



**Najmat Celene Nasser Medeiros Branco**

**Planejamento Operacional de Lavra de  
Minério de Ferro no Estado do Pará:  
Proposta de Simulação-Otimização de  
Recursos Logísticos na Etapa Mina**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Nelio Domingues Pizzolato  
Co-Orientador: Prof. André Cristiano Silva Melo

Rio de Janeiro  
Junho de 2013



**Najmat Celene Nasser Medeiros Branco**

**Planejamento Operacional de Lavra de  
Minério de Ferro no Estado do Pará:  
Proposta de Simulação-Otimização de  
Recursos Logísticos na Etapa Mina**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Nelio Domingues Pizzolato**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. André Cristiano Silva Melo**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Produção – UEPA

**Prof. José Carlos D'Abreu**

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

**Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho**

Departamento de Engenharia Industrial – UFRJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de junho de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Najmat Celene Nasser Medeiros Branco**

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará, em Belém – PA. Durante a graduação, estagiou na empresa Lojas Americanas S.A., desenvolvendo ações voltadas para uma visão geral do funcionamento da Companhia, tais como: Gerenciamento e Manutenção de sistemas, Controle e Prevenção de perdas, Auxiliar Administrativo, Aplicação do Programa 5S, Conhecimento dos Serviços oferecidos pela empresa, Atendimento ao Cliente e Gerência Comercial. Depois de graduada, ingressou no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio para obtenção do título de Mestre.

#### Ficha Catalográfica

Branco, Najmat Celene Nasser Medeiros

Planejamento operacional de lavra de minério de ferro no estado do Pará: proposta de simulação-otimização de recursos logísticos na etapa mina / Najmat Celene Nasser Medeiros Branco ; orientador: Nelio Domingues Pizzolato. – 2013.

100 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Planejamento Operacional de Lavra. 3. Cadeia Produtiva. 4. Minério de Ferro. 5. Simulação-Otimização. 6. Alocação Dinâmica de Caminhões. I. Pizzolato, Nelio Domingues. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais,  
pelos ensinamentos diante das dificuldades.

## **Agradecimentos**

A Deus pelas oportunidades e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus pais e irmão, Tadeu, Najmat e César, por todos os momentos compartilhados, por todos os ensinamentos, por toda a compreensão, confiança e apoio dados em todas as horas.

À PUC-Rio e a CAPES pela oportunidade realização deste Mestrado e pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos de Mestrado pela amizade, companheirismo, paciência e horas de estudo para conclusão deste curso.

Aos amigos de família, tios, tias e primos que me acolheram e me acompanharam nessa jornada longe de casa.

Aos Orientadores, André Melo e Nélio Pizzolato, pela atenção, colaboração e acompanhamento da minha vida acadêmica e pela compreensão da ausência física necessária ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros do grupo de estudos do Concept (UEPA) e Ceamazon (UFPA), especialmente à Nathália, Guilherme e Pedro, que compartilharam suas experiências acadêmicas e colaboraram para a qualidade e desenvolvimento deste projeto.

A empresa mineradora por disponibilizar todos os dados e recursos para a realização deste trabalho.

E a todos os meus amigos, que dentro ou fora do Estado do Pará ou do Estado do Rio de Janeiro, participaram do meu caminho de aprendizagem e acreditaram em mim para realização desse sonho.

## Resumo

Branco, Najmat Celene Nasser Medeiros; Pizzolato, Nélio Domingues; Melo, André Cristiano Silva. **Planejamento Operacional de Lavra de Minério de Ferro no Estado do Pará: Proposta de Simulação-Otimização de Recursos Logísticos na Etapa Mina**. Rio de Janeiro, 2013. 100 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente estudo aborda o planejamento operacional de lavra de minério de ferro com alocação dinâmica de caminhões, em um complexo de minas, no Estado do Pará. O objetivo é balancear as taxas de utilização dos recursos logísticos utilizados em operações de extração e transporte de minério de ferro, considerando aumento ou diminuição em suas unidades de uso. Inicialmente, é feita uma revisão da literatura que apresenta como a logística e seus componentes de desempenho se associam a produção de minério de ferro no estado, identificando as principais incertezas dos processos logísticos considerados, além de apresentar o problema operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões e técnicas de simulação e de otimização individualmente, ressaltando seu melhor desempenho em conjunto. Esta revisão respalda a fase de aplicação da Simulação-Otimização, que ocorre em um sistema dinâmico, estocástico e de eventos discretos. A análise consistiu no diagnóstico do sistema produtivo, avaliação dos relacionamentos entre os processos envolvidos, construção de um modelo de simulação a partir dos dados coletados e otimização, verificando-se seus *outputs* como origem dos cenários a serem propostos na nova simulação, para avaliar as potenciais modificações na utilização dos recursos. A Simulação-Otimização foi executada utilizando-se o pacote de simulação ProModel<sup>®</sup>, que inclui um *software* de Otimização baseado em Algoritmos Genéticos, o SimRunner<sup>®</sup>. Como resultado, o modelo de Simulação-Otimização foi construído para apoiar decisões estratégicas e operacionais da empresa em estudo, apresentando resultados satisfatórios para o balanceamento das taxas de utilização dos recursos logísticos envolvidos na operação.

## Palavras-chave

Planejamento Operacional de Lavra; Cadeia Produtiva; Minério de Ferro; Simulação-Otimização; Alocação Dinâmica de Caminhões.

## Abstract

Branco, Najmat Celene Nasser Medeiros; Pizzolato, Nélio Domingues (Advisor); Melo, André Cristiano Silva (Co-advisor). **Operational Mining Planning of Iron Ore in the State of Pará: Simulation-Optimization Proposal of Logistics Resources Regarding the Mine Place.** Rio de Janeiro, 2013. 100 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present study highlights the operational mining planning of iron ore with dynamic allocation of trucks in a mining complex in the State of Pará. The goal is to balance the utilization rates of logistical resources used in mining operations and transportation of iron ore, considering the increase or decrease of the number of resources in use. Initially, a literature review presents how the logistics and its performance components are associated with the iron ore production in the State of Pará, identifying uncertainties on key logistics processes, also presenting the operational mining planning with dynamic allocation of trucks and techniques of simulation and optimization individually, highlighting the best setting when considered together. This review endorses the implementation of the Simulation-Optimization phase, which occurs in a dynamic, stochastic and discrete events system. The analysis consisted in the diagnosis of the production system, the evaluation of the relationships between the logistics processes involved, the construction of a simulation model based on the collected data and optimization, verifying their outputs as the source for the scenarios to be proposed in the new simulation to evaluate the potential changes in resource utilization. The Simulation-Optimization was performed using the ProModel<sup>®</sup> simulation package, which includes an optimization software based on Genetic Algorithms, the SimRunner<sup>®</sup>. As a result, the Simulation-Optimization model was built to support strategic and operational decisions of the studied company, presenting satisfactory results to balance the utilization rates of all logistical resources involved in the operation.

## Keywords

Operational Mining Planning; Supply Chain; Iron Ore; Simulation-Optimization; Truck Dynamic Allocation.

## Sumário

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Considerações iniciais.....  | 15 |
| 1.1   | Justificativa e motivação para pesquisa .....                                | 17 |
| 1.2   | Objetivos .....  | 17 |
| 1.2.1 | Objetivo geral .....   | 17 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos .....  | 18 |
| 1.3   | Delimitação da pesquisa .....  | 18 |
| 1.3.1 | Técnicas aplicadas .....   | 19 |
| 1.3.2 | Ferramentas para a implementação.....  | 19 |
| 1.3.3 | Período de validade dos dados .....  | 19 |
| 1.4   | Metodologia de desenvolvimento da pesquisa.....                              | 20 |
| 1.5   | Estrutura da dissertação.....  | 22 |
| 2     | Logística associada à produção do minério de ferro no<br>Estado do Pará..... | 23 |
| 2.1   | Produção de minério de ferro no Estado do Pará .....                         | 23 |
| 2.2   | A importância da logística para o setor da mineração.....                    | 26 |
| 2.3   | Cadeia produtiva do minério de ferro .....                                   | 27 |
| 2.3.1 | Componentes de desempenho logístico da cadeia de<br>minério de ferro .....   | 29 |
| 2.3.2 | Modais logísticos para transporte de minério de ferro.....                   | 31 |
| 2.3.3 | Incertezas e riscos dos processos logísticos e elos da cadeia.....           | 32 |
| 3     | Técnicas de simulação e de otimização .....                                  | 35 |
| 3.1   | Planejamento operacional de lavra .....                                      | 37 |
| 3.2   | Alocação de caminhões .....  | 37 |
| 3.3   | Técnicas de simulação computacional.....                                     | 38 |
| 3.3.1 | Concepção ou formulação do modelo .....                                      | 40 |
| 3.3.2 | Implementação do modelo .....  | 41 |
| 3.3.3 | Análise dos resultados do modelo.....  | 43 |
| 3.4   | Problema de Coletas e Entregas.....  | 44 |
| 3.5   | Soluções.....  | 46 |
| 3.5.1 | Métodos Exatos.....  | 46 |
| 3.5.2 | Métodos Heurísticos.....   | 47 |
| 3.5.3 | Métodos Metaheurísticos .....  | 48 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.6 Método de Simulação-Otimização.....  | 49  |
| 4 Operações da cadeia produtiva do minério de ferro na empresa.....              | 52  |
| 4.1 Cadeia produtiva do minério de ferro da empresa .....                        | 52  |
| 4.2 Etapa do problema de planejamento operacional de lavra .....                 | 60  |
| 5 Simulação-Otimização das operações de Mina .....                               | 64  |
| 5.1 Concepção do modelo .....  | 64  |
| 5.2 Implementação do modelo .....  | 68  |
| 5.2.1 Elementos do modelo.....   | 68  |
| 5.2.2 Lógicas de operação do modelo .....  | 73  |
| 5.2.3 Verificação.....   | 73  |
| 5.2.4 Validação.....   | 74  |
| 5.3 Análise dos resultados do modelo.....  | 77  |
| 5.3.1 Duração da simulação.....  | 77  |
| 5.3.2 Número de replicações.....   | 78  |
| 5.3.3 Tempo de Warm-up .....   | 79  |
| 5.3.4 Experimentos .....   | 80  |
| 5.4 Otimização .....   | 82  |
| 6 Considerações finais .....   | 86  |
| 6.1 Análise comparativa dos resultados da Simulação-Otimização .....             | 86  |
| 6.2 Considerações Relacionadas ao Alcance do Objetivo Proposto.....              | 90  |
| 6.3 Limitações da pesquisa .....   | 90  |
| 6.4 Sugestões para trabalhos futuros.....  | 92  |
| 7 Referências bibliográficas .....   | 93  |
| APÊNDICE A – Processo produtivo do minério de ferro da<br>empresa em estudo..... | 98  |
| APÊNDICE B – Mapeamento das atividades de Mina .....                             | 99  |
| APÊNDICE C – Arranjo físico das minas, britadores e depósitos .....              | 100 |

## Lista de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 01 – Produção de minério de ferro .....   | 24 |
| Figura 02 – Arrecadação de CFEM por município paraense em 2011 (R\$ 463 milhões) .....   | 25 |
| Figura 03 – Fluxograma típico de tratamento de minério .....   | 28 |
| Figura 04 – Processo produtivo da mineração de ferro e sua variação ...  | 33 |
| Figura 05 – Passos para um estudo de simulação.....  | 40 |
| Figura 06 – Metodologia de simulação.....  | 40 |
| Figura 07 – Representação da ideia-base da Simulação-Otimização.....   | 51 |
| Figura 08 – Macro atividades da cadeia produtiva do minério de ferro ...   | 54 |
| Figura 09 – Extração e carregamento de caminhão fora de estrada.....   | 55 |
| Figura 10 – Transporte de minério por caminhão fora de estrada.....  | 55 |
| Figura 11 – Correias transportadoras saindo do britador semimóvel, em direção à Usina .....  | 56 |
| Figura 12 – Fluxograma de beneficiamento do minério de ferro da empresa .....  | 57 |
| Figura 13 – Pátio de estocagem de minério de ferro.....  | 58 |
| Figura 14 – Transporte do minério de ferro por correias transportadoras até os silos .....   | 59 |
| Figura 15 – Carregamento de minério de ferro nos vagões de trem .....  | 59 |
| Figura 16 – Trem de carga com locomotiva e vagões interligados .....   | 60 |
| Figura 17 – Etapa Mina .....   | 63 |
| Figura 18 – Boxplot para o tempo de carregamento dos caminhões pelas escavadeiras, nas Minas A, B e C .....                              | 66 |
| Figura 19 – Teste de autocorrelação para o tempo de carregamento dos caminhões de 240 t por escavadeiras, na Mina A .....                | 66 |
| Figura 20 – Ajuste de curva, para a distribuição Erlang, do tempo de manobra dos caminhões de 240 t na Mina A .....                      | 67 |
| Figura 21 – Ajuste de curva, para a distribuição Erlang, do tempo de carregamento dos caminhões de 400 t por escavadeiras na Mina B..... | 67 |
| Figura 22 – Ajuste de curva, para a distribuição Gamma, do tempo de carregamento dos caminhões de 240 t por carregadeiras na Mina C..... | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 23 – Crescimento do tempo de simulação por dia e linha de tendência.....                       | 78 |
| Figura 24 – Médias móveis do método de Welch para as primeiras 72h.....                               | 80 |
| Figura 25 – Taxa de utilização de locais de capacidade única no sistema atual simulado.....           | 80 |
| Figura 26 – Taxa de utilização de alguns locais de capacidade múltipla no sistema atual simulado..... | 81 |
| Figura 27 – Taxa de utilização dos recursos no sistema atual simulado.....                            | 81 |
| Figura 28 – Componentes logísticos das operações de Mina.....   | 84 |
| Figura 29 – Taxa de utilização dos recursos no cenário de Simulação-Otimização .....                  | 87 |
| Figura 30 – Quantidade de saída dos britadores (produção em toneladas).....                           | 88 |
| Figura 31 – Formação de pulmão próximo aos britadores (em toneladas) .....                            | 88 |
| Figura 32 – Análise de fila nos britadores do cenário de Simulação-Otimização .....                   | 89 |

## Lista de tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 01 – Software de Otimização .....  | 50 |
| Tabela 02 – Percentual de roteamento, a partir da Mina A, para os<br>britadores .....                           | 74 |
| Tabela 03 – Percentual de roteamento, a partir da Mina B, para os<br>britadores .....                           | 75 |
| Tabela 04 – Percentual de roteamento, a partir da Mina C, para os<br>britadores .....                           | 75 |
| Tabela 05 – Percentual de roteamento, a partir da Mina A, para os<br>depósitos .....                            | 75 |
| Tabela 06 – Percentual de roteamento, a partir da Mina B, para os<br>depósitos .....                            | 76 |
| Tabela 07 – Percentual de roteamento, a partir da Mina C, para os<br>depósitos .....                            | 76 |
| Tabela 08 – Percentual de roteamento médio final .....  | 77 |
| Tabela 09 – Resultado do cálculo das 5 replicações iniciais em<br>função da utilização média dos recursos ..... | 78 |
| Tabela 10 – Resultado do cálculo das 9 replicações finais .....   | 79 |

## Lista de quadros

|  |    |
|--|----|
| Quadro 01 – Elementos estruturais do modelo: Locais.....         | 69 |
| Quadro 02 – Elementos estruturais do modelo: Entidades .....     | 69 |
| Quadro 03 – Elementos estruturais do modelo: Recursos .....      | 70 |
| Quadro 04 – Lógicas de chegada .....                             | 71 |
| Quadro 05 – Atributos do modelo.....                             | 72 |
| Quadro 06 – Variáveis globais do modelo.....                     | 72 |
| Quadro 07 – Capacidade e velocidade de britagem nominal.....     | 73 |
| Quadro 08 – Função Objetivo para os cenários da otimização ..... | 84 |

*Eu aprendi...  
...que quanto menos tempo tenho, mais coisas consigo fazer.  
William Shakespeare*

## Considerações iniciais

O cenário econômico mundial tem se modificado devido aos avanços tecnológicos, à globalização e à maior conscientização ecológica. Estas mudanças provocam aumento da competitividade, obrigando as organizações a criarem soluções inovadoras para se manterem no mercado. Deste modo, a logística torna-se fundamental na busca por sistemas produtivos eficazes, que ofereçam melhores níveis de serviços e redução de custos, estabelecendo maior competitividade entre as organizações (CECILIANO, 2007; CILO, 2012).

A partir dessa modificação no mercado, Ceciliano (2007) aponta que o mercado de minério de ferro e aço está aquecido nesta primeira década do século XXI e continuará assim pelos próximos anos, pois o consumo de aço (principal produto do minério de ferro) continuará elevado, devido às expansões urbanas e ao êxodo rural, ocorridos, sobretudo na China (principal comprador do minério).

Dados do Ministério de Minas e Energia – MME (2009) e do Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2011) indicam o Brasil como o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo. Em 2010, produziu 372 milhões de toneladas, equivalente a 15% do total mundial (2,4 bilhões de toneladas).

Por natureza, a extração de minérios é uma atividade bastante concentrada em pequenas regiões. Segundo dados da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas – FIPE (2009), o Estado do Pará possui papel de destaque na atividade mineral, ocupando o segundo lugar no *ranking* nacional de produção, com participação em torno de 22%; enquanto o primeiro lugar é ocupado pelo Estado de Minas Gerais, com participação que vai além dos 70%. Apesar da posição, o primeiro estado é referência na atividade mineradora na região Norte, no qual suas exportações, em 2011, representaram o segundo maior saldo na balança comercial brasileira, além de ser o quinto maior estado gerador de exportações no Brasil (SEICOM, 2012).

Com o aumento de preços do minério de ferro, há nas indústrias ou corporações uma alta disponibilidade de recursos para bons projetos. Logo, a empresa que tiver condições de tomar as melhores e mais rápidas decisões estratégicas garantirá a sobrevivência do seu negócio neste mundo competitivo.

O sistema produtivo da mineração de ferro é caracterizado por ser um ciclo de produção longo, integrado, em série e contínuo, se iniciando na mina (extração), passando pelo beneficiamento, transporte, estocagem e terminando com a distribuição, realizada principalmente por modal aquaviário.

Muitas empresas que se destacam pela excelência em logística vêm modelando problemas, utilizando técnicas de Pesquisa Operacional (PO) como simulação e otimização, com o intuito de minimizar o impacto das interfaces de processo, reduzindo custos e aumentando a competitividade. A cadeia produtiva do minério de ferro apresenta especificidades que estimulam o uso de técnicas de PO e de Tecnologia da Informação (TI) de modo integrado, solucionando questões desde a lavra até o elo seguinte da cadeia (CECILIANO, 2007).

Nesse cenário, a cadeia produtiva do minério de ferro apresenta características estocásticas que podem ser traduzidas em técnicas de simulação computacional. Assim, através da utilização de modelos probabilísticos, se torna possível simular o processo com maior nível de detalhamento, realizando experiências, observações e avaliando o comportamento de determinado sistema, mediante a mudança de estado das variáveis de decisão. Além disso, muitos processos apresentam complexidades que não podem ser descritas por meio de equações matemáticas de solução analítica viável.

A PO tem várias aplicações, dentre elas inclui-se a utilização em planejamento operacional de lavra a céu aberto, especialmente, na alocação de máquinas e caminhões às frentes de lavra. Deste modo, este trabalho trata do problema de planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões, cujo objetivo é balancear as taxas de utilização dos recursos logísticos envolvidos no processo. O método utilizado combina técnicas de simulação e otimização, através do pacote de simulação ProModel<sup>®</sup>, que inclui um *software* de Otimização baseado na metaheurística Algoritmos Genéticos, o SimRunner<sup>®</sup>, de forma a potencializar as principais características de cada uma destas técnicas, garantindo a integração, aprendizagem e o melhoramento das tomadas de decisões operacionais referentes às atividades relacionadas à extração, carregamento, transporte e basculamento de minério de ferro em minas à céu aberto.

Sendo assim, este trabalho será desenvolvido a partir das operações de mina realizadas por uma empresa mineradora, com grande atuação na cadeia produtiva do minério de ferro, no Estado do Pará.

## 1.1 Justificativa e motivação para pesquisa

De maneira específica, ao se analisar a cadeia produtiva do minério de ferro, nota-se que as relações entre as quantificações das reservas desse minério e os volumes produzidos, no presente e através de projeções estimadas, apontam para uma realidade mineral a ser vivenciada por várias décadas. Isso ocorre principalmente no Estado do Pará, o qual apresenta a maior reserva de minério de ferro do mundo. Os detalhes são descritos no Capítulo 2.

No cenário da mineração, escolheu-se o planejamento operacional de lavra a céu aberto com alocação dinâmica de caminhões como objeto de estudo (ver Seção 1.3). As soluções para o problema são variadas. Algumas empresas utilizam métodos manuais que levam muito tempo e possuem muitas combinações, dificultando o processo de tomada de decisão operacional. Outro método é formular o problema como um modelo de programação matemática e resolvê-lo por um *software* de otimização, como o LINGO ou o CPLEX.

Entretanto, devido a esses problemas serem considerados de classe NP-difícil (ver Seção 3.5), a metodologia utilizada pode não conseguir resolver em tempo hábil casos reais deste problema. Logo, no Capítulo 5, é proposto um método de Simulação-Otimização, baseado na metaheurística Algoritmos Genéticos. A simulação considera o teste e análise do cenário atual das operações de lavra de minério de ferro para balancear as taxas de utilização dos recursos logísticos envolvidos neste processo. A partir do potencial da metaheurística considerada e da implementação já realizada no simulador, espera-se que as duas técnicas, combinadas, sejam capazes de proporcionar soluções de melhor qualidade a um tempo e custo de desenvolvimento mais baixos.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Propor um modelo de Simulação-Otimização como estratégia voltada à melhoria de desempenho das operações logísticas referentes à extração de minério de ferro produzido no Estado do Pará.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar, à luz da logística, a atividade de extração do minério de ferro produzido no Estado do Pará, identificando as etapas críticas desse processo produtivo e propondo indicadores referentes aos componentes de desempenho logístico;
- Analisar e relacionar as principais incertezas inerentes aos processos logísticos considerados;
- Desenvolver um modelo de simulação computacional que considere as incertezas inerentes à utilização dos recursos logísticos envolvidos na extração do minério de ferro;
- Identificar um modelo matemático que, baseado em técnicas exatas ou heurísticas, melhor descreva o sistema logístico atualmente desenvolvido pela empresa, de forma a potencializar a otimização das etapas julgadas mais críticas do processo em análise;
- Considerar a análise de *trade-off* logísticos para propor diferentes cenários (arranjos) logísticos plausíveis com a operação logística atualmente desenvolvida, para uso em comparações;
- Identificar indicadores para acompanhar a evolução de desempenho dos cenários (arranjos) propostos;
- Analisar e comparar os resultados gerados, considerando o(s) cenário(s) arranjo(s) logístico(s) proposto(s) *versus* o arranjo atualmente desenvolvido.

### 1.3 Delimitação da pesquisa

Este estudo foi desenvolvido em uma empresa mineradora atuante no Estado do Pará, como detalhado na Seção 4.1, e sua modelagem limita-se a etapa Mina, descrita na Seção 4.2. Ou seja, a modelagem da produção do minério de ferro se inicia na extração, com as frentes de lavra, passando por carregamentos e transporte em caminhões fora de estrada até a transferência do material para o britador, se minério, ou depósito, se estéril.

A escolha desta etapa deve-se ao fato desta ser a primeira etapa de análise, proposta no Projeto de Pesquisa “Otimização Logística da Malha de Transporte da

Cadeia Produtiva do Minério de Ferro do Estado do Pará, por meio de Simulação Computacional e Inteligência Artificial” aprovado no Edital FAPESPA/VALE.

O simulador criado servirá somente para análise de cenários específicos da empresa mineradora em estudo, pois existem algumas especificidades nos processos de produção de minério de ferro que diferem de empresa para empresa, não sendo, portanto, aconselhável aplicá-lo em outros sistemas industriais, sem as devidas adaptações necessárias.

O mesmo princípio é válido para o modelo de otimização, pois envolve características operacionais específicas de melhorias para tomada de decisão desta empresa e, se forem aplicados em outras organizações, devem ser levadas em consideração as características operacionais específicas de cada uma delas.

### **1.3.1 Técnicas aplicadas**

Para este trabalho foram aplicadas técnicas de:

- Modelagem matemática conceitual das operações realizadas dentro da mina de produção de minério de ferro;
- Simulação probabilística por eventos discretos;
- Otimização baseada na metaheurística Algoritmos Genéticos, para refino dos resultados de simulação.

### **1.3.2 Ferramentas para a implementação**

Para a implementação do método proposto neste trabalho, foram utilizadas algumas ferramentas computacionais, tais como:

- *Microsoft Office Excel* 2010
- *Minitab* 16
- ProModel 8.5 (2011) – ProModel Corporation

### **1.3.3 Período de validade dos dados**

Os dados utilizados para a validação dos modelos computacionais, criados neste trabalho, refletem o período de Janeiro de 2012 a Agosto de 2012. Esses

dados se encontram em uma planilha eletrônica do *Microsoft Excel*, detalhando toda a produção por hora, durante esse período.

#### 1.4

#### **Metodologia de desenvolvimento da pesquisa**

Neste trabalho, buscou-se uma metodologia para orientar o planejamento da pesquisa e a elaboração da dissertação, na qual os resultados fossem satisfatórios e consistentes. Deste modo, esta dissertação se enquadra como uma pesquisa de natureza Aplicada, cuja escolha do tema responde a seguinte pergunta, proposta por Silva e Menezes (2005): “O que se pretende abordar?”.

A escolha do tema está relacionada à linha de pesquisa, “Transporte e Logística” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, que abrange o desenvolvimento e o uso de métodos quantitativos para planejamento, projeto e análise econômico-operacional de sistemas logísticos. Além disso, conforme Seção 1.3, o tema se relaciona também ao Projeto de Pesquisa “Otimização Logística da Malha de Transporte da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro do Estado do Pará, por meio de Simulação Computacional e Inteligência Artificial”, que tem como objetivo propor e implementar estratégias logísticas para otimização da malha de transporte da cadeia produtiva de minério de ferro produzido no Estado do Pará, a partir do desenvolvimento de um *software* de simulação computacional que, utilizando métodos de otimização não lineares (probabilísticos) e técnicas de inteligência artificial, irá avaliar os cenários factíveis, retornando o(s) cenário(s) ótimo(s) e identificando os parâmetros do(s) mesmo(s).

Baseado na descrição acima, o tema proposto pra pesquisa foi “Planejamento Operacional de Lavra de minério de ferro no Estado do Pará: Proposta de Simulação-Otimização de recursos logísticos”, em que se apresenta o balanceamento das taxas de utilização dos recursos logísticos utilizados na mina, como um problema a ser enfrentado no planejamento operacional de lavra, pelas empresas que produzem o minério de ferro. Além de mostrar que um modelo de Simulação-Otimização, pode ser de grande utilidade na busca das possíveis soluções para o problema.

A pesquisa é caracterizada como Exploratória, pois busca familiaridade com o problema abordado. Em resumo, a formulação do problema de planejamento

operacional de lavra pode ser apresentada pela seguinte indagação: “Como balancear as taxas de utilização dos recursos logísticos utilizados em operações de extração e transporte de minério de ferro, considerando aumento ou diminuição em suas unidades de uso?”.

