

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO  
DOUTORADO EM ADMINISTRAÇÃO**

**LUÍS FELIPE RIEHS CAMARGO**

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE  
APOIO À DECISÃO BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO**

**São Leopoldo**

**2013**

LUÍS FELIPE RIEHS CAMARGO

PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE  
APOIO À DECISÃO BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL  
NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Administração.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Valle Antunes Júnior

São Leopoldo

2013

C172p      Camargo, Luís Felipe Riehs  
Proposição de um método para desenvolvimento de sistema de apoio à decisão baseado em modelos de simulação computacional na indústria de mineração / por Luís Felipe Riehs Camargo. -- 2013.  
307 f. ; 30cm.

Tese (Doutorado) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos. Programa de Pós-Graduação em Administração, São Leopoldo, RS, 2013.  
Orientador: Prof. Dr. José Antônio Valle Antunes Júnior.

1. Administração - Empresa - Processo decisório. 2. Simulação computacional. 3. Pensamento sistêmico. 4. Modelagem matemática. 5. Indústria de mineração. I. Título. II. Antunes Júnior, José Antônio Valle.

CDU 658.012.4

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Luís Felipe Riehs Camargo

Título: Proposição de um Método para Desenvolvimento de Sistema de Apoio à Decisão Baseado em Modelos de Simulação Computacional na Indústria de Mineração

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Administração.

Aprovado em 31 de maio de 2013

### BANCA EXAMINADORA

---

Rui Carlos Botter - USP

---

Ricardo Augusto Cassel - UFRGS

---

Luis Henrique Rodrigues - UNISINOS

---

Rafael Teixeira - UNISINOS

Prof. Dr. Dr. José Antônio Valle Antunes Júnior (Orientador)



## AGRADECIMENTOS

Ao final desta caminhada chamada doutorado, que não representa um fim da linha, vale tecer agradecimentos a todos aqueles que passaram pelo meu caminho e que foram importantes para a realização desta etapa.

Não há como não iniciar os meus agradecimentos pela minha amada esposa Laura, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e incentivando de todas as formas possíveis. Adjetivos para qualificá-la são muitos: amiga, parceira, compreensiva, amorosa... Laura muito obrigado por tudo que você fez, faz e sei que fará, inclusive por ter que ler e entender um pouco sobre estatística e mineração! Eu te amo!

Gostaria de agradecer aquelas pessoas que não necessariamente impactaram o trabalho ‘técnico’ realizado durante o doutorado, mas que nos bastidores fizeram o show acontecer, seja incentivando, seja propiciando momentos de descontração. Dessa forma, agradeço aos meus pais Paulo e Zuleika, aos meus ‘pais emprestados’ Irineu e Angélica, aos meus irmãos Ricardo e Ana. Hoje compreendo a importância da família para nosso crescimento. Ao mesmo tempo em que agradeço, peço desculpas pelos momentos em que não pude dar toda a atenção que vocês merecem! Não há como esquecer a minha querida avó Haydee, por quem tenho muito amor, que sempre acendeu uma vela para o seu santinho para que tudo desse certo. Não há como não destacar um agradecimento muito especial ao meu avô Norman (*in memorium*). Com certeza, um dos homens que forjou o meu caráter, o meu jeito de ser, e meu modo de ver e compreender o mundo.

Faço meus agradecimentos a duas pessoas que foram decisivas na minha resolução de me aventurar na academia, em especial no doutorado. Meu padrinho Sérgio, a quem eu tenho como uma figura de ‘homem’, e que muito me incentivou e apoiou para alçar elevados voos. Também ao professor e amigo Guilherme Liberali, que me apontou o trilho da modelagem e disponibilizou inúmeras oportunidades para o meu desenvolvimento acadêmico/profissional, culminando com a orientação do meu Estágio doutoral, realizado na *Erasmus University*.

Agradeço imensamente ao meu orientar e amigo Junico Antunes, que embarcou no avião quando ela já estava em voo. Obrigado por abrir as portas da sua casa, em alguns casos em pleno domingo, para debatermos a tese. As tuas revisões, contribuições e sugestões foram muito relevantes para o trabalho.

Agradeço profundamente ao amigo e professor, a quem tenho admiração, e que foi o grande idealizador da ideia contida na pesquisa, Luis Henrique Rodrigues. Aliás, foi ele quem abriu as portas da empresa Samarco, parceira na construção teórica/prática da tese, e do

GMAP. O que parecia apenas mais um projeto de simulação do GMAP, acabou virando o tema da minha pesquisa de doutorado e as portas de entrada para o estabelecimento de relações com pessoas muito especiais do grupo. Inicialmente, destaco aqueles envolvidos no desenvolvimento do simulador computacional na Samarco. Dessa forma, quero agradecer a quatro pessoas, a quem hoje tenho carinho e admiração, nominadas a seguir. Maria Isabel Morandi a quem Deus agraciou com enorme inteligência. Como esquecer dos finais de semana na sua casa trabalhando no SIMCAPS? Rodrigo Castilho, exímio programador e entendedor de simulação. Por fim, meu amigão Dieter Goldmeyer, que sempre se colocou à disposição para discutir conceitos, testar abordagens novas e desenvolver o modelo. Apesar de iniciar meus agradecimentos por aqueles envolvidos no SIMCAPS, devo minha gratidão a outros colegas e amigos do GMAP. Inicio pelo ‘*brother*’ Daniel Lacerda, um apaixonado pela academia, e que muito me ajudou desde a minha qualificação quando ainda não tinha certezas em relação ao tema de pesquisa. É um grande prazer poder conviver em momentos extratrabalho (qual a graça da vida sem um Fifa, por exemplo). Destaco, ainda, o amigo Secundino Corcini, a quem admiro como pessoa e profissional, a Aline Dresh, com quem tive acalorados debates sobre método de pesquisa e o Gustavo Rocha, sempre disposto a ajudar no que fosse preciso.

Agradeço a todos os professores e funcionários do PPGA da Unisinos. Nomino aqueles que marcaram profundamente a minha caminhada na academia: professores Achyles, Ely e Astor Concedo meus agradecimentos aos professores, funcionários e estudantes da *Erasmus University*, que tive o privilégio de conhecer durante a realização do meu estágio doutoral. Nesta estada tive o prazer de conviver com o povo holandês, compartilhando dos seus hábitos.

Agradeço a Samarco, nas figuras de Cristiano Pimenta, Eduardo Pessoti e Alexandre Oliveira, pela oportunidade de desenvolvimento do estudo na empresa. Devo também meus agradecimentos a todos os profissionais da Samarco que auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

Por fim, destaco ainda uma menção a CAPES e, por consequência, ao Governo Brasileiro, que me agraciou com bolsas de estudos, tanto no Brasil quanto na Holanda, para a realização dos meus objetivos.

*“Não tentes ser bem sucedido, tenta antes ser um homem de valor”*  
Albert Einstein

## RESUMO

As decisões são essenciais para a manutenção e o crescimento da firma em ambiente incerto e competitivo. As decisões são, igualmente, importantes e difíceis de serem tomadas devido à incerteza dos seus potenciais resultados. Identificou-se uma carência, na literatura de modelagem e simulação, de métodos para suportar decisões que envolvem as operações e que integrem o sistemas de produção e de manufatura e apresentem o desempenho do sistema de modo antecipado, em termos da qualidade do produto e produtividade do sistema. Esta tese apresenta um método para a construção de um sistema de apoio à decisão, baseado no pensamento sistêmico e em simulação computacional. O método possibilita avaliar de forma dinâmica, estocástica, circular e sistêmica o impacto das decisões da cadeia produtiva na área de mineração frente ao fenômeno da degradação e da variabilidade da qualidade da matéria-prima. A aplicação do método em um caso real mostrou-se factível. Além disso, ilustrou-se situações em que o modelo de simulação foi utilizado para suportar decisões. A pesquisa demonstra, ainda, através de um modelo computacional, o efeito da degradação da qualidade da matéria-prima no desempenho do sistema produtivo.

**Palavras Chaves:** Simulação computacional. Pensamento sistêmico. Modelagem matemática. Indústria de mineração.

## ABSTRACT

Decisions are essential for the maintenance and growth of the firm in competitive and uncertain environment. Decisions are also important and difficult to be taken due to the uncertainty of their future potential results. This dissertation tries to fill a gap in the literature of modeling and simulation methods to support operations decisions and setting operating policies in the operations. There are few approaches at the specialized OR/MS literature that integrate the production system and the manufacturing system and provide system performance in terms of quality the product and productivity of the system. This dissertation presents a method for the construction of a decision support system, based on systems thinking (soft OR) and computer simulation (hard OR). The method allows evaluating dynamically, stochastic and systemic the impact of the decisions of the supply chain in the mining area and deal with the phenomenon of degradation and variability in the quality of the raw material. The application of the method on a real case demonstrated to be feasible. The dissertation also illustrated situations in which the simulation model was used to support decisions at Samarco Company. The study further demonstrates, with the computational model developed, the effect of the degradation of the quality of raw material in the overall system performance.

**Keywords:** Computational simulation, mining industry, systems thinking, mathematical modeling

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação gráfica das características elementares da qualidade da matéria-prima .....	27
Figura 2: Elementos básicos que compõem o objeto de estudo .....	30
Figura 3: Fases do ciclo de vida de uma mina.....	45
Figura 4: Representação conceitual do esgotamento e da degradação do minério de ferro .....	46
Figura 5: Desenho inicial do framework conceitual.....	50
Figura 6: Visão geral do sistema de manufatura e de produção .....	52
Figura 7: Primeira atualização do desenho do framework conceitual.....	60
Figura 8: O movimento dos sistemas .....	64
Figura 9: Número de artigos e citações relacionados à chave de busca “operation research” .	71
Figura 10: Adequação dos diferentes métodos, técnicas e ferramentas de modelagem (PO <i>hard</i> ) em relação ao nível de complexidade e de variabilidade no sistema analisado. ....	75
Figura 11: Gráfico de Evaporação das Nuvens para o conflito dialético entre as abordagens <i>hard</i> e <i>soft</i> .....	82
Figura 12: Segunda atualização do desenho do framework conceitual.....	87
Figura 13: Diferença entre modelo determinístico e modelo probabilístico. ....	90
Figura 14: Macro etapas do método de desenvolvimento de modelos de simulação.....	98
Figura 15: Função distribuição de probabilidade e função de distribuição acumulada.....	104
Figura 16: Mecanismo de funcionamento da estimação do valor de uma variável em um modelo computacional.....	105
Figura 17: Ilustração da representação da variabilidade em um sistema através de distribuições de probabilidade independentes. ....	106
Figura 18: Processo para testar a aderência de modelos probabilísticos.....	109
Figura 19: Visão geral do framework conceitual da pesquisa.....	122
Figura 20: As rotas de produção típicas da produção de minério de ferro e os diferentes relacionamentos entre a mineração e a siderurgia. ....	127
Figura 21: Fluxograma típico de tratamento de minério .....	129
Figura 22: Método de investigação: modelagem e simulação.....	146
Figura 23: Interação entre teoria e o método de investigação de modelagem e simulação....	147
Figura 24: Método de trabalho .....	148
Figura 25: Sugestão do Artefato: Integração abordagens <i>hard</i> e <i>soft</i> para resolução de problemas. ....	158

Figura 26: Esquema ilustrativo do mecanismo tradicional de modelagem da variabilidade .	160
Figura 27: Esquema ilustrativo do mecanismo proposto para a modelagem da variabilidade .....	160
Figura 28: Ilustração da lógica de funcionamento do mecanismo proposto .....	164
Figura 29: Visão geral do Artefato – método para construção de modelos de simulação .....	166
Figura 30: Detalhamento do método para construção de modelos de simulação – Artefato .	167
Figura 31: Localização geográfica das plantas industriais da Samarco e o trajeto dos minerodutos .....	188
Figura 32: Estrutura sistêmica expondo o trade-off entre a qualidade do produto e a produtividade da cadeia produtiva.....	190
Figura 33: Relação de causa-e-efeito entre as variáveis de desempenho do sistema de manufatura da Samarco .....	194
Figura 34: Representação simplificada da cadeia produtiva consentida pelo grupo de trabalho .....	198
Figura 35: Fluxo de atividades para estimação dos modelos de regressão .....	212
Figura 36: Detalhamento do simulador .....	216
Figura 37: Comportamento da produção de pelota ao longo do tempo.....	232
Figura 38: Visão da tela inicial do SIMCAPS.....	257
Figura 39: Fluxograma da lógica de acionamento de correias/processos no SIMCAPS .....	261
Figura 40: Exemplo da planilha Excel de entrada de dados.....	267
Figura 41: Planilha Excel, dados de correias e processos .....	269
Figura 42: Planilha Excel, dados de ocupação de pilhas.....	269
Figura 43: Planilha Excel, dados de qualidade.....	270
Figura 44: Planilha Excel, valores finais das variáveis observadas .....	270
Figura 45: Arquivo trace (de resultados intermediários).....	271
Figura 46: Regra de alinhamento do Mineroduto 1.....	272
Figura 47: Regra de alinhamento do Mineroduto 2.....	273
Figura 48: Regra de retorno de material da Bacia de Polpa .....	273
Figura 49: Distribuição de material que sai do Filtro 1 .....	274
Figura 50: Interrupção dos Filtros e Prensas .....	274
Figura 51: Retorno de material dos pátios de <i>Pellet feed</i> .....	275

