estocagem estiver abaixo do limite mínimo e se houver estoque de “pellet feed” no pátio, o pacote de “pellet feed” recuperado do pátio é adicionado ao silo de “pellet feed”.

Figura 28 – Lógica de recuperação do “pellet feed” do pátio para o processo

4.5.6 Paradas Programadas dos Processos Produtivos

As paradas programadas dos processos no horizonte de tempo de estudo são representadas por um indicador de parada. Este indicador opera no modelo na forma de uma variável binária que quando recebe o valor 1, faz com que os pacotes de produção sorteados recebam o valor zero, indicando produção parada. São informadas ao modelo as datas das paradas de cada processo e o período de tempo em que estes ficam parados respectivamente. Assim, quando o avanço de tempo do modelo coincide com a data de parada de um determinado processo, o indicador de parada desse processo recebe o valor 1 ficando nessa condição até o avanço do

tempo atingir o final da duração da parada. Nesse período, o pacote de produção do processo é zerado e não é contabilizada a produção enquanto durar a parada. Abaixo, é mostrada na Figura 29 a lógica que representa as paradas programadas dos processos.

Figura 29 – Lógica de paradas programadas dos processos

4.5.7 Programação da Produção

A capacidade nominal de armazenagem de produtos acabados é de 2 milhões de toneladas. Contudo, na prática, a necessidade de segregação dos diferentes tipos de produtos restringe essa capacidade, de acordo com as possíveis combinações.

Na Samarco, existe problema de estoque devido aos seguintes fatores:

- Para cada carregamento de um determinado navio existe o tempo ideal de carregamento definido no contrato de venda que é função da quantidade a ser embarcada no navio e da taxa de carregamento padrão do navio. Se o tempo de carregamento real for maior que o tempo ideal de contrato, a empresa paga uma multa (“demurrage”) por sobreestadia do navio no porto. A taxa de produção das duas usinas de pelotização é menor que a taxa padrão de carregamento dos navios em Ubu, o que significa que na ocorrência de um carregamento direto da produção (“just in time”), o tempo de carregamento real seria maior que o tempo de carregamento ideal de contrato, resultando em multa. Nesse caso, o estoque é necessário e funciona como um regulador entre a produção e o carregamento dos navios.

- A chegada dos navios a Ponta de Ubu ocorre dentro de um período de quinze dias (“layday”). Este fato adiciona uma componente de incerteza quanto ao prazo limite para compor a carga de um determinado navio. É objetivado ter carga completa (lote completo) no primeiro dia da previsão de chegada do navio. Muitas vezes o navio chega após o primeiro dia da previsão e a carga, que já foi produzida, é contabilizada como estoque até ser embarcada.
- Ocorrência de estoque em função de sobra de um carregamento, que se dá quando o comandante do navio decide levar menos carga, respeitando a tolerância de 10%²².

A programação da produção está vinculada ao objetivo de reduzir o custo de manutenção de estoques e custo por atraso de carregamento (“demurrage”). Dessa forma a construção do seqüenciamento de produção busca o atendimento dos pedidos nos prazos programados, de acordo com a programação de embarques, ao mesmo tempo que busca a redução do nível de estoques de produtos acabados.

Em primeiro nível, é feita a programação da produção do processo de pelotização; e em seguida, esta programação é desdobrada até o processo de lavra, levando em consideração as restrições de capacidade e os planos de manutenção preventiva dos processos produtivos.

O processo de programação da produção tem como entrada o plano mensal de vendas da Samarco, o plano de manutenção preventiva, informações de produtividade dos processos produtivos e restrições que regem este processo, tais como:

- restrição de tamanho máximo e mínimo de campanha – relativa ao tempo mínimo e máximo necessário para se mudar a produção de um produto para outro; esta restrição é basicamente função das operações de mina;
- dias disponíveis de operação – representa o horizonte de planejamento;
- capacidade de produção dos processos produtivos.

²² A tolerância de 10% nos carregamentos foi explicada no capítulo 2, página 41, item “Incerteza na quantidade entregue ao cliente”, deste trabalho.

Como resultado deste processo, tem-se o programa de produção para o horizonte de planejamento, que geralmente é de 18 meses. Esse programa contém as durações e o seqüenciamento das campanhas de produção.

O processo de programação da produção é independente do processo de simulação que está em estudo e o programa de produção é informado ao modelo de simulação pela planilha Excel.

O tipo de produto resultante dos processos no horizonte de tempo de estudo é representado pelo indicador “família”. Esse indicador opera no modelo na forma de uma variável, que, quando recebe o valor 1, faz com que todos os processos produzam o produto referente à família 1, e quando recebe o valor 2, faz com que os processos produzam o produto referente à família 2. Como exemplo do sistema real, quando o indicador “família” é 1, está sendo produzido o concentrado tipo 1, que é correspondente ao “pellet feed” tipo 1, que, por sua vez, é a matéria-prima para o processo de pelletização produzir a pelota tipo 1.

É informada ao modelo em uma planilha Excel uma seqüência com duas colunas em que, na primeira é informado o tipo do produto (1 ou 2), e na segunda, a duração em horas do período de tempo em que os processos produtivos irão permanecer produzindo o produto informado. Para exemplificar; se na coluna 1 estiver em seqüência 1, 2 e 1, e na coluna 2, 100, 200 e 300, isso significa que os processos produtivos vão iniciar a simulação produzindo os produtos referentes ao tipo 1, permanecerão produzindo por 100 horas, quando passarão a produzir os produtos do tipo 2. Depois permanecerão produzindo os produtos tipo 2 por 200 horas, ao final das quais recomeçarão a produzir os produtos tipo 1 por 300 horas, e assim sucessivamente.

Como o modelo está representando a simulação para o período de um ano, a totalização dos tempos de duração das campanhas de produção na coluna 2 não poderá ser menor que 8.760 horas, que é o total de horas de 365 dias ou um ano. Caso isso ocorra, quando o tempo de simulação atingir o total de horas informado, o modelo perderá a referência de qual produto produzir e gerará um erro no processamento da simulação.

O modelo captura essas informações da planilha Excel por meio de um conjunto de blocos de leitura de dados, que faz com que a entidade leitora leia as

informações referentes a tipo de produto e ao período de campanha, e as configure como as variáveis “família” e “horas_produção” do modelo de simulação. Na Figura 30, a seguir, é mostrada a lógica construída no “software” ARENA para representar leitura e introdução do programa de produção no modelo de simulação.

Figura 30 – Lógica de leitura e introdução da programação de produção no modelo de simulação

Como exemplo, para o ano de 2005 houve um programa de embarques que foi seguido. Decorrente deste, houve a construção de um programa de produção que foi executado com o respectivo seqüenciamento e duração das campanhas. No Anexo C, é mostrada a planilha Excel com as informações do seqüenciamento de produção e das durações das campanhas executadas na Samarco Mineração S.A., no ano de 2005, e utilizadas na etapa de validação do modelo. Esse programa de produção representou o seqüenciamento da produção durante a simulação e foi introduzido ao modelo de simulação como informação de entrada.

No Anexo G é mostrado todo o modelo computacional desenvolvido no “software” ARENA para representar o sistema produtivo do minério de ferro.

5 APLICAÇÃO DA MODELAGEM

Neste capítulo será apresentado a execução do planejamento elaborado para a pesquisa e descrito no capítulo 1, item 1.4, letra f, com o intuito de atingir os objetivos traçados para a pesquisa.

5.1 DADOS DE ENTRADA DO MODELO: OBTENÇÃO E UTILIZAÇÃO

A fase de coleta e análise de dados desenvolveu-se com base em informações recebidas da Samarco Mineração S.A., divididas em duas partes: a primeira, com informações sobre o sistema portuário; a segunda, com informações sobre o sistema produtivo.

5.1.1 Análise dos Dados do Sistema Portuário

A fonte de dados referente ao sistema portuário contém diversas informações sobre as chegadas e operações dos navios no ano de 2005. Essas informações foram tratadas e analisadas estatisticamente com auxílio dos “softwares” Minitab e Iput Analyser, este último um aplicativo do software Arena.

As informações referentes às chegadas dos navios, citadas no capítulo 4 Modelagem por Simulação – Descrição do Sistema Produtivo do Minério de Ferro” e mostradas no Anexo A, foram retiradas dessa fonte de dados.

Os tempos de atracação, de preparação para o carregamento, o tempo ocioso do navio, o tempo ocioso do sistema de carregamento, de preparação para desatracação e de desatracação foram separados inicialmente, por tipo de navio, e analisados no Minitab para identificação das distribuições de probabilidade desses tempos na simulação.

A primeira análise consistiu em verificar se as médias das distribuições eram iguais para os navios “capesize” e “panamax” mediante utilização do teste de comparação de médias no “software” Minitab, no qual a hipótese nula é a igualdade das médias e a hipótese alternativa é a desigualdade delas.

O resultado do teste, disponível no Anexo H, mostrou que, em todos os tempos analisados para representar o comportamento dos navios tipo “capesize” e “panamax”, o p-valor foi maior que 0,05, o que significa que a hipótese nula não é rejeitada. Dessa forma, conclui-se com 95% de confiança que não existe diferença entre as médias dos tempos dos navios “capesize” e “panamax”.

A segunda análise consistiu em utilizar o Input Analyser na identificação das distribuições de probabilidade que representam os tempos desses navios no terminal portuário do simulador.

As distribuições que representam os tempos de preparação para o carregamento, o tempo ocioso do navio, de preparação para desatracação, de desatracação, de mau tempo e de mau tempo durante o carregamento foram extraídas da opção “empirical”, do Input Analyser do Arena, em virtude de não haver boa aderência a modelos teóricos conhecidos. Essa prática garante que os valores sorteados no simulador estejam contidos nos intervalos reais dos dados observados.

A análise dos dados de taxa de carregamento de pelotas mostrou que há diferença entre os carregamentos dos navios tipo “capesize” e “panamax”. No caso de carregamento de finos, foi utilizada a mesma distribuição para ambos os tipos de navio por ser pequena a base para esta análise, que representou apenas 8,45% da quantidade embarcada no ano de 2005. No Anexo I é mostrado o resultado do teste de comparação de médias utilizado para verificar a igualdade das médias entre as taxas de carregamento de pelotas para navios “capesize” e “panamax”, no qual o p-valor foi bem abaixo de 0,05, representando que existe diferença entre as médias das amostras analisadas.

A Tabela 5.1 apresenta as distribuições utilizadas na modelagem para representar o sistema portuário.

Os demais dados utilizados como entrada do modelo de simulação estão disponíveis no Anexo B.

Tabela 5.1 – Distribuições dos tempos dos navios no sistema portuário

Tempo	Entrada no Arena	Distribuição de Probabilidade
Taxa de Carregamento	exp_tx_carreg_panam_pelota	NORM(3622,946)
	exp_tx_carreg_cape_pelota	NORM(4879,512)
	exp_tx_carreg_finos	NORM(4304,503)
Atracação	exp_atrac_carvao	NORM(2.5523,0.6334)
	exp_atrac_cape	NORM(2.5523,0.6334)
	exp_atrac_panam	NORM(2.5523,0.6334)
Preparação para Carregamento	exp_prep_carreg_panam	CONT(0.000, 0.000, 0.748, 3.181, 0.807, 6.363, 0.904, 9.545, 0.956, 12.727, 0.978, 15.909, 0.980, 19.090, 0.982, 22.272, 0.985, 25.454, 0.990, 28.636, 0.995, 31.818, 1, 34.8)
	exp_prep_carreg_cape	CONT(0.000, 0.000, 0.748, 3.181, 0.807, 6.363, 0.904, 9.545, 0.956, 12.727, 0.978, 15.909, 0.980, 19.090, 0.982, 22.272, 0.985, 25.454, 0.990, 28.636, 0.995, 31.818, 1, 34.8)
Tempo Ocioso do Navio	exp_tocioso_navio_cape	CONT (0.000, 1.000, 0.815, 5.727, 0.948, 10.455, 0.970, 15.182, 0.985, 19.909, 0.993, 24.636, 0.994, 29.364, 0.995, 34.091, 0.996, 38.818, 0.997, 43.545, 0.998, 48.273, 1, 52.7)
	exp_tocioso_navio_panam	CONT (0.000, 1.000, 0.815, 5.727, 0.948, 10.455, 0.970, 15.182, 0.985, 19.909, 0.993, 24.636, 0.994, 29.364, 0.995, 34.091, 0.996, 38.818, 0.997, 43.545, 0.998, 48.273, 1, 52.7)
Tempo Ocioso do Navio	exp_tocioso_sistcarreg_panam	ERLA(5.67,2)
	exp_tocioso_sistcarreg_cape	ERLA(5.67,2)
Preparação para Desatracação	exp_prep_desatrac_panam	CONT (0.000, 0.000, 0.478, 1.818, 0.776, 3.636, 0.888, 5.455, 0.918, 7.273, 0.963, 9.091, 0.970, 10.909, 0.978, 12.727, 0.985, 14.545, 0.986, 16.364, 0.988, 18.182, 1, 19.6)
	exp_prep_desatrac_cape	CONT (0.000, 0.000, 0.478, 1.818, 0.776, 3.636, 0.888, 5.455, 0.918, 7.273, 0.963, 9.091, 0.970, 10.909, 0.978, 12.727, 0.985, 14.545, 0.986, 16.364, 0.988, 18.182, 1, 19.6)
Descarregamento de Carvão	exp_descarreg_carvao	NORM(108,23.7)
Desatracação	exp_desatrac_carvao	CONT (0.000, 0.000, 0.015, 0.182, 0.127, 0.364, 0.485, 0.546, 0.731, 0.728, 0.821, 0.910, 0.903, 1.091, 0.933, 1.273, 0.963, 1.455, 0.985, 1.637, 0.987, 1.819, 1, 2)
	exp_desatrac_cape	CONT (0.000, 0.000, 0.015, 0.182, 0.127, 0.364, 0.485, 0.546, 0.731, 0.728, 0.821, 0.910, 0.903, 1.091, 0.933, 1.273, 0.963, 1.455, 0.985, 1.637, 0.987, 1.819, 1, 2)
	exp_desatrac_panam	CONT (0.000, 0.000, 0.015, 0.182, 0.127, 0.364, 0.485, 0.546, 0.731, 0.728, 0.821, 0.910, 0.903, 1.091, 0.933, 1.273, 0.963, 1.455, 0.985, 1.637, 0.987, 1.819, 1, 2)
Mau Tempo	exp_mau_tempo	DISC(0.0000,0.0000,0.9556,0.0001,0.9630,6.5,0.9704, .76,0.9778,11.67,0.9852,12.75,0.9926,14.17,1,17)
Mau Tempo no Carregamento	exp_mau_temp_carreg	DISC(0.0000,0.0000,0.9556,0.0001,0.9630,0.4200,0.9704,0.67,0.9778,1.25,0.9852,2.83,0.9926,2.83,1,3.83)

5.1.2 Análise dos Dados do Sistema Produtivo

Os dados para identificação das distribuições que representam a variabilidade do processo produtivo utilizados no modelo não serão disponibilizados por se tratar de informações confidenciais da Samarco Mineração S.A.. Serão apresentadas as distribuições identificadas e a análise realizada para a obtenção dessas distribuições.

Para análise, foram estudadas as produções diárias, por produto, dos processos de concentração, bombeamento, filtragem e pelotização das usinas 1 e 2 da Samarco.

Em primeira análise, foi realizada a etapa de limpeza dos dados, seguindo-se as recomendações de Botter (2002), que fornece uma série de orientações para tratamento dos dados. O autor diz que a etapa de limpeza dos dados se refere à retirada dos valores sem coerência ou consistência, bem como àqueles que se apresentarem discrepantes com relação à aplicação da metodologia de gráfico de caixas ou “Box Plot” do “softwre” Minitab.