Após a definição do tema e problema, realizou-se uma pesquisa Bibliográfica e um Estudo de caso. A fundamentação teórica foi baseada no levantamento e análise do que já foi publicado sobre o tema e o problema abordado na pesquisa escolhida. Os dados darão sustentação ao desenvolvimento da pesquisa, juntamente com as informações provenientes da empresa mineradora de realização deste estudo, localizada no Estado do Pará.

O problema é abordado de forma Quantitativa, pois traduz as informações obtidas em dados numéricos para construção de um modelo de simulação e de otimização, posteriormente, representando a etapa Mina do sistema produtivo do minério de ferro considerado no estudo. Assim, o planejamento da investigação será resumido a seguir. Com o intuito de simular a etapa Mina do sistema produtivo do minério de ferro e de obter os resultados necessários para atingir os objetivos traçados para a pesquisa, foram planejados os seguintes experimentos com o modelo de simulação construído:

- Validação – Utilização de informações de origem e destino das cargas de minério de ferro dentro da área de mina, de uma empresa mineradora com atuação no Estado do Pará, sendo aplicado o teste T de *Student* para comprovar a correspondência entre os valores percentuais médios do modelo e do sistema real;
- Experimento – Avaliação do comportamento da medida global do sistema, que representa a distribuição das quantidades de minério de ferro entre os britadores, das quantidades de estéril entre os depósitos, bem como a taxa de utilização dos equipamentos utilizados na área de lavra (escavadeiras, carregadeiras e caminhões fora de estrada);
- Otimização – Mudança nos parâmetros da simulação, com o objetivo de encontrar um melhor funcionamento para as atividades operacionais de lavra, mediante as seguintes hipóteses:
  - Variação do número de escavadeiras;
  - Variação do número de carregadeiras;
  - Variação do número de caminhões fora de estrada.

Finalmente, com as respostas do cenário atual (simulado) e o cenário otimizado, são feitas as comparações e apresentadas as conclusões da pesquisa.

## 1.5

### **Estrutura da dissertação**

A dissertação está dividida em seis capítulos, sendo este primeiro capítulo, o de introdução.

O referencial teórico será apresentado nos Capítulos 2 e 3, respectivamente, “Logística associada à produção do minério de ferro no Estado do Pará” e “Técnicas de simulação e de otimização”, sendo obtida a partir de consultas a livros, periódicos, anais, artigos e outros trabalhos de pós-graduação, por meio das quais foi possível fazer um levantamento das características da cadeia produtiva do minério de ferro e das operações de lavra, das aplicações de modelagem em cadeias de suprimentos, das técnicas utilizadas pelos autores para modelagem e para resolução do sistema descrito, bem como dos conceitos e métodos de condução de projetos de simulação.

No Capítulo 4, “Operações da cadeia produtiva do minério de ferro na empresa”, deste trabalho, será apresentada toda a caracterização do problema de pesquisa, contendo a descrição e a identificação do sistema objeto de estudo, usada na fundamentação da aplicação do modelo computacional.

No Capítulo 5, “Simulação-Otimização das operações de Mina”, são descritos o modelo de simulação e os passos para a realização da otimização dessa simulação, representando a etapa Mina do sistema produtivo do minério de ferro considerado no estudo.

Por fim, os dados obtidos e organizados na etapa anterior são interpretados e analisados no Capítulo 6, “Considerações finais”. Segundo Silva e Menezes (2005), “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”. Nele, as recomendações finais também são apresentadas.

## 2

### **Logística associada à produção do minério de ferro no Estado do Pará**

A globalização e a expansão do mercado mundial do minério de ferro e de produtos siderúrgicos tornaram as empresas ferroviárias mais competitivas. Esta competição é marcada pela crescente demanda por este tipo de transporte e introdução de sistemas produtivos cada vez mais eficientes, que buscam soluções de otimização para aplicá-las em diversas atividades. No planejamento operacional de lavra em mina a céu aberto, é essencial a determinação do ritmo de lavra implementado em cada frente, de modo a fornecer à usina de beneficiamento uma alimentação adequada (COSTA, 2005; COELHO e MORALES, 2012).

Segundo Ceciliano (2007), “as empresas que hoje se destacam pela excelência em logística vêm modelando problemas, utilizando mais intensamente as técnicas de Pesquisa Operacional (PO) como simulação e otimização”. O objetivo é minimizar o impacto das interfaces de processo, aumentar a produtividade, reduzir custos e desperdícios, aumentando a competitividade.

A seguir, é feita uma revisão referente à logística associada à cadeia do minério de ferro no Estado do Pará. O principal objetivo dessa revisão é apresentar a importância da mineração e as dificuldades em se atender um mercado dinâmico como esse. Dessa forma, pode-se entender as relações entre os elos da cadeia produtiva do minério de ferro e justificar a proposta do modelo de Simulação-Otimização do planejamento em questão.

#### **2.1**

##### **Produção de minério de ferro no Estado do Pará**

As reservas que apresentam maior teor de ferro (Fe), superior a 60%, situam-se no Brasil e na Austrália. Porém, o Brasil destaca-se no cenário mundial devido ao alto teor encontrado nos minérios hematita (60% Fe), predominante no Pará, e itabirito (50% Fe), predominante em Minas Gerais. Em 2010, sua produção foi de 372 milhões de toneladas, equivalente a 15% do total mundial (2,4 bilhões de toneladas), de acordo com a Figura 01. Atualmente, a maioria das reservas se distribui entre Minas Gerais (63%), Pará (18%) e Mato Grosso do Sul (17%), com pequena produção em outros estados (MME, 2009; IBRAM, 2011).

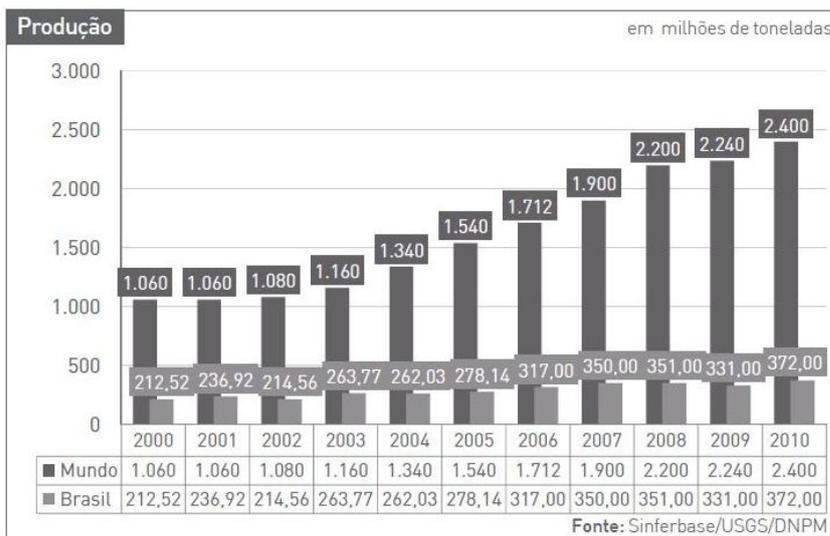


Figura 01 – Produção de minério de ferro  
Fonte: IBRAM, 2011

Dados da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE, 2009) destacam o papel do Estado do Pará na atividade mineral, ocupando o segundo lugar no *ranking* nacional de produção, com participação em torno de 22%; enquanto o primeiro lugar fica com o Estado de Minas Gerais, com participação acima de 70%. Esse fato torna o estado paraense referência absoluta na atividade mineradora na região Norte. A produção mineral paraense se divide principalmente entre oito substâncias, as quais representam uma taxa de 94%, sendo elas: o minério de ferro, o minério de cobre, a bauxita, o minério de manganês, o ouro, o caulim, o calcário e a água mineral. Por natureza, a extração de minérios é uma atividade bastante concentrada em pequenas regiões.

O Estado do Pará é composto por 144 municípios, onde 15 apresentam atividades mineradoras. Com essa concentração, em poucos municípios, se torna natural o desenvolvimento acima da média dessas unidades. Conforme a FIPE (2009), o sudeste paraense se destaca na atividade mineral do estado. Nessa região, estão localizados os municípios de Parauapebas e Canaã dos Carajás, principais produtores de minérios de ferro e cobre, respectivamente.

Dados da Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração (SEICOM, 2012) e do Sindicato das Indústrias Minerárias do Pará (SIMINERAL, 2012) apontam esses municípios como os maiores arrecadadores de Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerários (CFEM), conforme Figura 02. Tal fato aponta a importância do Estado do Pará no contexto da mineração.

Algumas projeções do SIMINERAL (2012) ainda indicam que essa cadeia produtiva respondeu por 232 mil empregos diretos e indiretos. Com a previsão de investimentos, outros 113 mil postos de trabalho serão criados no Pará até 2016.

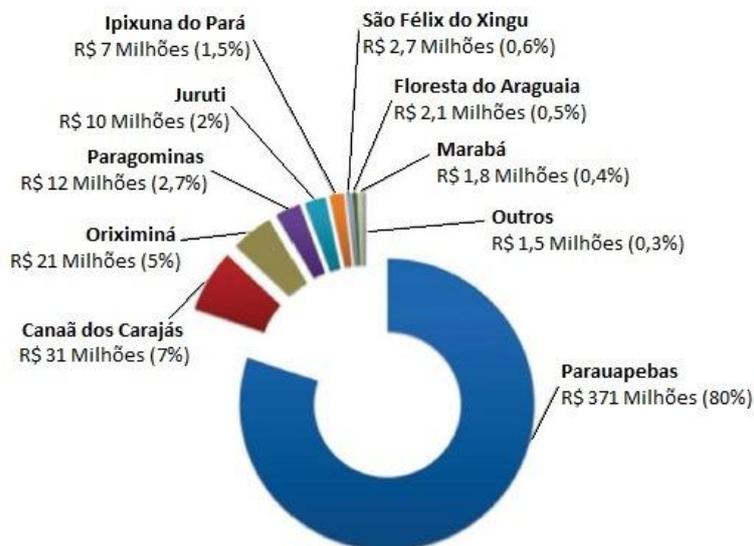


Figura 02 – Arrecadação de CFEM por município paraense em 2011 (R\$ 463 milhões)  
Fonte: SEICOM, 2012; SIMINERAL, 2012

A SEICOM (2012) ainda informa que, em 2011, o estado registrou R\$ 32,2 bilhões em exportações (mais de 90% das exportações paraenses), atingindo o segundo maior saldo na balança comercial brasileira, além de ser o quinto maior estado exportador. A previsão é que, nos próximos anos, esses valores continuem aumentando, levando o estado a ser o primeiro Produto Interno Bruto (PIB) (SIMINERAL, 2012). Deste modo, percebe-se que, apesar da economia paraense ser bastante diversificada, é o setor mineral primário, principalmente através do minério de ferro, que predomina na constituição do saldo comercial. O emprego desse minério se concentra, principalmente, na indústria siderúrgica.

Esses valores expressivos também decorrem de investimentos realizados com a finalidade de ampliação e modernização do setor mineral. A justificativa é a forte demanda interna e externa pelos produtos minerais, a qual tornou os preços praticados atrativos, apesar de, após a crise financeira internacional, alguns investimentos terem sido revistos (ESPECIAL LOGÍSTICA, 2011; FIPE, 2009).

Logo, ao se analisar as relações entre as quantificações das reservas de minério de ferro e os volumes produzidos, no presente e através de projeções estimadas, aponta-se uma realidade mineral para o Estado a ser vivenciada por várias décadas, principalmente se forem considerados os investimentos previstos.

## 2.2

### A importância da logística para o setor da mineração

A importância da logística na globalização permite trocas eficientes e eficazes de produtos e mercadorias, que circulam por canais internacionais e regionais bem ajustados. Logo, as organizações têm que descobrir quais são os componentes de valor que seus clientes apreciam e procurar realizar ações que se traduzam na agregação de valores aos mesmos.

Assim como toda cadeia produtiva, a do minério de ferro necessita de estudos logísticos para continuar exercendo seu papel predominante na constituição do saldo comercial brasileiro. Além disso, sua importância pode ser notada através dos níveis de produção, da geração de renda e dos investimentos realizados, conforme dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2011).

Neste contexto, para aumentar mais ainda a concorrência no mercado do minério de ferro, a mineradora britânica Anglo American vem investindo bilhões na construção de um mineroduto de 524 km que cruzará 32 municípios da região Sudeste e ligará o município de Conceição do Mato Dentro, no norte de Minas Gerais, ao Porto do Açu, em São João da Barra, no terminal logístico em construção no Rio de Janeiro (CILO, 2012). Essa estrutura trará grande economia com o transporte do minério de ferro, que representa 75% do preço final do produto onde, no Brasil, é feito principalmente por ferrovias. Além disso, uma tonelada do minério de ferro produzido pela mineradora chegará a China com um preço entre 15% e 25% abaixo do que hoje é cobrado pelas concorrentes.

A logística é muito explorada na redução de custos e melhoria no atendimento ao cliente, porém a mesma requer uma integração de fatores e componentes, sendo que a análise individual dos elos da cadeia produtiva pode prejudicá-la, impedindo a visão sistêmica e associada do processo produtivo.

Essa integração logística conduzirá à redução nas despesas com transporte, possibilitando também que a empresa tenha uma margem de lucro maior e, conseqüentemente, mais espaço nas negociações com os clientes (CILO, 2012). Apesar de a empresa estudada realizar grandes investimentos em mineração na região Norte, seus concorrentes estão começando a investir maciçamente na melhoria de seus processos logísticos. Essa corrida pelo mercado da mineração determinará quem serão os principais *players* desse mercado nos próximos anos.

Conforme Cilo (2012) “ao que tudo indica, o grande desafio do setor mineral não está apenas em garantir os grandes investimentos, mas como combiná-los com as estratégias para aumentar a competitividade”.

## 2.3

### Cadeia produtiva do minério de ferro

Os principais minerais que contêm ferro são: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\text{FeO}/\text{OH}$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). Entretanto, o minério de ferro, especificamente, é uma mistura de dois minerais: a hematita (óxido de ferro –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e o quartzo (sílica –  $\text{SiO}_2$ ), que constituem a rocha itabirito. Devido às suas propriedades físico-químicas, este minério é quase totalmente usado na indústria siderúrgica (98%). O restante é utilizado como carga na indústria de ferroliga e na indústria de cimento (MME, 2009; CASTRO NETO, 2006).

Segundo Castro Neto (2006), os produtos de minério de ferro não são definidos apenas pelos teores mínimos de ferro e máximos das impurezas sílica, alumina, fósforo, perda por calcinação, entre outras, mas também pelas classes de frações granulométricas rigidamente controladas. Basicamente, o minério de ferro se classifica em minério bruto e minério beneficiado.

Pfiffer (2004 *apud* CECILIANO, 2007) e Vale (2010) expõem que, embora o minério de ferro possua variações em suas características, normalmente, ele é classificado, de acordo com sua granulometria:

- **Granulado ou Lump:** é o minério de ferro cujas partículas mais grossas variam de 6,35 mm a 50 mm de diâmetro. Pode ser utilizada como carga direta nos altos-fornos.

- **Finos de minério de ferro ou sinter feed ou pellet screening:** 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, que não têm aplicação prática direta na indústria siderúrgica. Este produto é matéria prima do processo de pelletização.

Para Chaves (2002), o objetivo da atividade mineradora é a descoberta, a

lavra e o beneficiamento de minérios. O autor ainda aponta que o processamento do minério consiste em uma sequência de operações industriais, denominadas de operações unitárias, no qual a sequência varia para atender determinado objetivo.

A Figura 03 apresenta um fluxograma típico de tratamento de minérios, proposta por Luz e Lins (2004), em que as 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) e **disposição de rejeito**.

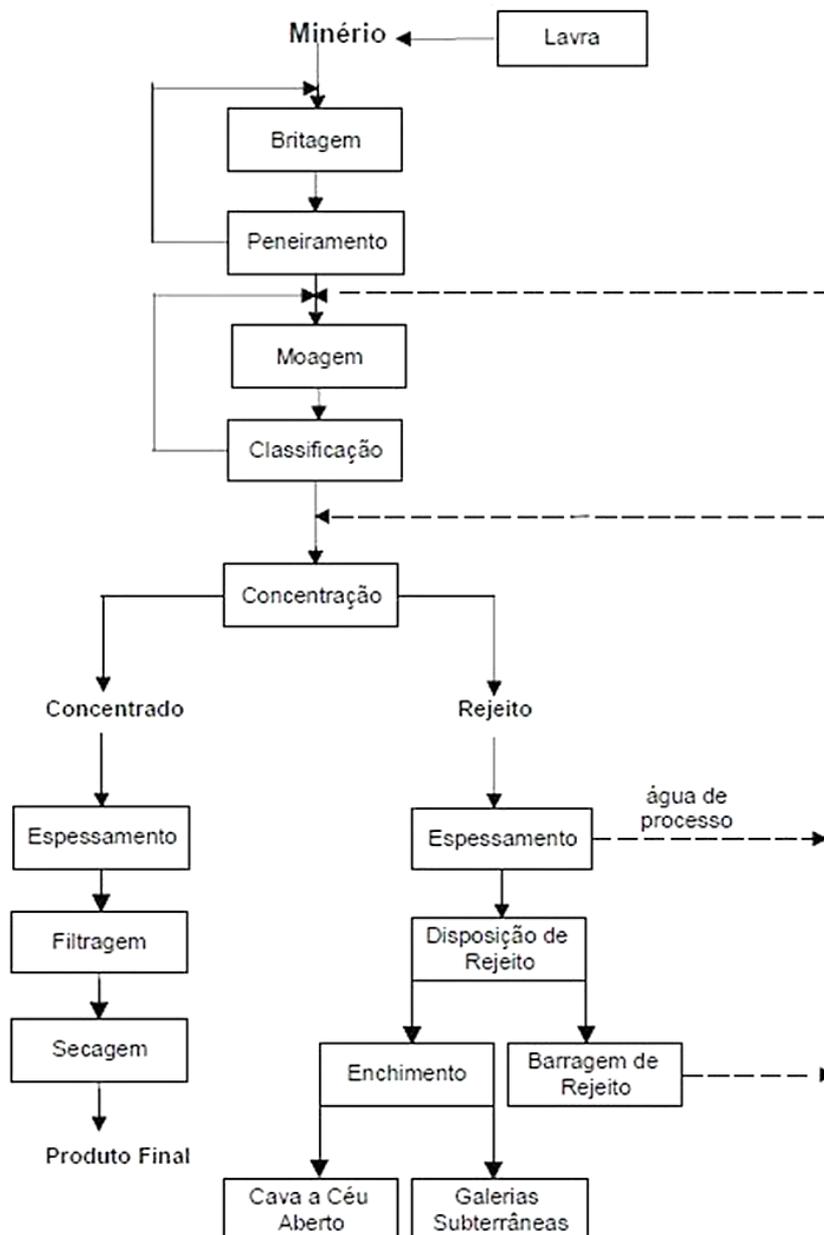


Figura 03 – Fluxograma típico de tratamento de minério  
Fonte: LUZ e LINS, 2004

O processo produtivo do minério de ferro, analogamente aos conceitos colocados por Chaves (2002) e Luz e Lins (2004), é constituído por uma sequência de operações unitárias, que são:

- **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;
- **Aglomerção:** que tem como finalidade a agregação de valor ao minério de ferro através da criação de características especiais, que tornam o produto mais atrativo no processo de fabricação do ferro primário a que são destinados os aglomerados na indústria siderúrgica; incluem os processos de sinterização e/ou pelotização, geralmente combinados com operações de cominuição e auxiliares;
- **Estocagem e embarque:** as operações de estocagem, embarque e portuárias tornam-se parte integrante do processo produtivo em uma parcela significativa das empresas de mineração, que exportam seus produtos através de transporte marítimo.

Considerando o elevado nível de interdependência das partes do sistema, tais atividades devem ser conduzidas levando-se em conta seu contexto mais amplo, buscando a maior integração possível entre elas. Na mina de minério de ferro do Estado do Pará, essa integração é feita entre mina-ferrovia-porto.

### **2.3.1 Componentes de desempenho logístico da cadeia de minério de ferro**

De acordo com Gomes e Ribeiro (2004), o desempenho expressa o grau de sucesso ou fracasso de uma entidade em relação a(s) outra(s) ou em relação a si própria, em um instante anterior. Bowersox; Cooper; Closs (2006) definem que, na tomada de decisão estratégica em um sistema logístico, três componentes de desempenhos são considerados fundamentais: instalações, transporte e estoque. Entretanto, estes são essenciais para que outros dois componentes sejam atendidos: o serviço ao cliente e a estrutura de custos. Além disso, existe o

componente de desempenho, informação, que atua de modo mais amplo, agindo como um integrador dos demais componentes.

Neste trabalho, os componentes de desempenho, serviço ao cliente e estrutura de custos não serão considerados, pois uma análise a médio e longo prazo seria necessária, além de que não foram repassadas informações sobre custos. Assim, os componentes instalações, transporte, estoque e informação são comentados ao longo desta pesquisa, sendo necessários para as considerações relacionadas ao alcance dos objetivos específicos propostos.

A localização das **instalações** tem impacto direto sobre a capacidade e o custo do serviço ao cliente. Em seu planejamento, devem se considerar aspectos como, o número de instalações, a quantidade, o tamanho, a localização em relação aos principais mercados a serem atendidos e o produto a ser estocado (BOWERSOX; COOPER; CLOSS, 2006).

Ballou (1993) afirma que: “O transporte é uma área fundamental de decisões no *mix* logístico. Excetuando os produtos adquiridos, o **transporte** é, dentre as atividades logísticas, a que absorve a maior percentagem dos custos”. Por isso, os sistemas logísticos devem ser projetados para utilizar o tipo de transporte que minimize o custo total do sistema.

Referente aos **estoques**, Gomes e Ribeiro (2004) acreditam que: “Deve-se optar pela redução dos níveis de estoques devido a fatores como maior diversidade de produtos, maior número de clientes a serem atendidos, elevado custo de oportunidade de capital e crescente foco gerencial no controle dos custos variáveis”. Desta forma, as estratégias logísticas são projetadas para manter o mínimo possível de recursos financeiros em estoque.

Finalmente, o componente **informação** que, conforme citado anteriormente, atua como um integrador e tem impacto direto nos demais componentes, operando como diferencial para melhorar o desempenho da cadeia de suprimentos. Bowersox; Cooper; Closs (2006) admitem que: “A informação facilita a coordenação do planejamento e do controle das operações do dia a dia. Sem informações precisas, o esforço despendido no sistema logístico pode ser desperdiçado”. Portanto, com a tecnologia atual é capaz de se atender aos mais exigentes requisitos de informação. Se desejado, a informação pode ser obtida em tempo real, como ocorre na empresa em estudo.

### 2.3.2

#### Modais logísticos para transporte de minério de ferro

A logística é parte do processo de uma cadeia de suprimentos, onde cada tipo de empresa tem sua cadeia produtiva e operações logísticas, devido suas particularidades. Segundo Gomes e Ribeiro (2004), dentro dos fluxos logísticos encontram-se atividades primárias como: transportes, manutenção de estoques e processamento de pedidos. Estas são assim classificadas, porque ou contribuem com a maior parcela do custo total da logística ou são essenciais para a coordenação e o cumprimento da tarefa logística (BALLOU, 1993).

O transporte é uma das principais funções logísticas, com papel fundamental no desempenho de várias dimensões do serviço ao cliente, ligadas principalmente a tempo e utilidade de lugar. Para muitas empresas, o transporte é considerado a atividade primária mais importante, pois absorve a maior parte dos custos logísticos (cerca de 60%). Este fato inclui fatores como, por exemplo, o modal escolhido para o transporte, as taxas cobradas pelo setor e as condições de infraestrutura oferecidas (LOPES *et al.*, 2011). Assim, para atingir objetivos operacionais, empresas calculam que o transporte seja um diferencial competitivo, pois qualquer redução nos custos logísticos impactará no lucro da organização.

Na busca de redução nos custos logísticos e maior confiabilidade no serviço prestado, destacam-se a integração entre modais de transporte e o surgimento de operadores logísticos, capazes de gerar economias de escala ao compartilhar sua capacidade e seus recursos de movimentação entre vários parceiros (GALLO *et al.*, 2010; LOPES *et al.*, 2011). Conforme Gallo *et al.* (2010), os tipos de produtos predominantemente transportados por mais de um modal são *commodities*, como o minério de ferro, o carvão mineral, os grãos e o cimento. Esses produtos possuem baixo valor agregado e grande volume, portanto o modal ferroviário é o mais utilizado nesse transporte, sendo combinado com outros.

Para a transferência do minério de ferro entre as minas e o porto, geralmente, são utilizados transporte por rodovias, ferrovias e dutos. De acordo com Coelho e Morales (2012), para essa transferência de material, basicamente, existem três alternativas de modais logísticos, que são: o transporte rodoviário com caminhões graneleiros, o transporte ferroviário em vagões e o transporte através de duto, sob a forma de polpa aquosa.

Brandt (2010 *apud* COELHO e MORALES, 2012) informa que “o custo operacional do sistema de transporte de polpa por duto, por tonelada transportada, é aproximadamente 10 vezes inferior ao custo de transporte por ferrovia”. Logo, o interesse por esse modal vem crescendo, especialmente para o minério de ferro, e atraído investimentos para suprir restrições de capacidade e deficiências operacionais, no uso de ferrovias e rodovias.

A empresa mineradora em estudo realiza a integração de modais via modal rodoviário. Deste modo, garante um maior ganho de eficiência e redução de custos, pela adoção, em grande parte da viagem, de modais com menor custo, com a capacidade de entrega porta a porta (LOPES *et al.*, 2011).

### 2.3.3

#### **Incertezas e riscos dos processos logísticos e elos da cadeia**

A partir das operações unitárias, explícitas na Seção 2.3, infere-se que cada operação possui características próprias e, por isso, variações em suas atividades. Esse fato se intensifica, devido à cadeia de minério de ferro ser longa e complexa, devendo ser considerada para estudo como um sistema que possui características estocásticas, na qual a origem dos eventos é aleatória.

Neste cenário, Castro Neto (2006) indica que algumas incertezas do processo produtivo do minério de ferro podem ser classificadas em: (a) Variações no processo produtivo; (b) Incerteza na confiabilidade da quantificação dos fluxos do processo; e (c) Incerteza na quantidade entregue ao cliente.

#### **a) Variações no processo produtivo da mineração do ferro**

Segundo Juran (1998 *apud* CASTRO NETO, 2006), todos os processos industriais exibem algum tipo de variação, seja ela permanente ou intermitente. A variação permanente ou variação aleatória resulta de causas eventuais e indetermináveis, sendo comuns ao processo; já a variação intermitente, resulta de causas determináveis. Na primeira, é possível antecipar os limites dentro do qual o processo variará, porém, na segunda, não é possível antecipar a dimensão dessa variação. Assim, o autor informa que através da 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”.

Se cada operação unitária constitui o processo produtivo da mineração do ferro, logo, comprova-se a existência de variação no processo produtivo global. Por conseguinte, 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 própria do processo produtivo.

De acordo com Vale (2010), Samarco (2012) e Chaves (2002), algumas variáveis que podem ser consideradas como resultados dos processos são apresentadas na Figura 04. Nela, tem-se o fluxograma esquemático do processo produtivo do minério de ferro com a variabilidade inerente a cada processo.