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Visão geral do referencial teórico.....	44
Quadro 2: Resumo das características da indústria de propriedade .....	58
Quadro 3: Diferenças fundamentais das abordagens <i>soft</i> e <i>hard</i> da PO.....	78
Quadro 4: Desdobramento dos método para desenvolvimento de modelos de simulação.....	99
Quadro 5: Síntese dos artigos apresentados na revisão realizada por Knights e Bonates (1999) .....	134
Quadro 6: Comparação das abordagens disponíveis na literatura para tratar o problema de pesquisa em comparação com a modelagem proposta .....	152
Quadro 7: Detalhes dos encontros realizados para a construção da estrutura sistêmica no caso estudado .....	193
Quadro 8: Classes de variáveis mapeadas ao longo da construção da estrutura sistêmica ....	196
Quadro 9: Resumo dos modelos matemáticos necessárias para a representação da cadeia produtiva da Samarco. ....	203
Quadro 10: Resumo dos tempos de processamento médio, em minutos, de cada operação da cadeia produtiva da Samarco .....	204
Quadro 11: Resumo das capacidades nominais dos estoques representados no fluxo de processo .....	205
Quadro 12: Pilhas e características de qualidade coletadas ao longo da simulação.....	260
Quadro 13: Opções de distribuições probabilísticas disponíveis no SIMCAPS .....	265
Quadro 14: Resumo das variáveis operação de extração .....	281
Quadro 15: Resumo das variáveis operação de concentração .....	282
Quadro 16: Resumo das variáveis operação de mineroduto.....	285
Quadro 17: Resumo das variáveis operação de aglomeração.....	285
Quadro 18: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão da etapa de extração.....	290
Quadro 19: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão da etapa de concentração .....	(Continua) 290
Quadro 20: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão do processo mineroduto.....	296
Quadro 21: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão da etapa de pelotização .....	(Continua) 297



Quadro 22: Histograma da variável dependente dos modelos de regressão da variável taxa de tamboramento .....	306
Observa-se dos histogramas apresentados no Quadro 22 que as variáveis dependentes apresentam um comportamento similar a uma distribuição normal.....	306

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Síntese dos modelos de regressão estimados (Continua).....	214
Tabela 2: Resultados da validação do modelo de simulação - produção .....	220
Tabela 3: Resultado da validação das qualidades simuladas.....	220
Tabela 4: Produção de pelota de ferro no Modelo Tradicional (síntese resultados das 31 replicações).....	229
Tabela 5: Produção de pelota de ferro no Modelo Proposto (síntese dos resultados das 31 replicações).....	230
Tabela 6: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 1 – campanha PBF .....	303
Tabela 7: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 1 – campanha PDR .....	303
Tabela 8: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 2 – campanha PBF .....	304
Tabela 9: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 2 – campanha PDR .....	304
Tabela 10: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 3 – campanha PBF.....	304
Tabela 11: Parâmetros modelo de regressão taxa de tamboramento da pelota da Usina 3 – campanha PDR .....	305
Tabela 12: Resultados do teste de Goldfeld-Quandt para os modelos que explicam a taxa de tamboramento .....	306

## LISTA DE SIGLAS

ARIMA	<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CLS	<i>Campaign Low Silica</i>
CNS	<i>Campaign Normal Silica</i>
EURO	<i>Association of European Operational Research Societies</i>
FDA	Função Distribuição Acumulada
FDP	Função Distribuição de Probabilidade
GMAP	Grupo em Modelagem para Aprendizagem
GPSS	<i>General Purpose Simulation System</i>
IMPIM	<i>Integrated Multidimensional Process Improvement Methodology</i>
INFORMS	<i>Institute for Operations Research and the Management Science</i>
JORC	<i>Joint Ore Reserves Committee</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MS	<i>Management Science</i>
OR	<i>Operation Research</i>
PBF	<i>Pellet Blast Furnace</i>
PDR	<i>Pellet Direct Reduction</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PO	Pesquisa operacional
PSM	<i>Problem Structuring Methods</i>
PPC	Perdas Por Calcinação
ROM	<i>Run Of Mine</i>
SIMCAPS	Simulador da Cadeia Produtiva da Samarco
SOBRAPO	Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional
TBF	<i>Time Between Fails</i>
TTR	<i>Time To Repair</i>
VPL	Valor Presente Líquido
PPC	Perda Por Calcinação
USGS	<i>United State Geological Survey</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 O CONTEXTO E A QUESTÃO DE PESQUISA .....	25
1.2 OBJETIVO DA PESQUISA .....	32
1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	33
<b>1.3.1 Justificativa sob a ótica acadêmico-científica .....</b>	<b>34</b>
<b>1.3.2 Justificativa sob a ótica empresarial.....</b>	<b>38</b>
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	40
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	42
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>44</b>
2.1 A DEGRADAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS .....	44
<b>2.1.1 Síntese da seção.....</b>	<b>49</b>
2.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO E DE MANUFATURA.....	51
<b>2.2.1 As melhorias nos sistema de produção .....</b>	<b>54</b>
<b>2.2.2 A questão da variabilidade .....</b>	<b>55</b>
<b>2.2.3 Caracterização da indústria de propriedade sob a ótica do sistema de produção e de manufatura.....</b>	<b>57</b>
<b>2.2.4 Síntese da Seção .....</b>	<b>58</b>
2.3 MODELAGEM DE SISTEMAS.....	61
<b>2.3.1 Considerações sobre a Teoria dos Sistemas .....</b>	<b>64</b>
<b>2.3.2 A Pesquisa Operacional: o estabelecimento de uma área do conhecimento .....</b>	<b>69</b>
2.3.2.1 As abordagens da Pesquisa Operacional Tradicional ( <i>Hard</i> ).....	74
2.3.2.2 A Modelagem <i>soft</i> .....	76
2.3.2.3 Integração entre as abordagens <i>Hard</i> e <i>Soft</i> .....	81
<b>2.3.3 Modelagem de sistemas produtivos e sistemas de manufatura .....</b>	<b>83</b>
<b>2.3.4 Síntese da seção.....</b>	<b>85</b>
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	88
<b>2.4.1 Elementos, conceitos e terminologia básicos em simulação.....</b>	<b>96</b>
<b>2.4.2 Método para desenvolvimento de modelos de simulação .....</b>	<b>98</b>
<b>2.4.3 Princípios de funcionamento da simulação estocástica.....</b>	<b>102</b>
<b>2.4.4 Análise de dados em simulação .....</b>	<b>107</b>
2.4.4.1 Análise dos dados de entrada do modelo .....	108

2.4.4.2 Análise dos dados de saída do modelo .....	111
<b>2.4.5 Modelos de simulação que avaliam a produtividade do sistema e a qualidade do produto .....</b>	<b>115</b>
<b>2.4.6 Síntese da Seção .....</b>	<b>118</b>
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	120
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO DE ESTUDO.....</b>	<b>123</b>
3.1 A UNIDADE DE ANÁLISE: A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO.....	123
<b>3.1.1 Caracterização do sistema de produção e de manufatura.....</b>	<b>125</b>
<b>3.1.2 A questão da variabilidade na indústria de mineração .....</b>	<b>130</b>
3.2 MODELAGEM APLICADA AO SETOR DE MINERAÇÃO.....	131
<b>3.2.1 A Simulação computacional na indústria de mineração.....</b>	<b>134</b>
<b>3.2.2 Os desafios para a modelagem do sistema de produção na indústria de mineração .....</b>	<b>139</b>
<b>4 MÉTODO .....</b>	<b>141</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	141
4.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	142
4.3 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	144
4.4 MÉTODO DE TRABALHO .....	147
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	156
<b>5 PROPOSIÇÃO DO MÉTODO PARA O DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO: ARTEFATO.....</b>	<b>157</b>
5.1 MECANISMO PROPOSTO PARA A MODELAGEM DA VARIABILIDADE E DA DEGRADAÇÃO .....	159
<b>5.1.1 Representação lógica e computacional do mecanismo proposto.....</b>	<b>163</b>
5.2 DETALHAMENTO DO ARTEFATO .....	165
<b>5.2.1 Compreensão do sistema.....</b>	<b>168</b>
5.2.1.1 Etapa 1.1: Definir o sistema de interesse e planejar o estudo.....	168
5.2.1.2 Etapa 1.2: Definir as variáveis de resposta do sistema.....	169
5.2.1.3 Etapa 1.3: Construir a estrutura sistêmica .....	169
<b>5.2.2 Construção do modelo conceitual .....</b>	<b>171</b>
5.2.2.1 Etapa 2.1: Compreender o funcionamento do sistema .....	172
5.2.2.2 Etapa 2.2. Propor o fluxo conceitual do sistema e detalhar os processos .....	173

5.2.2.3 Etapa 2.3: Especificar as regras e os parâmetros para representação do sistema.....	174
5.2.2.4 Etapa 2.4: Documentar e validar o modelo conceitual.....	174
<b>5.2.3 Desenvolvimento do modelo .....</b>	<b>175</b>
5.2.3.1 Etapa 3.1: Coletar os dados .....	176
5.2.3.2 Etapa 3.2: Tratar os dados de entrada do modelo.....	176
5.2.3.3 Etapa 3.3 Verificar e validar o modelo.....	179
<b>5.2.4 Utilização do modelo .....</b>	<b>181</b>
5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ARTEFATO PROPOSTO.....	182
<b>6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NO CASO ESTUDADO A PARTIR DO ARTEFATO.....</b>	<b>185</b>
6.1 DESCRIÇÃO DO CASO .....	185
<b>6.1.1 Motivação para avaliação do método na empresa estudada .....</b>	<b>189</b>
6.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO ARTEFATO PROPOSTO NA SAMARCO .....	192
<b>6.2.1 Compreensão do sistema.....</b>	<b>193</b>
<b>6.2.2 Modelo conceitual do sistema .....</b>	<b>196</b>
<b>6.2.3 Desenvolvimento do modelo computacional .....</b>	<b>208</b>
6.2.3.1 Verificação e Validação do Modelo Computacional.....	216
6.3 ILUSTRAÇÃO DO USO DO MODELO COMPUTACIONAL NA SAMARCO.....	221
<b>6.3.1 Análise de investimento de uma nova pilha de minério (ROM) .....</b>	<b>222</b>
<b>6.3.2 Determinação política de manutenção do Concentrador 1 .....</b>	<b>223</b>
6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	225
<b>7 O PROBLEMA DA DEGRADAÇÃO TRATADO PELO MODELO .....</b>	<b>228</b>
7.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	233
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>235</b>
8.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	240
8.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	242
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>235</b>
<b>ANEXO A: DETALHAMENTO DO SIMULADOR COMPUTACIONAL.....</b>	<b>257</b>
<b>ANEXO B: A ESTRUTURA SISTÊMICA.....</b>	<b>276</b>

<b>ANEXO C: MAPEAMENTO DAS VARIÁVEIS DO MODELO CONCEITUAL NO CASO DA SAMARCO.....</b>	<b>277</b>
<b>ANEXO D: CÓDIGO EM R PARA TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS DOS DADOS DO CASO ESTUDADO .....</b>	<b>289</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração mineral é essencial para a manutenção e a expansão do padrão de consumo da sociedade moderna. A elevação do consumo de bens de capital, associada aos vultosos investimentos em infraestrutura em países como China e Índia, tem promovido um crescimento significativo no consumo de minerais, dentre eles o minério de ferro. Tigre (1998) observa que as indústrias produtoras de minerais primários (ferro, carvão, níquel, etc.), em conjunto com as de petróleo e de petroquímicos, destacaram-se no século 20 nos Estados Unidos e na Europa. Segundo Tigre (1998), foram essas indústrias as responsáveis pela impulsão do crescimento econômico ocorrido durante a revolução industrial, assim como nos períodos posteriores às duas guerras mundiais.

Se por um lado, para empresas como a Apple, o valor agregado dos produtos não é sustentado pelo sistema de produção, mas sim pelo design, marketing, inovação tecnológica e sistema de distribuição, por outro lado, para produtores de commodities, como o minério de ferro, o sistema de produção exerce um papel essencial para a competitividade da firma. Segundo Xing e Detert (2010), no caso da Apple, em 2009 o custo de produção de um Iphone era de 178,96 dólares, dos quais apenas 4,4% referiam-se ao custo de produção propriamente dito. No mesmo período, o preço de venda do aparelho nos Estados Unidos era de 500 dólares, o que explicita a parcela pouco significativa do sistema de produção e de manufatura no desempenho da Apple. Já no caso das produtoras de commodities, a competitividade do produto se dá basicamente em função do custo de produção e da qualidade do produto, fatores diretamente relacionados às características das reservas minerais e à configuração do sistema de produção e de manufatura. (CGEE, 2010). A relevância do sistema produtivo varia em função do negócio da empresa, conforme exemplificado no caso da Apple e da produtora de commodities. O foco desta pesquisa converge para as situações em que o sistema produtivo exerce um papel central na competitividade da empresa, como no caso da indústria de mineração.