Nessa análise, foi observado que a maioria dos pontos identificados como “outliers”²³ estava abaixo da massa de dados. Foi realizada uma pesquisa para identificar a causa desse comportamento e verificado que quase em sua totalidade representavam dias em que houve parada de produção do processo. Esses pontos foram retirados da massa de dados para a etapa de identificação da curva de distribuição probabilística de modo que as paradas dos processos fossem contempladas na modelagem. As curvas de distribuição que representam o processo produtivo foram identificadas por meio do Input Analyser do Arena e através do Minitab e estão mostradas na Tabela 5.2 a seguir.

²³ Pontos com valores sem coerência ou consistência, bem como aqueles que se apresentarem discrepantes com relação à aplicação da metodologia de gráfico de caixas ou “Box Plot” do “softwre” Minitab.

Tabela 5.2 – Distribuições utilizadas para representar o sistema produtivo

Tempo	Entrada no Arena	Distribuição de Probabilidade
Processo Concentração	exp_prod_conc_prod1	NORM(1,0.065)
	exp_prod_conc_prod2	NORM(1,0.061)
Processo Mineroduto	exp_prod_bomb_prod1	CONT (0.000, 0.820, 0.001, 0.849, 0.041, 0.878, 0.095, 0.907, 0.155, 0.937, 0.236, 0.966, 0.405, 0.995, 0.581, 1.024, 0.885, 1.053, 0.966, 1.082, 0.986, 1.112, 0.993, 1.141, 1, 1.170)
	exp_prod_bomb_prod2	CONT (0.000, 0.780, 0.001, 0.812, 0.012, 0.845, 0.077, 0.877, 0.130, 0.909, 0.219, 0.942, 0.320, 0.974, 0.450, 1.006, 0.680, 1.038, 0.882, 1.071, 0.976, 1.103, 0.982, 1.135, 0.990, 1.168, 1.000, 1.200)
Filtragem	exp_prod_pf_prod1	NORM(1,0.0407)
	exp_prod_pf_prod2	NORM(1,0.0617)
	exp_ret_pf	Constante
Pelotização	exp_prod_usina1_prod1	NORM(1,0.0563)
	exp_prod_usina1_prod2	NORM(1,0.0320)
	exp_prod_usina2_prod1	$0.86 + 0.32 * \text{BETA}(3.97, 3.36)$
	exp_prod_usina2_prod2	$0.87 + 0.28 * \text{BETA}(3.71, 2.74)$

Os demais dados utilizados como entrada do modelo de simulação estão disponíveis no Anexo B.

5.2 EXTRAÇÃO DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DOS RELATÓRIOS DE RESULTADOS

O processo de gravação de resultados é feito em duas etapas. Na primeira etapa, os resultados referem-se ao sistema portuário, e na segunda, ao sistema produtivo.

Na primeira, ao final do processo de desatracação um bloco de cálculo calcula e registra no modelo os tempos praticados por navio na passagem pelo terminal portuário. No último instante de simulação, um bloco de gravação registra em uma planilha Excel os tempos que foram calculados no modelo. A Figura 31 mostra a lógica construída na modelagem para gravação dos resultados referentes ao sistema portuário.

Figura 31 – Lógica de registro dos resultados do sistema portuário em planilha Excel.

Essa rotina é repetida para cada replicação executada na simulação. Os resultados das n replicações executadas são arquivados em seqüência, na planilha Excel. Após o término da transferência dos resultados da última replicação, uma programação de cálculos construída no “software” Excel calcula a média das n replicações executadas na simulação. As informações das n replicações são consolidadas para cada cenário estudado. O Anexo D mostra os resultados referentes ao sistema portuário consolidado para o cenário de validação do modelo onde foram executadas 30 replicações.

Na segunda etapa, um conjunto de blocos de gravação registra também, em uma planilha Excel e a cada 24 horas do início da simulação, informações referentes ao sistema produtivo. Essa estrutura de registro de dados mostra, por dia do horizonte de simulação e por produto, a quantidade embarcada, a quantidade produzida e a quantidade estocada. A Figura 32 mostra a lógica construída no modelo para gravação dos resultados referentes ao sistema produtivo.

Figura 32 – Lógica de registro dos resultados do sistema produtivo em planilha Excel.

Como na etapa 1, esta rotina é repetida para cada replicação executada na simulação, e os resultados das n replicações executadas são arquivados em seqüência, dia-a-dia, em planilha Excel. Após o término da transferência dos resultados da última replicação, uma programação de cálculos construída no “software” Excel calcula a média das n replicações executadas na simulação. As

informações das n replicações são consolidadas para cada cenário estudado. A Tabela 5.3 abaixo mostra os resultados referentes ao sistema produtivo consolidado para o cenário de validação do modelo onde foram executadas 30 replicações.

Tabela 5.3 – Consolidação dos resultados das 30 replicações do sistema produtivo no cenário de validação do modelo Mineração S.A.

		PELOTAS			PELLET FEED			SINTER FEED
		Prod_1 PBF	Prod_2 PDR	Total	Prod_3 PFN	Prod_4 PFL	Total	Prod_5 PSC
BOMBEAMENTO		-----			7.600.891	7.707.912	15.308.803	-----
Retorno Pellet Feed		-----			90.167	115.604	205.771	-----
RESTRIÇÃO		1.251			0			-----
PRODUÇÃO	Usina 1	3.313.801	3.424.792	6.738.593	488.491	326.804	-----	345.301
	Usina 2	3.452.330	3.621.122	7.073.451				
	Total	6.766.130	7.045.914	13.812.044	815.295			
EMBARQUES		6.828.363	6.839.507	13.667.870	676.219	203.059	879.278	397.386

5.3 RESULTADOS A SEREM OBTIDOS PELO MODELO

Nesta etapa, são determinadas as respostas que o simulador fornece de tal forma que cada cenário pesquisado possa ser avaliado e comparado com outros processamentos. A princípio, todos os eventos e outras características relacionados com as atividades da entidade navios são gravados. Tais eventos e características estão citados abaixo:

- número do navio;
- instante de chegada;
- cliente;
- lote que o navio vai carregar;
- berço que ocupou;
- “status” de “layday”;
- instante em que está liberado para atracar;
- instante de atracação;

- instante de início de operação;
- tempo de paralisação devido ao navio;
- tempo de paralisação devido ao sistema de carregamento;
- tempo de efetivo carregamento;
- instante de final de operação;
- instante da desatracação;
- estoque inicial por produto.

Com base nesses valores, outros dados podem ser coletados a partir da simulação:

- número de navios por ano;
- embarque por navio, embarque por produto, a partir da base diária, que pode ser consolidado na base mensal e anual;
- número de navio por ano-cliente e carga total carregada por cliente;
- tempo médio em fila dos navios;
- número médio de navios em fila;
- tempo médio aguardando carga para atracar;
- tempo médio entre atracação e início de operação;
- tempo médio e global ocioso devido ao navio, por navio e por berço;
- tempo médio e global ocioso devido ao sistema de carregamento, por navio e por berço;
- tempo e taxa média de carregamento por navio e por berço;
- tempo médio entre o final da operação e a desatracação;
- ocupação de cada berço com base no tempo de operação;
- ocupação de cada berço com base no tempo do navio atracado;
- ocupação do terminal portuário;

- utilização do sistema de carregamento com base no tempo total de utilização do terminal portuário e no ano calendário.
- produção de cada processo produtivo por produto, a partir da base diária, que pode ser consolidada na base mensal e anual;
- quantificação do estoque diário por produto através da equação $\text{estoque inicial} + \text{produção diária} - \text{embarque diário}$;
- quantificação do estoque médio por produto;
- quantificação da produção restringida em cada processo devido à capacidade de estocagem intermediária máxima ou mínima atingida;
- identificação do processo gargalo dentro do processo produtivo;
- quantificação do valor de “demurrage” ou “dispatch” por navio e global do sistema;
- quantificação do custo de manutenção de estoques;
- quantificação do rendimento global do sistema por cenário pesquisado.

5.4 DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE REPLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO

Devido aos desvios estatísticos adotados, os resultados de cada simulação serão diferentes. A determinação do número suficiente de replicações da simulação para que se tenha consistência estatística dos seus resultados será feita com a utilização do modelo construído. As variáveis escolhidas para o teste foram os tempos de atracação, de preparação para carregamento, o tempo ocioso do navio, o tempo ocioso do sistema de carregamento e de desatracação.

Cada replicação consiste na simulação de um ano inteiro de operação do processo produtivo de minério de ferro, estocagem e embarque dos produtos para os clientes. Foram considerados os dados utilizados no processo de validação, ou seja, o seqüenciamento das vendas do ano de 2005 na Samarco, o seqüenciamento

e duração das campanhas utilizados para atendimento das vendas, os dados de entrada comentados no item anterior.

Foram rodadas 100 replicações. Para cada uma delas foi calculada a média dos tempos por navio e registrado o resultado em uma planilha Excel. Na coluna seguinte, foi calculada a média acumulada e, em seguida, a diferença percentual entre elas. Esses resultados foram colocados em gráficos que mostram a evolução da média acumulada em função de cada replicação executada.

A Figura 33 mostra o resultado dos tempos estudados.

Figura 33 – Diferença entre as médias acumuladas dos tempos para 100 replicações.

O critério adotado para determinação do número de replicações baseou-se na escolha do ponto no gráfico onde as diferenças permanecessem constantes. Na

etapa de execução dos experimentos será utilizado o total de 30 replicações, para garantir assim a consistência estatística dos resultados.

5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS DO ANO DE 2005

Durante o desenvolvimento de um modelo de simulação é preciso estar seguro de que ele esteja sendo corretamente implementado. Subentende-se que o modelo se encontra sem erros de sintaxe e/ou de lógica, bem como seja representativo do sistema real ou do projetado.

Segundo Freitas Filho (2001),

[...] A qualidade e a validade de um modelo de simulação são medidas pela proximidade entre os resultados obtidos pelo modelo e aqueles originados do sistema real. Uma vez que uma série de pressupostos e simplificações sobre o comportamento do sistema real costuma ser realizada no desenvolvimento do modelo, qualquer tomada de decisão com base em seus resultados deve ser precedida de uma avaliação de sua qualidade e apropriação. Consiste em avaliar se estes pressupostos e estas simplificações foram corretamente implementadas no modelo computacional e descobrir se, apesar dos pressupostos e das simplificações implementadas, o modelo ainda é válido, isto é, comporta-se à semelhança do sistema real. [...]

Para a validação, foram analisadas as principais saídas do modelo em comparação aos resultados reais do processo produtivo da Samarco Mineração S.A. no ano de 2005.

Com relação ao terminal portuário, os resultados analisados foram os seguintes:

- quantidade de navios atendidos no porto;
- total do tempo de espera dos navios, que é o somatório do tempo que cada navio ficou no porto desde a hora de sua chegada até o momento de sua atracação, como também o tempo médio gasto por navio;
- total do tempo de atracação dos navios, que é o somatório do tempo gasto para cada navio realizar o traslado no canal de acesso até o berço escolhido para ancoragem, as manobras de ancoragem e amarração, como também o tempo médio de atracação por navio;

- total do tempo de carregamento, que é o somatório do tempo gasto por navio desde o instante final de atracação até o início da desatracação, como também o tempo médio de carregamento por navio;
- total do tempo de desatracação, que compreende o somatório do tempo gasto por navio na saída do berço, na manobra e trânsito pelo canal de acesso até a saída do terminal portuário, como também o tempo médio de desatracação por navio;
- tempo total dos navios no porto, que é o somatório do tempo gasto por navio desde o instante de chegada até o da saída, como também a média do tempo total dos navios no porto por navio;
- ocupação do terminal portuário;
- quantidade total embarcada de pelotas tipo PBF;
- quantidade total embarcada de pelotas tipo PDR;
- quantidade total embarcada de finos.

Na Tabela 5.3 é mostrado um apanhado com todos os resultados comentados acima de modo a facilitar a visualização e análise desses resultados.

Para validação do processo produtivo foram consideradas a quantidade total bombeada, a quantidade total produzida de pelotas PBF e PDR, a quantidade total produzida de finos²⁴. A tabela 5.4 mostra a comparação destas informações em relação ao resultado do modelo e real no ano de 2005.

²⁴ A quantidade total produzida de finos é referente à soma da produção dos “pellet feeds” PFN e PFL e da produção total de “pellet screening” PSC.

Tabela 5.4 – Comparativo entre o resultado do modelo de simulação e o resultado real no ano de 2005 do terminal portuário da Samarco Mineração S.A.

		Modelo	2005	Diferença Absoluta	Diferença Percentual
Número de Navios Atendidos no Porto		134,70	136	-1,30	-0,96%
Tempo em Fila de Espera	Tempo Absoluto	5.172,42	5.073,07	99,35	1,96%
	Tempo Médio por Navio	38,40	37,30	1,10	2,94%
Atracação	Tempo Absoluto	868,49	884,67	-16,18	-1,83%
	Tempo Médio por Navio	6,45	6,50	-0,06	-0,88%
Carregamento	Tempo Absoluto	5.583,29	5.387,93	195,36	3,63%
	Tempo Médio por Navio	41,45	39,62	1,83	4,63%
Desatracação	Tempo Absoluto	475,29	457,47	17,82	3,90%
	Tempo Médio por Navio	3,53	3,36	0,16	4,90%
Tempo Total no Terminal Portuário	Tempo Absoluto	12.099,49	11.803,13	296,35	2,51%
	Tempo Médio por Navio	89,83	86,79	3,04	3,50%
Ocupação do Terminal Portuário		79,29%	77,21%	2,08	2,62%
Embarque Pelota PBF		6.828.363	6.852.799	-24.436	-0,36%
Embarque Pelota PDR		6.839.507	6.971.611	-132.104	-1,89%
Embarque Finos		1.276.664	1.276.664	0,00	0,00%

Tabela 5.5 – Comparativo entre o resultado do modelo de simulação e o resultado real no ano de 2005 do processo produtivo da Samarco Mineração S.A.

		Modelo	2005	Diferença Absoluta	Diferença Percentual
PRODUÇÃO	Pelota PBF	6.766.130	6.754.000	12.130	0,18%
	Pelota PDR	7.045.914	6.948.890	97.024	1,40%
	Total	13.812.044	13.702.890	109.154	0,80%
	FINOS	1.160.596	1.060.861	99.735	9,40%
	Total Geral	14.972.640	14.763.751	208.889	1,41%
BOMBEAMENTO		15.308.803	15.043.437	265.366	1,76%

Analisando o resultado da produção de finos na Tabela 5.5, observa-se uma diferença na ordem de 10%, muito acima dos valores dos outros resultados. Foi realizada uma verificação na base de cálculo do modelo e não se constatando nenhuma anormalidade. Foi checado então o balanço de massas entre o total embarcado, o estoque inicial e o estoque final dos finos para o ano de 2005 e constatado o seguinte:

- o total embarcado de “pellet feed” foi de 881.438 toneladas;
- o estoque inicial e final de “pellet feed”, respectivamente foi de 318.408 toneladas e 246.677 toneladas;
- com relação ao “pellet feed”, se somar o total embarcado com o estoque final e se diminuir o estoque inicial, a quantidade de produção de “pellet feed” terá que ser de 809.707 toneladas, que, se somadas ao total de “pellet screening” produzido de 340.700 toneladas, resultará em um total de produção de finos de 1.150.407 toneladas.

Com base nesses cálculos, a diferença na produção de finos entre o resultado do modelo e o resultado calculado com base no balanço de massas seria de 0,89%, bem mais coerente com os outros resultados.

A modelagem do sistema produtivo do minério de ferro representado pelo processo produtivo da Samarco Mineração apresenta dois sistemas distintos: o sistema portuário e o sistema produtivo, cada um com sua aleatoriedade e suas simplificações, que interagem entre si pela interligação no pátio de estocagem.

Como pode ser visto pelos resultados comparativos, a diferença entre os resultados do modelo e o resultado real, em 2005, nos dois sistemas, portuário e produtivo, foi menor que 5% para a análise de cada um dos resultados e menor que 3,5% pela comparação dos resultados globais Tempo Total no Terminal Portuário, Produção Total de Pelotas, Produção Total de Finos e Total de Bombeamento.