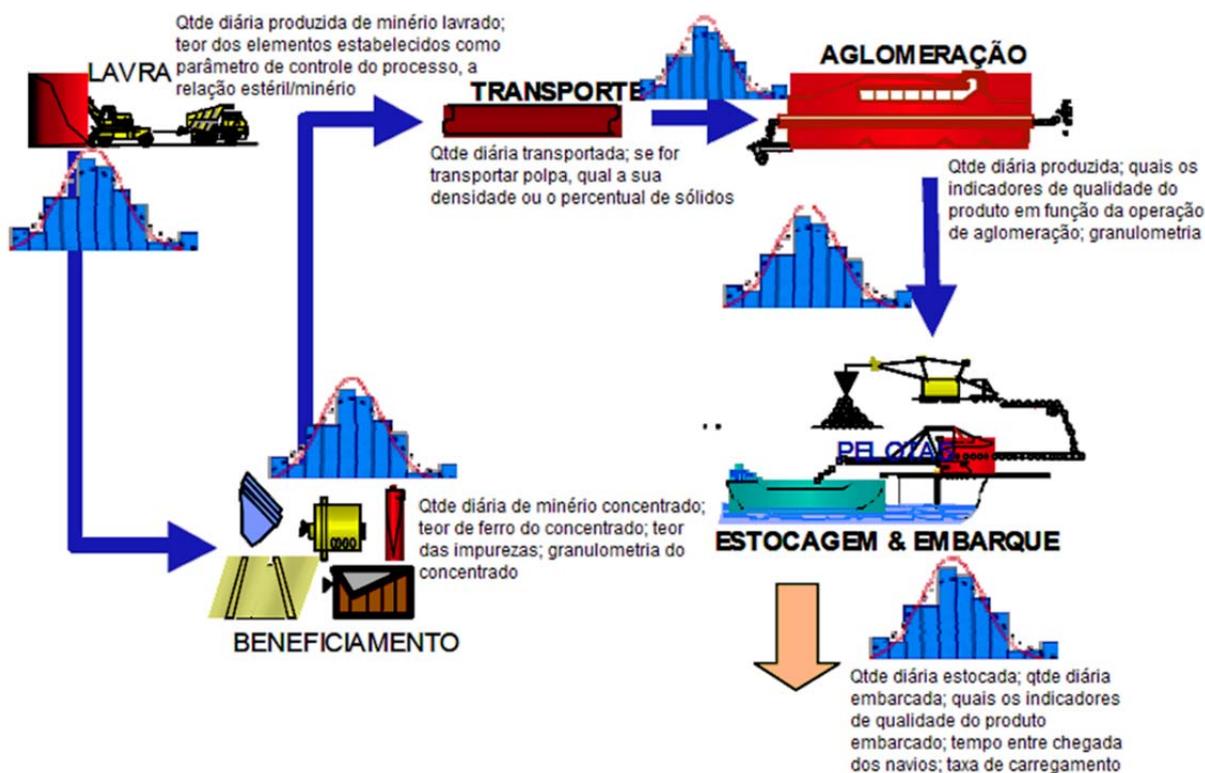


Figura 04 – Processo produtivo da mineração de ferro e sua variação  
Fonte: Adaptado de CASTRO NETO, 2006

#### b) Incerteza na confiabilidade da quantificação dos fluxos do processo produtivo da mineração de ferro

As operações do processo produtivo da mineração de ferro possuem natureza em grande escala (milhões de toneladas por ano), logo se caracterizam como um sistema contínuo, com fluxos de massas em larga escala.

É comum ocorrerem erros de medidas nos instrumentos que contabilizam de forma contínua as taxas mássicas dos diversos fluxos. A taxa mássica é a mensuração da quantidade de material processado por unidade de tempo (Ex.:

toneladas por hora). “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” (CECILIANO, 2007). Tais fatos demonstram uma tendência de ampliação dos fatores que são causadores dos erros de medidas dos instrumentos que contabilizam continuamente as taxas mássicas.

Conforme Ceciliano (2007), “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”. A influência da variação dessa incerteza na medida de rendimento global do sistema produtivo do minério de ferro não será objetivo desta pesquisa, deste modo, sua lógica representativa não constará no modelo de simulação.

### **c) Incerteza na quantidade entregue ao cliente**

A incerteza na quantidade entregue ao cliente é caracterizada pela tolerância de carregamento. No afretamento de granéis sólidos, como o minério de ferro, é comum o armador ter a opção de exercer o direito de 10% de tolerância na quantidade da carga a ser transportada. De acordo com Castro Neto (2006), “essa flexibilidade, estipulada em contrato, garante ao armador a possibilidade de balanceamento das cargas para otimizar a utilização do navio”, porém gera uma incerteza na quantidade real entregue ao cliente, sendo manifestada em uma entrega com quantidade maior ou menor que a planejada.

Vários desbalanceamentos sequenciados no processo de carregamento acarretam problemas como falta ou excesso de estoque e aumento do tempo de sobreestadia, decorrente de uma sucessão de entregas em quantidades maiores ou menores que a planejada.

Do mesmo modo que o item anterior, a influência da incerteza referente à quantidade embarcada em função da tolerância de carregamento também não será objetivo desta pesquisa.

### 3

## Técnicas de simulação e de otimização

Os problemas de otimização consistem em achar a melhor combinação, dentre um conjunto de variáveis, para maximizar ou minimizar uma função, chamada de função objetivo ou função custo. Essas variáveis de decisão assumem valores delimitados pelas restrições impostas a essas variáveis, formando um conjunto discreto (finito ou não) de soluções factíveis de um problema (COSTA, 2005; BECCENERI, 2012).

Para Becceneri (2012), esses problemas podem ser divididos em três categorias: “aqueles cujas variáveis assumem valores reais (ou contínuos), aqueles cujas variáveis assumem valores discretos (ou inteiros) e aqueles em que há variáveis inteiras e contínuas”. Respectivamente, se classificam como problemas de Otimização Contínua, de Otimização Combinatória ou Discreta, e de Otimização Mista. Neste estudo, o foco será na Otimização Combinatória.

Conforme Subitem 2.3.3 nota-se que a cadeia do minério de ferro possui características específicas além da natureza estocástica. Para melhorar a eficiência da utilização de seus recursos, algumas empresas buscam soluções inovadoras. Neste sentido, a evolução das ferramentas de TI e o avanço das técnicas de PO se mostram como motivadoras para a busca de melhores soluções integradas, desde a lavra até o elo seguinte da cadeia, podendo ser exemplificada nos trabalhos de Castro Neto (2006), Ceciliano (2007), Campos (2009) e Juliá (2010).

Em seu trabalho, Castro Neto (2006) constrói um modelo para simular a operação do sistema produtivo do minério de ferro, que comercializa produtos acabados no mercado transoceânico. O objetivo foi construir o modelo de simulação e estudar o comportamento do sistema perante a mudança de estado das variáveis representadas pela sequência de programação da produção, pelo nível de estoque de segurança no sistema e pela mudança na forma de operação.

O objetivo do trabalho de Ceciliano (2007) foi desenvolver e aplicar um método de tomada de decisão na cadeia produtiva de minério de ferro da Samarco Mineração S/A, utilizando Simulação-Otimização no processo de planejamento do negócio. O propósito era melhorar a qualidade das informações do processo de escolha da melhor alternativa de investimentos para os próximos cinco anos.

Em sua dissertação, Campos (2009) considerou os recursos materiais rodante e combustível, onde desenvolveu um modelo de otimização para apoio ao planejamento tático do transporte ferroviário de cargas, com visão integrada das operações em vias de circulação e pátios. O modelo utilizou o planejamento da rede de serviços, no qual apontava facilitar a tomada de decisão envolvendo a definição dos trens (serviços) a operar, sua frequência e a sequência das operações e serviços a serem praticados desde a origem das cargas até o destino.

Finalmente, Juliá (2010) propõe em seu trabalho o desenvolvimento de um modelo de simulação para o dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto, aplicando-o em uma empresa do ramo de mineração. Nele é apresentada uma análise entre possíveis cenários de expansão do sistema pátio-porto através de métricas definidas e faz uma comparação entre cada cenário proposto.

Em um contexto mais específico, as aplicações de PO também incluem sua utilização no planejamento operacional de lavra a céu aberto, em particular, na alocação de máquinas e caminhões às frentes de lavra, podendo ser exemplificadas nos trabalhos de Costa (2005) e Araújo (2008).

O trabalho de Costa (2005) aborda problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. São apresentados e modelados problemas relativos à mistura de minérios provenientes de várias frentes de lavra, sendo considerados três problemas: mistura de minérios, mistura de minérios com alocação dinâmica de caminhões e mistura de minérios com alocação estática de caminhões. Cada problema é resolvido por duas metodologias, uma baseada em técnicas de programação matemática e outra em técnicas heurísticas.

Já o trabalho de Araújo (2008) trata do planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões. Devido a sua complexidade combinatória, o problema é abordado por um procedimento heurístico baseado na metaheurística *Iterated Local Search*. Além disso, é formulado um modelo de programação matemática, o qual serve para validar o método heurístico proposto, testado através da utilização de dados reais em um *software* desenvolvido para este fim.

A literatura técnico-científica expõe muitos trabalhos na área de mineração, utilizando técnicas de otimização e técnicas de simulação separadamente, porém, para se conseguir melhores resultados é necessário integrá-las. Ultimamente, tem se explorado bastante a área dos transportes, principalmente as ferrovias. Porém, no presente trabalho será realizado um estudo de otimização baseado no transporte

do minério de ferro dentro de uma mina, partindo de sua extração (frente de lavra) até o descarregamento para beneficiamento (britador - usina).

Nas próximas seções, serão descritas técnicas de simulação computacional e de otimização, utilizadas na resolução do problema de planejamento operacional de lavra proposto neste trabalho, bem como o tema da alocação de caminhões, que será baseado no Problema de Coletas e Entregas.

### **3.1 Planejamento operacional de lavra**

Para se atender às necessidades de mercado, é necessário se fazer um planejamento estratégico de exploração de minério. As médias e grandes empresas de mineração realizam esse planejamento pra avaliar todos os cenários possíveis e detectar as melhores opções de operações em tempos ajustados. Conforme Araújo (2008), essa tarefa é conhecida como Planejamento de Lavra, sendo necessária para se conhecer com riqueza de detalhes a área a ser explorada. Em geral, um planejamento é elaborado considerando-se três fases: longo, médio e curto prazo.

No longo prazo, o planejamento é mais amplo, pensando nas operações da mina para alguns anos. No médio prazo, o planejamento é feito para até um ano. Enquanto no curto prazo, o planejamento pode ser diário, mensal e até trimestral, sendo realizado por profissionais de várias áreas, tais como Geologia, Engenharia de Minas, Qualidade, Produção e Administração.

Nota-se que os intervalos variam entre as empresas, dependendo de sua estratégia corporativa. A Seção 4.2 exhibe o problema de planejamento operacional de lavra da empresa mineradora em estudo, com atuação no Estado do Pará.

### **3.2 Alocação de caminhões**

De forma a atender as exigências dos clientes, é necessário selecionar quais as frentes serão lavradas e determinar seu ritmo de lavra. Assim, no planejamento de lavra a céu aberto, principalmente, na alocação de máquinas e caminhões em uma frente de lavra, cada frente contém uma determinada quantidade de minério, com características físicas, químicas e econômicas distintas, chamadas de parâmetros de controle (ARAÚJO, 2008).

Segundo Costa (2005), “Para a operação de minério e estéril, a mina conta com uma frota limitada de equipamentos de carga, os quais devem ser alocados às frentes de lavra, para operarem em uma faixa de produtividade que torne viável sua utilização”. O material retirado da frente de lavra é transportado por uma frota de caminhões com capacidades de carga diferentes, chamados de caminhões fora de estrada. Já o ritmo de lavra é determinado pelas capacidades de operação dos equipamentos de carga e transporte alocados às diversas frentes.

Em ambientes geograficamente reduzidos, como no caso de minas de extração de minérios, há dificuldade em se rotear frotas de veículos para atender determinadas demandas dessa área. Neste cenário, são utilizados dois critérios para a alocação de caminhões: alocação estática e alocação dinâmica, descritas a partir do Problema de Coletas e Entregas (Seção 3.4).

### **3.3 Técnicas de simulação computacional**

Nos últimos anos, o aprofundamento dos conceitos de programação matemática e a melhoria das tecnologias em informática, permitem, que, com o uso de modelos probabilísticos, seja possível simular certo processo com um nível de detalhamento maior e em pouco tempo (CECILIANO, 2007; AKSARAYLI e YILDIZ, 2011). Neste estudo, a simulação auxiliará o balanceamento das taxas de utilização dos recursos logísticos empregados em operações de extração e transporte de minério de ferro na etapa Mina, da empresa em estudo.

Entretanto, Chwif e Medina (2010) advertem que a simulação não é uma ferramenta estritamente de otimização, e sim, uma ferramenta de análise de cenários. Portanto, precisa ser combinada com algoritmos de otimização, pois sozinha não é capaz de identificar uma solução ótima.

Neste sentido, os autores afirmam que os sistemas reais, geralmente, são um pouco mais complexos devido à sua natureza dinâmica (que muda o seu estado ao longo do tempo) e à sua natureza aleatória (que é regida por variáveis aleatórias). Assim, a simulação é adequada pra se verificar ou confirmar o comportamento de determinado sistema diante de mudanças em algumas variáveis ou, simplesmente, experimentar novas políticas de operação antes de sua implementação.

Esse é o princípio de todo modelo de simulação: a partir de um sistema,

construir uma representação simplificada das diversas interações entre suas partes. Para Meireles (2010) e Chwif e Medina (2010) se têm três categorias de modelos:

- **Modelos simbólicos, icônicos ou diagramáticos:** compostos por ícones gráficos que representam o sistema de forma estática, como fotos ou fluxogramas;
- **Modelos matemáticos ou analíticos:** compostos por um conjunto de fórmulas matemáticas, como os modelos de Programação Linear ou os analíticos de Teoria das Filas;
- **Modelos de simulação:** capturam com fidelidade as características de um sistema real, repetindo em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria se fosse submetido às mesmas condições de contorno.

Para Ceciliano (2007), “um modelo de simulação envolve probabilidades, oferecendo uma resposta aproximada do problema”. A simulação difere dos modelos analíticos, pois a cada replicação do modelo obtêm-se respostas diferentes. O fato de serem inseridos dados estatísticos históricos no modelo e as relações matemáticas ou lógicas de suas diversas etapas serem realizadas para verificação de sua funcionalidade, mantém o modelo mais próximo do real.

Baseado nessas definições, a melhor alternativa para a modelagem de sistema complexo, regido por muitas variáveis aleatórias é a modelagem por simulação. O modelo de simulação é uma ferramenta utilizada para revelar os aspectos operacionais de um sistema, respondendo questões do tipo *what-if* (o que ocorre se...) (AKSARAYLI e YILDIZ, 2011). Soares (1990 *apud* CECILIANO, 2007) complementa com a informação de que “uma linguagem ou pacote para simulação fornece uma dessas estruturas e é a sua compilação que vai traduzir o sistema em uma forma aceitável para um sistema computacional”.

Em seu trabalho, Law e Kelton (1999) apresentam alguns passos para o estudo da simulação, ilustrados na Figura 05. Os mesmos passos são definidos por Chwif e Medina (2010), porém com algumas diferenças. A seguir, será descrita a metodologia de simulação dos autores, a qual será utilizada como base para a simulação computacional realizada neste estudo. Deste modo, basicamente, o desenvolvimento de um modelo de simulação compõe-se de três grandes etapas: concepção ou formulação do modelo; implementação do modelo; e análise dos resultados do modelo. Essas etapas são exibidas na Figura 06, explícitas nos próximos subitens.

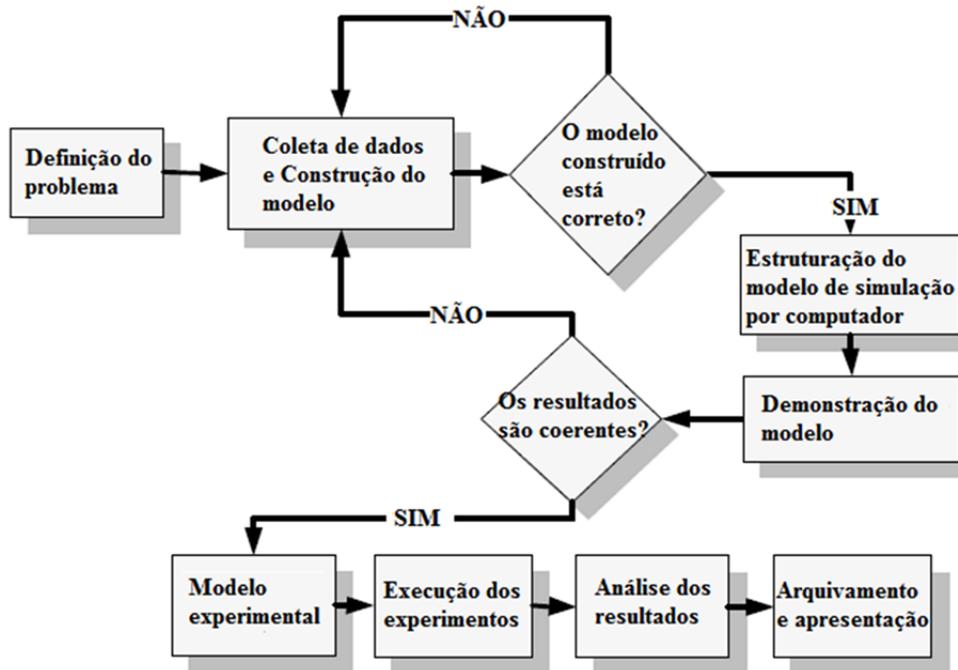


Figura 05 – Passos para um estudo de simulação  
 Fonte: LAW e KELTON, 1999

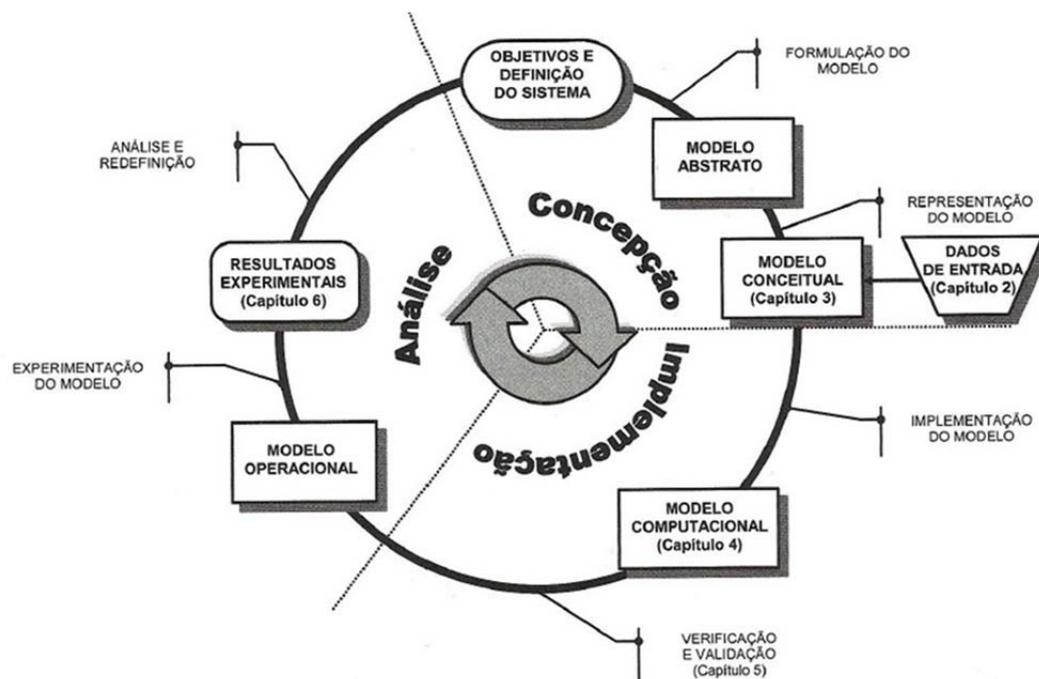


Figura 06 – Metodologia de simulação  
 Fonte: CHWIF e MEDINA, 2010

### 3.3.1 Concepção ou formulação do modelo

O estudo começa com a definição do problema e, a partir disso, se inicia a formulação do modelo. Nesta primeira fase, os dados para a construção do modelo foram originários de arquivos em planilhas eletrônicas, fotos, gravações de áudio

e vídeo, fono-conferências e do próprio *site* da empresa mineradora, juntamente com uma visita técnica, na qual se pode realizar um mapeamento de processos nas minas da empresa, localizadas no Estado do Pará.

Conforme Chwif e Medina (2010), os **modelos de entrada** são modelos probabilísticos responsáveis por representar a natureza aleatória de um dado fenômeno, enquanto **modelagem de dados** é o processo de escolher a melhor representação deste fenômeno. O último pode ser resumido em três etapas: coleta de dados, tratamento dos dados e inferência.

Na primeira etapa, obtém-se a amostra que é um conjunto de valores retirados da população de interesse, para representá-la no estudo estatístico. O objetivo é que a amostra obtida seja a mais representativa possível do fenômeno. Assim, seu tamanho deve estar entre 100 e 200 observações (CHWIF e MEDINA, 2010). Amostras acima ou abaixo desse intervalo podem comprometer o modelo.

Na segunda etapa, são usadas técnicas para descrever os dados levantados, identificar *outliers* (valores não usuais que distorcem as estimativas do problema) e analisar correlações. Finalmente, na terceira etapa, conhecimentos de cálculo de probabilidades são aplicados para se inferir o comportamento da população, a partir da amostra. O resultado é a distribuição de probabilidades que representará o fenômeno aleatório em estudo e será incorporado no modelo de simulação.

A escolha dos dados é de extrema importância para as etapas de verificação e validação dos dados (ver Subitem 3.3.2). Os mesmos possuem três finalidades: construção do modelo conceitual, validação de dados e experimentação. Dados históricos podem ser usados para fazer a calibração do modelo, não sendo recomendado o uso do mesmo conjunto de dados para construção e teste.

Ao final da etapa de concepção, deve-se ter um modelo conceitual, sendo representado por uma série de relações matemáticas e lógicas dos componentes e das capacidades do sistema (MEIRELES, 2010).

### **3.3.2 Implementação do modelo**

Nessa segunda fase, ocorre a codificação do modelo conceitual em modelo computacional, por meio de alguma linguagem de simulação ou de um simulador comercial (CHWIF e MEDINA, 2010). No presente trabalho, o simulador utilizado para realização dos experimentos foi o *software* ProModel 8.5.

Após a implementação, os dois modelos devem ser comparados para avaliar se a sua operação atende ao que foi estabelecido na etapa de concepção. Logo, os processos de verificação e validação devem acompanhar todo o ciclo de vida do projeto. Especificamente, a **verificação** indica se o modelo computacional está sendo executado corretamente, respondendo a seguinte pergunta: “Será que estamos desenvolvendo corretamente o modelo?” (CHWIF e MEDINA, 2010).

De maneira simplificada, pode-se dizer que verificar o modelo significa retirar os *bugs*, ou seja, retirar os elementos que causam o mau funcionamento. Para tanto, torna-se necessário a utilização de um *debugger* ou depurador, além da implementação do modelo em partes, chamado de implementação modular ou verificação modular (MEIRELES, 2010; CHWIF e MEDINA, 2010).

Enquanto o termo **validação** determina se o modelo conceitual é a representação precisa do sistema real, ou seja, se o modelo se comporta como o mundo real, sob as mesmas condições. Se isso for verdade, o modelo é válido, caso contrário, não é válido. Neste caso, a pergunta a ser respondida é: “Será que estamos desenvolvendo o modelo correto?” (CHWIF e MEDINA, 2010).

A maneira ideal para se validar um modelo é utilizar métodos estatísticos para se comparar o modelo simulado com o sistema real, através de dados históricos. Outro método é a análise de sensibilidade que determina a influência de alterações dos parâmetros de entrada nos resultados obtidos a partir do modelo (MEIRELES, 2010; CHWIF e MEDINA, 2010).

Deste modo, será utilizado para validação, através da análise de dados de saída, o teste de T de Student para duas amostras, que assume normalidade (como todo teste de T), variâncias iguais e permite tamanhos de amostras distintos. Para Devore (2012), quando se deseja somente validar a adequação da média aos dados reais, pode-se utilizar um simples teste T de Student de uma amostra:

$$T = \frac{x - \mu}{S/\sqrt{n}}$$

Sendo T a estatística desejada,  $x$  as observações,  $\mu$  a média populacional,  $S$  o desvio padrão e  $n$  o tamanho da amostra dos dados reais. Os limites inferiores e superiores  $\pm t_{\alpha/2, n-1}$ , com  $\alpha/2$  representando o nível de significância e  $n - 1$  os graus de liberdade da amostra, são definidos para inferir se a média populacional  $\mu$  (do modelo) está incluída no intervalo de confiança da média populacional real.

### 3.3.3 Análise dos resultados do modelo

Na última fase do desenvolvimento de um sistema de simulação, o modelo computacional já está pronto e podem ser feitos os experimentos, originando o modelo experimental ou modelo operacional (CHWIF e MEDINA, 2010).

A execução do modelo e sua posterior análise são usadas para calcular as medidas de desempenho (escolhidas a partir da definição dos objetivos da simulação) do sistema para os cenários que estão sendo simulados. Ceciliano (2007) completa que os experimentos são “rodados” várias vezes com diferentes cenários, por meio dos quais se podem fazer análises, a fim de avaliar o efeito de possíveis alterações, antes que elas ocorram de fato.

Chwif e Medina (2010) indicam que para análise dos modelos, dois tipos de simulação são considerados: terminal e não terminal. A simulação terminal é aquela que tem um momento exato no tempo para finalizar a simulação; enquanto a simulação não terminal é aquela que não tem um instante exato para o término. O presente trabalho trata de um sistema não terminal, assim, segundo Meireles (2010), devem ser considerados o tamanho da rodada da simulação, o número de rodadas e o modo de inicialização da simulação (*warm-up*).

De acordo com Montgomery e Runger (2009), o número de replicações é obtido a partir da equação de número de amostras a seguir:

$$n' = \left( \frac{Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{e} \right)^2$$

Onde  $Z_{\alpha/2}$  é valor da distribuição normal padronizada para um nível de confiança  $100(1-\alpha)\%$ ,  $\sigma$  é o desvio-padrão das observações e  $e$  é o erro máximo da estimativa, dado um número de amostras inicial.

Baseado na análise das execuções concluídas, o analista de simulação determina se serão necessárias execuções adicionais ou se é necessário adicionar novos cenários a serem simulados (MEIRELES, 2010).

O *warm-up* é o tempo necessário para o modelo entrar em estado estacionário. De acordo com Taylor (2010), quando um modelo alcança seu estado estacionário, pode-se dizer que ele está relativamente livre das influências das suas condições iniciais. O autor indica alguns métodos para definir o

comprimento do período de *warm-up*, porém, neste trabalho, será utilizado o método de Welch. As etapas e equações do método de Welch, segundo Taylor (2010), para uma janela de tempo de tamanho  $w$  são apresentadas em seguida:

- Um número de replicações  $n \geq 5$  é realizado, sendo cada uma com tamanho  $m$ , de modo que  $m$  é muito maior que uma previsão para o tamanho período de transição;
- É feita a média das informações para todas as replicações em cada período de tempo para criar o processo médio  $\bar{Y}$ ;
- As médias móveis  $\bar{Y}(w)$  são plotadas para diversos valores de  $w$  (janela ou ordem da média móvel). O valor inicial para  $w$  é 1, sendo incrementado um a um, com  $w \leq m/4$ . O menor valor para  $w$ , no qual as plotagens sejam razoavelmente regulares, é escolhido. A equação para o cálculo das médias móveis é:

$$\bar{Y}_i(w) = \begin{cases} \frac{1}{2w+1} \sum_{s=-w}^w \bar{Y}_{i+s} & \text{se } i = w+1, \dots, m-w \\ \frac{1}{2i-1} \sum_{s=-(i-1)}^{i-1} \bar{Y}_{i+s} & \text{se } i = 1, \dots, w \end{cases}$$

- Se nenhum valor para  $w$  for satisfatório, aumenta-se o nº de replicações;
- O ponto de transição é selecionado visualmente a partir da plotagem das medias móveis.