Em uma indústria como a de mineração, onde a competitividade depende basicamente da produtividade do sistema de produção, da qualidade do produto e do custo de produção, manter e elevar a competitividade é um desafio relevante para as empresas. (GAGGIATO, 2010). Primeiro devido aos elevados investimentos necessários para promover melhorias e ampliações no sistema produtivo e, segundo, em função da natureza da matéria-prima. Matérias-primas como o minério de ferro são recursos não renováveis e, portanto, esgotam-se



com o passar do tempo. Em terceiro lugar, ainda relacionado à matéria-prima, a degradação impacta negativamente o desempenho do sistema produtivo (CGEE, 2010).

Se por um lado os investimentos em mineração são vultosos, por outro eles são necessários para sustentar o desempenho e, conseqüentemente, a competitividade da empresa. Dessa forma, os gestores necessitam apresentar aos acionistas, ou aos níveis hierárquicos mais altos, o potencial impacto das decisões de investimento, seja na ampliação de capacidade ou na melhoria de processo. (HAYES et al., 2008). Uma característica importante que circunda o processo decisório é que os resultados de uma decisão tomada em um dado momento no tempo e no espaço somente são observados no futuro. (ROGERS; BLENKO, 2006). Ou seja, não há certezas de benefícios associados à tomada de decisão. Uma vez que existem incertezas associadas aos resultados previstos em um investimento, o uso de abordagens para identificar a opção mais recomendada torna-se relevante. Portanto, justificar um investimento demanda um exercício, por parte do tomador de decisão, de antecipar o potencial ganho da decisão no futuro. Em uma situação em que o tomador de decisão possui total compreensão do sistema sob análise, a consequência futura da decisão pode ser obtida facilmente, tornando a tarefa mais simples. No entanto, essa situação idealizada não ocorre no mundo real.

Avaliar o impacto da decisão envolvendo um sistema de produção e de manufatura não é simples, devido à natureza de tais conjuntos. Primeiro porque esses sistemas são compostos por partes interconectadas que interagem entre si. Uma mudança em uma parte do sistema conduz a alterações nas demais partes. Dessa forma, por exemplo, elevar a capacidade de uma das partes do sistema não garante que esse aumento se reflita no sistema como um todo. Um segundo fator é a variabilidade<sup>1</sup> presente nos sistemas, a qual afeta o desempenho do sistema. Um terceiro ponto é a complexidade<sup>2</sup> em termos de compreensão das inter-relações existentes entre os elementos dos sistemas e a elevada quantidade de informações que necessitam ser processadas para justificar o investimento de modo integrado. (ROBINSON, 2004).

---

<sup>1</sup> A definição de variabilidade nesta pesquisa consiste na quantidade de não uniformidades de uma classe de entidade. (HOPP; SPEARMAN, 2001).

<sup>2</sup> Para o propósito desta pesquisa, baseado em Robinson (2004) e Sterman (2000), distingue-se a complexidade em dois tipos: combinatória e dinâmica. A complexidade combinatória está relacionada ao número de componentes do sistema e às possíveis combinações entre eles. Ou seja, a complexidade está associada à amplitude de possibilidades para a solução de um problema, por exemplo, a escala de pilotos e comissários de uma companhia aérea que detém uma ampla malha aérea. Por outro lado, a complexidade dinâmica não está relacionada ao tamanho do sistema, mas sim com a dinâmica resultante da interação dos componentes de um sistema ao longo do tempo. A complexidade dinâmica está relacionada com a compreensão das relações acumulativas do sistema. Por exemplo, o jogo beer game apresenta baixa complexidade combinatória, mas interações que tornam a previsão de resultados complexa. (STERMAN, 2000).

A literatura sobre justificativa de investimento em tecnologia no sistema de produção geralmente destaca o uso da abordagem de retorno do investimento em termos de análises financeiras. (MEREDITH; SURESH, 1986). Essas análises usualmente assumem que a performance do sistema de produção, após a realização do investimento, é conhecida, ou seja, que o ganho nas saídas desejadas (por exemplo, peças, qualidade, etc.) e/ou a redução das entradas (por exemplo, matéria-prima) são percebidos. Dessa forma, as justificativas de investimento para uma dada opção pressupõem que o desempenho do sistema gerado pelo investimento seja conhecido. Geralmente, o potencial ganho acrescido ao sistema por um investimento é realizado no âmbito local e não de uma forma sistêmica, com análise do seu desempenho global. Além disso, outras dimensões importantes como a qualidade do produto, por exemplo, são negligenciadas. Antunes (1998, p. 343), no que tange à análise de investimento nos sistemas de produção e de manufatura, defende que:

torna-se impossível realizar qualquer tipo de Análise de Investimentos relacionado aos Sistemas Produtivos que não levem em consideração uma visão global do sistema, ou seja, sem que seja feita uma modelagem global do problema. Este tópico é profundamente importante na medida em que aponta para a necessidade das Empresas revisarem sua forma tradicional de tomada de decisão baseada na procura de ótimos locais que, em geral, não correspondem a decisões ótimas caso se considere o desempenho global da produção, ou seja, os ótimos globais.

Observa-se a necessidade de compreender e considerar o desempenho global<sup>3</sup> do sistema de produção para analisar os investimentos relativos aos sistemas de produção e de manufatura. Na gestão de qualquer tipo de sistema, a compreensão do funcionamento assume uma questão elementar e central para suportar decisões. (BANKS, 1998; PIDD, 1998; ROBINSON, 2004). Assim, a modelagem de sistema surge como alternativa para suportar as decisões e a resolução de problemas nas organizações. (ACKOFF, 1974; BLACK, 1998; CHECKLAND, 1999; PIDD, 2004a; PIDD, 1998; DAM et al., 2009; ROBINSON, 2004). Segundo Pidd (1998), a modelagem de sistemas é um importante mecanismo de suporte à decisão, que possibilita recriar um sistema real em um ambiente controlável, viabilizando a compreensão, a manipulação e a verificação do comportamento do sistema.

Apesar da dificuldade em mapear as origens dos estudos sobre modelagem de sistemas, indícios apontam para o trabalho seminal de Bertalanffy, que propõe uma teoria geral dos sistemas. (CHECKLAND, 1999). Uma das ideias centrais da teoria proposta por

---

<sup>3</sup> Entende-se por comportamento global ou desempenho global o desempenho do sistema como um todo e não por partes. Por exemplo, num contexto de produção, deve-se observar a produção horária de produto acabado e não a produção horária de uma parte do produto.

Bertalanffy é a análise do sistema como um todo, em detrimento da análise das partes proposta pela abordagem reducionista. As tentativas de Bertalanffy de desenvolver uma teoria geral dos sistemas não atenderam de modo satisfatório as diferentes áreas do conhecimento que a teoria pretendia cobrir, como sociologia, ciências naturais e engenharia, fazendo com que os estudos relacionados aos sistemas tomassem diferentes caminhos e elevada amplitude. (CHECKLAND, 1999). O desenvolvimento dessa área de estudo organizou-se sob o título de ciência dos sistemas, segundo Flood e Carson, (1993) ou movimento dos sistemas<sup>4</sup>, de acordo com Checkland (1999), e refere-se a todas as iniciativas, em diferentes áreas de estudo, que exploram a ideia do pensamento holístico em contraposição ao reducionismo.

Conforme sintetizado por Checkland (1999), uma das vertentes de desenvolvimento dentro do movimento dos sistemas, denominada de resolução de problemas (*problem-solving*), caracteriza-se por utilizar os princípios sistêmicos para a compreensão e solução de problemas do mundo real. Segundo Ackoff (1974), a abordagem<sup>5</sup> de sistemas (*system approach*), que busca a resolução de problemas a partir da visão de sistemas, resultou no desenvolvimento das abordagens de modelagem de sistemas *hard* e *soft*<sup>6</sup>.

Quanto à modelagem de sistemas produtivos, diferentes métodos técnicas e ferramentas estão disponíveis para o desenvolvimento de modelos para suportar decisões. Dentre as metodologias *hard* de modelagem de sistemas produtivos, a simulação computacional apresenta papel de destaque para a compreensão integrada do comportamento do sistema que apresenta variabilidade, complexidade e interconectividade. (BANKS, 1998; PIDD, 2004a; ROBINSON, 2004). Assim, a simulação possibilita imitar o comportamento do sistema, viabilizando a avaliação das consequências de uma decisão de produção sob uma ótica global do sistema. (BANKS, 1998; PIDD, 2004a; ROBINSON, 2004). Hollocks (2005) destaca que a simulação é uma das técnicas da Pesquisa Operacional (PO) clássica (*hard*) mais utilizada nos mais distintos segmentos industriais, como a produção (operação), finanças, saúde, serviços. Nessa linha, Jeffrey e Seaton (1995) também apresentam, após uma revisão da literatura, que a simulação é a técnica de modelagem mais utilizada.

<sup>4</sup> Do inglês “the system movement” (Checkland, 1999, pg. 92).

<sup>5</sup> O termo ‘abordagem’ é empregado com o significado apresentado em Checkland (1999). O autor diferencia abordagem, metodologia, método e técnica. ‘Abordagem’, segundo Checkland, denota uma filosofia (diretrizes amplas). Em uma abordagem pode haver diferentes metodologias: programas genéricos para desdobrar diretrizes em ações. Uma metodologia, por sua vez, utiliza vários métodos - programas específicos de ações - e ferramentas para operacionalizar a investigação dos problemas dentro de cada disciplina. (KASPER, 2000).

<sup>6</sup> A modelagem de sistemas *hard* e *soft* é um termo apresentado por Checkland (1999) ao se referir às abordagens tradicionais (clássicas) da modelagem de sistemas, centradas na modelagem quantitativa, e ao pressuposto de que o problema é compreendido. Enquanto que, as abordagens *soft* são menos restritivas e focam mais na compreensão do sistema. Essa discussão será ampliada e definida no Capítulo 2.

Se por um lado a literatura destaca a relevância da modelagem de sistemas de produção para suportar diferentes níveis e tipos de decisão, conforme destacado por Ackoff (1974), Black (1998), Checkland (1999), Pidd (2004a), Pidd (1998) e Robinson (2004), por outro lado dá pouca atenção à modelagem que aponte alternativa para a construção de modelos que descrevam o comportamento do sistema produtivo tratando simultaneamente a produtividade do sistema, a qualidade do produto e os custos produtivos. (CHAN; SPEDDING, 2003). Mingers e White (2010) reforçam a ideia de que os estudos envolvendo as operações das organizações geralmente focam na melhoria da eficiência do sistema ou em função da qualidade, ou em relação a produtividade. Apesar de essas dimensões serem inter-relacionadas, acabam sendo tratadas isoladamente.

A compreensão do desempenho global futuro do sistema produtivo e, conseqüentemente, da sua performance em termos de produtividade, qualidade do produto e custo é relevante para o suporte às decisões que envolvem recursos financeiros, em especial na indústria de mineração. Se a qualidade do produto, a produtividade e o custo são dimensões importantes para a indústria de propriedade<sup>7</sup> em geral, para a indústria de mineração, em específico, recebem papel de destaque. Segundo Topp et al. (2008), o sistema produtivo na mineração deve entregar ao mercado produtos que atendam a um conjunto de características de qualidade e minerar um volume de produção que justifique o capital investido. Consuegra (2010) destaca que as características da qualidade da matéria-prima, as flutuações do preço no mercado e os requisitos técnicos do produto definidos pelo mercado levam as empresas de mineração a enfrentar o problema da necessidade de constante desenvolvimento tecnológico para elevar o lucro, melhorar a utilização das reservas e atender às expectativas dos investidores.

Dentre as características da indústria de propriedade destacam-se as ideias de que o processo produtivo é integrado fisicamente, fazendo com que alterações em uma dada operação (atividade) reflitam em operações anteriores e posteriores, de que a qualidade do produto é dependente da qualidade da matéria-prima e de que as instalações industriais são projetadas para operarem sem interrupções, com elevado fator de utilização e em função da matéria-prima disponível. (HANSEN, 1996; FRANSOO; RUTTEN, 1994). Por exemplo, o

---

<sup>7</sup> Salerno (1987) apresenta uma tipologia para classificação das indústrias em função das características das operações: i) indústria de propriedade e; ii) indústria de forma. A indústria de propriedade tem como foco a fabricação de produtos que atendam a um conjunto de propriedades físicas e químicas e não à forma física dos produtos. São exemplos desse tipo de indústria as refinarias de petróleo, as siderúrgicas, as produtoras de papel, as beneficiadoras de minério de ferro, as produtoras de químicos em geral, entre outras. Já a indústria de forma tem a preocupação fundamental nos aspectos relacionados à forma do produto, como as dimensões, cor, tipo, acabamento, entre outros. Alguns exemplos desse tipo de indústria são a produção de automóveis, eletroeletrônicos, máquinas e equipamentos.

processo produtivo para extrair minério de ferro de elevada qualidade, por exemplo, é diferente daquele necessário para extrair minério de baixa qualidade<sup>8</sup>.

As decisões de ampliação ou melhorias nas operações que envolvem investimentos são essenciais para a manutenção e o crescimento das organizações. E é justamente no contexto das empresas mineradoras que as principais decisões na produção, como capacidade, sistema de informação, equipamento alternativo ou adoção de diferentes iniciativas de melhoria, requerem, normalmente, elevados investimentos. (CGEE, 2010; TOPP et al., 2008; LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). Desta forma, as propostas de investimento competem com outras, de diferentes processos, bem como com demandas de outras áreas, como a de marketing, por exemplo. Portanto, justificar decisões considerando que os recursos, principalmente financeiros e humanos, são limitados, é uma realidade para os gestores. (HAYES et al., 2008).