Concluindo, considera-se validado o modelo desenvolvido para representar o sistema produtivo do minério de ferro, de forma que seja possível alcançar os objetivos traçados para esta pesquisa.

5.6 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA MEDIDA DE RENDIMENTO GLOBAL PARA ESTUDO DOS CENÁRIOS

Botter (2001) cita Pegden et al. (1995) como segue,

Pegden et al. (1995) mostram que a simulação é o processo de elaborar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos, com o propósito de compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias estratégias para a operação do mesmo.

A simulação tem que ter como objetivo a descrição do comportamento de sistemas; a construção de teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado; o uso do modelo para prever um comportamento futuro (efeitos produzidos por mudanças no sistema ou na sua forma de operar).

Para isso, faz-se necessário o uso da abordagem sistêmica, pois a mesma procura considerar o desempenho total do sistema e não se concentrar nas partes. Isto se baseia no fato de que, mesmo que cada elemento ou subsistema esteja otimizado do ponto de vista de dimensionamento, projeto ou operação, o desempenho global do sistema pode estar subotimizado devido às interações entre as partes.

Com base no exposto por Botter (2001), foi desenvolvida uma medida de rendimento global para avaliação do sistema em estudo. Essa medida representa o somatório dos custos de manutenção de estoques, de vendas perdidas e de multas por sobreestadia.

Por se tratar de informações estratégicas da Samarco Mineração S.A., os valores reais dos custos acima mencionados não são mostrados neste trabalho.

A representatividade da análise, a observação e a avaliação dos resultados dos experimentos foram preservadas, tendo em vista que a distorção do valor real dos custos de manutenção de estoques, de vendas perdidas e de multas por sobreestadia que compõem a medida de rendimento global foi feita por meio da divisão desse valor por uma constante. Dessa forma preservada foi a ordem de grandeza entre os custos para todos os cenários estudados.

A seguir é mostrado o desenvolvimento dos cálculos para mensuração dos custos comentados no modelo de simulação.

5.6.1 Custo de Manutenção de Estoque

O custo de manutenção de estoque é o custo do capital empregado na manutenção de uma determinada quantidade de estoque durante um período. Foi mensurado com base na quantidade de estoque médio de cada produto por dia simulado multiplicada pelo custo de produção do produto, sendo este multiplicado por uma taxa de atratividade considerada para o estudo. A soma dos custos de manutenção do estoque médio de cada produto é o custo de manutenção de estoque no período simulado.

Na modelagem, a quantidade de estoque gerada por dia é um resultado da simulação, e a informação do custo de produção de cada produto, uma entrada do modelo de simulação. Os valores reais desses custos não foram utilizados no estudo devido ao fato de serem informações confidenciais da Samarco Mineração S.A.. Foram utilizados valores fictícios para todos os cenários estudados e mantida a relação de grandeza com os custos de sobreestadia e vendas perdidas.

5.6.2 Custo das Vendas Perdidas

Para cada cenário estudado, o custo das vendas perdidas é calculado com base no resultado da simulação pela diferença entre o valor das vendas do cenário que apresentar maior valor em vendas e o valor da venda do cenário em estudo. O valor das vendas para o horizonte de simulação é calculado pelo somatório do produto (multiplicação) da quantidade vendida (embarcada) por navio pelo preço médio de venda do produto que está sendo vendido. Como já comentado, o valor real desse custo será transformado em um valor fictício devido ao fato de se tratar de uma informação estratégica e confidencial da Samarco Mineração S.A..

Como mostrado no item 5.2 deste capítulo, a quantidade embarcada por navio no horizonte de simulação será uma resposta do modelo depois de terminado o processo de simulação, e o preço médio de venda de cada produto uma

informação de entrada ao modelo. Após o término da simulação, esse resultado estará disponível para análise na estrutura de resultados do modelo.

5.6.3 Custo das Multas por Sobreestadia dos Navios

O cálculo do custo das multas por sobreestadia é o resultado da multiplicação do tempo base para cálculo da sobreestadia dos navios no terminal portuário pela taxa de “Demurrage” ou de “Dispatch”²⁵ dada em dólar por tonelada e estabelecida em contrato de compra quando a venda é FOB, ou em contrato de afretamento – COA²⁶, quando a venda é CFR. Como já mencionado anteriormente, os valores reais dessas taxas não serão mostrados em função de se tratar de informações confidenciais e estratégicas da Samarco. Foram utilizados valores fictícios, os mesmos em todos os cenários, para possibilitar a comparação entre eles. Também foi mantida a relação da ordem de grandeza desses custos com os custos de manutenção de estoques e custos de vendas perdidas. O custo de sobreestadia para cada navio estará disponível nos resultados da simulação, após o término da mesma para cada cenário estudado.

O tempo-base para cálculo da sobreestadia dos navios é definido como a diferença entre o tempo de carregamento realizado e o tempo de carregamento permitido. O detalhamento da definição de ambos os tempos será feito a seguir.

O tempo de carregamento permitido é calculado pela divisão da carga do navio embarcada pela taxa de carregamento em toneladas por dia, estabelecida em contrato de compra, quando a venda é FOB, ou pela taxa de carregamento estabelecida em contrato de afretamento, quando a venda é CFR. Após o término da simulação, o valor da carga embarcada para cada navio que saiu do sistema estará disponível nos resultados da simulação. As taxas de carregamento praticadas pela Samarco são distribuídas da seguinte forma: para carregamentos com quantidade

²⁵ Dispatch - Dispatch ou Presteza – prêmio, determinado em contrato, a que faz jus o contratante de um navio, quando este permanece menos tempo do que o acordado nos portos de embarque ou de descarga.

²⁶ Do inglês “Contract of Afreightment”

menor que 50.000 toneladas, a taxa é de 40.000 toneladas por dia; para carregamentos com quantidades entre 50.000 e 100.000 toneladas, a taxa é de 50.000 toneladas por dia; para carregamentos acima de 100.000 toneladas, a taxa é de 60.000 toneladas por dia. Essas informações foram inseridas na modelagem, possibilitando calcular o tempo de carregamento permitido por navio após a simulação.

O tempo de carregamento realizado é definido pela diferença entre o instante de início da desatracação e o instante de início de contagem de tempo do carregamento realizado.

O início da contagem do tempo de carregamento realizado também é estabelecido em contrato de compra, quando a venda é FOB, ou em contrato de afretamento, quando a venda é CFR. O início da contagem do tempo de carregamento realizado se inicia quando acabado o tempo de manobra permitido, conhecido como “Turn Time” (TT).

Quando o navio chega ao porto dentro do “layday”, apresenta o aviso de prontidão – NOR²⁷. Após o aceite do NOR, deverá ser contado o TT e, ao término deste, inicia-se a contagem do tempo de carregamento realizado.

Se o navio chegar dentro do “layday” e o carregamento se iniciar antes do término do TT, o tempo de carregamento realizado deve ser contado a partir do início de carregamento.

Se o navio chegar antes do início do “layday”, o TT é contado a partir do início do “layday”. Nesse caso, se o carregamento iniciar antes do término do TT, o tempo de início de carregamento realizado deve ser contado a partir do início de carregamento, senão no final do TT. Se o carregamento também iniciar antes do “layday”, o início da contagem de tempo de carregamento realizado deve ser contado a partir do início do carregamento.

Se o navio chegar depois do término do “layday”, o início da contagem de tempo de carregamento realizado deve ser contado a partir do início de carregamento.

²⁷ Do inglês “Notice of Readiness”

Uma lógica foi construída com base nas regras acima descritas para marcação do instante de início de carregamento de cada navio. A Figura 34 mostra a lógica construída no modelo computacional.

Figura 34 – Lógica de cálculo do instante de início da contagem de tempo de carregamento realizado.

5.7 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Objetivando simular o sistema produtivo do minério de ferro e obter os resultados necessários para atingir os objetivos traçados para a pesquisa, foram planejados os experimentos I, II, III, IV e V pelo modelo de simulação construído.

Os experimentos consistem na avaliação do comportamento da medida de rendimento global do sistema, que representa o somatório dos custos de manutenção de estoques, custo de multa por sobreestadia e custo de vendas perdidas no horizonte de estudo através das seguintes hipóteses:

- variação do nível de estoque de segurança dos produtos;

- mudança da programação da produção com diferentes configurações da restrição de tamanho mínimo de campanha²⁸ de produção;
- mudança da operação do sistema de um para dois berços de atracação de navios “capesizes”, que são navios que têm capacidade de carregamento acima de 75.000 toneladas.
- mudança da operação do sistema de um para dois carregadores de navio (“Shiploader”);
- mudança da operação do sistema de um para dois berços de atracação de navios “capesizes” com dois carregadores de navios disponíveis e independentes.

Após a etapa de validação do modelo, algumas premissas foram adotadas para a realização dos experimentos planejados, objetivando manter a consistência dos resultados com o propósito da pesquisa.

A primeira premissa refere-se à incerteza que existe na chegada dos navios. Nos contratos de afretamento de navios, a data de chegada dos navios não é fixa. É definida uma janela de tempo onde é acordado que a chegada do navio deve acontecer. Dessa forma, entre o planejamento e a execução das entregas, existe uma incerteza referente ao instante de chegada do navio, que pode ser representada por uma distribuição probabilística do posicionamento da chegada do navio dentro da janela de tempo de previsão de chegadas.

Como não é objetivo desta pesquisa estudar a interferência desse tipo de incerteza, definiu-se como entrada para o modelo, em todos os cenários que serão estudados, o seqüenciamento das vendas realizadas no ano de 2005 pela Samarco Mineração S.A..

Outra premissa estabelecida refere-se à influência dos finos no processo de estocagem e embarque no sistema global.

Tanto o “pellet feed” como o “pellet screening” dependem diretamente da produção de pelotas, ou seja, no ano de 2005 esses produtos foram produzidos seguindo o seqüenciamento de produção utilizado para a produção de pelotas.

²⁸ Entende-se por campanha um período ininterrupto de produção de um mesmo produto

As vendas do “pellet feed” e do “pellet screening” foram definidas a partir do momento em que havia estoque no pátio, o que significa que as entregas desses produtos não influenciaram para que houvesse atraso nos carregamentos de pelotas, a não ser pela ocupação do terminal portuário durante a execução das vendas.

Dessa forma, definiu-se que o estoque inicial dos finos PFN, PFL e PSC fossem unificados para eliminar uma possível falta de estoque na data de entrega. Sendo assim, para todos os experimentos serão configurados 500.000 toneladas de estoque inicial para a soma dos estoques iniciais dos produtos 3, 4 e 5.

Cabe ressaltar que os resultados dos cenários que serão estudados, referentes ao custo de manutenção de estoques, de vendas perdidas e de sobreestadia dos navios, são fictícios, porém preservam em verdadeira grandeza a relação entre eles. Os resultados com valores reais não foram apresentados por se tratar de informações confidenciais da Samarco Mineração S.A.

5.7.1 Experimentos I e II

O primeiro experimento realizado visou avaliar o comportamento do sistema produtivo de minério de ferro com relação à medida de rendimento global através da variação do nível de estoque de segurança.

Em função de o sistema global em estudo ser composto por dois sistemas distintos e integrados (sistema portuário e o sistema produtivo) através de um pátio de estocagem, o estoque resultante da interação entre eles é dinâmico. Dessa forma, a definição preliminar do significado do estoque de segurança para realização dos experimentos torna-se necessária para uma análise e avaliação clara e objetiva dos resultados.

Partindo do fato de que todos os cenários teriam a mesma programação de vendas, definiu-se como estoque de segurança para o sistema a quantidade de estoque inicial. Dessa forma é possível analisar o comportamento de todo o sistema quando o nível de estoque cresce, e conhecer até que ponto o aumento desse

estoque interfere na problemática de espera dos navios. Como já comentado na introdução deste capítulo, os experimentos foram realizados com a variação do estoque inicial das pelotas PBF e PDR. Os cenários estudados contemplaram os seguintes níveis de estoque de segurança em toneladas mostrados na Tabela 5.6 abaixo:

Tabela 5.6 – Níveis de estoque de segurança simulados nos cenários

Cenário	PBF	PDR	Total
1	0	0	0
2	100.000	100.000	200.000
3	200.000	200.000	400.000
4	300.000	300.000	600.000
5	400.000	400.000	800.000
6	500.000	500.000	1.000.000
7	750.000	750.000	1.500.000

O segundo experimento visou avaliar o comportamento do sistema produtivo de minério de ferro com relação à medida de rendimento global através da mudança da programação da produção com diferentes configurações da restrição de tamanho mínimo de campanha de produção.

Pretendeu-se estudar a variação desse segundo fator, já que a restrição de campanha mínima é um dos fatores mais importantes para o processo de elaboração da programação de produção do processo produtivo do minério de ferro. Envolve problemas de formação de custo no planejamento de lavra na mina e problemas de custos de “setup” na sequência dos processos.

Como na elaboração da programação da produção os dados são determinísticos, será de grande utilidade para o processo de planejamento integrado de produção encontrar o melhor ganho na execução do planejamento e programação da produção do processo produtivo do minério de ferro, conhecer o comportamento do processo em diferentes configurações da restrição de campanha mínima de produção quando somada à parcela de aleatoriedade que é peculiar do sistema na realidade. Com base neste pressuposto, foram testados cenários onde a

programação da produção foi elaborada com variação da restrição de campanha mínima de dois, quatro, seis, oito, dez e doze dias.

No Anexo F é mostrada a lógica do seqüenciador de produção utilizado para elaborar as diferentes programações empregadas na simulação.

Para realização dos experimentos I e II foi elaborado um planejamento de 42 cenários a serem simulados conforme é mostrado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Planejamento das rodadas de simulação para experimentos I e II

Cenários	Campanha Mínima (dias)	Estoque Segurança (ton x 1000)
1	2	0
2	4	0
3	6	0
4	8	0
5	10	0
6	12	0
7	2	200
8	4	200
9	6	200
10	8	200
11	10	200
12	12	200
13	2	400
14	4	400
15	6	400
16	8	400
17	10	400
18	12	400
19	2	600
20	4	600
21	6	600
22	8	600
23	10	600
24	12	600
25	2	800
26	4	800
27	6	800
28	8	800
29	10	800
30	12	800
31	2	1000
32	4	1000
33	6	1000
34	8	1000
35	10	1000
36	12	1000
37	2	1500
38	4	1500
39	6	1500
40	8	1500
41	10	1500
42	12	1500

Os resultados dos quarenta e dois cenários simulados serão apresentados e discutidos com relação aos custos de manutenção de estoques, de vendas perdidas, por sobreestadia dos navios, e pela medida de rendimento global do sistema, que é a interação desse três custos juntos.

A Figura 35 mostra os resultados referentes ao custo de manutenção de estoques dos cenários simulados.

Figura 35 – Custo de manutenção de estoques em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança.

O gráfico apresentado na Figura 35 mostra os custos resultantes da manutenção de estoque de finos e pelotas da simulação do sistema produtivo do minério de ferro com a variação do estoque de segurança e a variação da restrição da campanha mínima em dias. No eixo das ordenadas, os valores são expressos em unidade monetária e, no eixo das abscissas, estão representados os cenários simulados, como mostrado na tabela 5.7. Todos os gráficos que serão mostrados adiante estarão nessa configuração.

Como já comentado, o comportamento do custo de finos não variou nos cenários simulados, atingindo o objetivo traçado no planejamento dos experimentos.

O comportamento do custo de manutenção de estoques das pelotas seguiu o comportamento lógico de aumento do estoque médio ao longo do horizonte de

tempo simulado de 365 dias com aumento do estoque de segurança. Porém pode-se observar que, mantendo o estoque de segurança constante, o custo de manutenção do estoque varia com a mudança da restrição de campanha mínima e que essa variação diminui à medida que o estoque de segurança aumenta, ficando praticamente constante a partir dos níveis de 800.000 toneladas.

Esse comportamento vem mostrar que para baixos níveis de estoque de segurança a restrição de campanha mínima influencia na quantidade de estoque médio gerado e, conseqüentemente, no custo de manutenção desse estoque.