No final das análises, os resultados são documentados, gerando conclusões e recomendações.

### 3.4 Problema de Coletas e Entregas

No presente estudo, o problema de otimização combinatória envolvendo rotas é o chamado Problema de Coleta e Entregas (*Pickup and Delivery Problem – PDP*), que é um caso especial do Problema Geral de Coletas e Entregas (*General Pickup and Delivery Problem – GPDP*) (SAVELSBERGH e SOL, 1995; ANDRADE; BATISTA; TOSO, 2004).

No *PDP*, cada veículo pertencente à frota possui certa capacidade de carga, um ponto inicial e um ponto final, sendo estes iguais (depósito central) a todos os

veículos. Nele, se constroem rotas ótimas que atendem todos os pedidos de transporte, satisfazendo restrições de paridade, precedência e capacidade. A partir do *PDP* serão descritas suas variantes: estática e dinâmica.

- **Variantes do Problema de Coletas e Entregas**

As variantes do *PDP* são divididas em problemas estáticos e dinâmicos, com ou sem janelas de tempo, porém suas modelagens diferenciadas não serão alvo do presente trabalho. Tais características demonstram a maneira pela qual os pedidos de transporte tornam-se disponíveis (SAVELSBERGH e SOL, 1995).

Em uma situação **estática**, todos os pedidos são conhecidos no momento de construção das rotas. Assim, um caminhão é alocado a uma única rota, se descolando entre dois pontos fixos, um de carga e outro de basculamento. Essa alocação simplifica operações e não tem custos altos com implantação de sistema de despacho computadorizado de caminhões (COSTA, 2005; ARAÚJO, 2008). Para Araújo (2008), “o ritmo de lavra de uma frente dependerá da capacidade de produção dos caminhões e do equipamento de carga alocado à frente”.

Em uma situação **dinâmica**, alguns pedidos são conhecidos no momento da construção das rotas e outros pedidos tornam-se disponíveis em tempo real, durante a execução destas. Logo, quando um pedido de novo transporte torna-se disponível, deve-se alterar pelo menos um percurso, para servir a nova solicitação.

A capacidade de produção de cada frente de lavra é determinada pelos equipamentos de carga nela alocada e pelos caminhões que realizam o transporte do material até o ponto de basculamento (COSTA, 2005). Deste modo, os caminhões podem ser direcionados a diferentes frentes de lavra compatíveis e diferentes pontos de basculamento, aumentando a produtividade da frota e prevenindo a formação de filas. Neste caso, é importante a existência de um sistema de despacho de caminhões computadorizado.

Costa (2005) aponta que: “Este aumento de produtividade da frota pode refletir um aumento na capacidade de produção da mina ou a redução do número de equipamentos necessários para manter o mesmo nível de produção”.

Ressalta-se que os Problemas de Coletas e Entregas são muito importantes do ponto de vista prático e teórico, porém têm recebido pouca atenção se relacionados com Problemas de Roteamento de Veículos, por exemplo. Logo, espera-se que este trabalho também inspire futuras investigações na área.

### 3.5 Soluções

A busca por soluções em problemas de otimização nem sempre é simples. Para Andrade; Batista; Toso (2004) e Campello e Maculan (1994), alguns problemas não podem ser resolvidos por um computador em tempo hábil, enquanto outros podem requerer mais memória que aquela disponível em um computador, além de existirem aqueles que não possuem solução exata conhecida.

Conforme Cormen *et al.* (2001), os algoritmos podem ser classificados, em relação à complexidade, como **P** (*Deterministic Polynomial Time*) e **NP** (*Non-deterministic Polynomial Time*). O caráter exponencial de complexidade NP está presente em problemas considerados intratáveis, possuindo linguagens e métodos peculiares para sua distinção, diante de problemas polinomiais.

O método de resolução de problemas está diretamente ligado à viabilidade da busca pela solução ótima. Essa viabilidade está relacionada ao número de entradas para o problema, no qual, dependendo de sua característica, se escolhe o melhor entre os métodos de resolução, classificados como exatos, heurísticos e metaheurísticos (ANDRADE; BATISTA; TOSO, 2004; CORMEN *et al.*, 2001).

#### 3.5.1 Métodos Exatos

A modelagem exata visa encontrar a melhor solução para o problema, ou seja, a solução ótima. Para Andrade; Batista; Toso (2004), esse método de busca deve satisfazer de forma ótima a função objetivo correspondente ao problema em questão, respeitando todos os parâmetros que se aplicam à resolução do mesmo.

Os algoritmos podem ser classificados como exatos ou aproximados. Alguns tipos de algoritmos exatos conhecidos são as técnicas do *branch-and-bound* e *branch-and-cut* que garantem encontrar uma solução ótima para qualquer instância de um problema de otimização (BECCENERI, 2012; PARRAGH; DOERNER; HARTL, 2008). Infelizmente, os problemas considerados como NP-Difícil implicam em métodos exatos que levam um tempo de computação muito grande para determinados tamanhos de entrada. Segundo Andrade; Batista; Toso (2004), os problemas polinomiais (classe P) são, em sua maioria, viáveis para aplicação de métodos exatos para resolução.

Neste sentido, deve-se atentar para a escolha da forma exata de resolução dos problemas, ou seja, qual a viabilidade do método escolhido. Além disso, nem sempre um método exato é a melhor forma de resolução de um problema. Assim, Becceneri (2012) indica que “nas últimas três décadas, muita atenção tem sido dada a métodos aproximados”.

### **3.5.2 Métodos Heurísticos**

Para Campello e Maculan (1994) os “algoritmos heurísticos são também muito utilizados para a obtenção de boas soluções viáveis iniciais para diversos algoritmos exatos”. Os métodos heurísticos possuem origens distintas e compõem uma gama relativamente nova de soluções para determinados problemas de otimização combinatória.

Andrade; Batista; Toso (2004) apontam que o método heurístico, sob a forma de um algoritmo, aplicado a um problema específico pode ser chamado simplesmente de heurística. Essa heurística conduz o problema a uma boa solução, porém não garante que esta seja a solução ótima. Logo, Campello e Maculan (1994) ressaltam que “uma solução aproximada, desde que viável e com valor suficientemente próximo da solução considerada exata, pode ser tão significativa quanto à própria solução ótima”. Tal fato justifica o uso de algoritmos heurísticos combinados com outras técnicas de otimização, como os métodos exatos e os métodos metaheurísticos.

Uma das técnicas de algoritmos mais utilizadas é a heurística gulosa ou míope (*Greedy Heuristic*) que busca uma boa solução, considerando a cada iteração a melhor decisão um passo a frente, sendo seu critério de otimização simplesmente local (CAMPELLO e MACULAN, 1994). Embora as heurísticas tenham algumas limitações, citadas acima, convergem em tempo rápido se comparadas com outros métodos. Além disso, apresentam custos mais acessíveis que os requeridos pela aquisição de um aplicativo de otimização para resolver os modelos de programação matemática (COSTA, 2005).

O autor ainda cita que, com “o desenvolvimento e o aumento da velocidade de processamento dos computadores, os métodos heurísticos vêm conquistando cada vez mais espaço na resolução de problemas de planejamento de produção em mineração”. Tais fatos explicam sua grande disseminação nos últimos anos.

### 3.5.3 Métodos Metaheurísticos

Outro método conhecido na literatura técnico-científica é a metaheurística. Tendo a palavra “heurística” origem grega, significando “descoberta” e o termo “meta” significando “após”, entende-se que tal palavra indica um nível superior de descoberta (BECCENERI, 2012).

Existem muitas definições para o método, porém as metaheurísticas, ao contrário das heurísticas, têm caráter geral e são providas de mecanismos para tentar escapar de ótimos locais, ainda distantes de um ótimo global (ARAÚJO, 2008; CHAVES, 2009; BECCENERI, 2012). São algoritmos aproximados, que utilizam mecanismos para evitar ficarem presos em mínimos ou máximos locais.

A aplicação de uma metaheurística apresenta desafios como a necessidade de se encontrar o equilíbrio ideal entre *diversificação* e *intensificação* (BECCENERI, 2012). Quando se cria novas soluções, a partir de soluções existentes, têm-se grande impacto na velocidade de convergência dos resultados.

Diversificação significa encontrar novas regiões do espaço de busca que ainda não tenham sido investigadas, enquanto, intensificação significa tentar melhorar a solução corrente realizando pequenas mudanças que conduzem a novas soluções próximas à solução corrente em uma região (CHAVES, 2009).

Deste modo, o algoritmo de otimização deve operar com características explorativas e operadores que pesquisem com maior detalhamento a região de uma determinada solução. Logo, é comum combinar uma metaheurística com outro método de otimização, seja exato, heurística ou outra metaheurística.

Alguns algoritmos classificados como metaheurísticas são: Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm – GA*), GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), Recozimento Simulado (*Simulated Annealing – SA*), Busca Tabu (*Tabu Search – TS*), Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization – ACO*), Busca Local Iterativa (*Iterated Local Search – ILS*), VNS (*Variable Neighborhood Search*), VND (*Variable Neighborhood Descent*) etc. (PARRAGH; DOERNER; HARTL, 2008; CHAVES, 2009; BECCENERI, 2012).

Este trabalho utiliza um *software* de otimização baseado na metaheurística Algoritmos Genéticos (AG), por este realizar uma busca estocástica e buscar soluções otimizadas para problemas complexos, não sendo objetivo do trabalho, realizar qualquer comparação entre as metaheurísticas citadas e não utilizadas.

## • ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AG) são métodos de busca estocástica inspirados na natureza, especificamente na teoria da evolução natural e da genética. Essa metaheurística executa um processo de busca, modificando a população inicial (soluções iniciais) e tentando encontrar uma solução melhor, alterando-se elementos dessa população (SANTOS, 2007; BECCENERI, 2012).

Para Nanda e Pendharkar (2001) o AG é “uma técnica de busca paralela que começa com um conjunto de soluções possíveis e, através de operações especiais (avaliação, seleção, *crossover* e mutação), evoluem progressivamente em direção a soluções mais promissoras”.

Desta forma, Santos (2007) aponta que a estrutura de um AG pode ser descrita da seguinte maneira: durante a iteração  $t$ , uma população  $P(t) = \{y_1^t, \dots, y_n^t\}$ , contendo as soluções potenciais e representadas por cromossomos, vetores ou listas, é mantida. Em seguida, cada solução passa por um processo de **avaliação**, obtendo-se uma medida de adaptação ou *fitness* para cada uma. Então, uma nova população (iteração  $t+1$ ) é produzida através de uma **seleção** que privilegia os indivíduos mais adaptados. Nessa nova população, alguns indivíduos sofrem alterações, por meio de recombinação ou *crossover* e **mutação**, para formar novas soluções potenciais. Assim, esse processo se repete até que um número predefinido de iterações seja atingido ou até que o nível de adaptação esperado seja obtido, ou seja, até que o conjunto de soluções não possa mais ser melhorado.

Basicamente, o AG mantém um equilíbrio notável entre diversificação e intensificação, pois é adequado para analisar um amplo espaço de soluções (através das amostras presentes na população inicial, gerada aleatoriamente), concentrando-se após nas áreas que mostram aproveitamento de melhores soluções (RAFAELY e BENNELL, 2006).

### 3.6

#### Método de Simulação-Otimização

O termo Simulação-Otimização (SO) une as ferramentas de simulação e otimização, objetivando diminuir algumas limitações que ambas possuem se utilizadas de maneira isolada. Assim, o desempenho do sistema baseia-se nas saídas (resultados) do modelo de simulação, que serão as entradas (respostas) a serem otimizadas (DÍAS e PÉREZ, 2000).

As técnicas de otimização em simulação partem de um modelo existente e validado. Não foi encontrada ainda uma metodologia simples ou padrão para otimizar esse tipo de sistema, contudo, para Días e Pérez (2000), a maioria dos métodos foca em processo de busca que envolve múltiplas rodadas de simulação. A Tabela 01 apresenta alguns *softwares* de otimização com os pacotes de simulação aos quais estão incluídos e as técnicas de otimização utilizadas.

Tabela 01 – Software de Otimização

| <b>Software de Otimização</b> | <b>Pacote de Simulação</b> | <b>Técnica de Otimização</b>                 |
|-------------------------------|----------------------------|--|
| AutoStat                      | AutoMod                    | Algoritmos Evolutivos e Algoritmos Genéticos |
| OptQuest                      | Arena, Crystal Ball etc.   | Busca Tabu e Redes Neurais                   |
| OPTIMIZ                       | SIMUL8                     | Redes Neurais                                |
| SimRunner                     | ProModel                   | Algoritmos Evolutivos e Algoritmos Genéticos |
| Optimizer                     | WITNESS                    | Simulated Anneling e Busca Tabu              |

Fonte: FU (2002 *apud* TORGA, 2007)

Especificamente para o SimRunner<sup>®</sup>, Harrel; Ghosh; Bowden (2000) propuseram uma metodologia em que, após a construção e validação do modelo, são necessários alguns passos para uma otimização bem sucedida, sendo eles:

**a)** Definir as variáveis que afetarão as respostas do modelo e que serão testadas pelo algoritmo de otimização. Estas variáveis são as que terão o valor alterado a cada rodada de simulação;

**b)** Definir o tipo de variável (real ou inteira) e limites inferior e superior. O número de variáveis de decisão e a gama de valores possíveis afetam o tamanho do espaço de busca, influenciando na dificuldade e tempo consumido para achar a solução ótima. Por isso, somente as variáveis significativas do modelo são usadas;

**c)** Definir a função objetivo para avaliar as soluções testadas pelo algoritmo. Sua construção pode ser baseada em locais, entidades, recursos, dentre outros, buscando minimizar, maximizar ou fazer uso de ambos em diferentes variáveis, dando inclusive pesos diferentes para compor a função objetivo;

**d)** Selecionar o tamanho da população do Algoritmo Evolutivo. O tamanho afeta a confiabilidade e o tempo requerido para a condução da busca, assim, é necessário que haja um equilíbrio entre esse tempo e o resultado esperado da otimização. Nesta fase também se definem outros parâmetros como: precisão requerida, nível de significância e número de replicações;

**e)** Concluída a busca, se devem estudar as soluções encontradas, pois, além

da solução ótima, o algoritmo encontra várias outras soluções competitivas. Uma boa prática é comparar todas as soluções tendo como base a função objetivo.

Embora exista essa metodologia para a execução da otimização em simulação, alguns fatores afetam diretamente a execução da busca, como: precisão do modelo, número de variáveis, complexidade da função objetivo, valores iniciais das variáveis e seus limites (TORGA, 2007).

O método SO funciona da seguinte maneira: tendo-se uma condição inicial  $X_0$ , o procedimento de otimização atuará interativamente com o modelo de simulação, fornecendo os valores das variáveis a serem simuladas e recebendo do modelo de simulação o valor da função objetivo. A essência do sistema deve ser extraída e os detalhes desnecessários excluídos. Os dados sobre as variáveis relevantes são utilizados para refinar ainda mais a definição das relações variáveis e, por conseguinte, a construção do modelo de simulação. O procedimento de otimização terminará quando algum critério for satisfeito, por exemplo, atingiu-se o número máximo de iterações ou não se tem mais potencial significativo de otimização das variáveis. O resultado final desse procedimento são os valores “ótimos” ou subótimos das variáveis de interesse do modelo de simulação (DÍAS e PÉREZ, 2000; CHWIF e MEDINA, 2010). A Figura 07 ilustra a ideia da SO.

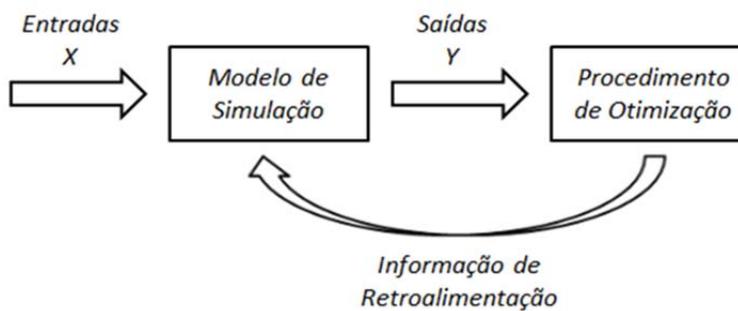


Figura 07 – Representação da ideia-base da Simulação-Otimização  
Fonte: CHWIF e MEDINA, 2010

De acordo com Protil (2001 *apud* TORGA, 2007), é possível se fazer uma comparação entre modelagem, simulação e otimização, onde a modelagem é a busca das inter-relações existentes entre os dados de entrada (*inputs*) e os dados de saída (*outputs*) de um determinado sistema, ou seja, é uma representação de seu comportamento; a simulação manipula as entradas de um modelo e verifica suas diferentes saídas; enquanto a otimização busca obter um *output* ótimo, previamente definido, alterando a composição dos *inputs*.

## 4

### **Operações da cadeia produtiva do minério de ferro na empresa**

Conforme Pardini e Matuck (2012), para garantir a competitividade da organização, alguns requisitos básicos devem ser alcançados, como a necessidade de elevar os índices de produtividade, reduzir custos e melhorar o atendimento aos clientes internos e externos. Assim, as empresas buscam aperfeiçoar suas práticas para acompanhar as mudanças decorrentes de diferentes demandas de mercado.

Neste sentido, muitas organizações aplicam ferramentas, como mapeamento e otimização de processos da cadeia de suprimentos, para melhorarem seus desempenhos e se tornarem mais competitivas. A seguir, será descrita a cadeia do minério de ferro da empresa em estudo, no qual as seções pesquisadas culminarão com a descrição do planejamento operacional de lavra, de curto prazo, onde metas de produção deverão ser atingidas, oferecendo a qualidade requerida para o minério produzido e fazendo o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

A descrição foi baseada em uma visita técnica feita às instalações da empresa mineradora, no Estado do Pará, onde foi realizado um mapeamento das atividades realizadas na produção de minério de ferro e obtidas as informações que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, dados extras foram obtidos através de fono-conferências e do próprio *site* da empresa mineradora.

#### **4.1**

##### **Cadeia produtiva do minério de ferro da empresa**

A empresa mineradora em estudo concentra a exploração de minério de ferro e suas operações relacionadas em duas regiões do Brasil, o Sistema Norte e o Sistema Sul. De acordo com Sampaio; Julianelli; Penna (2002), o Sistema Norte, de atuação da empresa, apresenta maior quantidade de reserva de minério de ferro, se comparado ao Sistema Sul (cerca de seis bilhões contra um bilhão). Este trabalho se concentrará no Sistema Norte, cujas atividades de extração de minério de ferro se realizam na faixa norte, que se divide em três principais áreas de extração mineral – Mina A, Mina B e Mina C, localizadas no Estado do Pará.

A primeira área de minério de ferro a ser lavrada foi a Mina A, devido à

facilidade de acesso ferroviário, à baixa espessura do capeamento e ao baixo teor de contaminantes. Essa ausência de contaminantes, juntamente com alto teor de ferro do minério (superior a 60%), proporciona redução dos custos de produção (SAMPAIO; JULIANELLI; PENNA, 2002; MME, 2009).

A produção da empresa segue a demanda de mercado, junto com o teor de concentração de ferro pedido anualmente. Para atingir suas metas, trabalha 24 horas por dia, assim, a produção é contínua e precisa ser monitorada. Este fato ocorre em uma Sala de Controle (SC), onde as operações são monitoradas via rádio entre funcionários da SC e os que estão nas minas, operando equipamentos e máquinas. A área operacional trabalha com quatro turmas, divididas em três turnos, nos horários de 06:00 às 15:00; de 15:00 às 24:00; e de 24:00 às 06:00.

Toda a produção de minério de ferro, desenvolvida pela empresa, se divide principalmente em três sistemas que integram minas a céu aberto, ferrovias, terminais marítimos/instalações portuárias.

O ciclo, descrito a seguir, envolve a extração na mina, beneficiamento, transporte, estocagem e distribuição, realizada principalmente por modal aquaviário. Segundo a revista Especial Logística (2011), toda a cadeia produtiva é integrada: “com o ciclo da ferrovia, o minério extraído da mina chega ao navio em cerca de 10 dias e, em 45 dias, está na China”.

A descrição do funcionamento da cadeia produtiva de minério de ferro da empresa estudada será efetuada de acordo com os dados obtidos em visita técnica e no *site* institucional da empresa, apresentado no APÊNDICE A. Neste trabalho, serão considerados os processos que ocorrem nas três minas da empresa mineradora. As ações ocorridas não são exclusivas, logo, a seguinte descrição serve para as três minas consideradas no estudo.

As minas em estudo, localizadas no Estado do Pará, são a céu aberto e possuem produção anual de 110 milhões de toneladas de minério de ferro. O processo se inicia com a extração do minério retirado do solo, no Estado do Pará, e termina na sua chegada ao porto de São Luís (MA), onde é embarcado em um navio que vai levá-lo, para alimentar os alto-fornos de siderúrgicas de 30 países.

Na região de exploração das minas, no Estado do Pará, a mineradora divide sua cadeia em macro atividades, sendo elas: Minas (Mina A, Mina B e Mina C), Usina (beneficiamento) e Expedição (início da logística ferroviária). As duas primeiras são controladas na própria região, no entanto, a partir do momento em

que o vagão do trem é carregado com minério e parte em direção ao porto (MA), mesmo ainda estando no Estado do Pará, toda a responsabilidade/gerência operacional passa a ser feita por outra diretoria, situada no Estado do Maranhão. Assim, a cadeia produtiva do minério de ferro se resume conforme a Figura 08.

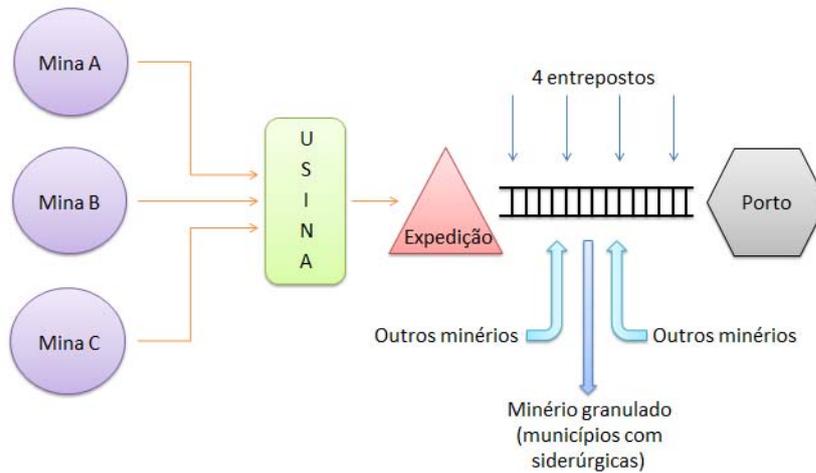


Figura 08 – Macro atividades da cadeia produtiva do minério de ferro  
Fonte: AUTORA, 2012

Para a operação das minas, estão disponíveis caminhões fora de estrada, escavadeiras e carregadeiras. Existem também equipamentos auxiliares, que ajudam a manter a mina em condições operacionais, ou seja, viabilizam a utilização dos equipamentos de lavra (produção), ajudam na planificação de estradas, na limpeza, na abertura da cava ou na drenagem, dentre outros. Dessa lavragem, extraem-se minério de ferro e estéril. Apesar de o estéril ser retirado, basicamente, para permitir a lavra do mineral útil, o minério de ferro, na empresa em estudo parte desse material tem valor econômico. A outra parte é estocada para possíveis utilizações futuras no mercado.

Após vários estudos e mapeamentos, obtêm-se os dados de produtividade de determinada mina, ou seja, qual o seu ciclo de vida, quais os minérios encontrados na região, qual o teor desses minérios etc. Anualmente, o mercado exige um determinado teor de ferro no minério e mensalmente é determinada uma quantidade de minério a ser extraído para atender a esse mercado.

Nesta primeira etapa da cadeia produtiva (**Mina**), escavadeiras e pás carregadeiras retiram o minério de ferro de bancadas de 15 metros de altura e carregam caminhões fora de estrada (Figura 09). Ao todo, 800 mil toneladas de material são movimentados ao dia, dos quais cerca de 57% possuem teor de ferro para utilização industrial e o resto é estéril que é devolvido ao solo.



Figura 09 – Extração e carregamento de caminhão fora de estrada  
Fonte: PANORAMIO (2012)

Com o carregamento dos caminhões fora de estrada, o minério de ferro é movimentado da mina (extração efetiva) até equipamentos, chamados britadores (B1, BSM1, BSM2, BSM3 e BSM4), onde sofrerá o beneficiamento inicial. No caso em estudo, caminhões fora de estrada, com capacidade para transportar até 400 toneladas, transportam o minério para a britagem (Figura 10), sendo este o primeiro passo do processo de beneficiamento.



Figura 10 – Transporte de minério por caminhão fora de estrada  
Fonte: Autora, 2012

A Etapa Mina termina após o basculamento dos caminhões fora de estrada nos britadores, originando a britagem inicial, que caracteriza o início da segunda macro atividade da cadeia produtiva do minério de ferro, chamada **Etapa Usina**.

Nessa etapa, após a britagem inicial, o minério de ferro passa a ser

movimentado em esteiras, conhecidas como correias transportadoras, visualizadas na Figura 11, que conduzem todo o minério até a Usina, onde ocorre todo o processo de beneficiamento do minério, sendo composta por uma malha de 85 km de correias transportadoras.



Figura 11 – Correias transportadoras saindo do britador semimóvel, em direção à Usina  
Fonte: Autora, 2012

Ao chegar à Usina, o minério de ferro sofre nova britagem que tem como objetivo homogeneizar os diferentes tamanhos de grãos (granulação), considerando a sua transformação em três produtos diferentes: granulado, *sinter feed* e *pellet feed*, cujas características encontram-se descritas na Seção 2.3. Esse processo pode ser repetido até três vezes para atingir os tamanhos pré-estabelecidos. No total, são 17 linhas de peneiramento de onde saem 19 mil toneladas de minério de ferro por hora. Além disso, existem peneiras auxiliares que fazem o repeneiramento do material, sendo localizadas ao longo das minas, fora da área de Usina. A Figura 12 apresenta as fases do beneficiamento do minério, que passam pela britagem, peneiramento, classificação, filtragem e terminam com a pelletização. Conforme Ceciliano (2007),

Devido ao baixo valor unitário da tonelada de minério de ferro, as operações de beneficiamento de 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.