Desse modo, esta tese trata da modelagem de sistemas empresariais para suporte às decisões de investimento e políticas operacionais, destacando especificamente os sistemas de produção e de manufatura no contexto da indústria de mineração. A seguir, são apresentadas informações sobre o trabalho, ressaltando, inicialmente, o contexto e a apresentação da questão de pesquisa. Em seguida, são destacados os objetivos, seguidos pelas justificativas que sustentam o estudo. Por fim, são descritas as delimitações e, na sequência, a estrutura da tese.

## 1.1 O CONTEXTO E A QUESTÃO DE PESQUISA

A taxa de extração de recursos naturais cresceu substancialmente após a revolução industrial. (HUMPHREYS, 2010). A exploração de minério de ferro, por exemplo, acentuou-se para sustentar o desenvolvimento maciço da infraestrutura (estradas de ferro, estradas, pontes, prédios, etc.), impulsionado pela revolução promovida pela máquina a vapor e, também, pela invenção e difusão do motor à combustão, no início dos anos 1900. Se por um lado o consumo per capita de aço, cuja matéria-prima principal é o minério de ferro, encontra-se estável em economias desenvolvidas como Estados Unidos e Europa, por outro lado em economias emergentes, como Índia e, principalmente, China, há expectativa de crescimento da utilização do produto, em função da previsão de investimentos em infraestrutura e da elevação dos padrões de consumo dessas sociedades. (HUMPHREYS, 2010).

---

<sup>8</sup> Define-se minério de alta qualidade aquele que apresenta elevado teor de ferro (>65%) e baixo aquele que apresenta teores inferiores a 60%.

De modo geral, para atender à demanda por minério de ferro, as empresas mineradoras investem em aumento de capacidade produtiva. (TOPP et al., 2008). No entanto, o minério é um recurso não renovável e, portanto, na medida em que o mineral de melhor qualidade é explorado, o custo de extração torna-se mais elevado devido à redução da qualidade da matéria-prima remanescente na reserva. (TOPP et al., 2008; CGEE, 2010). Assim, segundo Topp et al., (2008) são necessários não só investimentos em capacidade, mas também em melhorias e em tecnologia de produção, a fim de que se garanta a produtividade do sistema e a qualidade dos produtos entregues pelos sistemas produtivos. Além disso, o lado da demanda, ou seja, a indústria siderúrgica, pressiona o lado da oferta para entregar minério que atenda aos parâmetros de qualidade. (CGEE, 2010).

A qualidade da matéria-prima<sup>9</sup> disponível nas jazidas é central para o desempenho do sistema de produção e de manufatura de uma empresa mineradora, dado que essas características impactam a qualidade do produto e a produtividade do sistema (TOPP et al., 2008; KLIPPEL, 2007). Nesse sentido, Salerno (1987), Hansen (1996) e Fransoo e Rutten (1994) destacam que as inter-relações entre a qualidade da matéria-prima e o desempenho e o volume de produção são características relevantes da indústria de propriedade. A qualidade da matéria-prima disponível nas reservas apresenta duas características elementares, que são: i) elevada variação da qualidade da matéria-prima e; ii) degradação da qualidade da matéria-prima ao longo do tempo.

A elevada variação da qualidade da matéria-prima se deve à gênese da jazida mineral, ou seja, ao fato de que a constituição da reserva mineral não é uniforme. Isso quer dizer que ao medir a composição do minério extraído em diferentes instantes de tempo, observam-se variações em relação a um valor de referência. Em termos matemáticos, significa que a qualidade apresenta um valor médio, porém com elevado desvio padrão ao longo do tempo, quando analisado um conjunto de dados. (KLIPPEL, 2007).

Já a degradação da qualidade da matéria-prima refere-se à redução da qualidade com o passar do tempo. Esse fenômeno ocorre devido ao esgotamento da reserva, pois na medida em que a exploração é realizada, o minério que segue na reserva, ainda inexplorado, vai apresentando qualidade inferior daquela obtida no início da vida da mina. (CGEE, 2010). Quando observado um horizonte de tempo curto, por exemplo, um mês, geralmente o efeito da degradação pode ser desprezado, mas no longo prazo (três anos ou mais) esse efeito é

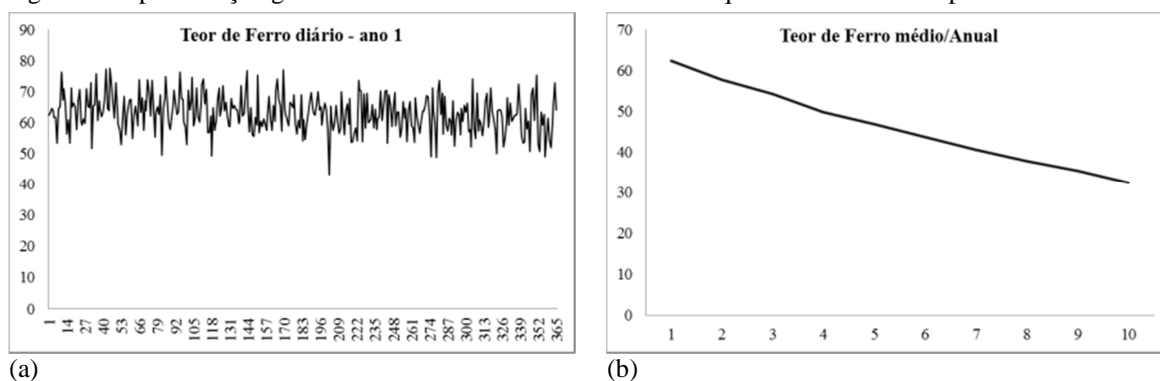
---

<sup>9</sup> A qualidade da matéria-prima na indústria mineral refere-se a um conjunto de características físicas, químicas e mineralógicas do minério. Por exemplo, a qualidade do minério de ferro refere-se ao teor contido de ferro (quanto maior, melhor é o minério), e de sílica, alumina e fósforo (quanto maior, pior é o minério). (CGEE, 2010).

significativo. (PRIOR et al., 2012; TOPP et al., 2008; VUUREN; STRENGERS; VRIES, 1999).

O esquema da Figura 1 representa graficamente as duas características elementares descritas anteriormente sobre a qualidade da matéria-prima processada por um sistema produtivo. No exemplo ilustrado, observa-se a qualidade do teor de ferro. A Figura 1 (a) apresenta o teor de ferro médio diário do minério por um período de um ano, apontando a variabilidade do teor de ferro. A Figura 1 (b) representa o teor de ferro médio anual observado ao longo de dez anos consecutivos. Nesta figura, percebe-se a redução do teor de ferro ao longo do tempo, ou seja, o fenômeno da degradação.

Figura 1: Representação gráfica das características elementares da qualidade da matéria-prima<sup>10</sup>



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme já destacado, de modo geral, existem limitações na literatura para tratar em um modelo o desempenho de um sistema produtivo em termos de produtividade e qualidade do produto simultaneamente. (CHAN; SPEDDING, 2003; MINGERS; WHITE, 2010). Isso é perceptível no contexto da indústria de mineração, dado que as características da qualidade da matéria-prima impactam tanto a produtividade quanto a qualidade do produto. Então, identifica-se a necessidade de compreender e prever as inter-relações e circularidades entre esses elementos, a fim de, auxiliar na justificativa de investimento e definição de políticas operacionais. Na mineração, os investimentos são elevados e, segundo Topp et al. (2008), levam tempo para serem efetivados. Como desconsiderar as características elementares da qualidade da matéria-prima para suportar os investimentos?

As condições impostas pelas duas características elementares da qualidade da matéria-prima (degradação e variabilidade da qualidade da matéria-prima) ao processo produtivo não ocorrem na indústria de forma, na qual as especificações e tolerâncias da matéria-prima são

<sup>10</sup> Cabe destacar que os valores representados nos gráficos são apenas ilustrativos.

conhecidas. (KLIPPEL, 2007). Assim, na indústria de forma, os sistemas de controle existentes na produção e na manufatura garantem que a matéria-prima atenda às especificações e às tolerâncias descritas. Desse modo, as abordagens existentes para a modelagem do sistema de produção ou de manufatura, apresentadas no contexto da indústria de forma, não são adequadas à indústria de propriedade, em especial para lidar com as características intrínsecas da qualidade da matéria-prima. No caso da indústria de mineração em especial, os sistemas de controle, apesar de estarem presentes no processo são, geralmente ineficientes, dada a complexidade observada em um sistema de processamento mineral. (HODOUIN; JÄMSÄ-JOUNELA, 2001; HODOUIN, 2011). A ineficiência dos sistemas de controle automatizados, aliada a um sistema de metas e indicadores ineficientes, pode levar à intervenção humana no sistema de manufatura para tentar contornar o problema da variabilidade e degradação da qualidade da matéria-prima. As interferências dos operadores no processo geram circularidades e ruídos que tornam ainda mais difícil a modelagem desse ambiente. (HODOUIN; JÄMSÄ-JOUNELA, 2001; HODOUIN, 2011).

Estudos que buscam explicar as inter-relações entre a qualidade da matéria-prima, a produtividade do sistema produtivo e a qualidade do produto são escassos. No desenvolvimento do conhecimento sobre o tema recursos naturais, em especial com relação às duas características elementares da qualidade da matéria-prima, diferentes aspectos são objeto de estudo na literatura, em especial nas áreas de economia e PO. Dentre os objetos abordados na economia, dois tópicos são centrais, tratando das seguintes questões: i) a degradação e o esgotamento dos recursos naturais e; ii) o impacto negativo causado pela exploração mineral no meio ambiente (poluição). Na evolução do pensamento econômico, o recurso natural apresenta um importante papel, sendo integrado à literatura econômica desde o século XVIII pelos fisiocratas<sup>11</sup>. No entanto, a sua importância nas formulações teóricas perdeu espaço com o passar do tempo, passando a ser considerado mero componente, como a mão de obra e a matéria-prima, e, portanto, subordinado aos mecanismos econômicos. Se por um lado para os fisiocratas, economistas pré-clássicos do século XVIII, a ordem econômica estaria subordinada ao meio ambiente, por outro lado, na corrente teórica neoclássica, corrente hegemônica ao longo do século XX, os recursos naturais são tratados como fatores de produção escassos, do mesmo modo que a mão de obra. (AMAZONAS, 2001).

No nível da empresa/firma, ou seja, das especificidades do sistema de produção e de manufatura, observam-se trabalhos que tratam da modelagem das operações de mineração a

---

<sup>11</sup> Denomina-se fisiocratas os economistas integrantes da primeira escola da economia científica. (AMAZONAS, 1994).



partir das abordagens disponibilizadas pela PO clássica (*hard*). Nesse sentido, Newman et al., (2010), Bjorndal et al., (2011) e Weintraub e Miranda (2007) realizaram uma revisão na literatura sobre PO e recursos naturais, de modo geral, e sobre mineração, em específico, em busca de proposições analíticas para a resolução de problemas relacionados à exploração mineral. Esses trabalhos apontam as principais classes de modelos destacadas na literatura que são: i) modelo que envolve a teoria econômica para identificar os limites dos recursos minerais (das minas), ou seja, o tamanho das reservas minerais ainda não mineradas; ii) modelos de otimização para sequenciar a extração do minério de modo a maximizar os ganhos financeiros; e iii) modelos baseados na teoria das opções reais para maximizar o valor dos recursos minerais. Os modelos propostos até consideram as características elementares da qualidade da matéria-prima para indicar a sequência ótima de extração do minério, no intuito de atender o volume e a qualidade desejados. No entanto, o que essas abordagens negligenciam ou desconsideram é o desempenho do sistema de produção e de manufatura, seja analisando o fluxo global de produção, seja analisando as relações entre o sistema de produção e as características da matéria-prima, com ponto relevante para o fluxo de produção, conforme destacado por Fransoo e Rutten (1994), Hansen (1996), Klippel, (2007), Topp et al., (2008), Newman et al., (2010) e Caro et al. (2007). Os trabalhos analisados, em especial Caro et al. (2007), destacam a carência mencionada, afirmando que há uma lacuna de modelos e metodologias que possibilitem a análise do planejamento de mina integrado com o restante da cadeia produtiva de minério, com a finalidade de suportar o processo decisório de investimento em ampliação ou melhoria.

Ainda na área de PO, a revista *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* publicou uma edição especial, em 1999, para expor o estado da arte, na época, sobre simulação computacional na indústria de mineração. Para isso, foram publicados sete artigos sobre simulação em diferentes regiões do planeta, como: América do Sul, Europa, Austrália, Ásia, África do Sul, Estados Unidos e Canadá. (KNIGHTS; BONATES, 1999; BASU; BAAFI, 1999; KONYUKH; GALIYEV; LI, 1999; PANAGIOTOU, 1999; STURGUL, 1999; TURNER, 1999; VAGENAS, 1999). No entanto, a revisão apresentada nesses artigos não apresentou nenhum modelo que contemple simultaneamente as duas características elementares da qualidade da matéria-prima, em especial a degradação. Assim, tradicionalmente, a literatura modela o sistema de produção de modo a representar as operações de mineração tendo somente a produtividade como variável de resposta do modelo. Os modelos descritos nos artigos geralmente avaliam o fluxo de material no tempo e no espaço, mas não consideram a influência da degradação da qualidade da matéria-prima no

desempenho do sistema. Na literatura recente sobre simulação, apesar de haver destaque para a importância do impacto da qualidade da matéria-prima na produtividade e na qualidade do produto, a degradação também não é contemplada nos modelos (EVERETT, 1996, 2001; HOWARD; CARSON; EVERETT, 2005).