A Figura 36 mostra os resultados do custo de vendas perdidas nos cenários simulados.

Figura 36 – Custo de vendas perdidas em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança.

O gráfico da Figura 36 mostra o custo referente às vendas perdidas para o horizonte de tempo simulado. Na rodada de simulação, em cada cenário são realizadas 30 replicações, com seus resultados diferentes em função dos desvios estatísticos adotados. Em cada replicação, uma quantidade de navios é processada no sistema portuário. Existe a possibilidade de que uma parte dos navios não seja processada pelo sistema até o final do horizonte de tempo da simulação devido às filas de espera que são formadas.

Para cada cenário, o modelo contabiliza em média qual foi a quantidade de navios processada como também o total embarcado que representa o total de vendas para o cenário. O custo de vendas perdidas tem como base o cenário em que houve a maior venda e representa a quantidade que os demais cenários não foram capazes de realizar. Essa quantidade então é traduzida em um custo de venda perdida através da multiplicação pelo preço de venda. Assim sendo, o cenário em que houve condições de processar o maior número de navios terá a maior quantidade vendida e o custo de vendas perdidas nulo. Para os demais cenários, a quantidade de vendas abaixo da venda do melhor cenário de vendas é caracterizada como uma receita que não pode ser concretizada e, desta forma, contabilizada como um custo de venda perdida.

O comportamento da curva no gráfico mostrado na Figura 36 apresenta uma tendência de redução do custo de vendas perdidas à medida que o nível do estoque de segurança cresce. Isso se deve ao fato de que, mantendo-se todas as outras variáveis constantes, com o aumento do estoque de segurança decrescem as esperas por carga dos navios. Se o tempo de espera diminui, maior quantidade de navios pode ser processada no sistema, maior será a quantidade vendida e menor será o custo de vendas perdidas.

Outro comportamento que pode ser observado é uma forte variação em função da restrição de campanha mínima. Como será visto a seguir, esse comportamento repete-se para o custo de “demurrage” e será analisado conjuntamente com o mesmo.

O gráfico da Figura 37 mostra o custo referente a sobreestadias dos navios no sistema portuário. O detalhamento desse custo está mostrado no item 5.6.3 deste capítulo.

Figura 37 – Custo de sobreestadia (“demurrage”) em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança

O comportamento do custo de “demurrage” também apresenta uma tendência de redução em função do crescimento do estoque de segurança até os níveis de 1.000.000 de toneladas. A partir desse ponto, o custo de “demurrage” não varia com o estoque de segurança. Analogamente ao comportamento do custo de vendas perdidas, isso se deve ao fato de que, com o aumento do nível de estoque de segurança, diminuem as chances de os navios chegarem sem haver estoque para carregá-los. Dessa forma, as esperas por carga diminuem, diminuindo também o custo de sobreestadia dos navios.

Observa-se também, para esse custo, o comportamento de que, mantendo-se o estoque de segurança constante, o custo de “demurrage” varia com a mudança da restrição de campanha mínima e essa variação diminui à medida que o estoque de segurança aumenta, tendendo a ficar constante a partir dos níveis de 1.000.000 de toneladas de estoque de segurança. Isso se explica pelo fato de que, para um certo nível de estoque de segurança que, no caso dos cenários simulados, foi de 1.000.000 de toneladas, não existe espera por falta de carga, e o custo de “demurrage” devido a outras causas que resultam em espera dos navios, tais como restrição de atracação de navios tipo “capesize” somente no Berço Oeste, limite de somente um navio poder trafegar pelo canal de acesso, de haver somente um

“shiploader” para carregamento dos navios, taxa de carregamento, entre outros motivos.

Analisando-se conjuntamente os gráficos do custo de vendas perdidas e do custo de “demurrage”, observa-se uma ampla variação desses custos em relação à restrição de campanha mínima nos níveis mais baixos de estoque de segurança. Observa-se também que o comportamento de ambas as curvas segue o mesmo sentido de variação na comparação entre os níveis de campanha mínima testados. Isso se explica pelo fato de que ambos os custos são influenciados pelo tempo de espera dos navios, e a variação desse tempo com a restrição de campanha mínima faz com que os custos variem no mesmo sentido.

A Figura 38 apresenta a composição desses três custos e representa o resultado global dos cenários simulados em termos monetários que para este estudo está denominado de medida de rendimento global do sistema.

Figura 38 – Medida de rendimento global do sistema em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança

Analisando-se o comportamento da composição dos três custos discutidos anteriormente, observa-se a existência de um “trade-off”²⁹ entre os custos de vendas

²⁹ “Trade_off” – Expressão de origem inglesa que, no âmbito da economia se refere a uma situação de escolha conflitante, ou seja, quando a solução para determinado problema implica consequências negativas em outra área, como, por exemplo; ao se controlar a inflação através de estratégias recessivas, existiria, então, um “trade-off” entre inflação e recessão.

perdidas, de sobreestadia e de manutenção de estoques. Nessa curva pode-se visualizar um ponto de mínimo configurando o melhor cenário, em que o estoque de segurança foi de 400.000 toneladas e a restrição de campanha mínima foi de seis dias. Este cenário foi o de número 15 na tabela 5.7.

É visível também um ponto de mínimo no ponto de seis dias quando se observa o comportamento do custo global somente com relação à variação da restrição de campanha mínima e manutenção do estoque de segurança constante.

Fato atípico nesse comportamento é observado no crescimento do custo global entre os níveis dois e quatro de restrição de campanha mínima, caindo para o ponto de mínimo no nível de seis dias. Também se observa a queda do custo global entre os níveis de dez para doze dias.

A explicação encontrada para esse comportamento deve-se ao fato de que o lote de produção diário utilizado pelo seqüenciador de produção para construção de todas as seqüências de produção com restrição de tempo mínimo de campanha de dois a doze dias foi de aproximadamente 40.000 toneladas. A programação dos navios utilizada como entrada do modelo, disponível no Anexo A, mostra que o tamanho médio dos navios tipo “panamax” é da ordem de 40.000, e dos navios tipo “capesize” é da ordem de 120.000 toneladas. Isso faz com que o seqüenciamento de produção que apresente o lote mínimo para mudança mais próximo do múltiplo de 40.000 e 120.000 apresente a menor perturbação na espera dos navios por carga.

Assim, para dois dias de restrição de campanha mínima o lote mínimo é de 80.000 toneladas, que é múltiplo de 40.000, porém não atende perfeitamente para navios “capesize” de 120.000 toneladas.

Já para quatro dias de restrição de campanha mínima, o lote mínimo é de 160.000 toneladas, que é múltiplo de 40.000, porém não é de 120.000.

Na campanha em que a restrição de mínimo é de seis dias, o lote mínimo é de 240.000 toneladas, que é valor múltiplo de 40.000 e também de 120.000.

Em restrições maiores, a perturbação volta a aumentar em função da falta de flexibilidade de mudança de produção, podendo ficar um determinado navio esperando carga até que a restrição de tempo acabe para ser produzida sua carga.

Dentro das condições de contorno simuladas, essa lógica mostra que a restrição de campanha mínima de seis dias tende a apresentar menor perturbação na espera dos navios por carga e apresente a melhor condição para se ter o menor custo global.

Para corroborar os resultados do modelo construído, no ano de 2004 a Samarco trabalhou com a campanha mínima em torno de oito dias e estoque de segurança de 119.453 toneladas, com o total de embarque de 14.057.252 toneladas. No ano de 2005, a Samarco trabalhou com campanha mínima de seis dias e estoque de segurança na casa de 140.238 toneladas. Em 2005, a quantidade embarcada foi de 15.101.074 toneladas.

Comparando-se os resultados de 2005 com os de 2004, observa-se que, em termos de custos globais, o ano de 2005 foi melhor que o de 2004. O custo de “demurrage” no ano de 2005 ficou 22,76% abaixo do do ano de 2004, as vendas em 2005 foram maiores que em 2004, e o estoque médio na ordem de 356.901 toneladas em 2004 contra 390.347 toneladas em 2005, ou seja, o custo de manutenção de estoque foi praticamente o mesmo .

5.7.2 Análise de Sensibilidade para os Experimentos I e II

Algumas condições de contorno do sistema podem variar com o tempo. Com isso a melhor condição encontrada para os cenários simulados pode mudar. Nesta etapa do trabalho, procurou-se descobrir, com a mudança de algumas principais condições de contorno, como se comportaria a curva da medida de rendimento global. Foram planejados novos cenários que fossem realmente possíveis de acontecer dentro do mercado de minério de ferro. Esse planejamento baseou-se em possíveis condições que pudessem mudar a forma da curva da medida de rendimento global em relação à restrição de campanha mínima e o nível de estoque de segurança.

O primeiro teste foi feito com base na redução dos custos de estocagem na ordem de 25%, 50% e 90%. Abaixo é mostrado, na Figura 39, o comportamento da

curva da medida de rendimento global com redução dos custos de estocagem em 90%.

Figura 39 – Medida de rendimento global do sistema em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança com redução de 90% no valor do custo de estocagem

Observa-se, no gráfico da Figura 39, que, mesmo com uma redução na ordem de 90% no valor dos custos de estocagem, o ponto de menor custo global permanece na condição de estoque de segurança em 400.000 toneladas e restrição de campanha mínima de seis dias. O mesmo comportamento repetiu-se para as reduções de 25 e 50% no custo de estocagem. Isso vem mostrar que, mantendo-se todas as outras condições constantes, a redução do custo de estocagem não muda o ponto de menor custo da curva. Esse fato se explica, se observarmos as curvas dos custos de vendas perdidas e de “demurrage”, que apresentam uma tendência de queda até certo ponto e depois ficam constantes.

O segundo teste foi realizado com o objetivo de representar uma crise no mercado de minério de ferro, na qual os preços de vendas seriam reduzidos juntamente com os custos de “demurrage”. Foram verificadas várias combinações de redução do preço de vendas e “demurrage”, como também aumentos dos custos de estocagem. Observou-se, nos resultados, que o ponto de mínimo do custo global somente muda para grandes reduções no preço de vendas, aliado a um aumento dos custos de estocagem. A Figura 40 mostra o teste onde houve, pela primeira vez,

a mudança do ponto de custo mínimo, com a combinação de uma redução dos custos de vendas perdidas e de “demurrage” na ordem de 70% e um aumento nos custos de estocagem na ordem de 30%. Nessa condição, o menor custo global aconteceria com o estoque de segurança em 200.000 toneladas e com a restrição de campanha mínima em seis dias.

Figura 40 – Medida de rendimento global do sistema em função da restrição de campanha mínima e nível de estoque de segurança com redução de 70% no valor do custo de vendas perdidas e “demurrage” e 30% de aumento do custo de estocagem

Esta análise mostra que o “trade-off” entre os custos de vendas perdidas, de “demurrage” e de manutenção de estoques no sistema produtivo do minério de ferro existe e é pouco sensível às variações do valor monetário que compõe esses custos.

5.7.3 Experimentos III, IV e V

Nos experimentos III, IV e V foi verificado o comportamento da medida de rendimento global do sistema, na hipótese de alteração da sua forma de operação. É sabido que o sistema portuário modelado apresenta restrições operacionais em que a capacidade de atracação em um dos berços é limitada a navios menores que os de 80.000 toneladas e em que para a operação de carregamento dos navios nesses dois berços só existe um carregador de navios. Dessa forma, objetivou-se responder

à pergunta: “O que aconteceria se fosse possível atracar navios maiores que os de 80.000 toneladas no Berço Leste e se fosse possível ter dois carregadores de navios independentes?” Para responder a estas perguntas foram simulados mais três cenários e realizada a comparação com o cenário de melhor resultado em relação à medida de rendimento global do sistema dos experimentos I e II. Os cenários então foram comparados em relação à medida de rendimento global do sistema e à taxa de ocupação do sistema portuário.

O primeiro cenário simulou o sistema portuário com ambos os berços tendo capacidade para atracar navios “capecsize” e “panamax”. O segundo cenário simulou o sistema inicial com dois carregadores de navios. Por último, foi simulado o sistema portuário com ambos os berços tendo capacidade para atracar navios “capecsize” e “panamax” e com dois carregadores de navios. As Figuras 41 e 42 mostram os resultados desses experimentos com relação à medida de rendimento global e à taxa de ocupação do terminal portuário.

Figura 41 – Comparativo entre o cenário 15 e os experimentos III, IV e V pela medida de rendimento global.

Figura 42 – Comparativo entre o cenário 15 e os experimentos III, IV e V pela taxa de ocupação do porto.

5.8 CONCLUSÃO PARA O CAPÍTULO

Após a análise de todas as informações geradas nas simulações da etapa de validação e dos cenários I, II, III, IV e V, e com base no plano de vendas de 2005, que serviu de entrada para as rodadas de simulação, e na capacidade produtiva instalada, que serviu de referência para a modelagem do sistema produtivo do minério de ferro, pode-se concluir que a operação desse sistema com estoque de segurança de 400.000 toneladas e seis dias de restrição de campanha mínima na elaboração da programação de produção resultaria no menor soma para os custos de demurrage, de manutenção de estoques e de vendas perdidas.

Se fosse possível operar o sistema portuário sem restrição de capacidade de atracação, haveria uma redução na taxa de ocupação do porto de 1,63%, que cairia de 79,26% para 77,97%. Essa redução permitiria que, ao final do ano simulado, houvesse um aumento nos embarques de 0,48%, totalizando 65.933 toneladas a mais embarcadas. Isso representaria uma redução de 24,71% no custo global do sistema.

Se fosse possível operar o sistema portuário com dois carregadores de navios independentes, haveria uma redução na ocupação do porto de 10,48%, que cairia de 79,26% para 70,95%. Essa redução na ocupação do porto permitiria que, ao final do ano simulado, todos os navios programados no plano de embarques fossem atendidos, o que representaria uma redução no custo global do sistema em 64,20%.

Se fosse possível operar o sistema portuário sem restrição nos berços e com dois carregadores de navios independentes, a taxa de ocupação do porto cairia para 65,87%, representando uma redução de 16,89%. Essa redução na taxa de ocupação permitiria que todos os embarques fossem atendidos, o que representaria uma queda no custo global do sistema de 71,31%.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa tratou da modelagem por simulação de um sistema produtivo de minério de ferro, com aplicação para o caso do sistema produtivo da Samarco Mineração S.A.

O objetivo principal, traçado no início do trabalho, foi atingido. Foi construído um modelo de simulação representativo de um sistema produtivo do minério de ferro pelo qual os produtos são comercializados no mercado transoceânico, apresentado no capítulo 4, o que possibilitou o estudo através da sua operação virtual pela técnica de simulação computacional apresentada no capítulo 5.

Com relação aos objetivos específicos, comenta-se o seguinte:

O modelo de simulação desenvolvido representou a interação do sistema produtivo do minério de ferro com o sistema portuário pela qual se pôde estudar a cadeia produtiva no aspecto relativo à variação do nível de estoque de segurança e da restrição de tempo mínimo para mudança de campanha na elaboração da programação da produção da cadeia citada, conforme o que foi apresentado no capítulo 5.

Foi mostrado, no capítulo 2, que o processo produtivo da mineração do ferro é um sistema contínuo e em série. O modelo de simulação construído utilizou a técnica de simulação discreta onde foi construída uma lógica para discretizar o processo produtivo, tornando possível simular um sistema contínuo, sem perder a integridade dos resultados, como pôde ser visto no capítulo 5. Dessa forma, conclui-se que é possível utilizar a simulação a eventos discretos para simular o processo contínuo em estudo.

O estudo tornou possível avaliar o “trade-off” existente entre os custos de vendas perdidas, de “demurrage” e de manutenção de estoques, e isso só foi possível devido ao fato de o modelo abranger a interação do sistema produtivo com o sistema portuário.

Com base nos experimentos III, IV e V mostrados no capítulo 5, foi possível comparar e avaliar novas formas de operação para a cadeia produtiva do minério de

ferro através da medida de rendimento global do sistema e da taxa de ocupação do terminal portuário.