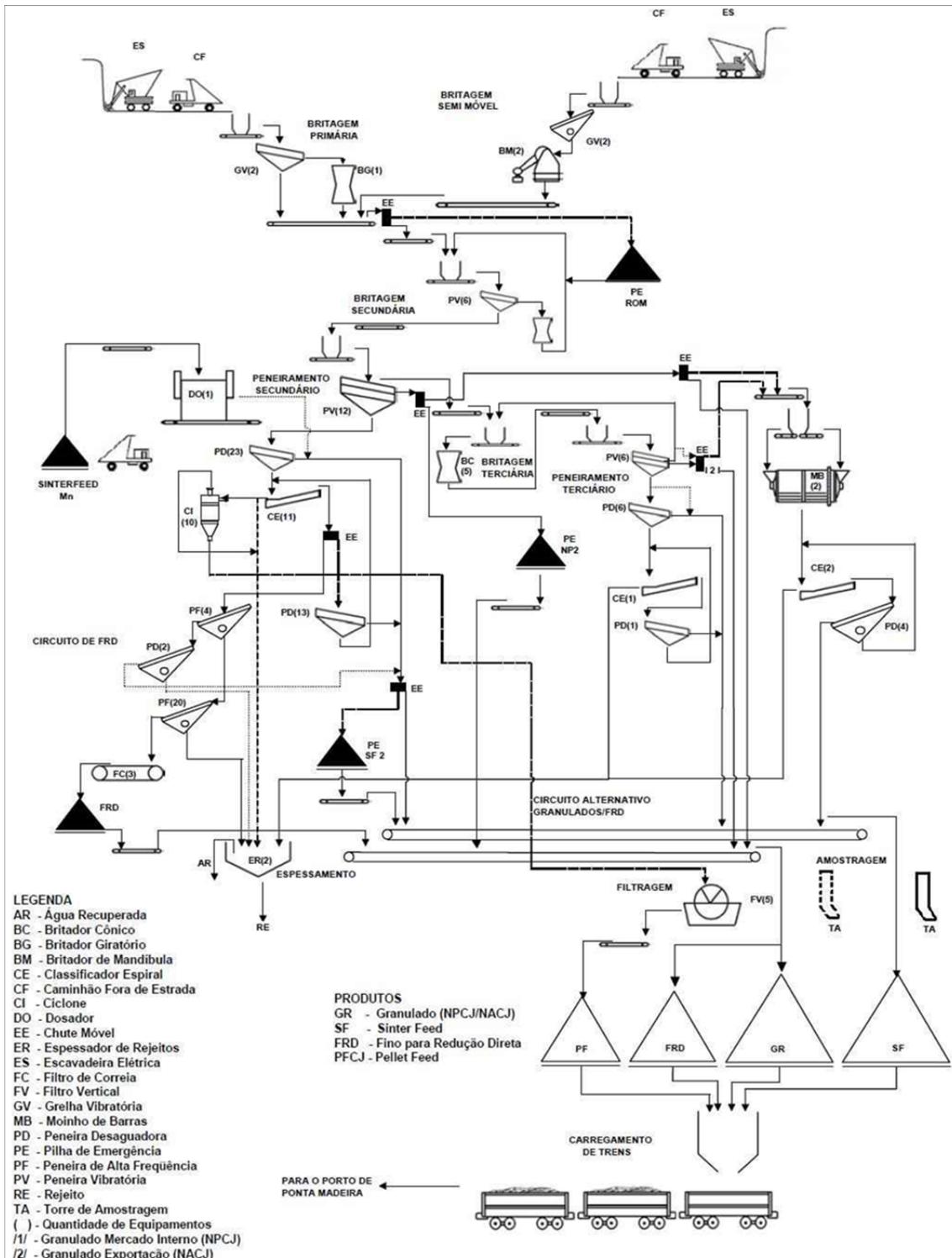


Figura 12 – Fluxograma de beneficiamento do minério de ferro da empresa  
Fonte: SAMPAIO; JULIANELLI; PENNA, 2002

Apesar de este processo ser simples, se comparado a outros utilizados por outros minérios, é essencial que todas as etapas de processamento sejam precisamente dimensionadas e controladas, para minimizar custos e assegurar a qualidade dos produtos.

Depois de peneirado, o minério de ferro é levado para o pátio de estocagem em esteiras e empilhado por quatro empilhadeiras e uma recuperadora que, além de empilhar, recupera o material. Ao todo existem cinco pátios, cada um com um quilômetro de extensão e 60 metros de largura, e capacidade para estocar três milhões de toneladas de minério de ferro, como apresentado na Figura 13. A quantidade de minério que chega por hora é de 11 mil toneladas. O processo de beneficiamento (Usina) termina aqui.



Figura 13 – Pátio de estocagem de minério de ferro  
Fonte: Autora, 2012

Na Usina e no pátio acontece o processo de *blend*, que é a mistura de minérios com determinados teores de ferro, de forma a atender à exigência de mercado estabelecido para o período. Os equipamentos utilizados nessa etapa levarão o minério beneficiado até a **Etapa de Expedição**.

Na **Expedição**, três recuperadoras coletam o minério de ferro das pilhas, na área de estocagem, e o colocam em correias transportadoras, que os levam para três silos de carregamento, continuando o processo de *blend*, conforme Figura 14.

O maior dos silos tem capacidade de armazenagem de 1,6 mil toneladas de minério. Juntas as recuperadoras coletam 10 mil toneladas por hora de minério de ferro. O carregamento, para o transporte, se caracteriza pela passagem do minério de ferro, contido nos silos, por gravidade, para os vagões do trem. Assim, o trem passa por baixo dos silos, levando, em média, 2h30 pra ser carregado (Figura 15).



Figura 14 – Transporte do minério de ferro por correias transportadoras até os silos  
Fonte: Autora, 2012



Figura 15 – Carregamento de minério de ferro nos vagões de trem  
Fonte: Autora, 2012

Depois de carregado, o trem percorre 892 km até o porto em São Luís, no Maranhão. O percurso é constituído uma linha única com 57 pátios de cruzamento e quatro entrepostos, onde o trem carrega e descarrega minérios, devido a linha férrea cruzar regiões próximas a jazidas de outros minerais, bem como outros produtos. O trem é composto por uma locomotiva e 110 vagões. No total, para tal operação, em geral, juntam-se três lotes, assim o trem completo possui três locomotivas e 330 vagões, com 3,5 km de comprimento e capacidade total de 40 mil toneladas, como pode ser observado na Figura 16.

Quando chega ao seu destino (porto), o minério de ferro é descarregado por meio de quatro viradores, um equipamento que tomba os vagões a 180 graus e descarrega o minério em silos que, por sua vez, carregam as correias transportadoras responsáveis pelo seu transporte até o pátio de estocagem. Assim que o navio atraca, recuperadoras de caçamba coletam e depositam o minério de

ferro estocado no pátio em correias transportadoras, que o descarregam nos porões do navio. Após a descarga, o navio levará o minério de ferro para alimentar os alto-fornos de siderúrgicas de 30 países, sendo o principal comprador a China.



Figura 16 – Trem de carga com locomotiva e vagões interligados  
Fonte: Autora, 2012

## 4.2

### **Etapas do problema de planejamento operacional de lavra**

Conforme a Seção 3.1, o planejamento de curto prazo é normalmente realizado por profissionais de várias áreas. Esta equipe interage com o objetivo de atender ao cliente, sendo a mais exigida pelas equipes de longo e médio prazo, pois tem a necessidade de cumprir tudo aquilo que foi pré-estabelecido.

Equipes de médio e longo prazo fornecem dados relativos à quantidade e qualidade do minério disponível nas minas. Assim, pode-se falar em vida útil destas, bem como fazer o planejamento para atender ao mercado por um dado período. Todas essas informações permitem que a empresa em questão estabeleça, mensalmente, determinada quantidade de minério a ser extraído para atender a esse mercado, além de estocar material antes considerado estéril que, no futuro, poderá ser economicamente aproveitado como minério.

De modo geral, o projeto de uma cava demora de 10 a 15 anos de planejamento. Toda a região é mapeada e fica em constante monitoramento. Baseado nessas informações, a equipe de curto prazo da empresa analisada planeja como atender às necessidades mensalmente. Há diversos *softwares* elaborados para este fim, nos quais a equipe do planejamento determina os diversos setores envolvidos (Produção, Qualidade, Sistema de Despacho,

Manutenção etc.); quais as frentes a serem lavradas; além de quais e quantos equipamentos serão envolvidos na operação (alocação de máquinas e caminhões).

Diariamente, são feitas duas reuniões, onde se discutem as operações realizadas em determinados turnos, de forma a atingir as metas pré-estabelecidas, tanto em qualidade quanto em quantidade.

Após se definir tarefas, escolher as frentes de lavra, definir os equipamentos de carga e de transporte a serem utilizados, inicia-se todo o processo produtivo que começa na mina com a extração do material (minério e estéril), passando pelo(s) britador(es) e terminando nas pilhas de homogeneização.

Com a ajuda de *softwares*, que permitem a visualização do fluxo de movimentação das ferramentas através de câmeras e GPS, a Sala de Controle (SC) controla todas as operações, via rádio, e as comunicam para a equipe de produção nas minas (técnicos, operadores das máquinas, operadores dos caminhões), que estão controlando os equipamentos. Esses, por sua vez, fazem o minério chegar ao(s) britador(es) ou às pilhas de estoque, transmitindo suas posições, rotas e outros dados relevantes à SC, que acompanha a produção por meio de fluxogramas e mapas virtuais.

A região de exploração das minas, no Estado do Pará é formada pelas Minas A, B e C. O estéril retirado da mina pode servir para formação de pilha ou por ordem de sondagem, devido ao minério estar mais no fundo da cava ou por não conter minério algum. Por outro lado, o minério retirado pode ser empilhado ou basculado nos britadores semimóveis. O primeiro caso ocorre para não haver formação de filas no britador semimóvel ou devido ao fato deste estar completamente carregado com minério em processamento. Para evitar que o caminhão fora de estrada fique parado em uma fila, aumentando o seu índice de ociosidade, o minério é basculado em um local próximo aos britadores, chamado de pulmão, onde ficará aguardando sua futura remoção por carregadeiras e/ou caminhões fora de estrada e despejo para britagem. Deste modo, considera-se que a distância das frentes de lavra aos britadores ou seus pontos próximos de descarga é a mesma.

Neste trabalho, o problema abordado é o planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões, onde há dois pontos de descarga: um para minério (britador ou pulmão) e outro para estéril (depósito).

O processo de lavra é constituído por três processos: a extração de minério,

o transporte por caminhões fora de estrada e a britagem nos britadores. O material é retirado das frentes de lavra por escavadeiras ou carregadeiras que carregam os caminhões fora de estrada, disponíveis em duas capacidades de carga diferentes: 240 t e 400 t. Os caminhões de 400 t são utilizados somente na Mina B. Esses, por sua vez, transportam o minério até o britador ou até o pulmão, além de transportar o estéril até o depósito.

No processo de transporte do minério de ferro, os caminhões fora de estrada são enviados aos britadores correspondentes de acordo com a mina de origem. Na chegada do caminhão ao britador, verifica-se o tamanho da fila, de modo que, se já houver algum caminhão em espera, o minério será depositado em um pulmão. Após o basculamento, o caminhão segue caminho dependendo do que é determinado pela SC. Como a alocação é dinâmica, após o caminhão fora de estrada descarregar o material em um desses pontos, este é novamente direcionado a uma frente de lavra, não necessariamente a mesma da operação anterior.

Os caminhões fora de estrada possuem um sistema de medição que afere seu perfil de carga e sua distribuição. Depois dessa medição, o minério de ferro é basculado no interior do britador, sendo esse processo acompanhado pela área de despacho, na SC. No local, todas as rotas (origem / destino), velocidade, tipo de carga (minério ou estéril) e quantidade de carga são monitoradas.

Por outro lado se o material for estéril, ele será enviado a uma região, chamada de depósito, onde será descarregado e armazenado para uso futuro. Existem cinco depósitos de estéril em todo o complexo, cujos nomes são: Dep Oeste 1, Dep Oeste 2, Dep Sul, Dep Norte e Dep Mina C.

Em teoria, os fluxos de estéril para os depósitos são bem abrangentes, permitindo que o que foi extraído em uma mina possa ter várias possibilidades de descarregamento. Entretanto, na prática, verificou-se um padrão mais restrito para estes fluxos. Assim, os depósitos Dep Oeste 1, Dep Oeste 2 e Dep Sul recebem estéril da Mina A; o depósito Dep Oeste 2 atende a Mina B e a Mina C é atendida pela maioria dos depósitos, exceto o Dep Oeste 1 e o Dep Oeste 2.

A lógica de basculamento é a mesma apresentada anteriormente, entretanto nos depósitos não há restrição para o tamanho da fila.

Em relação à britagem, existem cinco britadores, um estacionário (B1) e quatro semimóveis (BSM1, BSM2, BSM3 e BSM4). O minério retirado da Mina A passa pelos britadores B1 e BSM2. O minério extraído pela Mina B é enviado

para os britadores BSM1 e BSM4. Por fim, o britador BSM3 atende à produção da Mina C, entretanto o B1, o BSM2 e o BSM4 podem auxiliar esse beneficiamento.

No processo de britagem, o minério transportado é descarregado em um britador específico, sendo que os britadores B1, BSM2, BSM3 e BSM4 possuem duas “bocas”, ou seja, há a possibilidade de basculamento de dois caminhões simultaneamente.

Outra particularidade deste processo está no uso de carregadeiras e caminhões para a retirada de minério dos pulmões. Em todos os britadores semimóveis, exceto no BSM1, que possui somente uma “boca”, carregadeiras são utilizadas na recuperação do minério dos pulmões e no carregamento de caminhões que em seguida farão o basculamento no britador. No BSM1, a descarga de minério é feita diretamente por uma carregadeira que recupera o material do pulmão. Desse modo, o equipamento funciona somente durante 12 horas, enquanto os demais equipamentos têm uso constante, definido intervalos entre turnos e intervalo de almoço.

Após ser britado, esse minério é transportado por correias transportadoras até a área da Usina, local em que sofrerá beneficiamento. O processo (Usina) não será alvo desse estudo, portanto serão consideradas operações até o momento de basculamento do minério no britador. A Figura 17 ilustra a etapa Mina, alvo de estudo deste trabalho. O APÊNDICE B apresenta o esquema mais detalhado dos processos que ocorrem na operação de lavra.



Figura 17 – Etapa Mina

Fonte: Autora (2013) baseado em dados da empresa

## 5

### Simulação-Otimização das operações de Mina

A partir dos dados obtidos, o arranjo físico das minas, dos britadores e dos depósitos, foi mapeado. Como esperado, notou-se a existência de mais de uma frente de lavra em cada mina e mais de uma região de basculamento nos depósitos, próximos aos britadores. Para o uso na simulação, somente aquelas frentes de lavra mais significativas foram representadas no modelo.

O arranjo físico dos três locais é apresentado no APÊNDICE C, onde cada ponto de referência foi identificado na legenda e as linhas representam possíveis caminhos que os caminhões fora de estrada podem percorrer.

O modelo de simulação foi construído com a utilização do *software* ProModel 8.5 (2011). Como a empresa mineradora em estudo utiliza o simulador para auxílio em suas atividades, a escolha deste facilita a integração de resultados, considerando que estes constituem uma etapa do Projeto de Pesquisa, citado na Seção 1.3. Além disso, o *software* está disponível com certa facilidade nas universidades que serviram de suporte à pesquisa.

O modelo proposto se caracteriza por ser dinâmico, estocástico e de eventos discretos. Conforme Seção 3.3, o objetivo da simulação, neste estudo, é auxiliar o balanceamento das taxas de utilização dos recursos logísticos utilizados em operações de extração e transporte de minério de ferro na etapa Mina da empresa em estudo, localizada no Estado do Pará. Assim, buscou-se comparar o resultado da simulação do cenário atual das operações de Mina com o resultado da simulação norteadas pelos resultados da otimização desse cenário, baseada na metaheurística Algoritmos Genéticos, do módulo de otimização SimRunner<sup>®</sup>, encontrado no pacote ProModel<sup>®</sup>. Nas próximas seções são descritas as etapas do modelo de simulação.

#### 5.1

##### Concepção do modelo

O estudo começa com a definição do problema, para se iniciar a formulação do modelo. A Seção 4.2 apresenta a descrição detalhada do problema de planejamento operacional de lavra. Além disso, a representação conceitual das

operações de Mina pode ser observada no Apêndice B, onde são apresentadas as lógicas dos componentes do sistema, através de um mapeamento das atividades.

Para a concepção do modelo, os dados foram tratados de forma que a amostra pudesse representar efetivamente o sistema produtivo atual. Como *input*, foram selecionados dados de carga (em toneladas), de tempo de carregamento, de tempo de manobra e de tempo de basculamento, todos (em minutos) referentes aos caminhões fora de estrada. As informações relevantes foram extraídas de uma planilha eletrônica, fornecida pela empresa objeto de estudo, constituída pelos registros eletrônicos dos caminhões, onde cada um é representado por uma linha e os dados coletados são representados por colunas. Os registros listavam informações desde 1<sup>o</sup> de janeiro até 31 de agosto de 2012, mostrando, para cada veículo, uma variedade de campos como a data, hora (da saída da mina), o código do caminhão, a origem, o destino, entre outros.

A partir da planilha, identificaram-se algumas limitações, como a insuficiência de dados sobre o britador semimóvel BSM1, uma vez que o seu abastecimento é realizado exclusivamente por carregadeiras. Deste modo, havia dados informando sobre o basculamento de caminhões fora de estrada em pulmões, entretanto não havia informações sobre as carregadeiras que atuavam nesses pulmões, para abastecer o referido britador semimóvel.

Apesar da grande quantidade de dados, efetuaram-se vários filtros para as informações requeridas como *input*, a fim de tornar o modelo mais preciso. Para a análise de carga e do tempo de basculamento, os filtros separaram as informações entre caminhões de capacidade 240 toneladas e 400 toneladas. Para o tempo de carregamento, foram filtrados: caminhões de 240 toneladas carregados por escavadeiras ou por carregadeiras e caminhões de 400 toneladas carregados por escavadeiras ou por carregadeiras. Finalmente, para o tempo de manobra, foram divididos os tempos para cada caminhão (240 t e 400 t) e para cada destino, seja este uma mina, um britador/pulmão ou um depósito.

Com os dados filtrados, foi realizada uma análise dos *boxplots* (gráficos que representam uma distribuição) das observações, no *software Minitab* 16, de onde foram selecionados 80% dos dados centrais da distribuição, excluindo-se 10% dos dados de cada extremo (*outliers*), considerando-os não representativos do modelo. A Figura 18 mostra um exemplo da aplicação do *boxplot* para a eliminação de *outliers*, onde os limites das caixas são os percentis 10 e 90 e os pontos fora das

caixas representam os *outliers*.

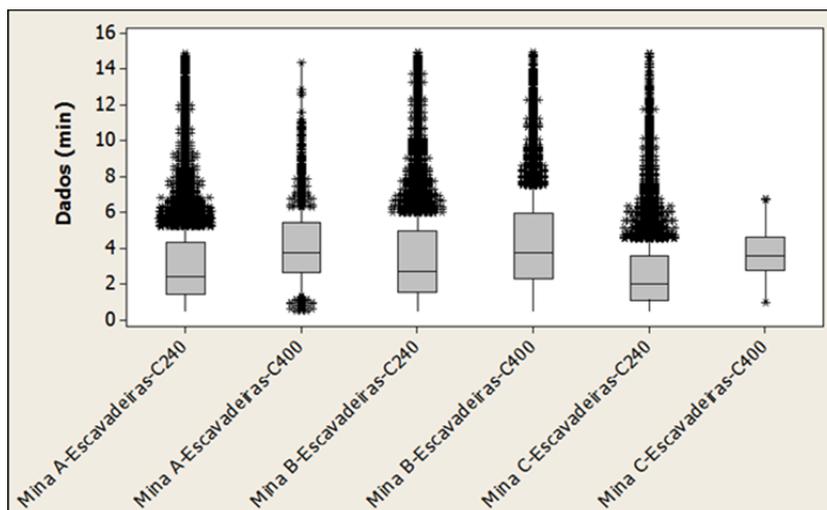


Figura 18 – Boxplot para o tempo de carregamento dos caminhões pelas escavadeiras, nas Minas A, B e C  
Fonte: Autora (2013)

Após a eliminação destes pontos, cada grupo de dados foi testado, para verificar a independência e fonte de variação, ou seja, verificar se são independentes e identicamente distribuídos. O teste foi realizado através de análise de correlação, no *Minitab* 16, como mostra o exemplo, na Figura 19.

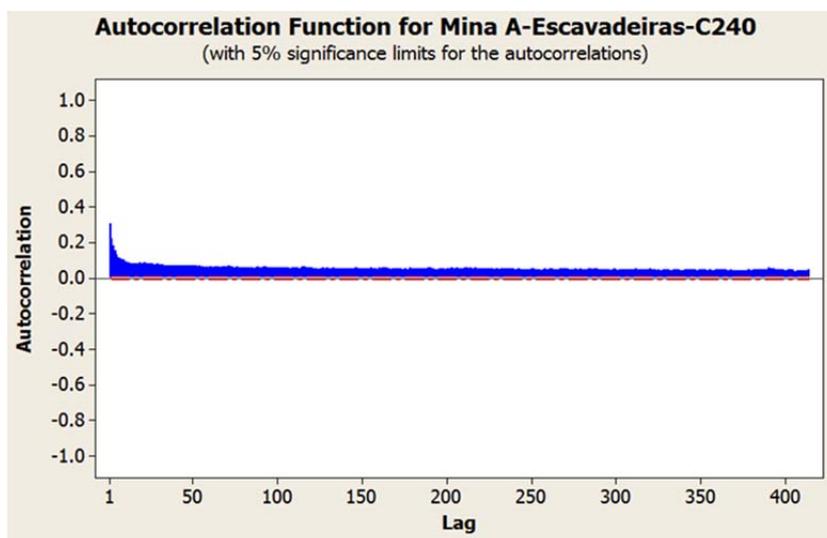


Figura 19 – Teste de autocorrelação para o tempo de carregamento dos caminhões de 240 t por escavadeiras, na Mina A  
Fonte: Autora (2013)

Mesmo após o tratamento no *Minitab* ainda havia uma quantidade considerável de dados para cada grupo, sendo então selecionada, aleatoriamente através do *Microsoft Excel*, uma amostra de, no máximo, 200 observações para cada campo filtrado. Para não comprometer o modelo, esse limite foi necessário,

pois quando se tem muitas observações, mas não variabilidade, os desvios-padrão reduzem extremamente, formando intervalos de confiança mínimos que rejeitam até mesmo hipóteses verdadeiras para os ajustes de curvas.

Deste modo, através do módulo StatFit do ProModel<sup>®</sup>, foi realizado o ajuste de curva para a quantidade de carga carregada por escavadeiras ou carregadeiras e para o tempo de carregamento, tempo de manobra e tempo de basculamento. As Figuras 20, 21 e 22 mostram alguns exemplos dos ajustes realizados.

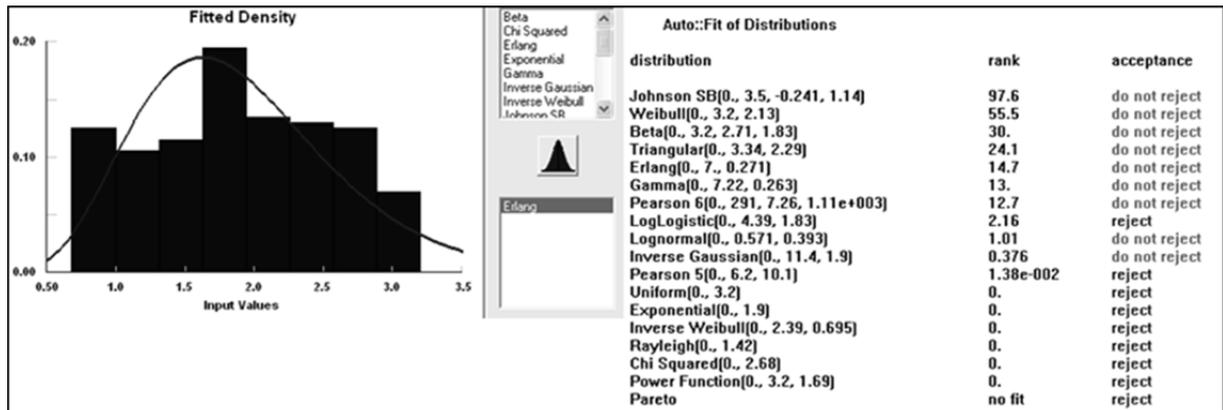


Figura 20 – Ajuste de curva, para a distribuição Erlang, do tempo de manobra dos caminhões de 240 t na Mina A  
Fonte: Autora (2013)

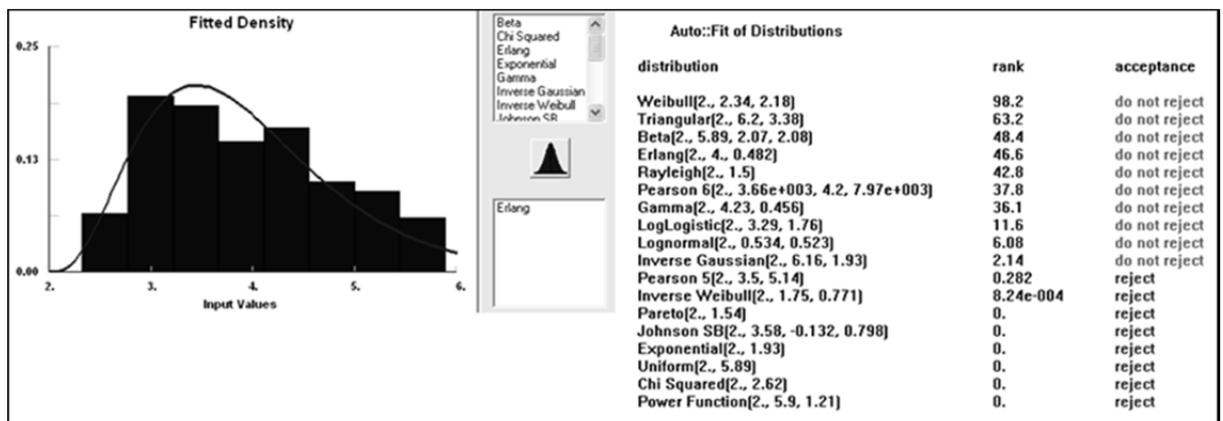


Figura 21 – Ajuste de curva, para a distribuição Erlang, do tempo de carregamento dos caminhões de 400 t por escavadeiras na Mina B  
Fonte: Autora (2013)

No ajuste de curvas, buscou-se adequar os dados às distribuições utilizadas geralmente, para representar tempo de serviço ou duração de tarefa. Assim, para representar o volume de carga nos caminhões fora de estrada, foi escolhida a distribuição Gamma por ter um limite inferior e superior bem estabelecidos. Para o tempo de manobra foi utilizada a distribuição Erlang, pois é bastante utilizada na representação de tempos. As distribuições Beta e Triangular representam os

tempos de basculamento; a primeira foi escolhida por assumir várias formas, enquanto a segunda apresenta resultados mais aderentes à realidade. As distribuições Erlang e Gamma representam os tempos de carregamento, devido melhor aderência na representação de tempos, como, de espera e serviço.