O objeto de estudo desta pesquisa visa compreender o efeito das duas características elementares da qualidade da matéria-prima dos recursos naturais (variabilidade e degradação) no sistema de produção e de manufatura, de modo integrado e dinâmico, no contexto da indústria de mineração. Essa compreensão tem como foco suportar decisões de investimentos no sistema produtivo. Assim sendo, delimita-se o objeto de estudo em três componentes básicos, que são: i) a modelagem de sistemas; ii) o sistema de produção e de manufatura e; iii) as duas características elementares da qualidade da matéria-prima (degradação e variabilidade).

Figura 2: Elementos básicos que compõem o objeto de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

Devido às duas características fundamentais dos recursos minerais, sustentar a eficiência do sistema produtivo e de manufatura é um desafio para as empresas mineradoras, que assumem que a eficiência do sistema depende não só da produtividade, mas também da qualidade do produto, da confiabilidade da entrega e dos custos produtivos. As consequências, no tempo e no espaço, da variabilidade e da degradação são produtos com perda de qualidade, elevação dos custos de produção e redução na confiabilidade de entrega. (TOPP et al., 2008; CGEE, 2010).

Observa-se, a partir de uma análise da literatura, carência de estudos que possibilitem a modelagem do processo produtivo e que compreendam o sistema produtivo (processos e operações) e o sistema de manufatura de modo integrado. Faz-se necessário na indústria de mineração avaliar de forma integrada e dinâmica o desempenho do sistema, ou seja, considerar, em toda a cadeia produtiva, as interações da qualidade do minério (matéria-prima) com a produtividade e as intervenções humanas no sistema, os efeitos de redesenho de processo (fluxo global de produção) e as melhorias na tecnologia intrínseca da mineração. Normalmente, os modelos ou expressam o desempenho a partir do volume de produção (produtividade) e do tempo de processamento, de espera, etc., ou consideram a modelagem da qualidade do produto, conforme destacado por Chan e Spedding (2003) e Mingers e White (2010).

Assim sendo, a questão a ser respondida por esta tese é: **Em uma dada firma produtora de minério de ferro, como a dinâmica e as circularidades provocadas pela degradação e pela variabilidade da qualidade da matéria-prima interferem no desempenho global do processo produtivo, em termos da produtividade horária do sistema e da qualidade do produto?**

Dado o problema de pesquisa exposto, cabe uma definição clara do que se entende por produtividade e qualidade. O termo produtividade refere-se a uma medida de desempenho de um sistema e é definido, de forma geral, como a quantidade total produzida dividida pela quantidade total de entradas utilizadas para produzir. (MARTINICH, 2008). Desse modo, a produtividade é dada pela razão entre as saídas e as entradas. Esse simples conceito abre espaço para diferentes formas de medir o que vem a ser as saídas e as entradas do sistema, o que dificulta o consenso sobre a medição da produtividade. (SCHMENNER; SWINK, 1998; TOPP et al., 2008; MARTINICH, 2008). Para Martinich (2008), a medição da produtividade depende da circunstância e do propósito para o qual se deseja realizar a análise.

A medida de produtividade mais usual é a horária, que é dada pela razão entre o total produzido por um sistema (unidades, volume, etc.) e o delta tempo considerado para atingir a produção observada. (ANTUNES et al., 2008). A visão de produção horária deriva dos conceitos da 'Administração Científica' apresentados por Taylor. Portanto, segundo Antunes et al. (2008), chama-se essa medida de 'produtividade taylorista'. Para o propósito desta pesquisa utiliza-se a produtividade taylorista, ou seja, a taxa de produção horária de produto, denominada, a partir de agora, como produtividade horária, ou meramente produtividade. Essa definição justifica-se tendo em vista que a indústria de propriedade, em geral, e a de

mineração, em específico, são caracterizadas pela produção em massa e pelo uso intensivo dos ativos físicos.

Já a qualidade do produto, questão que é amplamente debatida na literatura e que recebe diferentes conotações, refere-se ao atendimento dos requisitos de produção, ou seja, à conformidade das especificações e ao atendimento das necessidades do consumidor. (ANTUNES, 1998; HANSEN, 1996). De modo específico, a definição de qualidade nesta pesquisa é compreendida como os atributos físicos, químicos ou mineralógicos que descrevem as características do minério bruto (ROM), do concentrado, do *pellet feed*, do *sinter feed* e/ou da pelota de ferro. Para o contexto tratado neste trabalho, definem-se três tipos de qualidade, a saber:

- Qualidade da matéria-prima: qualidade do minério que é explorado (ROM) e que serve para alimentar o sistema de produção e de manufatura;
- Qualidade intermediária: qualidades do concentrado e do *pellet feed*. Durante o processamento do minério nas diferentes operações da cadeia produtiva ocorrem transformações nas características do produto. Essas transformações acarretam novos atributos de qualidade e/ou alterações em atributos já existentes. As qualidades intermediárias podem depender das qualidades da matéria-prima e/ou de outras qualidades intermediárias;
- Qualidade do produto: qualidade da pelota de ferro observada no final do processo produtivo. Os atributos de qualidade do produto são definidos pelo mercado consumidor.

A próxima seção apresenta o objetivo desta pesquisa.

## 1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Esta seção apresenta o objetivo geral da tese, bem como os objetos específicos que suportam o atingimento do objeto geral. Dessa forma, o objetivo geral da pesquisa é: **propor um método para construção de modelos de simulação que descrevam de modo integrado e dinâmico o impacto quantitativo da degradação e da variabilidade da matéria-prima no desempenho do processo produtivo em termos da qualidade do produto e da**

**produtividade da cadeia produtiva.** Esse objetivo visa auxiliar o desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão de investimento.

Os objetivos específicos propostos para suportar a pesquisa são os seguintes:

- Compreender e mapear as inter-relações entre o sistema de produção e o sistema de manufatura em empresas produtoras de minério de ferro;
- Avaliar a possibilidade de integração das abordagens de pesquisa operacional *hard* e *soft* para modelagem de sistemas de produção e de manufatura;
- Avaliar as técnicas de modelagem e simulação mais indicadas para modelar o problema da degradação da matéria-prima e da variabilidade;
- Desenvolver um modelo computacional de uma cadeia produtiva de minério de ferro que incorpore as qualidades das matérias-primas e simule o desempenho das operações a partir da produtividade horária e da qualidade do produto;
- Avaliar o uso do modelo computacional como uma ferramenta de suporte à decisão.

### 1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Esta seção descreve a justificativa da pesquisa sob a ótica acadêmico-empresarial. Sob a perspectiva acadêmica, a justificativa foca o rigor e a originalidade da tese, bem como o avanço do conhecimento promovido pela presente pesquisa. Já na perspectiva empresarial, percebe-se a relevância do trabalho em relação ao impacto da proposta na melhoria dos processos decisórios das organizações produtoras de minério de ferro.

A pesquisa insere-se, no sentido mais amplo, na agenda de estudos do Grupo de Pesquisa em Modelagem para Aprendizagem (GMAP/Unisinos)<sup>12</sup>. Diversas aplicações e estudos do GMAP ocorrem em empresas que operam no mercado de commodities, de onde surgiu a ideia de pesquisa e a motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

---

<sup>12</sup> O Grupo de pesquisa trata centralmente de questões relacionadas à modelagem *hard* e *soft* para a geração de aprendizado e, conseqüentemente, de avanço do conhecimento e de valor à organização.

### 1.3.1 Justificativa sob a ótica acadêmico-científica

A justificativa acadêmica desta tese busca responder três questões, que são: i) por que a tese merece ser lida?; ii) qual a lacuna teórica abordada pela pesquisa? e; iii) qual a originalidade da tese?

Inicia-se a justificativa desta pesquisa pela defesa da escolha do tema e pela explicitação do contexto do estudo. A indústria de mineração é um importante segmento para a economia do Brasil. Dados consolidados de 2010 apontam que a indústria de mineração representou 3,18% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial, sendo responsável por 15,7% das exportações brasileiras. Os investimentos na área, entre 2008 e 2010, totalizaram 14,1 bilhões de dólares. (BRASIL, 2011). Ainda segundo Brasil (2010), há uma previsão de investimentos na ordem de 90 bilhões de dólares em extração mineral entre 2010 e 2030. Recentemente, durante a divulgação dos dados consolidados do crescimento econômico do primeiro semestre de 2012 pelo governo federal, a mineração foi mencionada como uma das responsáveis pelo baixo desempenho da economia, que cresceu aquém das projeções. Segundo o Governo Federal, a produção de minério sofreu forte impacto negativo devido às chuvas ocorridas durante o primeiro trimestre do referido ano. Em dados divulgados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2011, dentre os produtos minerais produzidos pelo Brasil, o minério de ferro se destaca, totalizando uma produção de 372 milhões de toneladas no referido ano. Esse número representa aproximadamente 15% da produção mundial de ferro, situando o Brasil na segunda colocação nessa indústria. (BRASIL, 2011).

Varsavsky (1969) discute critérios para a classificação da relevância de trabalhos científicos. A autora sugere que as pesquisas acadêmicas devem focar os problemas concretos da realidade latina americana, buscando solucionar temas de reconhecida importância para as nações. Nesse contexto, três questões são destacadas nesta pesquisa. Primeiramente, este trabalho busca pesquisar o efeito da degradação da matéria-prima no desempenho do sistema de produção, tendo como objeto a indústria de mineração, segmento industrial de elevada importância para o Brasil, conforme demonstrado pelo impacto do setor no PIB e na balança comercial. A segunda questão diz respeito ao problema da degradação dos recursos naturais, sendo este um fenômeno que impacta não só a mineração, mas também outras indústrias relevantes que exploram recursos naturais, como a do petróleo. Finalmente, a terceira questão traz que o ferro e o aço são insumos essenciais para as cadeias produtivas metal mecânicas, segmento de elevada relevância para o desenvolvimento do Brasil.

São duas as variabilidades distintas e inter-relacionadas que afetam o desempenho do sistema de produção em uma firma mineradora: i) a variabilidade no sistema de manufatura (tecnologia específica de mineração), causada pelas características intrínsecas do minério extraído das reservas naturais e; ii) a variabilidade no sistema de produção, conforme tratado em Hopp e Spearman (2001). A principal fonte de origem da variabilidade das características do minério é a diferente composição química, física e mineralógica das reservas minerais. (EVERETT, 2001; HEIDARI; FROYLAND, 2011; KLIPPEL, 2007). Porém, o fenômeno da degradação é negligenciado das proposições teóricas e dos modelos reportados na literatura. Há um reconhecimento, tanto na academia quanto na gestão das empresas, de que a variabilidade<sup>13</sup> impacta negativamente o desempenho das operações. (HOPP; SPEARMAN, 2001; KLASSEN; MENOR, 2007). Essa variabilidade tem fontes internas e externas que tendem a dificultar o trabalho do gerente de operações, pois resulta em não conformidades que têm um impacto negativo no sistema produtivo. Hopp e Spearman (2001) deduzem, a partir de modelos matemáticos baseados na teoria das filas, os impactos da variabilidade no desempenho do sistema e destacam que tal característica encontra-se presente em todos os sistemas de produção. Compreender, medir e gerir a variabilidade é, pois, importante para suportar as decisões relacionadas ao processo produtivo.

Autores como Mason et al. (2011), Prior et al. (2012), Topp et al. (2008), Vuuren, Strengers e Vries (1999) e Yellishetty, Mudd e Ranjith (2011) abordam os temas da degradação e do esgotamento dos recursos naturais no contexto da indústria de mineração. Esses autores justificam a importância de compreender os efeitos da degradação no âmbito econômico, social e ambiental. Uma reserva, ao ser explorada, tem reduzida a qualidade da matéria-prima com o passar do tempo (por exemplo, finos, mineralogia, impurezas, etc.). Como a qualidade da matéria-prima influencia o desempenho das operações, o rendimento do sistema de produção decai em função da degradação da qualidade dos recursos naturais. (TOPP et al., 2008). Dessa forma, segundo Prior et al. (2012), para manter um mesmo nível de *output* no sistema produtivo, é necessário elevar os *inputs* (minério, capital, etc.) no sistema. (PRIOR et al., 2012; YELLISHETTY; MUDD; RANJITH, 2011).