Por intermédio do estudo de simulação utilizando-se o modelo desenvolvido, foi possível identificar o nível ideal de estoque de segurança para o sistema como também identificar, no processo de elaboração do programa de produção, o tamanho ideal do limite mínimo de tempo para mudança de campanha de produção, que resulta no menor custo referente a manutenção de estoque, sobreestadia dos navios no porto e vendas que podem ser perdidas no horizonte de estudo.

O modelo de simulação apresenta-se como uma ferramenta de grande utilidade para o processo de tomada de decisão na gestão de um sistema produtivo de minério de ferro, visto que, oscilações nos preços de vendas dos produtos, nos custos de afretamento das embarcações e nos custos de produção, este último base para os custos de manutenção de estoque, são reais no mercado do minério de ferro. Desta forma, ter a acesso a essa ferramenta de auxílio ao estudo de soluções para a redução dos custos na operação do sistema produtivo, torna-se uma oportunidade vantajosa para a gestão desse sistema.

Todas os cenários simulados utilizaram informações referentes às chegadas dos navios na operação do sistema produtivo da Samarco Mineração S.A. no ano de 2005, para propiciar a etapa de validação do modelo. Porém, para planejamentos futuros, as datas das chegadas dos navios são informadas através de uma janela de tempo, que geralmente é de 15 dias. Com isso, o instante real de chegada do navio não é conhecido, o que faz com que outra parcela de incerteza, além das simuladas nesta pesquisa, influenciem na formação dos custos de sobreestadia, de vendas perdidas e de manutenção de estoques. Dessa forma, será de grande utilidade para o processo de planejamento de produção da cadeia produtiva do minério de ferro possuir um modelo de simulação que considere também essa parcela de incerteza, onde o planejamento de produção poderia encontrar formas de operação otimizadas em função dos custos aqui mencionados com muito mais precisão e assertividade. Dessa forma, a adequação do modelo aqui construído para simular a cadeia produtiva do minério de ferro considerando a parcela de incerteza referente à janela de tempo de chegada pode ser mencionada como uma oportunidade de estudo futuro.

Aparece também, como oportunidade para novas pesquisas, o estudo da influência da incerteza na confiabilidade da quantificação dos fluxos do processo produtivo da mineração do ferro e da incerteza na quantidade entregue ao cliente na operação do sistema produtivo do minério de ferro. O detalhamento dessas incertezas foi feito no capítulo 2 deste trabalho.

Outra oportunidade que aparece em decorrência desta pesquisa é a investigação da influência do aumento da variabilidade nos processos produtivos na operação do sistema produtivo do minério de ferro. A variabilidade dos processos foi considerada no modelo construído, porém a investigação do aumento dessa variabilidade não foi objetivo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS³⁰

ARCAUTE, K. et al. **Optimize foamvolute process through analysis of production constraints and performance variables using ARENA 5.0 software submitted to Dr. Rafael S. Gutierrez.** Texas: The University of Texas at El Paso, 2001.

BALOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos:** planejamento, organização e logística empresarial. Tradução de Elias Pereira. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

BASU, A. J.; BAAFI, E. Y. Discrete event simulation of mining systems: current practice in Australia. **International Journal of Surface Mining**, Balkeema, v. 13, p. 79 – 84, 1999.

BATISTA, B. C. D. **Análise das operações com embarcações de apoio off-shore na Bacia de Campos – RJ.** 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BELÉM, A. C. V.; DARÉ, C. T. **Controle estatístico de processos.** 2000. Apostila do curso oferecido pela Fundação de Desenvolvimento Gerencial, Belo Horizonte, 2000.

BOTTER, R. C. **Introdução às técnicas de simulação e ao programa ARENA.** 2001. Apostila do curso oferecido Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

_____. **Tratamento de dados em modelos de simulação discreta.** 2002. 147 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BOTTER, R. C. et al. Análise da utilização de janelas de tempo na chegada de navios e sua influência sobre o desempenho das operações portuárias. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 20., 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SOBENA, 2004. p. 1 – 11.

³⁰ De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023:** informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. Tradução da Equipe do Centro de Estudos em Logística e Adalberto Neves. São Paulo: Atlas, 2001.

CARDOSO, J.; FARINES, J. M.; CURY, J. E. **Controle de sistemas de manufatura**. 1994. Apostila do curso oferecido pelo Curso de Pós-Graduação em Automação Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina & Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 1994.

CARVALHO, D. D. T. **Metodologia de análise do desempenho da usina de concentração da Samarco Mineração S.A. baseada em simulação das operações**. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

CASSEL, R. A. **Desenvolvimento de uma abordagem para a divulgação da simulação no setor calçadista gaúcho**. 1996. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

CHAN, F. T. S. et al. A simulation approach in supply chain management. **Integrated Manufacturing Systems**, Bradford, v. 13, p. 117 – 122, Jan. 2001.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. v. 1, 2. ed. São Paulo: Signus, 2002.

COMEXNET. **Dicionário COMEX**. Disponível em:
<http://comexnet.com.br/comexnet/index.cfm?pag=main_1.cfm>. Acesso em: 12 ago. 2005.

CVRD. **Processo minério de ferro e pelotas**. Disponível em:
<<http://www.cvrd.com.br/cvrd/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=38>>. Acesso em: 5 jul. 2005.

DIAS, E. G. C. S. **Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento**. 2001. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

FORRESTER, J. W. **World dynamics**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis: Visual Books, 2001.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. 2003. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2003.

GOLDENBERG, M. **A arte de pesquisar**. Rio de Janeiro: Record, 1999.

GOLDRATT, E. M. **Corrente crítica**. Tradução de Thomas Corbett Neto. São Paulo: Nobel, 1998.

GONZALEZ, J. A.; BOTTER, R. C. Vantagens e desvantagens da aplicação de técnicas de simulação versus a teoria de filas no planejamento portuário: uma discussão conceitual e uma aplicação prática. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 19., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SOBENA, 2002.

HAMERI, A. P.; PAATELA, A. Multidimensional simulation as a tool for strategic logistics planning. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 273-285, Nov. 1995.

HOLLOCKS, B. A well-kept secret? simulation in manufacturing industry reviewed. **OR Insight**, Warrick, v. 5, p. 12 – 17, Oct./Dec. 1992.

IRON ORE OUTLOOK – IOO. Sydney: AME Mineral Economics, September / 2005. Mensal. ISSN 1321-6775.

JURAN, J. M. The quality control process. In: JURAN, J. M. **Juran's quality control handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1998. p. 4.1 – 4.29.

KELTON, W. D. et al. **Simulation with ARENA**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

KNIGHTS, P. F.; BONATES, E. J. L. Applications of discrete mine simulation modeling in South America. **International Journal of Surface Mining**, [s.l.] v. 13, p. 69 – 72, 1999.

KONYUKH, V.; GALIYEV, S.; Li, Z. Mine simulation in asia. **International Journal of Surface Mining**, [s.l.] v. 13, p. 57 – 67, 1999.

LAMOSO, L. P. **A exploração de minério de ferro no Brasil e no Mato Grosso do Sul**. 2001. 305 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling e analysis**. 3th ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. How to select simulation software for manufacturing applications. **Industrial Engineering**, New York, v. 24, nº 7, p. 29 – 35, Jul. 1992.

LEE, Y. H.; KIM, S. H. Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints. **Computers and Industrial Engineering**, [s.l.] v. 43, nº 1-2, p. 169 – 190, Jul. 2002.

LENDERMANN, P. et al. Distributed supply chain simulation as a decision support tool for the semiconductor industry. **Simulation**, [s.l.] v. 79, n. 3, p. 126 – 138, 2003.

LUZ, A. B. et al. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004.

MARTINS, M. A. S.; PEREIRA, F. F.; SILVA, C. J. Balanço de massas automático na Mina de Carajás da Cia Vale do Rio Doce. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 33 e 4., 2003, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ABM, 2003.

MARUTA, T.; IKKAI, Y.; KOMODA, N. Simulation tool of supply chain model with various structure and decision making processes. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 7., 1999, Barcelona. **Anais...** Barcelona: IEEE, 1999. v. 2, p. 1443 – 1449.

MENEZES, A.; RODRIGUES, L. H. Breves considerações sobre a flexibilidade e o grau de especialização técnica das ferramentas de simulação computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 16., 1996, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SOBRAPO, 1996.

MIN, H.; ZHOU, G. Supply chain modeling: past, present and future. **Computers and Industrial Engineering**, New York, v. 43, n. 1-2, p. 231 – 249, Jul. 2002.

MINEGISHI, S.; THIEL, D. System dynamics modeling and simulation of a particular food supply chain. **Simulation Practice and Theory**. [s.l.] v. 8, n. 5, p. 321 – 339, Dec. 2000.

PANAGIOTOU, G. N. Discrete mine system simulation in Europe. **International Journal of Surface Mining**, [s.l.] v. 13, p. 43 – 46, 1999.

PEGDEN, C. D. et al. **Introduction to simulation using SIMAN**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.

PERSSON, F.; OLHAGER, J. Performance simulation of supply chain designs. **International Journal of Production Economics**. [s.l.] v. 77, n. 3, p. 231 – 245, Jun. 2002.

PIFFER, 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**. 2004. 228 f. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) – Programa de Pós-Graduação em Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

PIDD, M. **Computer simulation in management science**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.

PINTO, L. R. Uso de técnicas de pesquisa operacional na otimização das operações de lavra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 6., 1995, Salvador. **Coletânea de trabalhos técnicos**. Salvador: IBRAM, 1995. p. 53 – 61.

_____. **Metodologia de Análise do Planejamento de Lavra de Minas a Céu Aberto Baseada em Simulação das Operações de Lavra**, 1999. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

PRADO, D. S. **Teoria das filas e da simulação**. 2. ed. Belo Horizonte: INDG, 1999a.

_____. **Programação linear**. Belo Horizonte: INDG, 1999b.

REDDY, R. Grand challenges in AI. **ACM Computing Surveys**, New York, v. 27, n. 3, p. 301-303, Sept. 1995.

SALIBY, E. **Repensando a simulação: a amostragem descritiva**. São Paulo: Atlas, 1989.

SAMARCO. **Operação**. Disponível em: <<http://www.samarco.com.br>>. Acesso em: 2 jul. 2005.

SCHRIBER, T. J. **Simulation using GPSS**. New York: John Wiley & Sons, 1974.

SEN, W.; POKHAREL, S.; YULEI, W. Supply chain positioning strategy integration, evaluation, simulation, and optimization. **Computers and Industrial Engineering**, [s.l.] v.46, n. 4, p. 781 – 792, Jul. 2004.

SHANNON, R. E. **Systems simulation: the art and science**. New Jersey: Prendice-Hall, 1975.

SHAPIRO, J. F. **Modeling the supply chain**. California: Duxbury Press, 2001.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação**. 3. ed. Florianópolis: LED/UFSC, 2001.

SIMON, H. **The sciences of the artificial**. Cambridge: MIT Press, 1969.

STURGUL, J. R.; LI, Z. New developments in simulation technology and applications in the minerals industry. **International Journal of Surface Mining**, [s.l.] v. 11, p. 159 – 162, 1997.

STURGUL, J. R. Discrete mine system simulation in the United States. **International Journal of Surface Mining**, [s.l.] v. 13, p. 37 – 41, 1999.

SZYMANKIEWCI, J.; MCDONALD, J.; TURNER, K. **Solving business problems by simulation**. London: McGraw-Hill Publishing Co. 1988.

THE ANNUAL OUTLOOK FOR IRON ORE (TAOFIO). London: CRU International Limited, 2004.

UMEDA, S. Modeling and simulation for supply chain business integration. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, 1., 2001, Tokio. **Anais...** Tokio: IEEE, 2001, v. 5, p. 2991 – 2996.

UNCTAD – UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. **Port development: a handbook by the secretariat of UNCTAD**. 2ª ed. New York: United Nations, 1985.

VAGENAS, N. Applications of discrete-event simulation in canadian mining operations in the nineties. **International Journal of Surface Mining**, [S.L.] v. 13, p. 77 – 78, 1999.

ANEXO A – Informações das chegadas dos navios

1	1	2	2	44.958	0,02	0,00	240,00
2	2	2	2	162.061	327,00	120,00	360,00
3	2	2	2	166.030	390,00	48,00	432,00
4	2	2	2	129.554	398,00	192,00	456,00
5	2	1	1	129.188	417,27	360,00	720,00
6	2	1	1	139.585	554,25	432,00	792,00
7	2	1	1	123.689	602,00	528,00	840,00
8	1	2	2	44.478	711,50	504,00	744,00
9	2	1	1	140.077	684,75	624,00	936,00
10	2	1	1	125.311	796,00	648,00	1008,00
11	2	2	2	164.008	816,02	816,00	1056,00
12	2	1	1	160.941	859,70	576,00	864,00
13	1	2	2	43.534	936,02	936,00	1176,00
14	2	2	2	75.238	955,50	864,00	1056,00
15	1	2	2	44.618	1019,00	960,00	1200,00
16	2	2	2	164.947	1029,83	720,00	960,00
17	2	1	1	143.981	1074,00	1008,00	1368,00
18	2	1	1	158.394	1233,00	1104,00	1368,00
19	1	2	2	43.330	1321,43	1176,00	1416,00
20	2	1	1	163.038	1349,50	1176,00	1416,00
21	2	1	1	162.372	1417,50	1272,00	1512,00
22	2	2	2	129.911	1461,50	1392,00	1632,00
23	1	2	2	44.280	1591,42	1560,00	1800,00
24	1	4	4	32.698	1719,25	1680,00	1896,00
25	1	3	3	65.472	1728,90	1632,00	1800,00
26	2	2	2	166.452	1845,40	1680,00	2040,00
27	1	2	2	41.933	1914,00	1536,00	1776,00
28	2	1	1	156.019	1848,30	1824,00	2136,00
29	2	1	1	139.624	1904,80	1728,00	1968,00
30	2	1	1	161.288	2047,00	2016,00	2256,00
31	1	2	2	43.560	2084,00	1848,00	2088,00
32	2	1	1	140.254	2080,30	1920,00	2160,00
33	2	2	2	121.846	2136,02	2136,00	2376,00
34	2	2	2	97.425	2209,50	2160,00	2400,00
35	2	1	1	140.586	2477,00	2376,00	2736,00
36	2	1	1	116.327	2544,02	2544,00	2904,00
37	2	1	1	141.236	2616,02	2616,00	2856,00
38	1	2	2	40.957	2678,67	2520,00	2760,00
39	2	1	1	160.246	2811,00	2544,00	2904,00
40	2	2	2	146.580	2880,02	2880,00	3240,00
41	2	2	2	145.047	2941,75	2808,00	3048,00
42	1	5	5	71.633	2983,00	2808,00	3168,00
43	2	2	2	163.198	3020,50	2808,00	3048,00
44	1	2	2	43.095	3090,50	2784,00	3024,00
45	2	1	1	170.706	3240,02	3240,00	3480,00
46	2	2	2	163.167	3330,67	2976,00	3240,00
47	1	2	2	42.947	3378,92	2928,00	3168,00
48	2	1	1	139.797	3472,32	3288,00	3528,00
49	2	2	2	162.245	3528,02	3528,00	3888,00
50	1	2	2	42.725	3518,90	3336,00	3576,00
51	1	3	3	69.444	3567,83	3288,00	3648,00
52	2	2	2	132.603	3728,40	3432,00	3672,00
53	1	2	2	43.636	3759,30	3648,00	3888,00
54	2	2	2	142.819	3864,47	3720,00	3960,00
55	2	1	1	167.174	3888,02	3888,00	4200,00
56	2	2	2	96.834	3969,50	3744,00	3984,00
57	2	1	1	155.242	4069,50	4104,00	4344,00
58	2	1	1	160.260	4116,50	3216,00	4200,00
59	1	1	1	74.706	4152,02	4152,00	4512,00
60	2	1	1	163.392	4279,00	4080,00	4344,00
61	1	2	2	43.595	4336,70	4104,00	4344,00
62	2	2	2	165.036	4351,00	4344,00	4704,00
63	2	4	4	141.179	4440,02	4440,00	4824,00
64	2	1	1	164.740	4521,75	4488,00	4848,00
65	1	2	2	42.548	4605,92	4248,00	4488,00
66	1	2	2	44.262	4634,75	4560,00	4800,00
67	2	1	1	165.704	4880,75	4800,00	5064,00
68	2	1	1	151.371	4905,00	4752,00	5136,00
69	2	2	2	121.798	4944,02	4944,00	5184,00
70	1	2	2	40.395	4986,90	4848,00	5088,00
71	2	1	1	126.833	4979,00	4656,00	5016,00
72	2	2	2	97.978	5020,33	4872,00	5112,00
73	2	2	2	163.264	5043,00	5016,00	5376,00
74	2	2	2	153.733	5164,50	5064,00	5304,00
75	2	1	1	133.900	5251,50	4632,00	4872,00