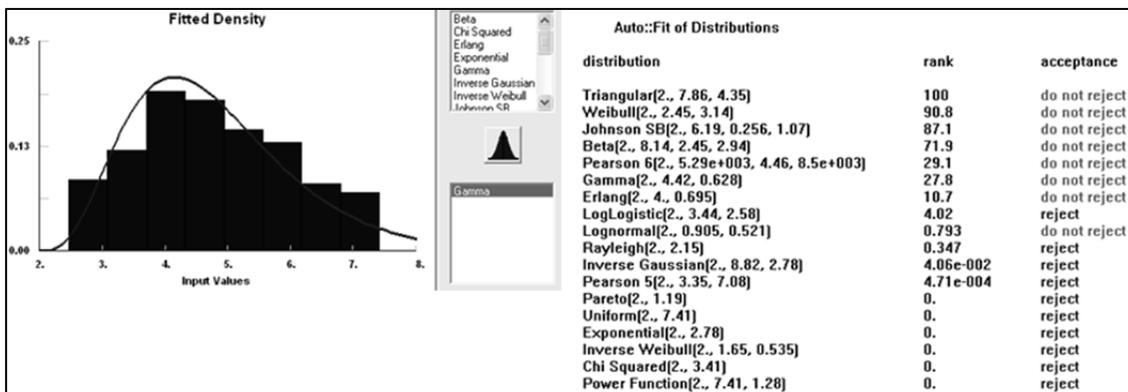


Figura 22 – Ajuste de curva, para a distribuição Gamma, do tempo de carregamento dos caminhões de 240 t por carregadeiras na Mina C

Fonte: Autora (2013)

## 5.2 Implementação do modelo

Nessa segunda fase, o modelo conceitual foi convertido em modelo computacional, através do *software* ProModel 8.5. A seguir, são apresentados os elementos do modelo e as lógicas de simulação, segundo o *software*.

### 5.2.1 Elementos do modelo

Para a construção de um modelo, o ProModel<sup>®</sup> exibe os seguintes elementos: “locais”, “entidades”, “redes de caminho”, “recursos”, “processamento” e “chegadas”, encontrados no menu “Construir” do *software*.

Os locais representam os lugares fixos do sistema, onde se realizam os processos. O Quadro 01 expõe os locais considerados no modelo de simulação.

As entidades, expostas no Quadro 02, são os itens que são processados pelo sistema, possuindo velocidades definidas e podendo ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo. Este elemento se movimenta de um local para outro através de uma rota definida ou de uma rede de trabalho.

Quadro 01 – Elementos estruturais do modelo: Locais

| Nome   | Descrição  | Capacidade |
|--|--|------------|
| B1, BSM2, BSM3 e BSM4  | Britador Semimóvel   | 2          |
| BSM1   | Britador Semimóvel   | 1          |
| PB1, PBSM1, PBSM2, PBSM3 e PBSM4   | Pulmão   | Infinita   |
| FILA_B1, FILA_BSM1, FILA_BSM2, FILA_BSM3 e FILA_BSM4   | Fila do Britador Semimóvel   | 1          |
| DECISAO_B1, DECISAO_BSM1, DECISAO_BSM2, DECISAO_BSM3 e DECISAO_BSM4                                      | Decisão entre ir para a fila ou descarregar no pulmão. No caso do BSM1, o local DECISAO_BSM1 direciona somente ao pulmão | Infinita   |
| MinaA1, MinaA2, MinaA3 e MinaA4  | Frentes de lavra da Mina A   | Infinita   |
| MinaB1, MinaB2, MinaB3 e MinaB4  | Frentes de lavra da Mina B   | Infinita   |
| MinaC1, MinaC2, MinaC3, MinaC4, MinaC5 e Mina C6   | Frentes de lavra da Mina C   | Infinita   |
| DEP_OESTE11, DEP_OESTE12, DEP_OESTE2, DEP_SUL1, DEP_SUL2, DEP_NORTE1, DEP_NORTE2, DEP_NORTE3 e DEP_MINAC | Depósitos de estéril   | Infinita   |
| CHEGADAS_A, CHEGADAS_B, CHEGADAS_C   | Local para fazer as chegadas de minério no modelo e distribuir para as minas   | Infinita   |

Fonte: Autora (2013)

Quadro 02 – Elementos estruturais do modelo: Entidades

| Nome    | Descrição  | Chegada                            | Frequência de chegada | Ocorrências |
|---------|--|------------------------------------|-----------------------|-------------|
| MINERIO | Quantidade em tonelada de minério que será carregada nos caminhões. O tamanho da carga será definido pelo tipo de caminhão utilizado | CHEGADAS_A, CHEGADAS_B, CHEGADAS_C | 1/min                 | Infinitas   |
| ESTERIL | Quantidade em tonelada de estéril que será carregada nos caminhões. O tamanho da carga será definido pelo tipo de caminhão utilizado | -                                  | -                     | -           |

Fonte: Autora (2013)

O arranjo físico do complexo das Minas A, B e C foi utilizado para a construção da rede de caminho, na qual os recursos se movimentam. A rede é caracterizada como Passante (veículos ultrapassam uns aos outros), definida por distância e velocidade, sendo constituída por 90 caminhos e 44 interfaces.

O Quadro 03 apresenta alguns dos recursos logísticos utilizados no modelo de simulação. Estes são os elementos usados para transportar entidades, executar operações, realizar manutenção nos locais, dentre outros, podendo ser pessoas ou equipamentos. Um sistema pode ter um ou mais recursos, que podem se movimentar ou não. Entretanto, cada recurso deve ter uma rede de caminho, onde ocorrerá sua movimentação. Os valores de unidades e velocidade foram dados pela empresa mineradora.

Quadro 03 – Elementos estruturais do modelo: Recursos

| Nome  | Descrição   | Unidades         | Velocidade |
|---|---|------------------|------------|
| C240  | Caminhão fora de estrada com capacidade para 240 toneladas                            | 110              | 44 km/h    |
| C400  | Caminhão fora de estrada com capacidade para 400 toneladas                            | 16               | 44 km/h    |
| CARREG  | Carregadeiras com capacidade de 80 toneladas utilizadas no carregamento dos caminhões | 17               | 44 km/h    |
| ESCAV_A1, ESCAV_A2, ESCAV_A3 e ESCAV_A4                     | Escavadeiras operando na Mina A   | 2, 2, 1 e 1      | -          |
| ESCAV_B1, ESCAV_B2, ESCAV_B3 e ESCAV_B4                     | Escavadeiras operando na Mina B   | 2, 2, 1 e 1      | -          |
| ESCAV_C1, ESCAV_C2, ESCAV_C3, ESCAV_C4, ESCAV_C5 e ESCAV_C6 | Escavadeiras operando na Mina C   | 2, 2, 2, 1, 1, 1 | -          |

Fonte: Autora (2013)

O processamento consiste em uma tabela, onde são definidas as operações de cada entidade, em cada local, e o recurso necessário para estas operações (lógicas de operação), além de definir uma tabela de rotas, com o destino e a movimentação de cada entidade, o modo como ocorre essa movimentação e o

recurso necessário (lógicas de movimentação). Nesta etapa, foram inseridos os tempos de processamento de cada local de forma probabilística, através da utilização do módulo StatFit, conforme descrito na Seção 5.1.

Finalmente, o elemento “chegada” define a entrada das entidades no modelo, podendo se determinar as quantidades, a frequência, os períodos de chegada e as lógicas de chegada. O Quadro 02 apresenta parte desse elemento, enquanto as lógicas são apresentadas no Quadro 04, onde os valores percentuais (0,25; 0,38 e 0,47) são estimativas da quantidade minério de ferro que sai da Mina X, de acordo com dados da empresa.

Quadro 04 – Lógicas de chegada

| Entidade | Local      | Lógica  |
|----------|------------|---|
| MF       | CHEGADAS_A | if rand(1)<=0.25 then<br>tipo_mat=1<br>else<br>tipo_mat=2 |
| MF       | CHEGADAS_B | if rand(1)<=0.38 then<br>tipo_mat=1<br>else<br>tipo_mat=2 |
| MF       | CHEGADAS_C | if rand(1)<=0.47 then<br>tipo_mat=1<br>else<br>tipo_mat=2 |

Fonte: Autora (2013)

Além dos elementos do modelo citados acima, o ProModel<sup>®</sup> ainda contém elementos auxiliares como o “Designar Turno”, para definição de turnos de trabalho, “Atributos” e “Variáveis”, descritos a seguir. Quanto aos turnos, dois foram designados: o turno para o funcionamento do BSM1 – durante 12 horas – e o turno para os demais equipamentos (caminhão fora de estrada, escavadeira e carregadeira), onde foram definidos intervalos de duas horas para almoço e 15 minutos para troca de turno.

Os elementos lógicos do modelo utilizados são os atributos e as variáveis. Os atributos são anexados a entidades ou locais, contendo informações sobre os mesmos, podendo conter valores reais ou inteiros. Neste trabalho, existem seis atributos (Quadro 05) que identificam o tipo de recurso utilizado, a quantidade de carga transportada, o tipo de material, a origem da carga, o destino da carga e o horário de saída da carga em relação à sua origem.

Quadro 05 – Atributos do modelo

| Nome          | Descrição  | Valores possíveis  |
|---------------|--|--|
| TIPO_MAT      | Tipo de material carregado no caminhão, podendo ser minério ou estéril   | Minério = 1<br>Estéril = 2   |
| CAP_RECURSO   | Tipo de caminhão utilizado no transporte   | Caminhão de 240 t = 240<br>Caminhão de 400 t = 400   |
| CARGA         | Quantidade de minério que foi efetivamente carregada   | Definido por distribuição de probabilidade, podendo ser maior ou menor que a capacidade nominal do caminhão              |
| ORIGEM        | Marca a mina de origem da carga de minério ou estéril. Utilizado para gerar um <i>log</i> de origem x destino                            | 1=Mina A; 2=Mina B; 3=Mina C   |
| DESTINO       | Marca o destino da carga de minério ou estéril. Utilizado para gerar um <i>log</i> de origem x destino                                   | 1=B1; 2=BSM1; 3=BSM2;<br>4=BSM3; 5=BSM4;<br>6=DEP_OESTE2;<br>7=DEP_OESTE1;<br>8=DEP_SUL;<br>9=DEP_MINAC;<br>10=DEP_NORTE |
| HORARIO_SAIDA | Marca o horário de saída da carga de minério ou estéril. Utilizado no cálculo do tempo de deslocamento no <i>log</i> de origem x destino | Valores do relógio em minutos  |

Fonte: Autora (2013)

Quadro 06 – Variáveis globais do modelo

| Nome   | Descrição   | Valores possíveis |
|--|---|-------------------|
| vFila_B1, vFila_BSM1,<br>vFila_BSM2, vFila_BSM3,<br>vFila_BSM4 | Controle da fila de cada britador                     | 0 ou 1            |
| MF_PB1, MF_PBSM1,<br>MF_PBSM2, MF_PBSM3,<br>MF_PBSM4           | Quantidade de minério estocado nos pulmões            | Maior que zero    |
| MF_B1, MF_BSM1, MF_BSM2,<br>MF_BSM3, MF_BSM4                   | Quantidade de minério em processamento nos britadores | Maior que zero    |
| saida_B1, saida_BSM1,<br>saida_BSM2, saida_BSM3,<br>saida_BSM4 | Quantidade de minério processado pelos britadores     | Maior que zero    |

Fonte: Autora (2013)

As variáveis podem ser globais ou locais. Ambas podem conter valores reais ou inteiros. Neste trabalho, foram utilizadas quatro variáveis globais, apresentadas no Quadro 06, para representar valores numéricos mutáveis em qualquer lugar do

modelo. Logo, compreendem o controle do tamanho das filas dos britadores, a quantidade de minério nos pulmões, a quantidade de minério em processamento nos britadores e a produção de cada um deles.

A capacidade, em toneladas, dos britadores e a velocidade de britagem serão controladas por variáveis locais, facilitando assim o controle de quantos caminhões podem fazer o basculamento por vez. Essas variáveis só estabelecem funções na parte da lógica em que são declaradas. O Quadro 07 apresenta a capacidade real e a velocidade de britagem de cada britador.

Quadro 07 – Capacidade e velocidade de britagem nominal

| <b>Britador</b> | <b>Capacidade real total</b> | <b>Britagem nominal</b> |
|-----------------|------------------------------|-------------------------|
| B1              | 25.000 t                     | 12.000 t/h              |
| BSM1            | 20.000 t                     | 6.000 t/h               |
| BSM2            | 110.000 t                    | 6.000 t/h               |
| BSM3            | 105.000 t                    | 6.000 t/h               |
| BSM4            | 125.000 t                    | 8.000 t/h               |

Fonte: Dados da empresa

### 5.2.2 Lógicas de operação do modelo

Durante a construção das lógicas do modelo, buscou-se trabalhar de forma simples e clara, porém sem realizar simplificações além das citadas no início do Capítulo 5. Basicamente, observa-se a existência de quatro grupos principais de lógicas de operação utilizadas no modelo: as lógicas das minas, as lógicas de decisão entre fila do britador ou pulmão, as lógicas de basculamento nos britadores e as lógicas de recuperação do minério nos pulmões.

### 5.2.3 Verificação

A partir disso, pode-se verificar se o modelo computacional está sendo executado corretamente. Na verificação, foram utilizadas as ferramentas *Trace Step* e *Trace Continuous* do próprio ProModel<sup>®</sup>. Estas ferramentas permitem o acompanhamento da simulação passo a passo, ou seja, a cada ocorrência de um evento, se registra e se mostra a origem da entidade, para onde foi roteada e qual o recurso que está transportando. Assim, são importantes para a averiguação do funcionamento e atendimento das rotas estipuladas no modelo.

Outra ferramenta utilizada foi a instrução *DISPLAY* <argumento>, na qual é possível acompanhar a ocorrência de certos pontos específicos de código, principalmente dentro de instruções condicionais *IF* <condição> *THEN* <argumento>.

Finalmente, para verificar se a movimentação dos recursos estava ocorrendo de forma adequada, foi analisada a animação do modelo. A partir desta, notou-se que os caminhões e carregadeiras se movimentam de forma bem distribuída entre todas as minas, britadores e depósitos, sem que haja uma superlotação em determinado ponto.

Logo, o modelo foi considerado adequado e corretamente construído, onde as lógicas utilizadas e todos os elementos estruturais interagem de forma adequada. Deste modo, o modelo pode ser validado.

#### 5.2.4 Validação

Para a validação do modelo, foram utilizadas as informações de origem e destino das cargas de minério de ferro. Um arquivo externo foi gerado e nele foram registrados, a partir do uso de atributos no modelo, um número correspondente a cada ponto de origem e destino da rede, conforme Quadro 05.

Com essas informações, foram montadas tabelas com o percentual de vezes que as cargas vão de uma origem *x* para um destino *y* em cada uma das nove replicações do modelo (ver Subitem 5.3.2). Os percentuais calculados para as rotas com destino aos britadores são apresentados nas Tabelas 02, 03 e 04.

Tabela 02 – Percentual de roteamento, a partir da Mina A, para os britadores

| Replicações | Destino |      |        |      |      |
|-------------|---------|------|--------|------|------|
|             | B1      | BSM1 | BSM2   | BSM3 | BSM4 |
| 1           | 20,75%  | -    | 79,25% | -    | -    |
| 2           | 20,33%  | -    | 79,67% | -    | -    |
| 3           | 22,17%  | -    | 77,83% | -    | -    |
| 4           | 21,83%  | -    | 78,17% | -    | -    |
| 5           | 22,98%  | -    | 77,02% | -    | -    |
| 6           | 23,13%  | -    | 76,87% | -    | -    |
| 7           | 22,10%  | -    | 77,90% | -    | -    |
| 8           | 20,54%  | -    | 79,46% | -    | -    |
| 9           | 20,95%  | -    | 79,05% | -    | -    |

Fonte: Autora (2013)

Tabela 03 – Percentual de roteamento, a partir da Mina B, para os britadores

| Replicações | Destino |        |      |      |        |
|-------------|---------|--------|------|------|--------|
|             | B1      | BSM1   | BSM2 | BSM3 | BSM4   |
| 1           | -       | 11,39% | -    | -    | 88,61% |
| 2           | -       | 11,05% | -    | -    | 88,95% |
| 3           | -       | 10,78% | -    | -    | 89,22% |
| 4           | -       | 11,22% | -    | -    | 88,78% |
| 5           | -       | 10,37% | -    | -    | 89,63% |
| 6           | -       | 10,78% | -    | -    | 89,22% |
| 7           | -       | 10,30% | -    | -    | 89,70% |
| 8           | -       | 11,49% | -    | -    | 88,51% |
| 9           | -       | 10,40% | -    | -    | 89,60% |

Fonte: Autora (2013)

Tabela 04 – Percentual de roteamento, a partir da Mina C, para os britadores

| Replicações | Destino |      |      |        |      |
|-------------|---------|------|------|--------|------|
|             | B1      | BSM1 | BSM2 | BSM3   | BSM4 |
| 1           | 42,31%  | -    | -    | 57,69% | -    |
| 2           | 41,41%  | -    | -    | 58,59% | -    |
| 3           | 42,23%  | -    | -    | 57,77% | -    |
| 4           | 43,34%  | -    | -    | 56,66% | -    |
| 5           | 43,57%  | -    | -    | 56,43% | -    |
| 6           | 42,23%  | -    | -    | 57,77% | -    |
| 7           | 41,78%  | -    | -    | 58,22% | -    |
| 8           | 42,30%  | -    | -    | 57,70% | -    |
| 9           | 41,84%  | -    | -    | 58,16% | -    |

Fonte: Autora (2013)

Tabela 05 – Percentual de roteamento, a partir da Mina A, para os depósitos

| Replicações | Destino    |            |         |           |           |
|-------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|
|             | Dep Oeste1 | Dep Oeste2 | Dep Sul | Dep MinaC | Dep Norte |
| 1           | 9,91%      | 39,10%     | 50,99%  | -         | -         |
| 2           | 9,34%      | 39,44%     | 51,22%  | -         | -         |
| 3           | 9,75%      | 39,26%     | 50,99%  | -         | -         |
| 4           | 8,96%      | 40,31%     | 50,73%  | -         | -         |
| 5           | 10,02%     | 40,44%     | 49,54%  | -         | -         |
| 6           | 9,75%      | 39,26%     | 50,99%  | -         | -         |
| 7           | 9,85%      | 40,17%     | 49,98%  | -         | -         |
| 8           | 9,29%      | 40,29%     | 50,43%  | -         | -         |
| 9           | 9,58%      | 39,68%     | 50,75%  | -         | -         |

Fonte: Autora (2013)

Nas Tabelas 05, 06 e 07 são apresentados os percentuais calculados para as rotas com destino aos depósitos.

Tabela 06 – Percentual de roteamento, a partir da Mina B, para os depósitos

| Replicações | Destino    |            |         |           |           |
|-------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|
|             | Dep Oeste1 | Dep Oeste2 | Dep Sul | Dep MinaC | Dep Norte |
| 1           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 2           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 3           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 4           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 5           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 6           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 7           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 8           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |
| 9           | -          | 100,00%    | -       | -         | -         |

Fonte: Autora (2013)

Tabela 07 – Percentual de roteamento, a partir da Mina C, para os depósitos

| Replicações | Destino    |            |         |           |           |
|-------------|------------|------------|---------|-----------|-----------|
|             | Dep Oeste1 | Dep Oeste2 | Dep Sul | Dep MinaC | Dep Norte |
| 1           | -          | -          | 9,54%   | 43,82%    | 46,64%    |
| 2           | -          | -          | 10,00%  | 42,75%    | 47,25%    |
| 3           | -          | -          | 10,34%  | 43,57%    | 46,09%    |
| 4           | -          | -          | 9,90%   | 44,35%    | 45,75%    |
| 5           | -          | -          | 9,39%   | 43,07%    | 47,54%    |
| 6           | -          | -          | 10,34%  | 43,57%    | 46,09%    |
| 7           | -          | -          | 10,22%  | 43,68%    | 46,09%    |
| 8           | -          | -          | 9,27%   | 43,28%    | 47,45%    |
| 9           | -          | -          | 9,29%   | 44,85%    | 45,86%    |

Fonte: Autora (2013)

Para a validação, através da análise dos *outputs* do modelo, foram investigadas as médias e os desvios padrão do roteamento percentual semanal, nos quais se percebeu que as médias estavam aproximadas, mas os desvios padrão apresentavam valores erráticos. Analisando o comportamento da variabilidade, percebeu-se que certas semanas apresentavam quedas e aumentos irregulares, embora fosse claro que eram casos extraordinários, onde os *outliers* elevavam o desvio-padrão significativamente. Como isto acontecia para vários roteamentos diferentes em semanas diferentes, decidiu-se comparar apenas as médias

percentuais dos roteamentos (Tabela 08), desconsiderando esses altos desvios padrão, provavelmente, provenientes de paradas para manutenção, acidentes etc.

Tabela 08 – Percentual de roteamento médio final

| <b>Minério de ferro</b> | <b>BRIT</b>       | <b>BSM1</b>      | <b>BSM2</b>    | <b>BSM3</b>      | <b>BSM4</b>      |
|-------------------------|-------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|
| Mina A                  | 22.23%            | *                | 77.77%         | *                | *                |
| Mina B                  | *                 | 10.92%           | *              | *                | 89.08%           |
| Mina C                  | 41.86%            | *                | *              | 58.14%           | *                |
| <b>Estéril</b>          | <b>Dep Oeste2</b> | <b>Dep Oeste</b> | <b>Dep Sul</b> | <b>Dep MinaC</b> | <b>Dep Norte</b> |
| Mina A                  | 39.44%            | 9.52%            | 51.04%         | *                | *                |
| Mina B                  | 100.00%           | *                | *              | *                | *                |
| Mina C                  | *                 | *                | 9.72%          | 43.93%           | 46.35%           |

Fonte: Autora (2013)

Os percentuais de roteamento do modelo foram comparados com os valores percentuais reais das rotas médias semanais. Sendo assim, o teste T de *Student* foi aplicado, de modo a comprovar a correspondência entre os valores percentuais médios do modelo e do sistema real. Avaliados os respectivos intervalos de decisão, construídos com os dados reais, todos continham os valores médios oriundos do modelo entre seus limites inferiores e superiores, permitindo, enfim, a validação do modelo em função do percentual das rotas de origem e destino na atividade de mina.

### **5.3 Análise dos resultados do modelo**

Com o modelo computacional pronto, foram realizados os experimentos, considerando as decisões descritas nos próximos subitens.

#### **5.3.1 Duração da simulação**

O tempo de duração da simulação foi definido a partir de cronometragens de tempos de simulações realizadas, que foram analisadas no *Microsoft Excel*. Desta forma, a duração da simulação foi definida em 168 horas, ou seja, sete dias. Buscou-se utilizar um tempo de simulação não muito longo para que a falta de informações sobre manutenção ocasionasse um efeito mínimo, visto que houve limitação no fornecimento destes dados.

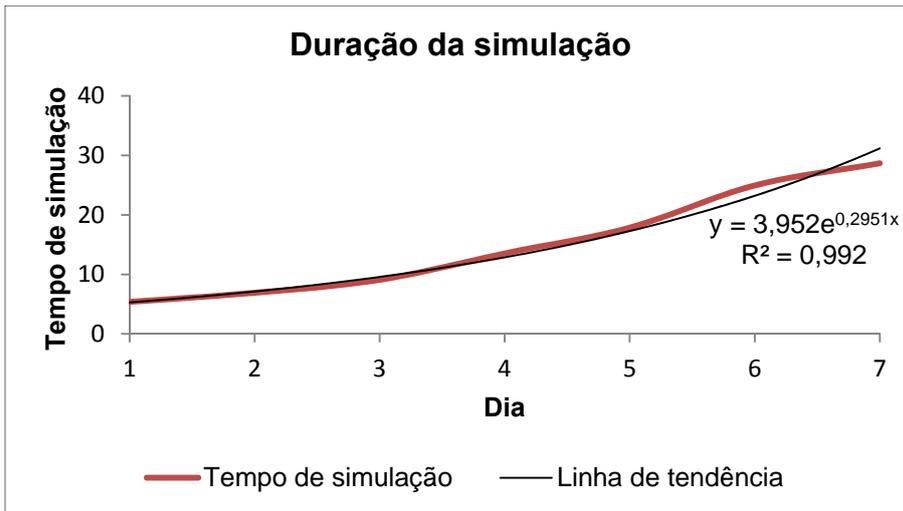


Figura 23 – Crescimento do tempo de simulação por dia e linha de tendência  
Fonte: Autora (2013)

Apesar disso, é possível extrair resultados consideráveis para análise da simulação. Ressalta-se que devido ao tamanho e complexidade do modelo, a cada dia, o tempo de simulação/dia aumenta exponencialmente, visto na Figura 23.

### 5.3.2 Número de replicações

Para identificar o número de replicações, inicialmente, foram rodadas cinco, nas quais os dados de saída (*outputs*) utilizados foram os percentuais de utilização média dos caminhões fora de estrada e das carregadeiras, pois são os que apresentavam maior variabilidade. Os valores para escavadeira não foram considerados, pois apresentam baixa variabilidade. O resultado e o número de replicações ideal para um nível de confiança de 95% é apresentado na Tabela 09.

Tabela 09 – Resultado do cálculo das 5 replicações iniciais em função da utilização média dos recursos

| Replicação       | Caminhão de 240 t (%) | Caminhão de 400 t (%) | Carregadeira (%) |
|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 1                | 31,15                 | 67,97                 | 97,03            |
| 2                | 27,23                 | 62,97                 | 97,81            |
| 3                | 31,46                 | 67,84                 | 97,03            |
| 4                | 33,44                 | 70,28                 | 96,68            |
| 5                | 30,32                 | 68,13                 | 97,17            |
| $\sigma$         | 2,26                  | 2,69                  | 0,41             |
| <b>Erro (5%)</b> | 1,54                  | 3,37                  | 4,86             |
| <b>n</b>         | 8,33                  | 2,44                  | 0,03             |

Fonte: Autora (2013)

A partir da Tabela 09, o modelo foi rodado novamente, entretanto para nove replicações, conforme o valor do maior  $n$  encontrado ( $n = 8,33$ . Logo,  $n \cong 9$ ). A mesma análise foi feita novamente e o resultado é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado do cálculo das 9 replicações finais

| Replicação | Caminhão de 240 t (%) | Caminhão de 400 t (%) | Carregadeira (%) |
|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| 1          | 29,31                 | 67,36                 | 97,49            |
| 2          | 28,75                 | 66,62                 | 97,66            |
| 3          | 27,94                 | 66,09                 | 97,80            |
| 4          | 27,53                 | 64,56                 | 97,80            |
| 5          | 27,38                 | 64,60                 | 97,81            |
| 6          | 27,36                 | 64,17                 | 97,76            |
| 7          | 28,19                 | 65,44                 | 97,51            |
| 8          | 29,94                 | 67,23                 | 97,29            |
| 9          | 27,72                 | 64,65                 | 97,80            |
| $\sigma$   | 0,91                  | 1,23                  | 0,19             |
| Erro (5%)  | 1,41                  | 3,28                  | 4,88             |
| $n$        | 1,61                  | 0,54                  | 0,01             |

Fonte: Autora (2013)

Logo, verifica-se que nove replicações é um número válido estatisticamente, sendo, portanto, utilizado daqui em diante na simulação.

### 5.3.3 Tempo de *Warm-up*

O tempo de *warm-up* foi definido em função do número de recursos logísticos (somente caminhões e carregadeiras) livres no sistema a cada hora. Sendo assim, o modelo foi executado durante 168 horas (sete dias) e com as nove replicações, definidas no subitem anterior, obtendo-se 169 observações (contando o instante zero) para cada replicação.

As médias móveis foram calculadas para janelas  $w$  de tamanho 5, 10 e 15. Para cada uma, utilizou-se a segunda equação de  $\bar{Y}_l(w)$  até  $i=w$  e, em seguida, a primeira equação foi empregada até o ponto de parada  $m-w$ . Com isso, os valores das três médias móveis foram plotados em um gráfico, sendo o resultado apresentado na Figura 24.