Quando os recursos naturais são abundantes e o minério apresenta elevada qualidade, obter lucro a partir da extração desse minério é simples. Porém, após certo tempo de exploração de uma mesma reserva, a qualidade do minério reduz e a acessibilidade a ele torna-se cada vez mais difícil. Assim, ou a reserva encontra-se em estado de esgotamento, ou

---

<sup>13</sup> Os autores apresentam esta discussão ao apontar que não existe uma teoria universal para a gestão das operações. Há um conjunto de conceitos e proposições como TQM, JIT, etc.

o avanço tecnológico torna viável a exploração. Porém, isso torna o processo de extração mais complexo e com custos mais altos. (MASON et al., 2011; PRIOR et al., 2012; TOPP et al., 2008). A elevação de custo se dá em função da dificuldade de extração, que acaba por demandar mais máquinas (provocando maior custo com manutenção, combustível, depreciação, etc.), mais processos de beneficiamento para elevar os teores do minério e maior consumo de energia, além de gerar mais rejeitos, dado que a qualidade do minério se reduz, ocasionando maiores contrapartidas ambientais. (PRIOR. et al., 2012). Segundo Prior et al. (2012), o teor do minério (qualidade da matéria-prima) e as características mineralógicas afetam a produtividade e a lucratividade das mineradoras. Porém, os autores destacam que, usualmente, as qualidades do minério são consideradas homogêneas nas medições de produtividade apontando, assim, uma lacuna na proposição de métodos de modelagem que contemplem a questão da qualidade de forma heterogênea. A principal consequência associada ao problema da degradação das qualidades da matéria-prima para uma empresa mineradora é a redução da sua competitividade. (CGEE, 2010; GRAY, 2006; TOPP et al., 2008).

Observa-se, a partir da revisão da literatura de administração da produção e, em especial, da literatura de PO, uma carência de abordagens que considerem o efeito da degradação dos recursos naturais no sistema de produção e de manufatura. Buscas realizadas em bases de dados como Ebsco e Proquest utilizando as chaves de busca degradação, mineração e administração da produção ou PO não resultaram em nenhuma ocorrência. Nessa linha, Franks et al. (2010) destacam a escassez de análises empíricas sobre os efeitos econômico e físico da degradação do recurso natural no custo de produção.

Na indústria de mineração, a tecnologia intrínseca de mineração e o processamento de mineral, que estuda as relações físico-químicas do produto no processo de transformação, buscam o melhor aproveitamento do recurso mineral através de tecnologia de lavra e beneficiamento mineral (minimizar custo; otimizar recuperação em peso; maximizar a segurança). Essas melhorias no sistema de manufatura são, geralmente, focadas nas operações (atividades). Dada a especificidade da tecnologia de mineração, compreender e analisar o fluxo global (sistema de produção) no tempo e no espaço, objeto da administração da produção, demanda um outro nível de análise. (ANTUNES, 1998; SHINGO, 1996).

Não foram identificadas na literatura sobre modelagem e simulação métodos ou técnicas que atendem ao requisito central desta pesquisa, que é compreender o desempenho do sistema de produção em termos da qualidade do produto e da produtividade em um



contexto em que as matérias-primas degradam-se com o passar do tempo. Observa-se, nas proposições existentes na literatura, que:

- modelos disponíveis não modelam a qualidade do produto (ótica do sistema de manufatura) e a produtividade (ótica do sistema de produção) conjuntamente. Os modelos que tratam da qualidade do produto são abordados sob uma ótica de modelos especialistas que retratam relações elementares e intrínsecas da engenharia de minas (metalúrgica)<sup>14</sup>. Já os modelos que debatem a produtividade do sistema de produção a partir de um prisma global, desconsideram os efeitos da degradação da qualidade da matéria-prima na performance do sistema, conforme observado nas revisões sobre modelagem e simulação descritas por Knights e Bonates (1999); Basu e Baafi (1999); Konyukh, Galiyev e Li (1999); Panagiotou (1999); Sturgul (1999); Turner (1999) e Vagenas (1999).
- os modelos retratam a variabilidade por intermédio de distribuições de probabilidade<sup>15</sup>, as quais são atribuídas às diferentes operações/atividades do sistema modelado. (PRITSKER, 1998; BANKS, 1998; LAW; KELTON, 1991; PIDD, 2004b; ROBINSON, 2004).

Esse mecanismo de modelagem da variabilidade não permite incorporar o fenômeno da degradação ao modelo. Isso porque cada atividade do modelo é representada por uma distribuição de probabilidade independente uma da outra. Para exemplificar o mecanismo, considera-se uma fila em um caixa de banco, a qual é composta por uma taxa de chegada de clientes, uma fila e um caixa que processa as solicitações. Tradicionalmente, a modelagem desse sistema consiste em associar uma distribuição de probabilidade para a taxa de chegada e uma para o tempo de atendimento. Assim, o desempenho do sistema poderia ser obtido em termos de tempo de espera. Supondo que haja uma situação em que a quantidade de contas pagas por cada cliente esteja reduzindo com o passar do tempo, é razoável imaginar que o tempo de atendimento passará a ser menor, pois o número de contas foi reduzido. Sendo assim, o mecanismo de modelagem tradicional da variabilidade não consegue representar esse

---

<sup>14</sup> King (2001) apresenta um conjunto de modelos específicos que tratam de relações elementares do sistema de manufatura de mineração de ferro. Abordam, por exemplo, a relação entre a granulometria do minério e a taxa de produção horária de um britador.

<sup>15</sup> A distribuição de probabilidade aponta para uma dada variável aleatória, que define quais os resultados que podem ocorrer e as probabilidades de ocorrências de cada resultado. (DOANE; SEWARD, 2008).

efeito da redução do número de contas pagas por cada cliente, a menos que a distribuição de probabilidade que representa o tempo de atendimento seja re-estimada. Dessa forma, para modelar a degradação das qualidades da matéria-prima, faz-se necessária a identificação ou a proposição de novos mecanismos que viabilizem a modelagem de tal fenômeno.

A ausência de conhecimento em modelar um sistema de produção na indústria de propriedade que leve em consideração as características elementares da matéria-prima (degradação e variabilidade) que alimenta o processo produtivo, pode levar a uma análise inadequada da performance global do sistema. Esse viés deriva basicamente da degradação, que impacta negativamente o desempenho do processo produtivo, ou seja, que diminui a aderência do modelo à realidade.

Já o benefício em modelar o efeito da degradação no desempenho do sistema de produção é a melhor alocação de recursos financeiros para a melhoria de processo e a ampliação de capacidade. Segundo Topp et al. (2008), como o volume de capital investido em projetos de mineração é alto e o tempo de execução é, geralmente, longo (medido em anos) torna-se relevante a modelagem proposta neste trabalho. Silva (2008) defende que é importante analisar de modo antecipado e integrado o desempenho econômico-financeiro potencial de um empreendimento em mineração, para minimizar os riscos estratégicos do investimento de capital. Dentre os riscos listados pelo autor, destacam-se: i) riscos metalúrgicos associados às projeções de recuperação do minério esperado na etapa de beneficiamento; ii) riscos de projeto de engenharia (de minas) relacionados à ineficiência na concepção em atingir as metas definidas para o sistema.

Uma vez finalizada a justificativa de cunho acadêmico, a próxima seção descreve as justificativas da pesquisa em termos de relevância para o meio empresarial.

### **1.3.2 Justificativa sob a ótica empresarial**

A lista das maiores empresas mundiais da atualidade, divulgada pela Forbes (2012), contempla quatro empresas exploradoras de recursos naturais nas primeiras dez posições, todas elas no segmento de extração de petróleo. No Brasil, das dez maiores empresas, três operam no ramo de exploração de recursos naturais, sendo uma no segmento de petróleo (Petrobras - primeira posição) e as outras duas no segmento do ferro e do aço (Vale do Rio Doce - quinta posição e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) - oitava posição). Essa lista

aponta a relevância dos recursos naturais para a nação brasileira, sendo o presente problema de pesquisa mapeado e delineado no contexto da indústria em cena.

Nesse sentido, Meredith et al. (1989) destacam a necessidade de as pesquisas acadêmicas expandirem suas abordagens de análise para que os gestores passem a percebê-las como relevantes. A academia costuma endereçar problemas fictícios que não são de interesse do mundo real. (LITTLE, 2004; MEREDITH et al., 1989). Portanto, Meredith et al. (1989) sugerem que metodologias apropriadas devem ser utilizadas para que contribuições efetivas sejam realizadas no mundo acadêmico e no mundo prático. Antunes (1998, p. 359) apresenta as inter-relações que a simulação pode propiciar entre os problemas do mundo prático e a teoria:

Um aspecto muito interessante da Simulação consiste, no que tange à construção dos Modelos, em sua “independência relativamente à Teoria”. Os Modelos de Simulação partem da realidade objetiva do problema visando representá-la de forma mais simples e meticulosa possível. Os Modelos são validados na medida em que são confrontados com os “dados”, “informações” e “fatos” da realidade. As Hipóteses de explicação dos fenômenos que estão ocorrendo bem como os Cenários propostos para a experimentação computacional, estes sim dependentes da Teoria, são construídos após a modelagem do problema. Os defensores da Lógica Indutiva tem na Simulação uma ferramenta bastante interessante para explorar em seus trabalhos.

A simulação computacional deve ir ao encontro das reais necessidades da indústria, no caso a mineração, como forma de reduzir o risco e de melhorar a eficiência a partir da compreensão do sistema de forma global. (STOTHARD; SWADLING, 2010). Para isso, segundo Stothard e Swadling (2010), os altos executivos devem comprar a causa e impor, de cima para baixo, o desenvolvimento sustentável da simulação para melhorar as operações e garantir, assim, a sustentabilidade de longo prazo do negócio.

Ainda cabe destacar que há uma necessidade de aprimorar o processo de tomada de decisão de empresas mineradoras para os projetos considerados estratégicos e que demandam elevadas quantias de investimento de capital. (TOPP et al., 2008). Silva (2008) destaca que em situações em que há necessidade de elevados valores para melhoria do sistema de produção e/ou do sistema de manufatura, os potenciais benefícios devem ser submetidos a análises detalhadas para, assim, as implicações dos resultados da proposta serem observadas. No segmento de mineração, os investimentos necessários para promover a expansão ou a melhoria da produção envolvem elevadas quantias de capital. Essas somas são ainda mais volumosas quando há a necessidade de etapas de beneficiamento do minério de ferro, conforme destacado por CGEE (2010), Gray (2006) e Topp et al. (2008).

Por fim, no que tange às características da degradação e da variabilidade da matéria-prima, Prior et al. (2012) descrevem três novos projetos de exploração de níquel na Austrália

que não atingiram as expectativas em termos de produtividade e de qualidade do material. Após a conclusão dos projetos em questão, as metas não se concretizaram na prática, tornando a operação não rentável economicamente. Isso se sucedeu basicamente devido ao elevado índice de impurezas do minério, que afetou negativamente a performance do processo produtivo. Prior et al. (2012) informam, no seu relato, que um dos três projetos acabou viabilizado em função da elevação do preço do níquel no mercado durante a década de 2000. O caso descrito em Prior et al. (2012) evidencia a importância de se avaliar o impacto da variabilidade e da degradação da matéria-prima no desempenho do sistema produtivo. Se por um lado investimentos são viabilizados em situações em que o preço dos minérios encontra-se em patamares elevados, por outro lado, em momentos de preço baixo ou estável, as análises propostas nesta pesquisa tornam-se relevantes e importantes para suportar as decisões de investimentos.

A próxima seção apresenta as delimitações da pesquisa.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

As delimitações da pesquisa expõem elementos que não são tratados neste trabalho. Além disso, os pressupostos que norteiam o estudo são explicitados.

Inicialmente, delimita-se o trabalho no tocante à teoria da decisão. Tal teoria é muito abrangente, englobando diferentes áreas do conhecimento (psicologia, sociologia, economia, etc.). Neste sentido, um amplo desdobramento da teoria da decisão é relatado em Buchanan e O'Connell (2006). Não é objeto deste estudo avaliar o comportamento do tomador de decisão, mas sim, gerar informações relevantes para suportar a tomada de decisão no contexto da indústria de mineração que se depara com o fenômeno da degradação dos recursos naturais. Com relação ao uso de informações para suportar decisões, esta pesquisa assume as evidências descritas por Raghunathan (1999), para quem a qualidade da informação afeta positivamente o desempenho econômico-financeiro da empresa.

Ao longo do trabalho, utiliza-se os termos firma, empresa e organização como sinônimos e delimita-se o estudo em firmas produtivas cujo objetivo central é a obtenção de lucros privados. Goldratt e Cox (2003) corroboram a visão de que o objetivo principal (meta) de qualquer empresa é ganhar dinheiro, hoje e no futuro. No contexto desta tese define-se competição, que acontece quando duas empresas atuam em uma mesma indústria, ou seja, produzem e oferecem produtos/serviços substitutos em um dado mercado.

Além disso, o objeto de estudo compreende a relação firma individual com o fenômeno da degradação dos seus recursos naturais (minas). Essa delimitação diferencia o trabalho aqui descrito das pesquisas de Franks et al. (2010), Mason et al. (2011), Prior et al. (2012) e Topp et al. (2008) que, apesar de tratarem da degradação dos recursos naturais, analisam esse objeto no contexto de uma nação e/ou do mundo, abordando a degradação em relação ao esgotamento global de recursos para sustentar a economia, e o desenvolvimento tecnológico para minimizar o efeito desse processo. Ainda com relação a esse tema, o trabalho delimita-se, de modo geral, à indústria de propriedade e, em especial, à indústria exploradora de recursos naturais, pois a degradação e a variabilidade da matéria-prima são características marcantes nesse tipo de empresas. Na indústria petroquímica, por exemplo, o tema da degradação tem pouca relevância.