(Continua)

ANEXO A – Informações das chegadas dos navios

76	2	1	1	140.197	5283,00	5256,00	5496,00
77	1	3	3	67.094	5317,50	5088,00	5448,00
78	1	1	1	73.447	5488,08	5184,00	5424,00
79	2	1	1	165.655	5490,00	5352,00	5592,00
80	2	1	1	111.735	5541,50	5448,00	5808,00
81	1	2	2	42.802	5669,00	5544,00	5784,00
82	2	2	2	163.300	5743,42	5736,00	6120,00
83	2	2	2	135.961	5747,00	5688,00	5928,00
84	1	2	2	38.589	5860,50	5664,00	5904,00
85	2	1	1	166.119	5880,02	5880,00	6144,00
86	1	3	3	66.710	5880,02	5880,00	6240,00
87	1	2	2	44.723	5923,75	5784,00	6024,00
88	2	2	2	166.970	5923,70	5640,00	6000,00
89	1	1	1	70.968	6007,00	5952,00	6192,00
90	2	1	1	167.251	6165,50	6096,00	6408,00
91	2	2	2	115.931	6267,10	6192,00	6432,00
92	1	2	2	43.939	6305,00	6240,00	6480,00
93	2	1	1	165.417	6303,50	6144,00	6504,00
94	2	2	2	96.056	6414,50	6240,00	6480,00
95	1	2	2	42.580	6507,33	6480,00	6720,00
96	1	1	1	69.376	6549,20	6384,00	6624,00
97	2	2	2	167.227	6600,02	6600,00	6840,00
98	1	2	2	45.764	6698,00	6552,00	6792,00
99	2	3	3	149.311	6703,83	6552,00	6912,00
100	2	1	1	142.336	6923,00	6720,00	6984,00
101	2	1	1	166.888	6947,20	6816,00	7056,00
102	1	3	3	65.299	6982,90	6936,00	7296,00
103	1	2	2	44.793	7048,00	6864,00	7104,00
104	1	1	1	62.698	7092,33	6288,00	6528,00
105	2	2	2	152.225	7073,17	6912,00	7152,00
106	2	2	2	166.859	7082,33	6912,00	7272,00
107	2	2	2	170.099	7232,20	7104,00	7416,00
108	1	2	2	43.862	7257,00	7032,00	7272,00
109	1	3	3	62.256	7351,50	7032,00	7392,00
110	1	1	1	71.677	7364,67	7296,00	7536,00
111	2	1	1	160.840	7456,83	7440,00	7680,00
112	2	1	1	134.142	7615,00	7512,00	7776,00
113	2	1	1	171.175	7618,75	7392,00	7704,00
114	2	1	1	115.860	7712,33	7344,00	7584,00
115	1	4	4	29.182	7737,00	7512,00	7896,00
116	1	1	1	71.455	7729,00	7560,00	7920,00
117	2	2	2	164.711	7740,08	7752,00	8112,00
118	2	2	2	129.611	7752,02	7752,00	7992,00
119	2	2	2	109.917	7798,00	7656,00	7896,00
120	2	2	2	107.835	7941,00	7992,00	8112,00
121	1	2	2	41.136	7994,92	7608,00	7848,00
122	1	2	2	41.673	8009,83	7896,00	8136,00
123	1	2	2	43.907	8061,00	7824,00	8064,00
124	2	2	2	151.580	8014,80	7752,00	8040,00
125	1	3	3	61.463	8120,83	8112,00	8472,00
126	2	5	5	162.749	8160,02	8160,00	8520,00
127	2	1	1	117.022	8264,17	7752,00	8016,00
128	2	2	2	146.036	8246,67	8016,00	8376,00
129	1	2	2	40.659	8312,00	8112,00	8352,00
130	1	2	2	41.222	8419,13	8400,00	8640,00
131	2	5	5	163.004	8259,70	8040,00	8400,00
132	2	1	1	127.994	8262,83	8232,00	8472,00
133	1	3	3	69.170	8352,00	8352,00	8712,00
134	2	2	2	157.377	8490,42	8352,00	8616,00
135	2	2	2	110.067	8529,87	8472,00	8688,00
136	1	2	2	42.142	8646,00	8472,00	8712,00
137	3			48.710	491,00		
138	3			49.666	2097,42		
139	3			45.241	3388,90		
140	3			38.374	4635,50		
141	3			40.292	7107,50		

(Conclui)

ANEXO B – Dados de entrada do processo produtivo

	Descrição		Unidade	Variável no Arena
Informações Gerais	Período de Discretização do Tempo		minutos	passo_tempo
	Fator de Consumo Pellet Feed para Pelotas		-	fator_pf_pel
	Indicador Média / Curva de Probabilidade		1 ou 2	tipo_modelo
Processo Concentração	Capacidade de Produção	Concentrado 1	tms/dia	capacidade_prod_conc(1)
		Concentrado 2	tms/dia	capacidade_prod_conc2()
	Limite Mínimo de Produção	Concentrado 1	tms/dia	min fator conc(1)
		Concentrado 2	tms/dia	min fator conc(2)
	Limite Máximo de Produção	Concentrado 1	tms/dia	max fator conc(1)
		Concentrado 2	tms/dia	max fator conc(2)
	Estocagem Concentrado	Limite Máximo	tms	limmax tq conc
		Limite Mínimo	tms	limmin tq conc
	Data de Início das Paradas do Processo	Data da 1ª Parada	data	dia_parada conc(1)
		Data da 2ª Parada		dia_parada conc(2)
		Data da 3ª Parada		dia_parada conc(3)
		Data da 4ª Parada		dia_parada conc(4)
		Data da 5ª Parada		dia_parada conc(5)
		Data da 6ª Parada		dia_parada conc(6)
		Data da 7ª Parada		dia_parada conc(7)
		Data da 8ª Parada		dia_parada conc(8)
		Data da 9ª Parada		dia_parada conc(9)
		Data da 10ª Parada		dia_parada conc(10)
	Duração das Paradas dos Processos	1ª Parada	dias	periodo_parada conc(1)
		2ª Parada		periodo_parada conc(2)
		3ª Parada		periodo_parada conc(3)
		4ª Parada		periodo_parada conc(4)
		5ª Parada		periodo_parada conc(5)
		6ª Parada		periodo_parada conc(6)
		7ª Parada		periodo_parada conc(7)
		8ª Parada		periodo_parada conc(8)
		9ª Parada		periodo_parada conc(9)
		10ª Parada		periodo_parada conc(10)
Processo Mineroduto	Capacidade de Produção	Bombeado 1	tms/dia	capacidade_bomb_conc1
		Bombeado 2	tms/dia	capacidade_bomb_conc2
	Limite Mínimo de Produção	Bombeado 1	tms/dia	min fator bomb(1)
		Bombeado 2	tms/dia	min fator bomb(2)
	Limite Máximo de Produção	Bombeado 1	tms/dia	max fator bomb(1)
		Bombeado 2	tms/dia	max fator bomb(2)
	Estocagem Bombeado	Limite Máximo	tms	limmax tq homog
		Limite Mínimo	tms	limmin tq homog
	Data de Início das Paradas do Processo	Data da 1ª Parada	data	dia_parada_min(1)
		Data da 2ª Parada		dia_parada_min(2)
		Data da 3ª Parada		dia_parada_min(3)
		Data da 4ª Parada		dia_parada_min(4)
		Data da 5ª Parada		dia_parada_min(5)
		Data da 6ª Parada		dia_parada_min(6)
		Data da 7ª Parada		dia_parada_min(7)
		Data da 8ª Parada		dia_parada_min(8)
		Data da 9ª Parada		dia_parada_min(9)
		Data da 10ª Parada		dia_parada_min(10)
	Duração das Paradas dos Processos	1ª Parada	dias	periodo_parada_min(1)
		2ª Parada		periodo_parada_min(2)
		3ª Parada		periodo_parada_min(3)
		4ª Parada		periodo_parada_min(4)
		5ª Parada		periodo_parada_min(5)
		6ª Parada		periodo_parada_min(6)
		7ª Parada		periodo_parada_min(7)
		8ª Parada		periodo_parada_min(8)
		9ª Parada		periodo_parada_min(9)
		10ª Parada		periodo_parada_min(10)

(Continua)

ANEXO B – Dados de entrada do processo produtivo

	Descrição		Unidade	Variável no Arena
Processo Filtragem	Capacidade de Produção	Pellet Feed 1	tms/dia	capacidade_prod_pf1
		Pellet Feed 2	tms/dia	capacidade_prod_pf2
	Limite Mínimo de Produção	Pellet Feed 1	tms/dia	min_fator_pf(1)
		Pellet Feed 2	tms/dia	min_fator_pf(2)
	Limite Máximo de Produção	Pellet Feed 1	tms/dia	max_fator_pf(1)
		Pellet Feed 2	tms/dia	max_fator_pf(2)
	Estocagem Pellet Feed	Limite Máximo - Silo	tms	limmax_silo_pf
		Limite Mínimo - Silo	tms	limmin_silo_pf
		Lim Máx - PF1 Pátio	tms	limmax_estoque_pf(1)
		Lim Mín - PF1 Pátio	tms	limmin_estoque_pf(1)
		Lim Máx - PF2 Pátio	tms	limmax_estoque_pf(2)
		Lim Mín - PF2 Pátio	tms	limmin_estoque_pf(2)
		Estoque Inicial - PF1	tms	estoque_pf(1)
		Estoque Inicial - PF2	tms	estoque_pf(2)
	Data de Início das Paradas do Processo	Data da 1ª Parada	data	dia_parada_filt(1)
		Data da 2ª Parada		dia_parada_filt(2)
		Data da 3ª Parada		dia_parada_filt(3)
		Data da 4ª Parada		dia_parada_filt(4)
		Data da 5ª Parada		dia_parada_filt(5)
		Data da 6ª Parada		dia_parada_filt(6)
		Data da 7ª Parada		dia_parada_filt(7)
		Data da 8ª Parada		dia_parada_filt(8)
		Data da 9ª Parada		dia_parada_filt(9)
		Data da 10ª Parada		dia_parada_filt(10)
	Duração das Paradas dos Processos	1ª Parada	dias	periodo_parada_filt(1)
		2ª Parada		periodo_parada_filt(2)
		3ª Parada		periodo_parada_filt(3)
		4ª Parada		periodo_parada_filt(4)
		5ª Parada		periodo_parada_filt(5)
		6ª Parada		periodo_parada_filt(6)
		7ª Parada		periodo_parada_filt(7)
		8ª Parada		periodo_parada_filt(8)
		9ª Parada		periodo_parada_filt(9)
		10ª Parada		periodo_parada_filt(10)
Processo Retorno de Pellet Feed	Capacidade de Retorno	Pellet Feed 1	tms/dia	capacidade_ret_pf1
		Pellet Feed 2	tms/dia	capacidade_ret_pf2
	Limite Mínimo de Retorno	Pellet Feed 1	tms/dia	min_ret_pf(1)
		Pellet Feed 2	tms/dia	min_ret_pf(2)
	Limite Máximo de Retorno	Pellet Feed 1	tms/dia	max_ret_pf(1)
		Pellet Feed 2	tms/dia	max_ret_pf(2)

(Continua)

ANEXO B – Dados de entrada do processo produtivo

	Descrição		Unidade	Variável no Arena
Processo Pelotização	Capacidade de Produção	Usina 1 - Pelota 1	tms/dia	capacidade_usi1_pel1
		Usina 1 - Pelota 2	tms/dia	capacidade_usi1_pel2
		Usina 2 - Pelota 1	tms/dia	capacidade_usi2_pel1
		Usina 2 - Pelota 2	tms/dia	capacidade_usi2_pel2
		Fator de Geração PSC	%	fator_gera_psc
	Limite Mínimo de Produção	Usina 1 - Pelota 1	tms/dia	min_fator_usina1(1)
		Usina 1 - Pelota 2	tms/dia	min_fator_usina1(2)
		Usina 2 - Pelota 1	tms/dia	min_fator_usina2(1)
		Usina 2 - Pelota 2	tms/dia	min_fator_usina2(2)
	Limite Máximo de Produção	Usina 1 - Pelota 1	tms/dia	max_fator_usina1(1)
		Usina 1 - Pelota 2	tms/dia	max_fator_usina1(2)
		Usina 2 - Pelota 1	tms/dia	max_fator_usina2(1)
		Usina 2 - Pelota 2	tms/dia	max_fator_usina2(2)
	Estocagem Pelotas	Limite Máx - Pel 1	tms	limmax_estoque_pel(1)
		Limite Máx - Pel2	tms	limmax_estoque_pel(2)
		Limite Máx - Pelotas	tms	limmax_estoq_pel_total
		Limite Mín - Pel 1	tms	limmin_estoque_pel(1)
		Limite Mín - Pel2	tms	limmin_estoque_pel(2)
		Esto Inicial - Pel 1	tms	estoque_pel(1)
		Esto Inicial - Pel 2	tms	estoque_pel(2)
		Esto Inicial - PSC	tms	estoque_psc
	Paradas da Usina - 1 Data de Início	Data da 1ª Parada	data	dia_parada_usina1(1)
		Data da 2ª Parada		dia_parada_usina1(2)
		Data da 3ª Parada		dia_parada_usina1(3)
		Data da 4ª Parada		dia_parada_usina1(4)
		Data da 5ª Parada		dia_parada_usina1(5)
		Data da 6ª Parada		dia_parada_usina1(6)
		Data da 7ª Parada		dia_parada_usina1(7)
		Data da 8ª Parada		dia_parada_usina1(8)
		Data da 9ª Parada		dia_parada_usina1(9)
		Data da 10ª Parada		dia_parada_usina1(10)
	Paradas da Usina - 1 Duração da Parada	1ª Parada	dias	periodo_parada_usina1(1)
		2ª Parada		periodo_parada_usina1(2)
		3ª Parada		periodo_parada_usina1(3)
		4ª Parada		periodo_parada_usina1(4)
		5ª Parada		periodo_parada_usina1(5)
		6ª Parada		periodo_parada_usina1(6)
		7ª Parada		periodo_parada_usina1(7)
		8ª Parada		periodo_parada_usina1(8)
		9ª Parada		periodo_parada_usina1(9)
		10ª Parada		periodo_parada_usina1(10)
	Paradas da Usina - 2 Data de Início	Data da 1ª Parada	data	dia_parada_usina2(1)
		Data da 2ª Parada		dia_parada_usina2(2)
		Data da 3ª Parada		dia_parada_usina2(3)
		Data da 4ª Parada		dia_parada_usina2(4)
		Data da 5ª Parada		dia_parada_usina2(5)
		Data da 6ª Parada		dia_parada_usina2(6)
		Data da 7ª Parada		dia_parada_usina2(7)
		Data da 8ª Parada		dia_parada_usina2(8)
		Data da 9ª Parada		dia_parada_usina2(9)
		Data da 10ª Parada		dia_parada_usina2(10)
	Paradas da Usina - 2 Duração da Parada	1ª Parada	dias	periodo_parada_usina2(2)
		2ª Parada		periodo_parada_usina2(2)
		3ª Parada		periodo_parada_usina2(3)
		4ª Parada		periodo_parada_usina2(4)
		5ª Parada		periodo_parada_usina2(5)
		6ª Parada		periodo_parada_usina2(6)
		7ª Parada		periodo_parada_usina2(7)
		8ª Parada		periodo_parada_usina2(8)
		9ª Parada		periodo_parada_usina2(9)
		10ª Parada		periodo_parada_usina2(10)