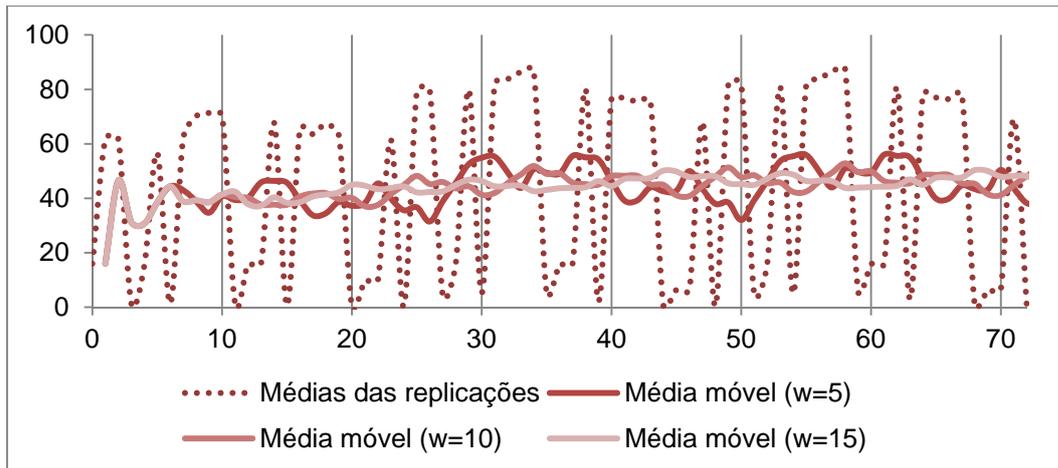


Figura 24 – Médias móveis do método de Welch para as primeiras 72h  
Fonte: Autora (2013)

Analisando o gráfico da Figura 24, é possível perceber que com  $w=15$ , a média móvel apresenta um aspecto mais suavizado. Nota-se, ainda, que o sistema se torna estacionário entre os instantes 20 e 30 horas, especificamente entre os instantes 23 e 25. Portanto, o ponto de transição foi definido no instante 24 horas.

### 5.3.4 Experimentos

Nesta fase, foi executada a simulação do sistema atual. Feito o experimento, o *software* apresenta vários relatórios, onde é possível obter informações sobre o percentual de tempo em que cada local ficou em operação, em preparação (*Setup*), ocioso, aguardando, bloqueado, vazio, parcialmente ocupado, cheio e fora de operação, sendo tais valores expostos nas Figuras 25 e 26, como exemplo.

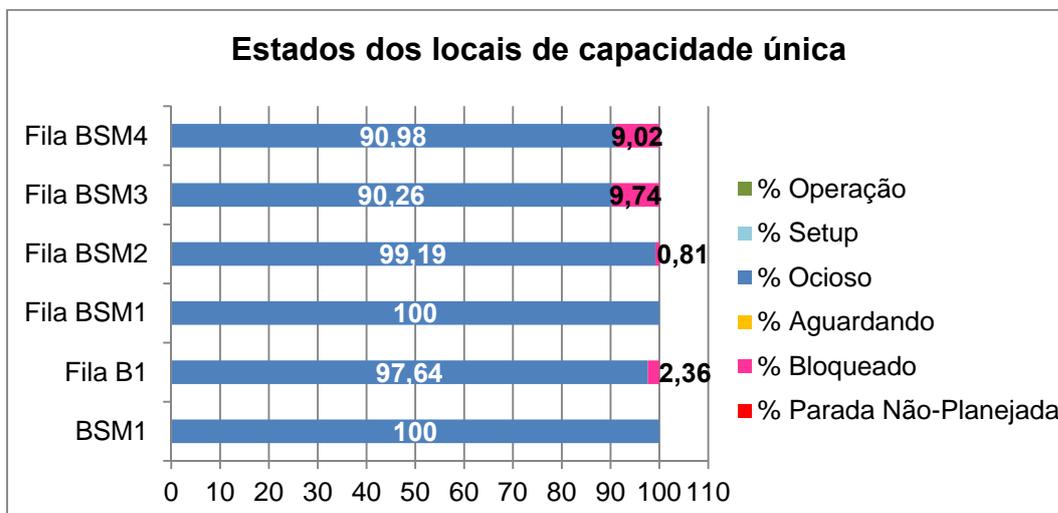


Figura 25 – Taxa de utilização de locais de capacidade única no sistema atual simulado  
Fonte: Autora (2013)

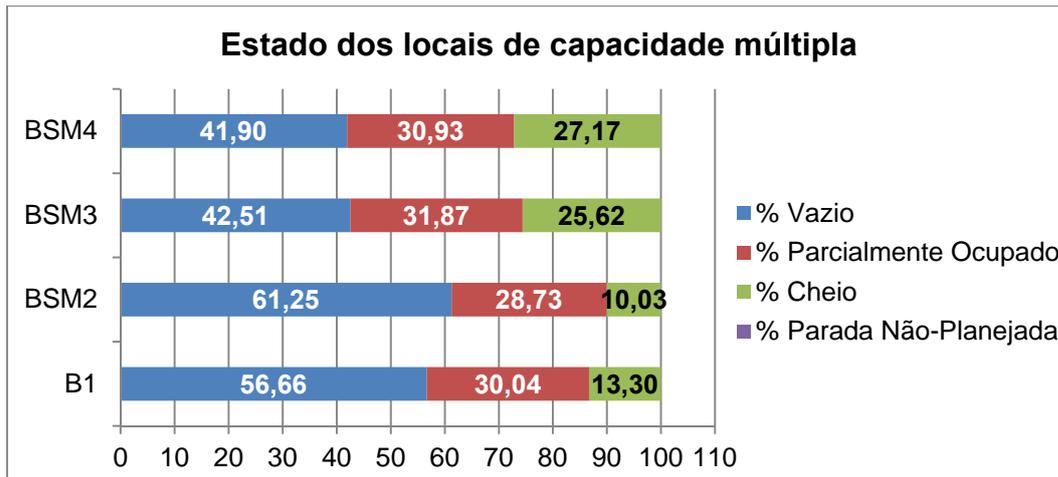


Figura 26 – Taxa de utilização de alguns locais de capacidade múltipla no sistema atual simulado

Fonte: Autora (2013)

As análises das Figuras 25 e 26 fogem da delimitação desta pesquisa (etapa Mina). Através dos relatórios do *software*, foi possível obter também o percentual de tempo em que cada recurso trabalhou na produção, visto na Figura 27.

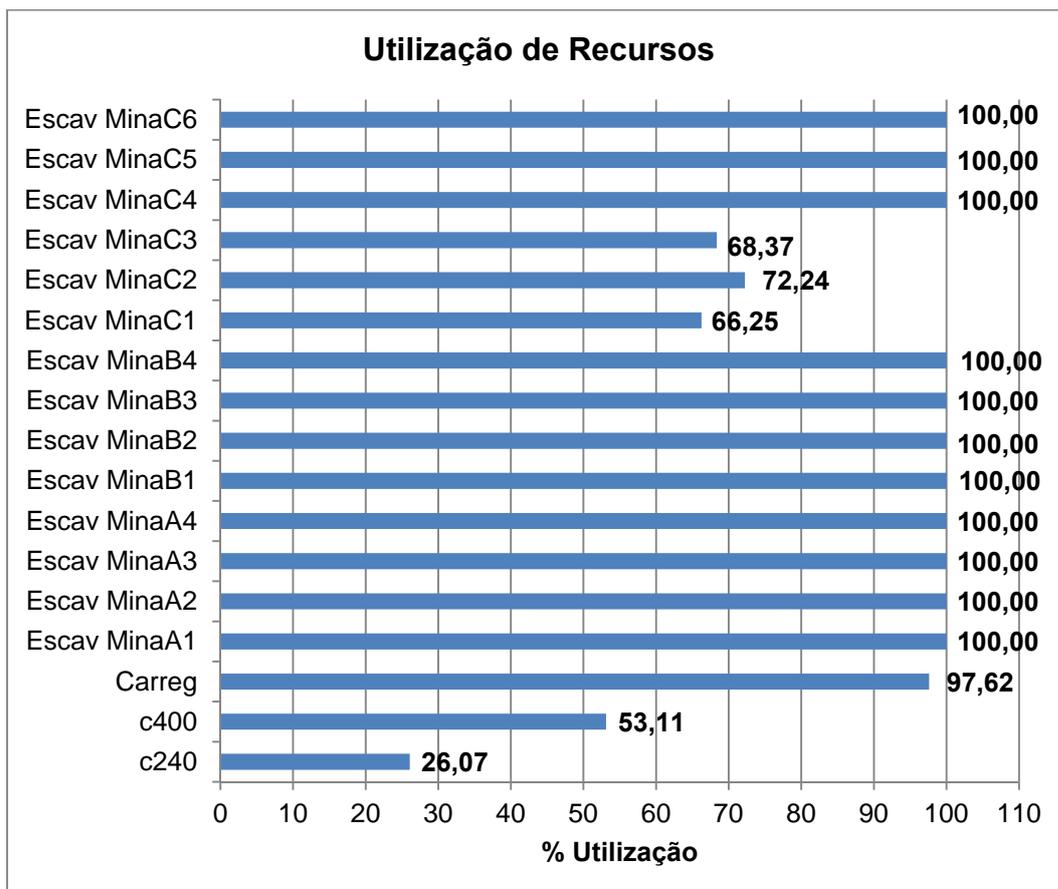


Figura 27 – Taxa de utilização dos recursos no sistema atual simulado

Fonte: Autora (2013)

Por meio da análise dos resultados apresentados, pode-se verificar um grande percentual de tempo de inatividade, para os locais, e alta utilização de equipamentos do tipo escavadeiras e carregadeiras, havendo possibilidade para o melhoramento nas operações de lavra.

## **5.4 Otimização**

Esta etapa do estudo busca balancear as taxas de utilização dos recursos logísticos envolvidos no processo, através do *software* SimRunner<sup>®</sup>, que usa Algoritmos Genéticos como método otimizador. Igual à simulação, a realização da otimização segue uma metodologia. A utilizada neste trabalho é definida por Harrel; Ghosh; Bowden (2000), descrita na Seção 3.6 com os seguintes passos:

### **a) Definição das variáveis**

As variáveis aqui definidas, chamadas de variáveis de decisão ou *inputs*, são testadas pelo algoritmo de otimização e têm seu valor alterado a cada rodada da simulação. Neste problema de otimização, as variáveis de decisão são definidas como sendo os recursos logísticos (escavadeiras, carregadeiras, caminhões fora de estrada de 240 t e caminhões fora de estrada de 400 t) envolvidos na operação.

Para que estas variáveis estejam disponíveis para escolha, no *software* SimRunner<sup>®</sup>, é necessário que no modelo a quantidade de cada uma delas seja definida como uma macro.

### **b) Definição dos tipos de variáveis**

Com as variáveis definidas, é necessário definir o tipo de variável e seus limites superior e inferior, para que durante a busca o algoritmo de otimização sejam geradas soluções, respeitando estas definições.

No presente problema, as variáveis representam as quantidades de recursos logísticos (escavadeiras, carregadeiras, caminhões fora de estrada de 240 t e de 400 t), assim elas devem ser do tipo inteira. Na definição dos limites das variáveis, foram estipulados três cenários, baseados nos resultados obtidos na simulação do modelo atual, apresentados na Figura 27, do Subitem 5.3.4. A escolha dos cenários foi aleatória, visto que a versão do ProModel<sup>®</sup> não era

profissional (limitada a 25 experimentos) e a quantidade de recursos logísticos desejáveis, não deveria ser muito alta para não dispendar custos elevados na empresa mineradora, considerando uma visão real.

Deste modo, as quantidades de recursos foram limitadas, onde, em todos os três cenários, definiu-se para as **escavadeiras** (Escav MinaA1, Escav MinaA2, Escav MinaA3, ..., Escav MinaC6) que o limite inferior seria as suas quantidades atuais e o limite superior teria o acréscimo de 1 equipamento em cada uma de suas quantidades, pois observa-se que o nível de utilização desses equipamentos, em todas as minas e suas frentes de lavra, é alto. Para as **carregadeiras** definiu-se, no primeiro cenário, que o limite inferior seria a quantidade atual, enquanto o limite superior aumentaria em 10% essa quantidade. No segundo cenário, o limite inferior continuaria sendo a quantidade atual e o limite superior aumentaria em 15%. Por último, no terceiro cenário, se definiu um limite inferior igual ao atual, porém o limite superior aumentaria em 20% essa quantidade. Nota-se que o nível de utilização desses equipamentos também é alto, por isso, foram testadas as alternativas para aumento dos limites superiores.

Quanto aos **caminhões de 240 t e de 400 t** definiu-se, no primeiro cenário, que o limite superior seria a quantidade atual e o limite inferior seria 10% a menos dessa quantidade. No segundo cenário, definiu-se que o limite superior seria a quantidade atual e o limite inferior seria 15% a menos dessa quantidade. Enquanto, no terceiro cenário, definiu-se que o limite superior seria a quantidade atual e o limite inferior seria 20% a menos dessa quantidade. Percebe-se que ambos os caminhões possuem baixa taxa de utilização, logo, nos testes seus limites inferiores poderão somente ser, se necessário, diminuídos.

### **c) Definição da função objetivo**

Para a definição da função objetivo, foi realizada uma análise baseada nos componentes de desempenho logístico, citados no Subitem 2.3.1, sendo identificados para as operações da etapa Mina, conforme Figura 28.

Como este trabalho busca balancear as taxas de utilização dos recursos logísticos utilizados em operações de extração e transporte de minério de ferro, observa-se que, neste caso em estudo, os componentes de desempenho logístico com maiores custos, respectivamente, são o transporte, realizado por caminhões fora de estrada; as instalações, representadas por escavadeiras e carregadeiras,

pois são recursos que desenvolvem processos dentro de uma área específica e fixa que é a frente de lavra, vista como uma instalação; e os estoques, que acumulam minério de ferro nos pulmões presentes nas minas (próximos aos britadores).

| Operação        | Recurso      | Componentes de Desempenho Logístico |            |         |             |
|-----------------|--------------|-------------------------------------|------------|---------|-------------|
|                 |              | Instalações                         | Transporte | Estoque | Informações |
| Extração        | Mina         |                                     |            | x       | x           |
|                 | Escavadeira  | x                                   |            |         | x           |
|                 | Carregadeira | x                                   |            |         | x           |
| Carregamento    | Escavadeira  | x                                   |            |         | x           |
|                 | Carregadeira | x                                   |            |         | x           |
| Transporte      | Caminhões    |                                     | x          |         | x           |
| Descarregamento | "Pulmões"    |                                     |            | x       | x           |
|                 | Caminhões    |                                     | x          |         | x           |
|                 | Carregadeira |                                     | x          |         | x           |

Figura 28 – Componentes logísticos das operações de Mina  
Fonte: Autora (2013)

#### Quadro 08 – Função Objetivo para os cenários da otimização

**F.O.:** Min: 1.00 \* Escav\_MinaA1 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaA2 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaA3 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaA4 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaB1 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaB2 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaB3 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaB4 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaC1 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaC2 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaC3 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaC4 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaC5 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Escav\_MinaC6 - % Utilization  
 Min: 1.00 \* Carreg - % Utilization  
 Target: [70.0 to 80.0] 1.00 \* c240 - % Utilization  
 Target: [70.0 to 80.0] 1.00 \* c400 - % Utilization

Fonte: Autora (2013)

Assim, a função objetivo foi definida como sendo a minimização da taxa de utilização dos recursos, escavadeira e carregadeira, além de definir um intervalo de utilização para os recursos relacionados ao transporte, caminhões fora de estrada de 240 t e de 400 t, de 70% a 80%, pois se admite que pessoas manuseiam os equipamentos e que se estes forem muito utilizados, custos com manutenção e/ou perdas podem incidir. Logo, o Quadro 08 expõe a função objetivo definida.

#### **d) Seleção do tamanho da população do Algoritmo Evolutivo**

Na seleção do tamanho da população, pode-se escolher entre três opções no menu *Optimization options*: *cautious*, que tem uma grande população, implicando em maiores tempos de processamento, entretanto a confiabilidade da resposta é maior; *moderate*, que apresenta um equilíbrio entre tempo de processamento e confiabilidade da resposta, sendo o tamanho de sua população um número intermediário entre o *cautious* e o *aggressive*; e *aggressive*, que tem uma população pequena, permitindo convergir para uma solução mais rapidamente, porém com uma confiabilidade menor.

Neste trabalho, foi utilizada a opção *moderate*. Ainda foi definida a precisão requerida no problema, sendo igual a um, devido à resposta ser dada em unidades. O nível de significância adotado foi 95%, que é o padrão do *software*; enquanto que, para o número de replicações, adotou-se o mesmo utilizado na fase de simulação, ou seja, nove replicações.

#### **e) Análise dos resultados**

Para finalizar a metodologia do estudo de otimização, é realizada a análise dos dados obtidos através da busca efetuada pelo algoritmo otimizante. A análise dos resultados será descrita a seguir no Capítulo 6.

## 6

### Considerações finais

Neste trabalho, conceitos importantes sobre logística e cadeia de suprimentos aplicados à produção do minério de ferro; técnicas de simulação e técnicas de otimização; método de Simulação-Otimização (SO); e planejamento operacional de lavra foram descritos para melhor entendimento da necessidade de se aplicar modelos desse tipo.

Como contribuições à literatura, referente aos assuntos citados no parágrafo anterior, neste trabalho, foi proposto um modelo de SO como estratégia voltada à melhoria de desempenho das operações logísticas referentes à extração de minério de ferro produzido no Estado do Pará. A modelagem limitou-se a etapa Mina, devido esta ser a primeira etapa de análise, proposta no Projeto de Pesquisa citado na Seção 1.3., mostrando que um modelo de Simulação-Otimização, pode ser de grande utilidade na busca das possíveis soluções para o problema.

Este capítulo expõe as conclusões obtidas com os resultados da SO e como estes se relacionam com o objetivo proposto, bem como, apresenta as limitações da pesquisa e as recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

#### 6.1

#### **Análise comparativa dos resultados da Simulação-Otimização**

Ressalta-se que Simulação-Otimização é uma abordagem poderosa, mas não substitui o analista. Neste trabalho, o método consumiu um bom tempo de análise devido à complexidade do modelo e ao número de variáveis no problema.

Conforme citado anteriormente, três cenários foram testados que, para facilitar o entendimento, são chamados de: Cenário 10%, Cenário 15% e Cenário 20%. Neste estudo, a versão utilizada do ProModel<sup>®</sup> não era profissional, logo o *software* SimRunner<sup>®</sup> está limitado a rodar 25 experimentos. Entretanto, dentre os resultados gerados nesses 25 experimentos, em todos os três cenários, o melhor valor encontrado pelo *software* ocorria no experimento 5 (cinco), cujo resultado da função objetivo foi melhor que os resultados dos outros 24. Com isso, a mesma análise das funções objetivo foi realizada na comparação entre os três resultados das otimizações (Experimento cinco do Cenário 10%, experimento cinco do Cenário 15% e experimento cinco do Cenário 20%,).

Deste modo, após a execução das otimizações, foi selecionada aquela que apresentava o melhor resultado (Cenário 15%), cujos valores referentes aos recursos logísticos foram utilizados como entradas (*inputs*) para uma nova simulação, cujos resultados permitiram fazer uma análise comparativa dos resultados das simulações antes e depois da otimização. Conforme observado na Figura 29, a taxa de utilização dos recursos, após a otimização, está mais balanceada, pois a utilização de escavadeiras diminuiu, demonstrando que não há tanta sobrecarga nos equipamentos e que há menor probabilidade de paradas por quebra, entretanto a utilização de carregadeiras aumentou um pouco, devido ter que atender maiores quantidades de escavadeiras. Enquanto a utilização dos caminhões fora de estrada aumentou, pois houve aumento na quantidade de matéria-prima extraída da frente de lavra.

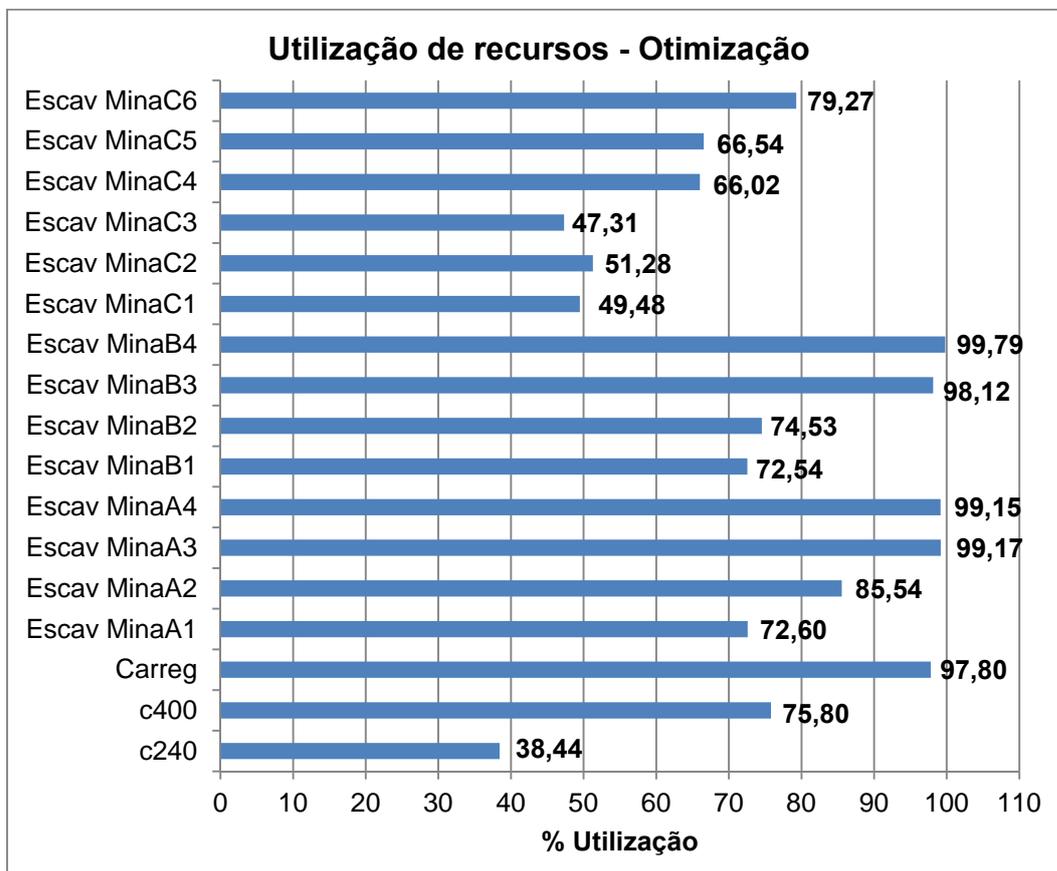


Figura 29 – Taxa de utilização dos recursos no cenário de Simulação-Otimização  
Fonte: Autora (2013)

Para uma análise mais completa, seria importante representar também o incremento ou decréscimo em termos financeiros e o impacto desse balanceamento na manutenção dos recursos, porém tais dados não foram disponibilizados devido a questões de confidencialidade impostas pela empresa.

Deste modo, foi realizada uma análise de impacto no sistema, no que se refere à produção e formação de pulmões. A Figura 30 mostra que a produção, gerada por meio da simulação do cenário atual, é menor que a gerada pelo modelo de simulação do cenário otimizado, indicando que, com o aumento do número de escavadeiras e carregadeiras, os caminhões de ambas as capacidades são “forçados” a trabalhar mais e, conseqüentemente, têm aumentada a sua taxa de utilização e sua produção.

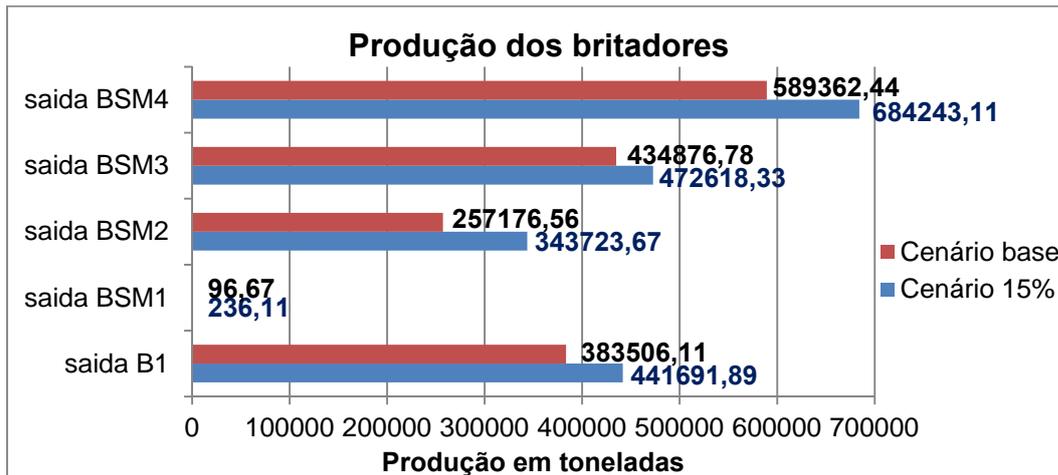


Figura 30 – Quantidade de saída dos britadores (produção em toneladas)  
Fonte: Autora (2013)

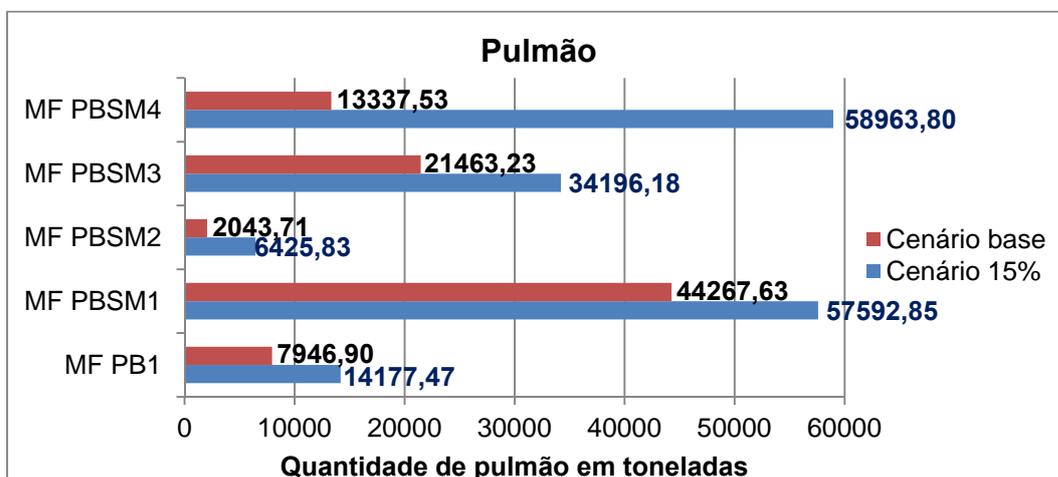


Figura 31 – Formação de pulmão próximo aos britadores (em toneladas)  
Fonte: Autora (2013)

Entretanto, ao mesmo tempo em que essa produção aumenta, também se aumenta a formação de pulmões na mina, conforme Figura 31. Isso acontece, pois, no basculamento do minério de ferro, o caminhão fora de estrada precisa atentar para a capacidade do britador e para a não formação de filas neste. Como o

processo descrito neste estudo se limita ao basculamento do minério no britador, não serão feitas análises referentes à produtividade do equipamento.