Quanto ao termo desempenho utilizado ao longo do texto, o mesmo refere-se à dimensão econômico-financeira, ou seja, ao lucro líquido e ao retorno sobre o investimento na dimensão econômica, e à caixa na dimensão financeira. Já o desempenho dos sistemas de produção e de manufatura são compreendidos a partir das dimensões de produtividade horária e de qualidade do produto. Para efeitos de comparação de resultados das decisões esperadas em diferentes cenários, não se vê necessidade de explorar as diversas definições e conceitos do constructo desempenho. Segundo Carneiro et al. (2005), observa-se na literatura que trata do constructo desempenho que ele é multifacetado e que pode contemplar diferentes indicadores. Essa discussão torna-se relevante quando se deseja comparar o desempenho de diferentes empresas que, por exemplo, operam em diferentes países. Nessa situação, legislações e regras contábeis dificultam a comparação entre resultados. Porém, como o objeto da tese analisa o desempenho econômico-financeiro de ações no sistema de produção ou de manufatura de uma única firma, não se vê necessidade de aprofundar esta discussão. As análises realizadas pelo modelo proposto utilizam as medidas econômico-financeiras para avaliar diferentes cenários de modo comparativo.

A pesquisa analisa a degradação no nível do sistema de produção e de manufatura. Como o sistema de produção é parte de um sistema maior, a empresa, delimita-se o estudo exclusivamente ao sistema de produção, deixando de analisar outros sistemas existentes na organização como, por exemplo, marketing e vendas, recursos humanos, etc. É importante destacar que existem inter-relações entre os elementos que compõem o sistema empresa, mas tratar todas essas inter-relações simultaneamente não é objeto do estudo. Em relação ao sistema empresa, Antunes (1998) apresenta um quadro de referência que possibilita a segmentação da organização em dois sistemas, um social e outro técnico. O primeiro

relaciona-se com as questões do poder e da cultura. Já o segundo refere-se às questões tecnológicas. Assim, apesar de compreender que esses sistemas são inter-relacionados, a tese trata exclusivamente do sistema técnico.

As discussões destacadas no referencial teórico sobre as abordagens *hard* e *soft* da PO não tratam os fundamentos epistemológicos e ontológicos que sustentam o desenvolvimento destas duas correntes de estudo da PO. Uma síntese profunda desse debate pode ser obtida em Lane (1994). Esta pesquisa assume a ideia central tratada em Pidd (2004a), Pidd (1998) e Rodrigues (2006) de que as abordagens *hard* assumem que o problema é bem compreendido, enquanto que as abordagens *soft* visam a compreensão e criação de consenso em relação à uma situação problemática.

Finalmente, em relação à simulação computacional, um dos temas centrais deste trabalho, a literatura destaca duas técnicas de simulação para representar a operação de um sistema dinâmico, complexo e que apresente variabilidade: a simulação contínua e a simulação de eventos discretos (BANKS, 1998; LAW; KELTON, 1991; PIDD, 2004b; ROBINSON, 2004; CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008). Para os objetivos desta pesquisa, utiliza-se a técnica de simulação de eventos discretos para a proposição da solução desenvolvida, sendo ela a mais difundida e utilizada no campo acadêmico e prático (ROBINSON, 2004). Segundo Robinson (2004) e Thesen e Travis (1991), em geral, a simulação de eventos discretos é mais apropriada para a modelagem de operação de sistemas e para quando o sistema necessita ser modelado em detalhes, assim como para situações em que uma entidade necessita ser rastreada ao longo do processo.

A próxima seção apresenta a estrutura dos capítulos que seguem esta introdução.

## 1.5 ESTRUTURA DA TESE

O Capítulo 1 – Introdução – apresenta, além desta estrutura, a introdução e o objeto de estudo, o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos da tese, as justificativas em termos acadêmicos e empresariais e as delimitações do projeto.

O Capítulo 2 – Referencial Teórico – descreve os aspectos teóricos e os elementos que sustentam a pesquisa. Essa parte aborda o problema da degradação e o papel dos sistemas de produção e de manufatura, finalizando com as teorias de modelagem de sistema, de modo amplo, e com a literatura de simulação, em específico. Ao final do capítulo, é apresentado o *framework* conceitual que sustenta o método e o modelo propostos.

O Capítulo 3 detalha o ambiente de estudo, com foco especial para a apresentação da unidade de análise. Nesse capítulo apresenta-se, ainda, os estudos que envolvem modelagem e simulação na indústria de mineração.

No Capítulo 4 é apresentado o método de trabalho proposto para a condução da pesquisa. Inicialmente, são descritos o delineamento da pesquisa e o método de investigação utilizado para suportar o desenvolvimento da tese. Em seguida, detalha-se o método de trabalho utilizado.

O Capítulo 5 é dedicado à proposição do método para a construção de modelos de simulação, no intuito de atender ao objetivo principal da pesquisa. O método aqui descrito lida com o problema da degradação da qualidade da matéria-prima e avalia o desempenho do sistema produtivo em termos de produtividade e qualidade.

No Capítulo 6, o método proposto no Capítulo 5 é utilizado para o desenvolvimento de um modelo de simulação no caso estudado. Nesse capítulo, a empresa Samarco que serviu de suporte ao desenvolvimento da pesquisa é detalhado.

O Capítulo 7 descreve as simulações do efeito da degradação da qualidade da matéria-prima no desempenho do sistema produtivo. Para isso, utiliza-se de dois modelos: o primeiro foi desenvolvido a partir do método proposto (Capítulo 6); o segundo não utiliza o mecanismo e o método propostos, mas o mecanismo tradicional de modelagem da variabilidade.

Por fim, o Capítulo 8 dedica-se à apresentação das considerações finais da pesquisa, além de apontar limitações do trabalho e possibilidades de pesquisas futuras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo dedica-se a explicitar os aspectos teóricos necessários para o equacionamento do problema de pesquisa apresentado na introdução deste trabalho. O referencial teórico proposto visa apresentar conceitos e modelos que fundamentam efetivamente a pesquisa. Ao final do capítulo, é apresentado um *framework* conceitual que sintetiza a proposição da presente pesquisa.

Este capítulo está estruturado em quatro seções, conforme detalhes apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Visão geral do referencial teórico

Seção	O que é abordado	Principais autores
A degradação dos recursos naturais	Explicitação do problema do esgotamento e da degradação dos recursos naturais. Endereçamentos na literatura para tratar o problema.	Amazonas, 1994, 2001; Hyman, 1984; Klippel, 2007; Mason et al., 2011; Prior et al., 2012; Topp et al., 2008; Yellishetty, Mudd e Ranjith, 2011
Sistema de produção e de manufatura	A função do sistema de produção e de manufatura; a natureza dos sistemas de produção e manufatura; principais dificuldades para gestão do sistema de manufatura; as medidas de desempenho dos sistemas; caracterização da indústria de propriedade.	Antunes, 1998; Antunes et al., 2008; Bakhrankova, 2010; Black, 1998; Dennis e Meredith, 2000; Hansen, 1996; Hopp e Spearman, 2001; Klippel, 2007; Shingo, 1996
Modelagem de sistemas	A teoria geral dos sistemas; abordagens de modelagem para compreensão, análise e solução de problemas; as abordagens <i>hard</i> e <i>soft</i> para tratamento de problemas e a integração entre as abordagens.	Ackoff, 1971, 1974; Bertalanffy, 1975; Brown, Cooper e Pidd, 2006; Checkland, 1999; Forrester, 1968; Mingers e White, 2010; Pidd, 1998, 2004a; Hillier e Lieberman, 2013; Andrade et al., 2006; Rodrigues, 2006.
Simulação computacional	Métodos disponíveis para construção de modelos de simulação; mecanismos tradicionais para modelagem da variabilidade	Banks, 1998; Chwif e Medina, 2010; Freitas Filho, 2008; Law e Kelton, 1991; Pidd, 2004b; Pritsker, 1997; Robinson, 2004; Withers et al., 1993; Hillier e Lieberman, 2013; Rodrigues, 1995.

Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.1 A DEGRADAÇÃO DOS RECURSOS NATURAIS

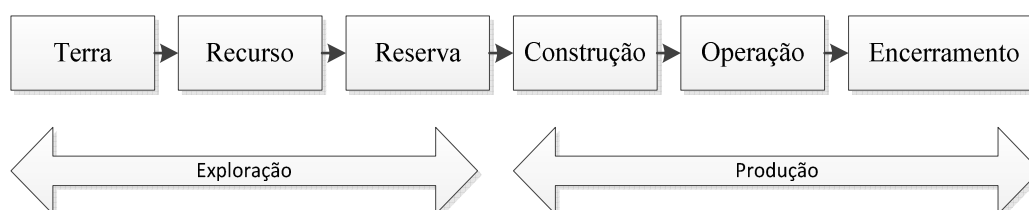
Inicialmente, cabe detalhar os conceitos de recurso natural e reserva que são utilizados nesta pesquisa. O recurso natural é a “substância” disponível na natureza (por exemplo, minério de ferro, petróleo). (HYMAN, 1984). Os recursos naturais são geralmente classificados em renováveis e não renováveis. Um recurso não renovável existe em uma quantidade fixa na natureza e não é repostado por ela em um curto período de tempo. Amazonas



(2001) define recurso exaurível aquele cuja taxa de regeneração é negativa, ou seja, o horizonte de extração é menor do que o horizonte de regeneração natural ou de reciclagem. Prior et al. (2012) defendem que os recursos naturais não renováveis (petróleo, minério de ferro, carvão, etc.) são finitos. Em contrapartida, os recursos renováveis são aqueles cuja taxa de regeneração é positiva.

Os minérios são recursos não renováveis; sendo assim, segundo Topp et al. (2008), uma mina apresenta um ciclo de vida, contemplando as fases destacadas na Figura 3.

Figura 3: Fases do ciclo de vida de uma mina



Fonte: Adaptado de Topp et al. (2008)

O recurso natural é classificado como reserva somente quando a sua extração torna-se economicamente viável, ou seja, uma reserva depende do preço pago pelo produto no mercado e da tecnologia existente para extraí-lo. (TOPP et al., 2008). As reservas apresentam elevada probabilidade econômica e geológica de extração rentável. Já os recursos naturais têm uma probabilidade razoável de possuir as características geológicas requeridas, mas menos certeza em relação à viabilidade econômica. Esse conceito deriva do Joint Ore Reserves Committee (JORC), um comitê formado por empresas australianas para elevar a transparência na divulgação de informações para o público e para os investidores. (PRIOR et al. 2012). Hyman (1984) sugere que as disponibilidades dos recursos não renováveis podem ser classificadas em três grupos: comprovado, não comprovado e recurso economicamente viável.

Após a decisão de desenvolver a reserva, as fases de produção do seu ciclo de vida são executadas. Observa-se que há uma primeira fase de construção da infraestrutura física, seguida pela fase de operação e, por último, a fase de encerramento da mina (TOPP et al., 2008).

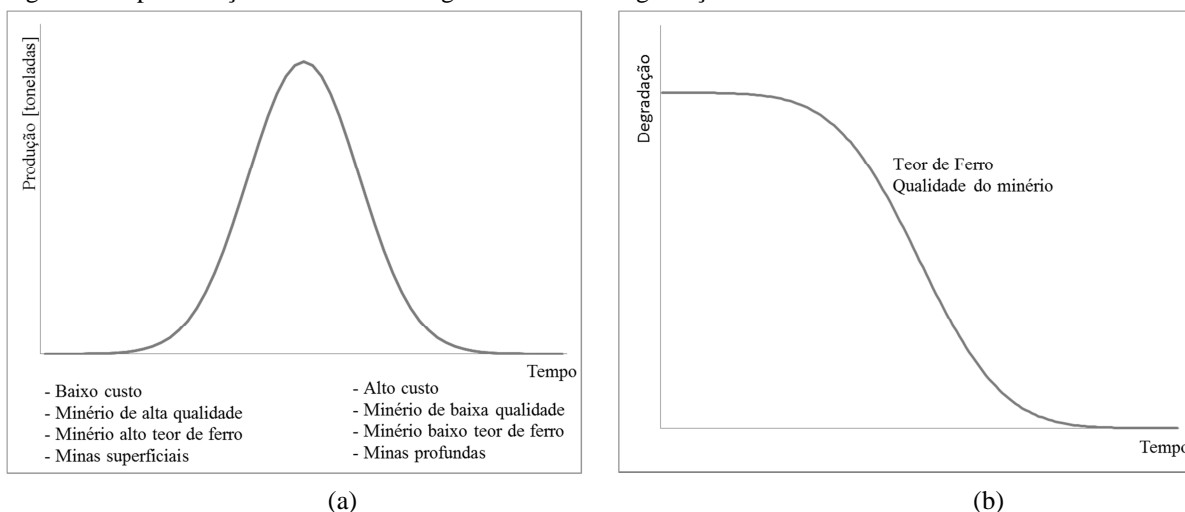
A ideia de ciclo de vida de uma mina destaca que a reserva esgota-se com o passar do tempo. Giurco et al. (2010) apresentam o conceito de Pico de Minerais (Peak Mineral) referindo-se ao fenômeno do esgotamento dos recursos naturais. O modelo de Pico Mineral avalia o esgotamento das reservas minerais no nível global. No entanto, o conceito apresentado pode ser extrapolado para representar o fenômeno da degradação a partir da

observação de uma única mina, ou então das reservas de uma única firma. A Figura 4 (a) ilustra o fenômeno do esgotamento dos recursos naturais, explicitando que com o passar do tempo o custo aumenta, ao passo que o volume de produção, o teor de ferro e a qualidade do minério reduzem. May et al. (2011) em seu artigo apontam evidências empíricas que comprovam o conceito de Peak Mineral. Os autores avaliam o comportamento do custo e da degradação da qualidade da matéria-prima ao longo do tempo e, para alguns minérios, a curva de produção obtida segue o comportamento teórico ilustrado na Figura 4 (a).