(Conclui)

ANEXO C – Sequenciamento e duração das campanhas de produção da Samarco Mineração S.A. no ano de 2005

Coluna 1	Coluna 2
Sequência das Campanhas de Produção	Duração das Campanhas de Produção em Horas
1	38
2	370
1	398
2	346
1	372
2	280
1	440
2	204
1	294
2	474
1	272
2	360
1	266
2	206
1	522
2	366
1	248
2	352
1	178
2	134
1	332
2	160
1	244
2	392
1	433,5
2	478,5
1	146
2	156
1	126
2	172
	8760

Totalização dos tempos de duração das campanhas de produção na coluna 2 em horas

ANEXO D – Resultado consolidado para o cenário de validação do modelo com 30 (trinta) replicações executadas

Navio	RESPOSTA DO MODELO						
	Tempo em Espera Modelo	Atracação Modelo	Carreg. Modelo	Desatrac Modelo	Replicações	Quantida de Média de Navios	Quantida de Média de Navios Minério
1	5,98	5,93	17,33	3,22	30,00	139,73	134,73
2	0,00	6,40	38,00	3,31			
3	4,87	7,36	37,89	4,29			
4	58,31	7,24	32,13	3,47			
5	97,91	7,05	31,07	3,09			
6	20,73	6,22	33,91	2,71			
7	30,86	6,95	29,70	4,68			
8	0,48	5,42	43,57	4,07			
9	11,72	6,91	36,85	2,82			
10	8,14	6,24	31,82	3,61			
11	45,76	6,20	39,84	2,89			
12	63,87	6,54	44,45	3,47			
13	6,17	6,77	46,92	3,21			
14	42,20	6,89	44,59	2,89			
15	5,89	6,20	45,39	3,22			
16	40,39	6,32	66,18	3,22			
17	85,84	7,44	35,46	4,24			
18	10,79	6,45	37,80	4,03			
19	4,88	4,65	21,30	2,97			
20	2,72	6,86	50,56	3,49			
21	11,21	6,47	38,77	3,71			
22	32,90	8,93	33,75	3,57			
23	0,02	6,41	17,65	3,65			
24	1,00	5,77	11,56	2,35			
25	5,32	6,34	32,48	3,67			
26	9,35	5,28	39,52	4,03			
27	12,00	8,36	37,30	3,36			
28	70,29	7,41	52,72	3,97			
29	90,74	6,87	49,09	3,37			
30	26,23	6,86	46,14	2,43			
31	10,00	4,97	32,95	3,40			
32	60,95	6,69	52,79	3,43			
33	82,93	5,32	31,72	2,72			
34	118,86	5,07	24,42	4,42			
35	1,80	5,29	34,19	3,42			
36	8,13	5,38	28,67	3,37			
37	8,01	6,11	33,76	3,50			
38	1,02	7,85	19,15	3,06			
39	3,37	5,67	37,62	2,72			
40	6,12	5,49	34,62	2,52			
41	4,59	5,19	33,65	3,72			
42	1,53	6,29	35,82	4,17			
43	10,08	5,22	49,51	3,03			
44	11,69	6,15	21,91	3,24			
45	6,04	5,17	40,05	3,95			
46	11,44	5,78	38,29	3,34			
47	11,30	6,32	29,15	3,11			
48	1,37	6,05	34,54	3,80			
49	33,25	5,92	46,12	4,66			
50	9,32	5,93	17,98	3,74			

(Continua)

ANEXO D – Resultado consolidado para o cenário de validação do modelo com 30 (trinta) replicações executadas

Navio	RESPOSTA DO MODELO					
	Tempo em Espera Modelo	Atracação Modelo	Carreg. Modelo	Desatrac Modelo	Replicações	Quantida de Média de Navios Minério
51	12,84	5,43	55,62	3,66		
52	0,22	5,67	30,43	3,29		
53	1,06	6,82	37,25	3,22		
54	5,85	6,33	34,88	2,70		
55	41,22	6,27	38,38	2,50		
56	18,19	6,95	24,40	3,34		
57	1,10	6,40	36,58	3,10		
58	15,52	4,79	43,49	4,00		
59	6,35	5,58	52,54	3,25		
60	1,21	5,52	38,24	3,11		
61	0,00	5,01	22,32	4,47		
62	2,14	7,27	65,64	4,22		
63	12,91	6,74	39,31	3,32		
64	6,64	7,00	37,92	3,02		
65	8,41	5,53	19,20	2,44		
66	3,57	6,46	33,57	3,73		
67	0,23	5,58	40,20	2,81		
68	39,97	5,02	36,79	4,10		
69	59,51	7,22	52,88	3,28		
70	11,10	6,17	30,22	2,40		
71	101,90	7,05	38,62	3,84		
72	121,96	6,41	24,84	3,16		
73	148,71	6,86	36,93	3,48		
74	86,93	5,59	35,19	2,71		
75	61,10	6,90	42,40	4,50		
76	95,09	6,76	57,04	4,21		
77	0,55	6,45	50,28	3,21		
78	0,00	6,30	26,11	3,80		
79	12,89	5,13	71,92	3,50		
80	108,67	5,19	28,22	3,88		
81	1,00	5,98	17,44	4,27		
82	0,75	7,57	39,46	3,28		
83	62,25	6,07	34,22	2,87		
84	1,50	6,44	25,10	3,48		
85	59,67	6,41	65,25	3,67		
86	16,30	5,45	39,32	4,18		
87	25,14	6,07	39,26	4,45		
88	105,99	8,23	73,19	2,97		
89	17,13	6,55	66,33	3,62		
90	21,16	7,56	39,96	4,02		
91	4,99	7,03	29,62	2,15		
92	0,00	8,58	35,27	4,11		
93	22,58	5,97	67,64	3,51		
94	11,05	5,68	23,91	3,78		
95	3,05	6,16	18,34	3,86		
96	9,21	6,69	26,85	3,73		
97	9,65	5,72	42,73	2,59		
98	4,29	5,30	18,45	3,37		
99	2,16	9,34	68,75	3,43		
100	1,27	7,96	34,45	3,36		

(Continua)

ANEXO D – Resultado consolidado para o cenário de validação do modelo com 30 (trinta) replicações executadas

	RESPOSTA DO MODELO						
Navio	Tempo em Espera Modelo	Atracação Modelo	Carreg. Modelo	Desatrac. Modelo	Replicações	Quantida de Média de Navios	Quantida de Média de Navios Minério
101	35,77	7,51	47,87	3,69			
102	7,44	5,14	46,00	3,79			
103	0,98	6,32	45,70	4,33			
104	15,09	6,41	49,14	4,03			
105	33,00	7,81	64,65	3,01			
106	111,47	7,01	55,36	3,15			
107	40,81	5,48	48,73	3,76			
108	39,40	7,71	39,17	4,04			
109	8,77	5,68	34,97	4,12			
110	23,43	6,63	47,91	3,18			
111	6,68	5,43	43,97	3,09			
112	1,53	7,90	33,28	4,65			
113	57,43	6,03	40,60	2,92			
114	26,96	7,89	57,35	3,27			
115	53,19	7,07	52,18	3,05			
116	5,80	7,98	43,78	4,06			
117	103,24	6,14	56,28	4,40			
118	170,13	6,56	31,97	3,01			
119	180,60	5,04	32,28	3,05			
120	90,37	7,10	51,62	3,54			
121	4,91	6,29	34,50	3,53			
122	41,02	7,75	56,75	3,42			
123	66,91	5,74	57,20	3,61			
124	102,48	6,22	65,12	3,24			
125	62,04	5,89	56,90	3,22			
126	95,44	7,35	52,67	3,11			
127	320,83	5,50	39,64	4,06			
128	110,00	6,58	61,46	3,93			
129	5,64	6,20	42,87	3,89			
130	59,98	6,63	68,34	3,37			
131	136,44	6,89	69,80	3,13			
132	246,01	6,05	63,19	3,43			
133	44,81	6,97	68,94	3,54			
134	141,85	6,56	45,44	3,94			
135	147,33	5,80	46,13	4,66			
136	1,28	5,46	43,94	3,81			
Total	5.172,42	868,49	5.583,29	475,29			
Média por Navio	38,40	6,45	41,45	3,53			

(Conclui)

ANEXO E – Tempos praticados no porto de Ubu da Samarco no ano de 2005

	NAVIO	Tipo	Produto	Mau Tempo	Atracação	Pré Carregamento	Tempo Ocioso Sist Carreg.	Tempo Ocioso Navio	Pré-Desatracação	Desatracação
1	PYTHAGORAS	1	2	0,00	1,57	0,42	25,82	2,66	1,47	0,37
2	OCEAN COSMOS	2	2	0,00	2,09	0,75	11,97	3,15	1,42	1,50
3	SA FORTIUS	2	2	0,00	4,00	0,50	7,59	3,75	1,67	0,50
4	GOOD NEWS	2	2	0,00	2,67	1,17	5,19	6,09	3,17	0,50
5	CHINA STEEL EXCELLENCE	2	2	0,00	1,91	0,83	9,84	4,00	2,25	0,50
6	LOWLANDS LONGEVITY	2	2	0,00	2,92	4,00	14,28	3,92	1,25	0,50
7	IKARIA	2	1	0,00	3,25	13,87	8,90	5,67	2,99	1,33
8	PELOPIDAS	1	1	0,00	2,67	0,67	5,07	4,42	0,17	0,50
9	CAPE PROVIDENCE	2	1	0,00	2,34	3,58	2,81	4,52	2,00	0,50
10	CSK TRIBUTE	2	2	0,00	7,58	0,67	6,75	8,45	1,25	0,58
11	LOWLANDS BEILUN	2	1	0,00	2,52	0,25	11,26	4,91	2,25	0,67
12	AMBER	2	1	0,00	4,92	0,50	7,74	4,32	1,25	0,58
13	OCEAN EAGLE	1	2	0,00	2,42	1,25	2,76	4,01	1,34	0,50
14	MOMMY DUCKLING	2	1	0,00	3,24	8,00	7,66	6,34	0,34	0,35
15	NAUTICAL ACE	1	2	11,67	1,74	0,67	1,43	12,73	4,67	0,58
16	CSK FORTUNE	2	2	0,00	2,58	1,25	8,36	6,21	6,33	1,58
17	SILVER CLIPPER	2	2	0,00	2,59	6,50	13,66	2,83	1,00	0,33
18	KWK GENESIS	2	2	0,00	9,67	0,33	16,66	4,66	4,09	0,58
19	FULL SOURCES	1	1	0,00	0,50	5,00	8,50	6,08	2,00	0,33
20	PITSA D	2	1	0,00	4,67	0,91	22,66	3,60	1,00	0,50
21	SETSUYO STAR	2	2	6,76	2,58	15,17	13,50	5,48	2,17	0,50
22	YIOSONAS	2	1	0,00	2,58	0,83	21,97	8,60	0,42	0,67
23	FULL STRONG	1	1	0,00	1,58	0,33	2,49	3,85	1,50	1,17
24	CYNTHIA FAGAN	1	2	0,00	2,83	7,67	2,01	5,59	19,65	0,60
25	GEMSTAR	1	2	0,00	1,93	0,33	33,81	4,42	3,25	0,17
26	CHITOSE	2	4	0,00	2,50	9,10	11,02	3,17	2,58	0,34
27	CLIPPER JOY	1	3	0,00	2,17	1,25	5,08	2,41	1,16	0,58
28	CAPE KESTREL	2	2	0,00	3,47	6,37	15,93	3,17	4,92	0,50
29	LOWLANDS BEILUN	2	2	0,00	1,93	6,32	2,81	3,92	1,50	0,42
30	ANANGEL DESTINY	2	1	0,00	1,95	0,67	16,98	4,42	0,08	0,47
31	MAGNA GRAECIA	1	1	0,00	1,62	10,08	3,42	5,68	0,33	2,00
32	CAPE MERCURY	2	1	0,00	2,09	0,66	6,30	3,67	3,66	0,33
33	DIAS	2	2	0,00	3,50	0,75	20,77	3,18	1,67	0,33
34	SKS MERSEY	2	1	0,00	1,67	0,75	19,34	5,26	3,12	0,47
35	CHIN SHAN	2	2	0,00	2,25	0,42	16,68	2,91	1,83	0,42
36	CAPTAIN VANGELIS L	2	2	14,17	2,08	0,25	1,91	4,18	1,58	0,43
37	CAPE MAXIM	2	1	0,00	1,32	8,26	7,01	5,60	1,92	0,42
38	GLADSTONE	1	1	0,00	1,75	9,09	6,09	3,00	0,50	1,17
39	GOLDEN WING	2	1	0,00	2,75	3,08	10,72	6,71	7,34	0,50
40	IANTHE	2	2	0,00	2,41	9,50	2,99	4,66	0,59	1,16
41	ALPHA ACTION	2	1	0,00	2,58	0,42	8,18	4,67	0,41	0,58
42	MINERAL POTERNE	1	2	0,00	2,92	1,08	15,73	1,16	0,66	0,92
43	TAI SHAN	2	2	0,00	1,67	0,33	9,67	3,76	8,33	0,43
44	ADRIATICA GRAECA	1	5	0,00	2,00	0,91	0,84	8,84	2,24	0,80
45	SOUTHERN WISDOM	2	2	0,00	1,92	0,33	16,37	5,03	5,92	0,42
46	PITSA D	2	2	0,00	2,67	0,17	9,65	4,34	0,75	0,67
47	ANANGEL GALINI	1	1	0,00	3,58	0,58	0,25	2,68	1,92	0,27
48	PRINCESS SUSANA	2	2	0,00	2,85	0,50	9,23	4,49	1,00	0,92
49	CAPE CONDOR	2	2	0,00	3,17	0,42	14,83	3,34	1,83	1,08
50	DRIN	1	1	0,00	3,50	0,00	11,76	4,25	3,00	0,67
51	GRAND FORTUNE	1	2	0,00	1,83	0,67	28,03	1,99	2,25	0,58
52	GATEWAY BULKER	2	2	0,00	11,52	0,42	5,16	2,73	0,33	0,67
53	GENKO KNIGHT	1	3	0,00	3,17	0,42	10,22	2,25	0,17	0,22
54	CHS STAR	2	2	0,00	3,66	5,36	17,99	2,24	1,58	0,47
55	FANTASTIKS	2	2	0,00	2,87	0,50	8,37	3,68	12,87	0,48
56	SKS MOSEL	2	2	0,00	3,33	0,58	22,93	4,16	1,84	0,67
57	RUTLAND	2	1	0,00	5,01	0,50	25,61	3,77	4,41	0,67
58	CHITOSE	2	2	0,00	2,25	0,25	9,85	4,36	1,34	0,50
59	GREAT SUNRISE	1	1	0,00	2,66	0,50	12,92	1,91	3,50	0,42
60	CASTILLO DE SAN JORGE	2	1	0,00	2,75	0,33	11,79	3,52	8,78	0,38
61	GREAT GLORY	1	1	0,00	2,55	1,67	0,99	3,09	3,00	0,75
62	CSK GRANDEUR	2	1	0,00	2,67	1,00	13,53	4,00	10,00	0,25
63	FRONT LEADER	2	2	0,00	2,66	0,33	7,43	7,69	2,83	0,50
64	CSK FORTUNE	2	2	0,00	2,68	0,25	21,68	4,51	8,75	0,83
65	TORM MARINA	1	4	0,00	2,92	0,58	4,34	5,34	2,25	0,33
66	ANEMI BREEZE	1	1	0,00	5,08	3,33	8,42	12,28	1,50	0,42
67	NIGHTWHISPER	2	2	0,00	2,08	0,33	5,67	4,86	0,83	0,50
68	FRONT CLIMBER	2	2	0,00	3,25	0,50	8,11	15,77	4,25	0,50