Quanto às filas de caminhões fora de estrada, foram observadas diminuições consideráveis nos britadores B1, BSM2, BSM3 e BSM4, visualizadas na Figura 32. O BSM1 não contém fila, pois é abastecido somente por carregadeira.

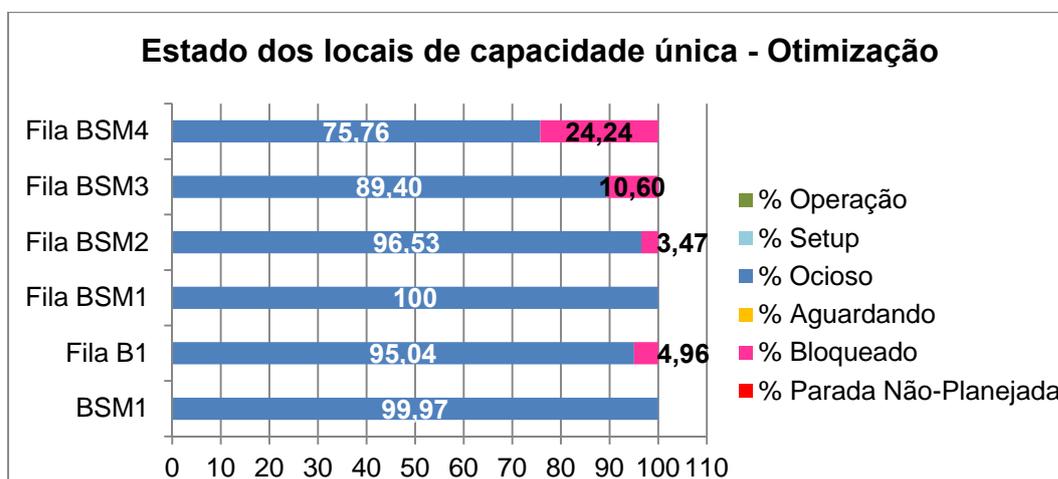


Figura 32 – Análise de fila nos britadores do cenário de Simulação-Otimização  
Fonte: Autora (2013)

Apesar de ter sido aumentada a quantidade de minérios nos pulmões, como estes se apresentam como um recurso logístico associado ao componente estoques, no início da cadeia produtiva de minério de ferro, constituindo materiais de baixo valor agregado, não representam altos custos para sua manutenção ou, mesmo, problemas com espaço para sua armazenagem, pois as minas são extensas, com muito espaço para seu depósito. Desta forma, faz-se necessária uma análise mais detalhada dos recursos logísticos que causam maiores impactos, ou seja, dos recursos referentes a transportes (caminhões fora de estrada) e instalações (escavadeira e carregadeiras), considerando seus níveis de utilização e, a partir deste, indiretamente, seus custos.

Por fim, os resultados da SO, apontam um aumento de 17% na produção de minério de ferro, considerando as saídas dos cinco britadores, bem como a inclusão de 14 escavadeiras (aumento de uma unidade em cada frente de lavra) e 3 carregadeiras, além das atualmente existentes nas minas; entretanto, não houve decréscimos de caminhões fora de estrada (de ambas as capacidades), sendo utilizadas as quantidades atuais. Logo, investir nesses equipamentos resultará em um aumento de 21% na quantidade de material retirado das frentes de lavra (minério de ferro + estéril).

## 6.2

### Considerações Relacionadas ao Alcance do Objetivo Proposto

Este trabalho teve como objetivo geral propor um modelo de Simulação-Otimização como estratégia voltada à melhoria de desempenho das operações logísticas referentes à extração de minério de ferro produzido no Estado do Pará. A proposta foi atendida através da realização do balanceamento das taxas de utilização dos recursos logísticos envolvidos no processo.

Para isso, as etapas críticas do processo foram identificadas e três componentes de desempenho logístico foram propostos: transporte, instalações e estoques. As principais incertezas inerentes aos processos logísticos foram expostas, sendo consideradas as variações no processo produtivo da mineração do ferro, para o desenvolvimento do modelo de simulação computacional. Esse modelo foi construído para ser robusto o suficiente, ter alta usabilidade e ser capaz de ser adaptado, de modo que, futuramente, possa servir como uma ferramenta para apoiar decisões estratégicas e operacionais da empresa em estudo.

Com base nos resultados da simulação, foi identificado um modelo matemático exato que descreveu o sistema logístico atualmente desenvolvido pela empresa, utilizado na otimização das etapas de extração e transporte de minério de ferro. Para a proposição dos cenários, a serem comparados com o atual, foi realizada uma análise de *trade-off* logísticos, pois ao se investir na aquisição de novas escavadeiras e carregadeiras, se ganha em produtividade e em taxa de utilização de caminhões fora de estrada, em tese, tornando o processo menos custoso, considerando exatamente o aumento do nível de utilização deste recurso .

Finalmente, com os resultados gerados na SO, observou-se que o cenário escolhido na otimização, cujos resultados se tornaram *inputs* da nova simulação, tem desempenho melhor que o cenário atual, pois a taxa de utilização dos recursos é mais bem distribuída, assim como a produção de minério de ferro que sai dos britadores, é maior.

## 6.3

### Limitações da pesquisa

Conforme apresentado anteriormente, o processo de unificação de duas técnicas de PO – simulação e otimização – objetivam diminuir algumas limitações

que ambas possuem quando utilizadas de maneira isolada. Neste trabalho, devido à complexidade do sistema, algumas variáveis foram simplificadas e/ou desconsideradas, caracterizando uma limitação na pesquisa.

No arranjo físico das minas, notou-se que são constituídas por diversas cavas e frentes de lavra, de onde são extraídos o minério de ferro e o estéril. Além disso, seu arranjo é dinâmico, ou seja, os pontos de onde são extraídos os materiais mudam com o tempo, conforme as minas vão sendo exploradas. O fato, também influencia a movimentação dos britadores semimóveis, que devem ser reposicionados de tempos em tempos, para ficarem mais próximas às novas frentes de lavra que estão sendo formadas.

Para a construção do modelo de simulação, não foram consideradas essas mudanças de posição das frentes de lavra e dos britadores semimóveis, por se considerar que o tempo necessário para que haja uma mudança em suas posições seja significativamente maior do que o tempo de operação que o modelo simulou (1 semana).

Outro ponto importante sobre o arranjo físico, refere-se aos desníveis de altitude, presentes em todas as minas, cavas e frentes de lavra. Durante o mapeamento das minas, depósitos e britadores, as diferenças de altitude foram desconsideradas, uma vez que não foram disponibilizados dados sobre os caminhos percorridos pelos caminhões fora de estrada, entre os três locais, de modo que as distâncias percorridas foram obtidas através da visualização da região pelo Google Earth, conforme Apêndice C.

A partir desse mapeamento, também se verificou a existência de mais de uma frente de lavra em cada mina e mais de uma região de basculamento nos depósitos. Para o uso na simulação, somente aquelas frentes de lavra consideradas mais significativas foram representadas no modelo.

O modelo também não considerou custos, como de aquisição e manutenção de equipamentos, manutenção de estoques, de produção, de combustível, dentre outros, uma vez que não é objetivo deste trabalho realizar uma análise econômica das operações correntes ou propostas pela SO referentes ao sistema produtivo do minério de ferro analisado. Além disso, tais valores não foram disponibilizados pela empresa objeto do estudo.

Referente à modelagem dos dados, uma das limitações foi a insuficiência de dados sobre o BSM1, abastecido somente por carregadeiras. Nos arquivos

repassados pela empresa não foram encontradas informações sobre as carregadeiras que atuavam nos pulmões voltados ao abastecimento deste britador. Finalmente, houve limitação no fornecimento de dados referentes à manutenção dos equipamentos, logo se buscou utilizar um tempo de simulação não muito longo para não prejudicar a consistência e aderência dos modelos de simulação propostos.

#### **6.4 Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para trabalhos subsequentes a este, propõem-se:

- Modelar o mesmo sistema, utilizando novos cenários utilizados para otimização, como aumento do número de carregadeiras com alocação de, pelo menos, uma para o BSM1, de forma a se obter resultados satisfatórios comparando seus desempenhos;

- Modelagem de outro arranjo físico, associado à simulação e a otimização, para que resultados futuros de médio e longo prazo possam ser alcançados, considerando a mudança de posição dos britadores semimóveis nas minas, devido à formação de novas frentes de lavra, provenientes do alargamento das cavas;

- Realizar nova simulação da etapa Mina, considerando tempos de parada para manutenção e alterando os sistemas de movimentação;

- Realizar análise econômica no sistema em estudo, visto que, oscilações nos preços de vendas dos produtos, nos custos de produção, nos custos de manutenção de estoque e nos custos de aquisição e manutenção de equipamentos, são reais no mercado do minério de ferro. Assim, a partir do uso dessa ferramenta poderão ser criadas oportunidades para a gestão do sistema produtivo, considerando soluções baseadas em parâmetros mais realistas para a redução dos custos na operação;

- Utilizar outras técnicas de otimização, como métodos exatos, heurísticos ou metaheurísticos, incluindo o próprio AG, de forma a estimular a discussão sobre o correto emprego destas ferramentas, explorando e potencializando suas características, para garantir o sucesso da solução do problema ou da concretização da oportunidade.

## Referências bibliográficas

AKSARAYLI, M.; YILDIZ, A. Process optimization with simulation modeling in a manufacturing system. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, Turquia, v. 3, n. 4, p. 318-328, abr. 2011.

ANDRADE, C. E.; BATISTA, F. L. N.; TOSO, R. F. **Modelo de Otimização para Transporte de Cargas em Ambientes Reduzidos**. 2004. 116 f. Monografia (Bacharelado em Ciência da Computação) – Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

ARAÚJO, F. C. R. **Planejamento operacional de lavra com alocação dinâmica de caminhões: abordagens exata e heurística**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

BALLOU, Ronald H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. São Paulo: Atlas, 1993.

BECCENERI, J. C. **Meta-heurísticas e Otimização Combinatória: Aplicações em problemas ambientais**. Minicurso da Escola de Verão do Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada – ELAC. São Paulo: INPE, 2012. Disponível em: <[http://www.lac.inpe.br/elac13/arquivos/MiniCurso\\_02ELAC2012](http://www.lac.inpe.br/elac13/arquivos/MiniCurso_02ELAC2012)>. Acesso em: 10 nov. 2012.

BOWERSOX, D. J.; COOPER, M. B.; CLOSS, D. J. **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. São Paulo: Bookman, 2006.

CAMPELLO, R. E.; MACULAN, N. **Agoritmos e Heurísticas: desenvolvimento e avaliação de performance**. Niterói, RJ: EDUFF, 1994. 228 p.

CAMPOS, L. B. **Modelo de otimização para o planejamento da rede de serviços no transporte ferroviário de cargas**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

CASTRO NETO, L. R. **Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro**. 2006. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de Simulação-Otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro**. 2007. 237 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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

CHAVES, A. A. **Uma meta-heurística híbrida com busca por agrupamentos aplicada a problemas de otimização combinatória**. 2009. 197 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Ed. Do Autor, 2010.

CILO, H. O novo Eldorado da mineração. **Revista Isto é Dinheiro – NEGÓCIOS**, 754. ed. São Paulo: Editora Três, mar. 2012. Disponível em: <[http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/79639\\_O+NOVO+ELDORADO+DA+MINERACAO](http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/79639_O+NOVO+ELDORADO+DA+MINERACAO)>. Acesso em: 25 de jun. 2012.

COELHO, C. F.; MORALES, G. **Comparação de modais de transporte para escoamento de minério: indicadores de sustentabilidade**. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 8, 2012, Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg8/anais/T12\\_0564\\_2639.pdf](http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg8/anais/T12_0564_2639.pdf)>. Acesso em: 16 nov. 2012.

CORMEN, T. H. *et al.* **Algoritmos: Teoria e Prática**. Tradução da Segunda Edição Americana por Vandenberg D. de Souza. Rio de Janeiro: Campus, 2001. P. 763-807.

COSTA, F. P. **Aplicações de técnicas de otimização a problemas de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. 2005. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

DEVORE, J. L. **Probability & Statistics for Engineering and the Sciences**. 8. ed. Boston: Cengage Learning, 2012.

DÍAS, J. A.; PÉREZ, I. G. Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season. In: 32TH WINTER SIMULATION CONFERENCE – WSC '00, 2000. **Proceedings of the 32th Winter Simulation Conference – WSC '00**. San Diego, California: Society for Computer Simulation International, 2000, v. 2, p. 1114-1117.

ESPECIAL LOGÍSTICA. Vale News. **Especial Logística**, [S.l.], fev. 2011. Disponível em: <[http://saladeimprensa.vale.com/pt/book/pages/vale\\_news.pdf](http://saladeimprensa.vale.com/pt/book/pages/vale_news.pdf)>. Acesso em: 12 mai. 2012.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS. **Análise Espacial da Mineração no Pará**. São Paulo: FIPE, mar. 2009.

GALLO, A. *et al.* O sistema logístico brasileiro. **Revista científica do ITPAC**, Tocantins, v. 3, n. 3, jul. 2010.

GOMES, C. F. S.; RIBEIRO, P. C. C. **Gestão da cadeia de suprimentos integrada à tecnologia da informação**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. 6. ed. Brasília-DF: IBRAM, 2011. 28 p.

JULIÁ, A. F. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro**. 2010. 168 f. Dissertação (Mestrado Interdepartamental em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Logísticos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3 ed. Arizona: McGraw Hill Inc., 1999.

LOPES, H. S. *et al.* Simulação do transporte de minério de ferro na Hidrovia do Araguaia-Tocantins. **Revista Gestão Industrial**, Paraná, v. 7, n. 1, p. 43-71, 2011.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

MEIRELES, R. P. L. **Modelagem e simulação de malha ferroviária em circuito fechado da Estrada de Ferro Vitória a Minas**. 2010. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Perfil da Mineração de Ferro**. [s.l.]: MME, ago. 2009. 63 p. Relatório Técnico 18.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NANDA, S.; PENDHARKAR, P. Linear models for minimizing misclassification costs in bankruptcy prediction. **International Journal of Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management**, v. 10, n. 3, p. 155, 2001.

PANORAMIO. Extração de minério de ferro. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/76085356>>. Acesso em: 12 mar. 2013.

PARDINI, D.; MATUCK, P. J. P. Mudanças nas práticas organizacionais com a implementação do programa de Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (GCS) em uma multinacional do setor siderúrgico. **Revista de Gestão da Tecnologia e Sistemas de Informação**, v. 9, n. 1, p. 147-170, jan/abr. 2012.

PARRAGH, S. N.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F. A survey on pickup and delivery problems. Part II: Transportation between pickup and delivery locations. **Journal für Betriebswirtschaft**, Austria, v. 58, n. 1, p. 21-51, abr. 2008.

RAFAELY, B.; BENNELL, J. A. Optimisation of FTSE 100 tracker funds: A comparison of genetic algorithms and quadratic programming. **Managerial Finance**, Patrington, v. 32, n. 6, p. 477-492, 2006.

SAMARCO. Desenvolvido pela Samarco Mineração, 2012. Apresenta textos sobre a empresa e sua atuação. Disponível em: <<http://www.samarco.com.br/>>. Acesso em: 15 de mai. 2012.

SAMPAIO, J. A.; JULIANELLI, K. M.; PENNA, M. T. M. **Ferro – Mina N5 – Carajás / CVRD**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

SANTOS, F. M. C. S. **Pré-despacho da geração em sistemas de energia elétrica na presença de usinas eólicas**. 2007. 91 f. Proposta de Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SAVELSBERGH, M. W. P.; SOL, M. *The general pickup and delivery problem*. **Transportation Science**, Georgia, v. 29, n. 1, p. 17-29, fev. 1995.

SECRETARIA DE ESTADO DE INDÚSTRIA, COMÉRCIO E MINERAÇÃO. **Plano de Mineração do Estado do Pará 2013-2030**. Pará: SEICOM, abr. 2012. Relato da 2ª Oficina “APL de base mineral: oleiro cerâmico e artesanato mineral”.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS MINERAIS DO ESTADO DO PARÁ. **Anuário Mineral do Pará**. 1. ed. Belém: SIMINERAL, 2012. 164 p.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. rev. atual. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.

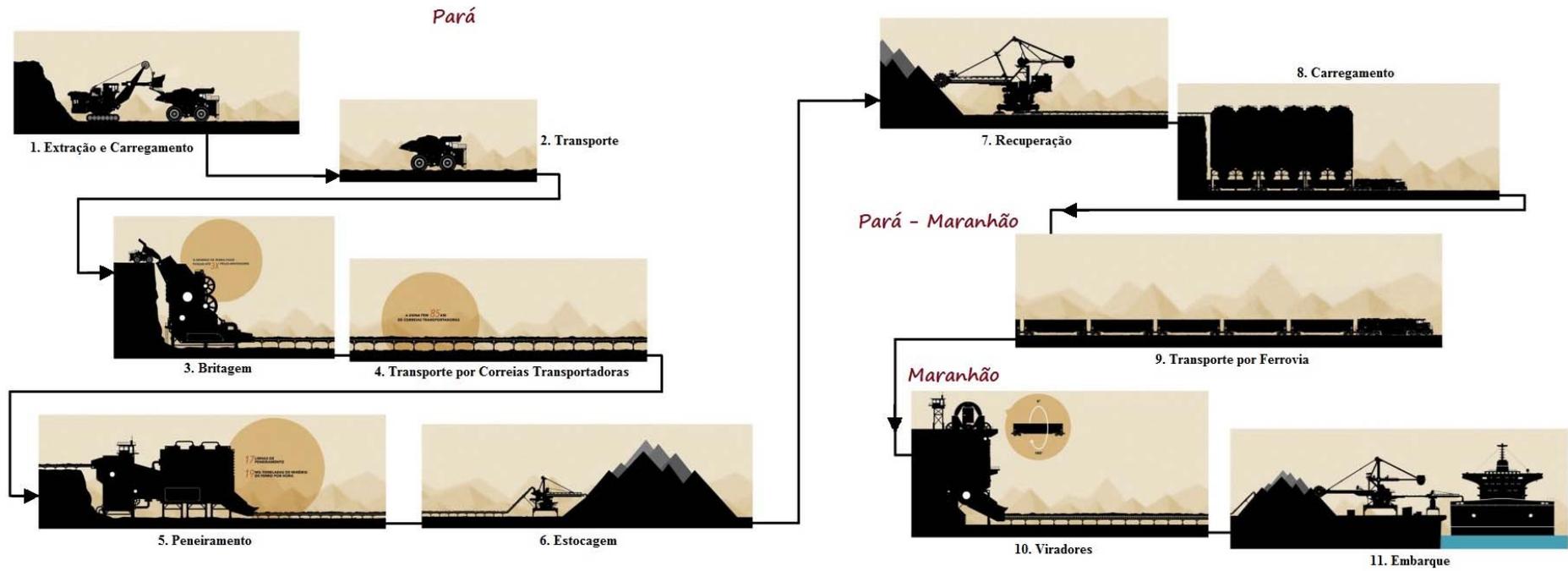
TAYLOR, S. L. **Analyzing Methods of Mitigating Initialization Bias in Transportation Simulation Models**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado)

- School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta (EUA). 2010.

TORGA, B. L. M. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2007.

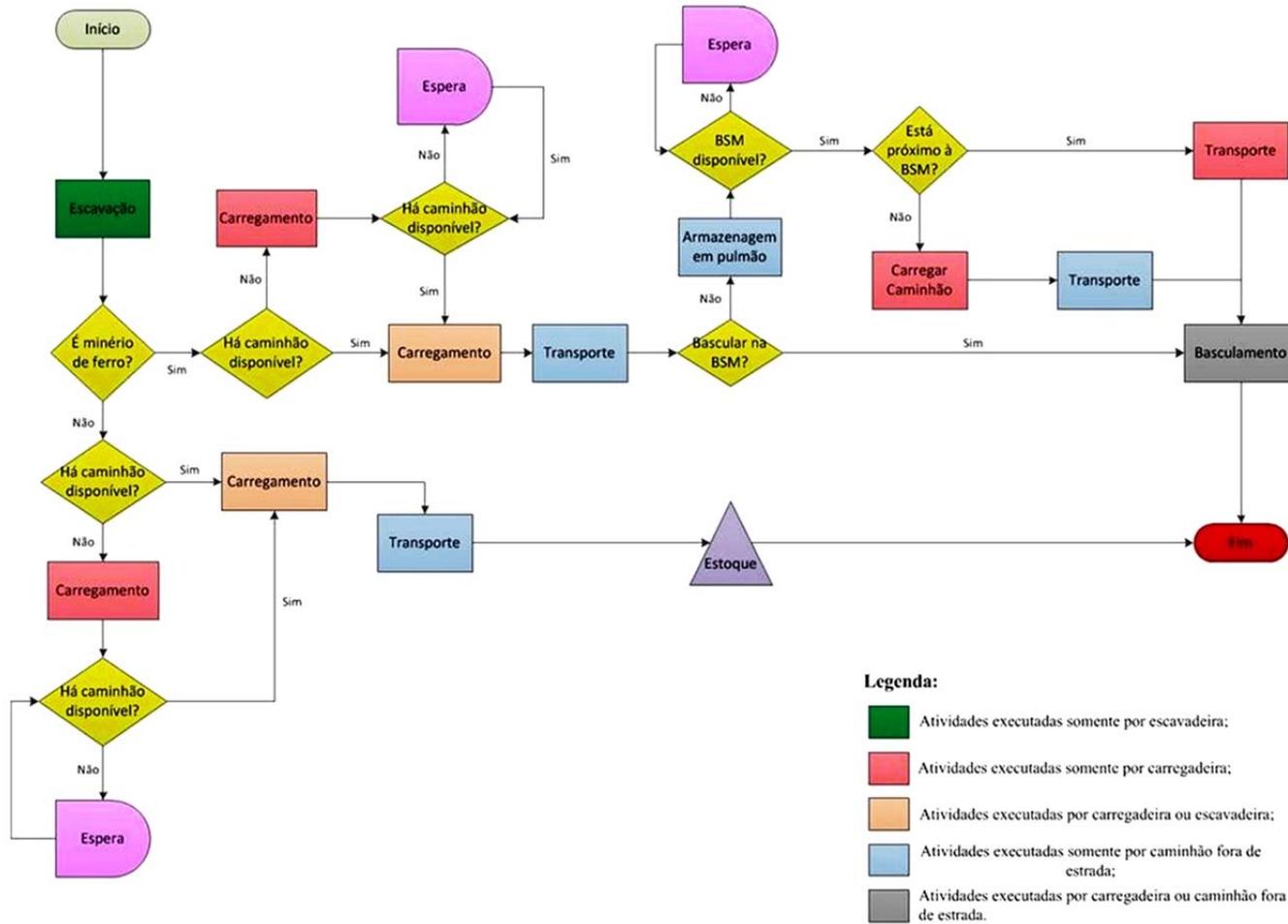
VALE. Desenvolvido pela Vale, 2010. Apresenta textos sobre a empresa e sua atuação. Disponível em: <<http://www.vale.com.br/>>. Acesso em: 15 de mai. 2012.

### APÊNDICE A – Processo produtivo do minério de ferro da empresa em estudo

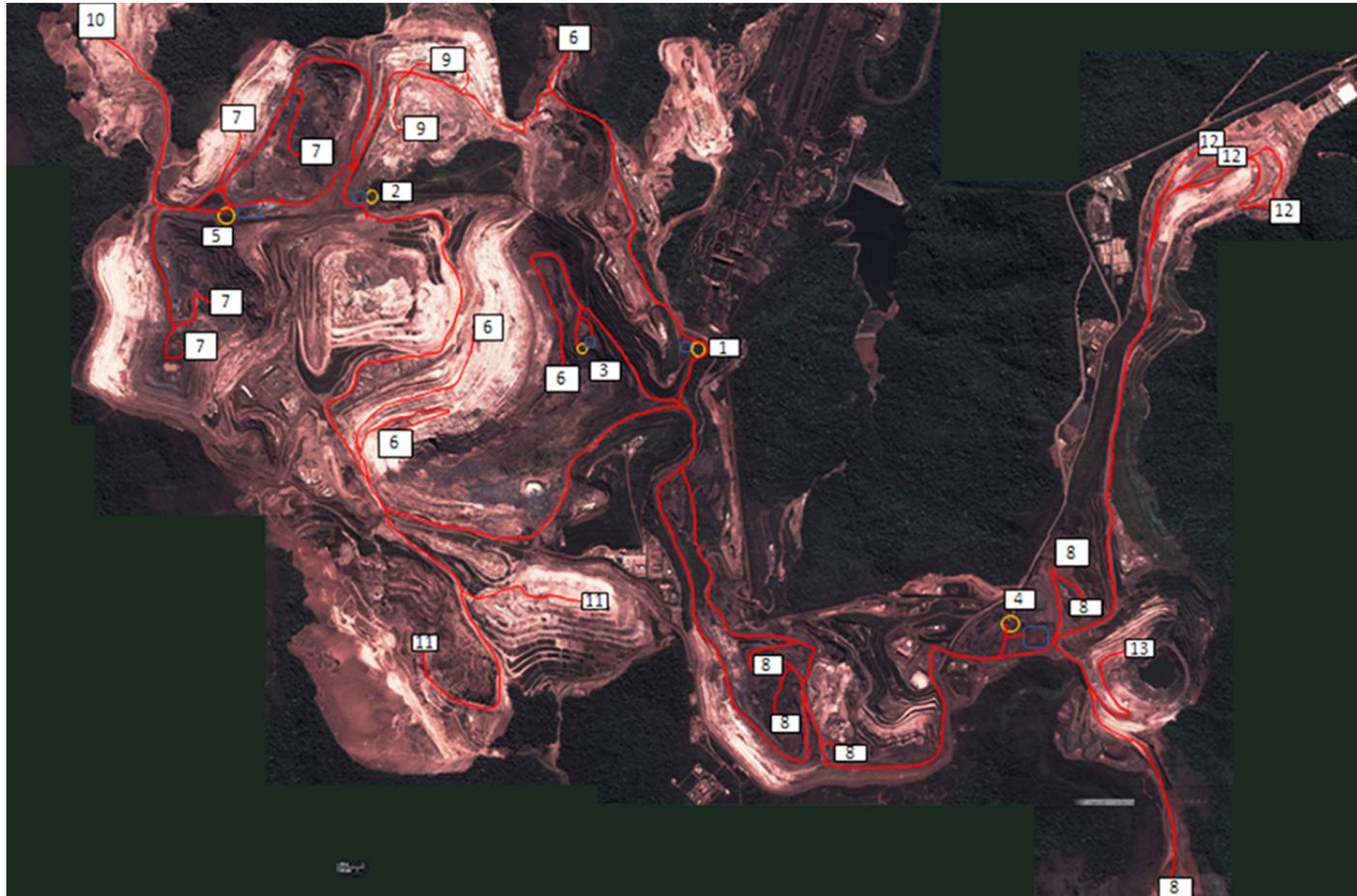


Fonte: Autora (2012) baseado em dados da empresa

### APÊNDICE B – Mapeamento das atividades de Mina



Fonte: Autora, 2012

**APÊNDICE C – Arranjo físico das minas, britadores e depósitos****Legenda:**

- 1- B1
- 2- BSM1
- 3- BSM2
- 4- BSM3
- 5- BSM4
- 6- Mina A
- 7- Mina B
- 8- Mina C
- 9- Dep Oeste 1
- 10- Dep Oeste 2
- 11- Dep Sul
- 12- Dep Norte
- 13- Dep Mina C

Fonte: Autora (2013) baseado em *Google Earth*