(Continua)

ANEXO E – Tempos praticados no porto de Ubu da Samarco no ano de 2005

	NAVIO	Tipo	Produto	Mau Tempo	Atracação	Pré Carregamento	Tempo Ocioso Sist Carreg.	Tempo Ocioso Navio	Pré-Desatracação	Desatracação
69	OLYMPIA	2	1	0,00	1,90	11,02	4,24	3,57	0,17	0,17
70	CORATO	1	1	0,00	2,50	2,60	4,92	5,41	6,67	0,25
71	IRON KING	2	2	0,00	3,20	13,71	5,74	5,35	4,68	0,73
72	DUHALLOW	2	2	0,00	3,46	0,67	8,24	3,60	0,17	0,60
73	PIONEER	2	1	0,00	2,50	1,73	5,50	4,01	0,67	0,50
74	MATILDE	2	2	0,00	2,80	0,33	15,02	3,77	0,67	0,58
75	KYUSHU STAR	2	2	0,00	2,49	0,00	3,08	3,50	1,34	1,50
76	IANTHE	2	2	0,00	2,00	0,42	7,08	3,68	1,33	0,50
77	SUMIHOU	1	1	0,00	3,66	0,33	3,19	3,40	1,10	0,70
78	ATACAMA	1	1	0,00	1,95	0,48	9,37	5,72	6,08	0,42
79	HEBEI LOYALTY	2	3	0,00	2,42	34,83	21,92	8,34	1,42	1,00
80	SAAR N	2	1	0,00	1,90	0,67	13,34	3,82	0,67	0,33
81	POSEIDON	1	1	0,00	1,58	0,67	14,02	9,33	0,16	1,00
82	LOWLANDS TRADER	2	1	0,00	0,63	0,33	7,94	9,72	0,60	0,65
83	CAPE LORD	2	2	0,00	2,50	0,42	6,99	5,90	0,08	1,91
84	EDELWEISS	1	2	0,00	2,25	1,17	6,43	3,75	0,67	0,92
85	NIGHTWHISPER	2	2	0,00	2,08	9,58	8,26	3,58	0,30	0,53
86	CLEOPATRA DREAM	1	2	0,00	2,75	0,25	28,10	3,26	0,50	1,41
87	ALPHA FLAME	1	1	0,00	0,00	0,00	8,58	2,41	0,17	0,67
88	MINERAL SINES	2	3	0,00	2,23	0,33	13,95	3,02	9,00	0,58
89	CORONADO	1	2	0,00	2,00	2,17	7,09	6,08	1,67	0,42
90	ANANGEL FORTUNE	2	2	0,00	3,57	10,93	11,10	52,71	1,83	0,75
91	YIOSONAS	2	1	0,00	2,33	0,33	12,76	3,35	3,00	0,58
92	LUISE OLDENDORFF	1	1	0,00	2,64	2,42	2,08	11,40	2,75	0,42
93	SA FORTIUS	2	2	0,00	2,67	0,33	8,26	4,90	19,59	0,75
94	SKS TRENT	2	2	6,50	3,00	0,42	16,14	3,33	3,67	0,50
95	LAMYRA	1	1	0,00	2,17	0,91	69,08	3,31	1,34	0,50
96	TAI PROFIT	1	2	0,00	2,30	2,03	11,51	3,07	3,66	0,42
97	MINERAL ANTWERPEN	2	2	0,00	3,83	9,70	10,01	3,43	2,00	0,67
98	ATHINA ZAFIRAKIS	1	1	0,00	1,50	3,75	49,40	2,76	4,02	0,98
99	CAPE PROVENCE	2	2	12,75	1,83	0,50	7,78	2,66	3,08	0,42
100	ALPHA ACTION	2	2	0,00	3,50	0,25	24,01	4,60	0,67	0,67
101	CAPE CENTURY	2	3	0,00	3,59	0,42	10,92	3,60	0,92	1,08
102	SIBELF	1	1	0,00	2,80	1,00	27,17	6,50	8,33	0,67
103	RULE	1	1	0,00	3,08	2,67	2,75	20,66	2,95	0,71
104	FRANCESCO	1	3	0,00	3,75	0,58	5,84	2,69	1,93	1,31
105	IRON QUEEN	2	2	0,00	2,75	7,83	8,51	4,53	1,00	0,83
106	XINFHA HAI	2	1	0,00	3,50	0,25	24,01	4,60	0,67	0,67
107	LOWLANDS PHOENIX	2	2	0,00	2,30	0,25	7,98	2,51	0,00	Sem dados
108	JI MAY	1	2	0,00	1,30	0,80	11,24	2,34	2,17	0,25
109	RUBIN ACE	1	2	0,00	2,25	0,33	10,64	1,77	0,25	0,75
110	LOWLANDS COMFORT	1	2	0,00	2,09	0,50	23,33	3,08	0,25	0,62
111	HEBEI PHOENIX	2	3	0,00	7,22	31,91	8,77	5,05	12,34	1,08
112	CAPE LORD	2	1	0,00	3,75	0,42	2,98	6,65	3,00	0,42
113	IRONGATE	2	1	0,00	3,26	5,32	8,30	2,92	0,58	0,50
114	GRAFTON	2	1	0,00	1,77	0,75	10,40	3,60	2,67	0,58
115	KANOK NAREE	1	1	0,00	4,60	22,82	5,25	3,18	3,83	0,42
116	ROYAL BREEZE	1	1	0,00	2,59	2,08	3,33	4,42	1,75	0,50
117	CSK FORTUNE	2	4	0,00	2,67	0,33	9,49	4,25	3,67	0,92
118	IANTHE	2	1	0,00	2,66	8,18	6,82	5,10	1,75	0,75
119	ULLSWATER	2	2	0,00	2,25	7,16	1,50	2,40	3,09	0,33
120	NORDSTAR	2	2	0,00	1,92	0,92	14,07	2,34	1,83	0,75
121	HERAKLIA	1	2	0,00	1,71	7,45	15,77	3,00	2,08	0,45
122	FU ZHOU HAI	1	2	0,00	30,39	0,66	7,67	1,74	2,67	0,42
123	WADI ALARABI	1	2	0,00	3,58	10,83	2,24	6,98	1,16	0,92
124	CHRISMIR	2	2	0,00	1,30	0,80	11,24	2,34	2,17	0,25
125	GOLDEN BRIDGE	1	2	0,00	2,41	0,58	8,99	2,67	4,00	0,50
126	CECILIA	2	2	0,00	3,58	0,50	14,07	4,77	4,25	0,67
127	DUHALLOW	2	3	0,00	2,83	6,75	5,83	3,32	0,83	0,58
128	KATE	2	5	0,00	2,41	0,58	25,10	7,83	2,25	0,83
129	LIBERTY SEA	1	1	0,00	1,83	0,42	1,33	4,91	1,50	0,75
130	PONTOS	1	2	0,00	2,17	12,63	5,27	3,19	1,25	0,38
131	LOWLANDS PHOENIX	2	2	0,00	2,94	0,33	18,24	4,86	4,42	0,58
132	OLYMPIA	2	2	0,00	2,42	1,67	32,98	18,63	0,25	0,67
133	AQUAGRACE	2	1	0,00	3,25	0,08	5,56	5,17	3,25	1,38
134	ERIDGE	2	3	0,00	2,95	0,25	3,50	3,23	1,78	0,30
135	ATLANTIC HAWK	1	2	0,00	4,51	0,17	6,33	2,49	2,42	1,17

(Conclui)

ANEXO F – Lógica do seqüenciador de produção utilizado para elaborar as seqüências de produção utilizadas como entrada dos cenários

Seqüenciador de produção passo a passo:

Num Navio	Produto	Quantidade
1	1	100.000
2	1	60.000
3	3	120.000
4	2	80.000
5	2	100.000
6	1	60.000

Passo 1
Ler todos os navios

Num Navio	Produto	Quantidade
1	1	160.000
2	2	180.000
4	1	60.000

Passo 2
Agrupar navios subsequentes que vão levar o mesmo tipo de pelota.

Produto	Produção Dia
1	39.099
2	38.694

Produto	Num dias
1	4,09
2	4,65
1	1,53

Passo 3
Dividi-se a quantidade total pela produção diária de cada produto para se achar o número de dias necessários para produzir cada carga.

Tabela 1 BF

Num dias
4,09
1,53
10,90
2,20
7,60

Tabela 2 DR

Num dias
4,65
12,67
1,32
3,89
13,67

Passo 4
A tabela é separada em duas. Uma para cada tipo de produto: tabela 1(BF), e tabela 2 (DR).

Para cada tabela são verificadas algumas condições que são as seguintes: considere que para ambas as tabelas a primeira campanha fosse chamada de camp1, a segunda de camp2 e a terceira de camp3 e ainda exista uma camp.min que é a campanha mínima.

(Continua)

ANEXO F – Lógica do seqüenciador de produção utilizado para elaborar as seqüências de produção utilizadas como entrada dos cenários, pagina 2.

```

Se camp1 < camp.min então
  Se camp2 >= camp.min então
    camp2 = camp2 + camp1
    camp1 = 0
  senão
    se (camp1 + camp2) < camp.min então
      dif = camp.min. - (camp1 + camp2)
      camp1 = minimo
      camp2 = 0
      camp3 = camp3 - dif
    senão
      camp1 = camp1 + camp2
      camp2 = 0
    fim se
  fim se
senão
  se camp2 < camp.min então
    camp1 = camp1 + camp2
    camp2 = 0
  fim se
fim se

```

Passo 5

Para o exemplo na tabela BF, camp1=4,09, camp2=1,53 e camp3=10,90 e camp.min = 4

Para estes valores a condição satisfeita seria $camp1 + camp2 > camp.min$

Estas condições são testadas para toda a tabela, ou seja depois de executar estes passos testam-se todas as condições mas com os valores de camp1, camp2 e camp3 diferentes, ou seja na segunda rodada o valor de camp1 = camp2, camp2 = camp3 e o camp3 = ao próximo valor na tabela. E ao final teríamos as seguintes tabelas:

Tabela 1 BF

Num dias
5,62
0
13,1
0
7,6

Tabela 2 DR

Num dias
4,65
13,99
0
0
17,56

Assim as tabelas voltam a formar uma única tabela intercalando as linhas das duas tabelas. Ficando da seguinte maneira:

Produto	Num dias
1	5,62
2	4,65
1	13,1
2	13,99
1	7,6
2	17,56

Passo 8

No final adiciona-se as paradas preventivas nas campanhas uma vez que estas paradas já são conhecidas. Formando assim a seqüência de produção para o ano inteiro. A soma do número de dias das campanhas é igual a 36 uma ez que corresponde ao plano de produção de todo o ano.

(Conclui)

ANEXO G – Modelo computacional na linguagem de simulação do Software Arena

(Continua)

ANEXO G – Modelo computacional na linguagem de simulação do Software Arena

(Continua)

ANEXO G – Modelo computacional na linguagem de simulação do Software Arena

(Continua)

ANEXO G – Modelo computacional na linguagem de simulação do Software Arena

(Continua)

ANEXO G – Modelo computacional na linguagem de simulação do Software Arena

Logica Variacao Processos Produtivos

Logica Transporte Resultados Excel

(Conclui)

ANEXO H – Resultado do teste de comparação de médias no software Minitab para os tempos de atracação, preparação para o carregamento, tempo ocioso do navio, tempo ociosos do sistema de carregamento, preparação para desatracação e desatracação

Two-Sample T-Test and CI: Atrac_Cape; Atrac_Panam

Two-sample T for Atrac_Cape vs Atrac_Panam

	N	Mean	StDev	SE Mean
Atrac_Ca	87	2,99	1,57	0,17
Atrac_Pa	48	3,03	4,15	0,60

Difference = μ Atrac_Cape - μ Atrac_Panam

Estimate for difference: -0,042

95% CI for difference: (-1,288; 1,204)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0,07 P-Value = 0,946 DF = 54

Two-Sample T-Test and CI: Pré Carreg_Cape; Pré Carreg_Panam

Two-sample T for Pré Carreg_Cape vs Pré Carreg_Panam

	N	Mean	StDev	SE Mean
Pré Carr	87	3,32	5,99	0,64
Pré Carr	48	2,64	4,28	0,62

Difference = μ Pré Carreg_Cape - μ Pré Carreg_Panam

Estimate for difference: 0,680

95% CI for difference: (-1,084; 2,443)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,76 P-Value = 0,447 DF = 124

Two-Sample T-Test and CI: T_Ocioso Sist Carreg_Cape; T_Ocioso Sist Carreg_Panam

Two-sample T for T_Ocioso Sist Carreg_Cape vs T_Ocioso Sist Carreg_Panam

	N	Mean	StDev	SE Mean
T_Ocioso	87	11,39	6,36	0,68
T_Ocioso	48	11,3	13,2	1,9

Difference = μ T_Ocioso Sist Carreg_Cape - μ T_Ocioso Sist Carreg_Panam

Estimate for difference: 0,12

95% CI for difference: (-3,91; 4,16)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,06 P-Value = 0,952 DF = 59

Two-Sample T-Test and CI: T_Ocioso Navio_Cape; T_Ocioso Navio_Panam

Two-sample T for T_Ocioso Navio_Cape vs T_Ocioso Navio_Panam

	N	Mean	StDev	SE Mean
T_Ocioso	87	5,27	5,70	0,61
T_Ocioso	48	4,75	3,56	0,51

Difference = μ T_Ocioso Navio_Cape - μ T_Ocioso Navio_Panam

Estimate for difference: 0,520

95% CI for difference: (-1,058; 2,099)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,65 P-Value = 0,515 DF = 130

(Continua)

ANEXO H – Resultado do teste de comparação de médias no software Minitab para os tempos de atracação, preparação para o carregamento, tempo ocioso do navio, tempo ociosos do sistema de carregamento, preparação para desatracação e desatracação

Two-Sample T-Test and CI: Pré-Desatrac_Cape; Pré-Desatrac_Panam

Two-sample T for Pré-Desatrac_Cape vs Pré-Desatrac_Panam

	N	Mean	StDev	SE Mean
Pré-Desa	87	2,85	3,26	0,35
Pré-Desa	48	2,31	2,97	0,43

Difference = μ Pré-Desatrac_Cape - μ Pré-Desatrac_Panam

Estimate for difference: 0,545

95% CI for difference: (-0,553; 1,643)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,98 P-Value = 0,327 DF = 104

Two-Sample T-Test and CI: Desatrac_Cape; Desatrac_Panam

Two-sample T for Desatrac_Cape vs Desatrac_Panam

	N	Mean	StDev	SE Mean
Desatrac	87	0,623	0,326	0,035
Desatrac	48	0,88	1,15	0,17

Difference = μ Desatrac_Cape - μ Desatrac_Panam

Estimate for difference: -0,259

95% CI for difference: (-0,601; 0,082)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1,52 P-Value = 0,134 DF = 51

(Conclui)

ANEXO I – Resultado do teste de comparação de médias no software Minitab para a taxa de carregamento de pelotas dos navios capesize e panamax

Two-Sample T-Test and CI: Tx_Carreg_Cape; Tx_cCarreg_Panan

Two-sample T for Tx_Carreg_Cape vs Tx_Carreg_Panan

	N	Mean	StDev	SE Mean
Tx_Carre	75	4781	961	111
Tx_Carr	37	3622	946	156

Difference = μ Tx_Carreg_Cape - μ Tx_cCarreg_Panan

Estimate for difference: 1159

95% CI for difference: (778; 1540)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 6,06 P-Value = 0,000 DF = 72

ANEXO J – Fluxograma do processo produtivo da Samarco Mineração S.A.

(Continua)

ANEXO J – Fluxograma do processo produtivo da Samarco Mineração S.A.

(Conclui)