A degradação das características da matéria-prima (redução do teor de ferro e elevação das impurezas) se dá ao passo em que a reserva se esgota. (PRIOR et al., 2012; CGEE, 2010). Evidências empíricas da degradação das reservas minerais são expostas por CGEE (2010). Segundo o texto, em 1983 a produção anual de *lump* (minério granulado de alto teor de ferro) foi de 108 milhões de toneladas. Já em 2000, o número baixou para a casa dos 77 milhões de toneladas, expondo a retração na produção de minério de alta qualidade.

Segundo Prior et al. (2012), a exploração do recurso é simples e de baixo custo no início da reserva e torna-se gradativamente complexa e dispendiosa com o passar do tempo. A Figura 4 (b) representa graficamente o fenômeno da degradação dos recursos naturais, no caso, o minério de ferro.

Figura 4: Representação conceitual do esgotamento e da degradação do minério de ferro



Fonte: Adaptado de Giurco et al. (2010) e Prior et al. (2012)

Não há consenso na literatura sobre a existência ou não do esgotamento de um recurso natural. Para Prior et al. (2012), não existem mecanismos para avaliar se o esgotamento irá ou não ocorrer. Grande parte do debate existente sobre o tema centra-se em torno da questão de

saber se: i) o preço das commodities irá promover avanços tecnológicos na exploração, na produção e no processamento dos recursos ou; ii) a diminuição dos estoques dos recursos irá motivar a reciclagem, o reuso e a busca de novos materiais. Segundo apontado por Prior et al. (2012), os avanços tecnológicos tem vencido o debate sobre a questão do esgotamento pois, conforme os autores, há evidências de elevação da produção mundial e de aumento de reservas, fato que somente é possível devido à melhoria da tecnologia envolvida.

O esgotamento da reserva e, conseqüentemente, a sua degradação são compreendidos pela literatura como problemas, pois promovem elevação do custo de produção, em função da redução da qualidade do minério e da maior profundidade da mina. (GIURCO et al., 2010; HYMAN, 1984; MASON et al., 2011; PRIOR et al., 2012). Esses problemas são analisados a partir de diferentes óticas, que são:

- a ótica da economia;
- a ótica da organização;
- a ótica da tecnologia intrínseca/específica de mineração (engenharia de minas).

Sob a ótica da economia, o objeto de estudo são as macrorrelações entre as reservas naturais e o atendimento das necessidades da sociedade de modo geral, ou seja, a preocupação com as questões relacionadas ao esgotamento e à degradação dos recursos naturais no âmbito de uma nação ou do mundo. (HYMAN, 1984).

Na economia, as questões ligadas aos recursos naturais dividem-se em duas correntes. A primeira, ligada ao consumo dos recursos e aos fenômenos da degradação e do esgotamento é chamada, na literatura, de economia dos recursos naturais. A segunda, focada na compreensão e análise dos outputs gerados pelo processo extrativista e no impacto destes no meio ambiente, é denominada de economia da poluição. (HYMAN, 1984; AMAZONAS, 2001). Amazonas (2001) destaca o trabalho seminal de Hotelling (1931) que apresenta um modelo para otimizar a utilização dos recursos naturais não renováveis. Nesse modelo, o objetivo proposto é maximizar o tempo de uso dos recursos.

A economia dos recursos naturais busca compreender as relações entre a oferta, a demanda e o uso dos recursos naturais e, em especial, os aspectos de extração e de esgotamento dos recursos em relação ao tempo. (AMAZONAS, 1994). As mesmas correntes teóricas, neoclássica, institucionalista e evolucionista, desenvolvidas ao longo do tempo para explicar a teoria da firma, também são encontradas na literatura que trata do meio ambiente (recursos naturais e poluição). Porém, segundo Amazonas (1994), a interpretação econômica

do debate à respeito das questões ambientais é dominada pela abordagem neoclássica. Para Amazonas (1994), esse domínio deve-se à hegemonia do pensamento neoclássico e à simplificação analítica amplamente divulgada por essa corrente teórica.

A economia ambiental neoclássica abrange um amplo conjunto de tópicos, como: i) demonstração de modelos de equilíbrio geral; ii) modelos de Input-output; iii) uso de recursos naturais específicos; iv) utilização de instrumentos de políticas pública e; v) desenvolvimento de metodologias para medir monetariamente os benefícios providos pelos recursos naturais. (AMAZONAS, 1994). Segundo Hyman (1984), os economistas da escola neoclássica buscam determinar a taxa de uso ótima dos recursos e resolver problemas que interferem no atingimento desse resultado. O objetivo dos estudos disponíveis na literatura é auxiliar a gestão dos recursos, no intuito de garantir a sua disponibilidade futura para a sociedade.

Os trabalhos que tratam da degradação da qualidade dos recursos minerais estudam o fenômeno analisando um setor ou uma nação como, por exemplo, o efeito da degradação e do esgotamento na indústria de mineração da Austrália, ou da degradação e do esgotamento do carvão mundial. (MASON et al., 2011; PRIOR et al., 2012; TOPP et al., 2008). O autor dessa tese supõe que a literatura busca generalizações para o tema através de análises empíricas dos históricos de produções, de custos e dos teores de ferro médio da indústria, em um âmbito nacional ou mundial e não no nível da firma. Ao estudar esse nível agregado, os autores deslocam o foco para o impacto da degradação em termos ambientais e sociais e, em menor intensidade, para o impacto na economia do país. Prior et al. (2012) defendem que haverá, em um futuro próximo, a elevação do interesse no entendimento das variações dos custos econômicos, sociais e ambientais impactados pela degradação dos recursos.

Schmenner e Swink (1998) mostram que as teorias microeconômicas pouco contribuem para a compreensão das diferenças entre as firmas, não conseguindo responder, por exemplo, porque duas empresas na mesma indústria apresentam produtividades diferentes. Conforme destacado pelos autores, apesar das contribuições da teoria microeconômica para a área da administração da produção, ela não consegue tratar questões como: i) tipo do processo utilizado pela empresa; ii) a existência dos gargalos no sistema de manufatura e; iii) os efeitos da variabilidade. Em síntese, a literatura da economia trata a escassez dos recursos naturais, e conseqüentemente, a degradação dos recursos, sob o viés de preço, de oferta e de demanda do mercado, de modo a satisfazer as necessidades humanas. Os economistas não adentram a firma para equacionar os problemas vividos constantemente pelos gestores.

Já sob a ótica da organização (firma), estudos relacionados ao tema recursos naturais, de modo geral, e degradação e esgotamento do recurso, de modo específico, somente passaram a ser tratados recentemente pela literatura, ainda que de forma escassa. O objeto de estudo, sob a ótica em questão, é focado em compreender a sustentabilidade da firma de modo amplo, relacionando as questões sociais, ambientais e financeiras, considerando que o minério é um recurso finito.

Bell et al. (2012) discutem a escassez dos recursos naturais e apresentam um conjunto de recomendações para o desenvolvimento de trabalhos relacionados ao tema. Para os autores, os gestores necessitam considerar a escassez dos recursos naturais como fator de risco para a continuidade futura das organizações. Dentre as sugestões de trabalhos futuros apontados por Bell et al. (2012), destaca-se a necessidade de realizar pesquisas que tentem explicar e prever os fluxos de produção no nível da firma quando os recursos tornam-se escassos.

Segundo Topp et al. (2008), a natureza da qualidade dos recursos naturais não renováveis é uma questão central para a mineração. Uma vez explorados, os recursos tornam-se indisponíveis. Naturalmente, a exploração dos recursos inicia-se a partir daqueles que apresentam maior qualidade sendo que, com o passar do tempo, a reserva passa por progressiva degradação de suas características, até chegar à exaustão. Assim, os recursos que permanecem nas reservas apresentam qualidades e rendimentos inferiores, observando-se uma degradação constante das características dos recursos naturais que alimentam o sistema de produção.

Por fim, sob a ótica da tecnologia intrínseca/específica da engenharia de minas, petróleo, etc., o objeto de estudo recai sobre a compreensão das relações elementares entre a qualidade da matéria-prima e os meios para transformar esse Input em produtos finais que atendam às especificações do mercado consumidor. (KING, 2001).

### **2.1.1 Síntese da seção**

As questões-chaves apresentadas nesta seção foram os conceitos de esgotamento e de degradação dos recursos naturais, bem como o impacto desses elementos no desempenho das operações. Após a definição dos conceitos, eles foram contextualizados em diferentes níveis, ou seja, sob a visão da economia, da organização e da engenharia de minas.

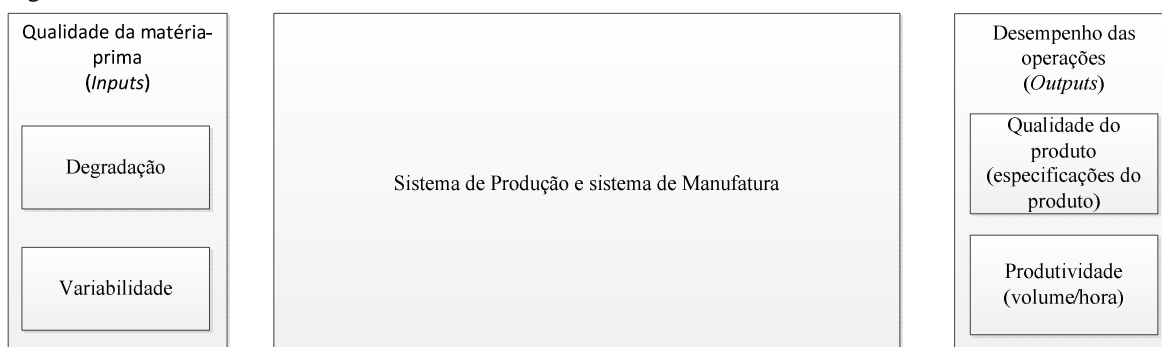
Verificou-se que, por um lado, sob a ótica da organização, há estudos que apontam o problema da relação inversa entre a qualidade do minério e o desempenho das operações (em

um sentido amplo) ao analisar a degradação. Esses estudos, porém, apenas explicitam o problema, não endereçando a solução. Por outro lado, há a tecnologia intrínseca da engenharia mineral, que compreende o desenvolvimento de soluções para viabilizar o processamento de minério com baixa qualidade, mas que não atinge o nível de gestão das operações como um todo.

Assim, há uma lacuna na literatura entre o nível da organização e o nível da engenharia de minas responsável pela tecnologia dos sistemas de manufatura. O primeiro compreende o problema da degradação no âmbito do desempenho da organização (elevação de custo; degradação de performance; inviabilidade do negócio), mas não aponta meios para compreender, em detalhes, as operações sob a lógica do fluxo global de produção (sistema de produção). Já a tecnologia desenvolvida pela engenharia de minas tem uma visão restrita do sistema de produção e nenhuma preocupação com o fluxo global de produção. A engenharia de minas, por exemplo, foca propor soluções para elevar a eficiência da operação elementar de separação do ferro das impurezas contidas no minério processado. Já no nível da gestão, uma melhoria nessa operação ou a aquisição de uma nova máquina para viabilizá-la, deve ser analisada sob uma lógica de ganho global para a organização, a partir do fluxo global de produção.

A Figura 5 é uma primeira tentativa de estabelecer o *framework* conceitual da pesquisa. Nesta figura destaca-se a ideia que, no nível da firma mineradora, há um sistema de produção e de manufatura que recebe matéria-prima, processa este material e entrega ao mercado produtos com uma dada qualidade e com um determinado volume.

Figura 5: Desenho inicial do framework conceitual



Fonte: Elaborado pelo autor

A próxima seção conceitua e caracteriza sistemas de produção e de manufatura de modo geral e define-os no contexto da indústria de propriedade.

## 2.2 SISTEMA DE PRODUÇÃO E DE MANUFATURA

Esta seção define o conceito de sistema de produção e de manufatura, recapitula a evolução das teorias envolvendo o sistema de produção e apresenta a natureza dos sistemas de produção e de manufatura, as principais dificuldades para a gestão desses sistemas dada a sua natureza, bem como as principais medidas de desempenho.

Black (1998, p. 37) define que o sistema de manufatura como:

Um sistema de manufatura é uma coleção ou arranjo de operações e processos utilizados para fabricar um determinado produto ou componente. O sistema de manufatura inclui os equipamentos existentes que compõem os processos e o arranjo destes processos.

O sistema de manufatura é responsável pela agregação de valor ao bem a partir da transformação das entradas (energia, matéria-prima, trabalho, etc.) em produtos acabados (ANTUNES, 1998; BLACK, 1998). Segundo Black (1998), esse sistema é uma combinação de um conjunto de processos de manufatura.

O sistema de manufatura pode ser classificado, conforme Checkland (1981), como um ‘sistemas físico desenvolvido’<sup>16</sup>, visto que é um projeto criado pelo homem e que contempla um conjunto de elementos fisicamente arranjados para a transformação de matéria-prima, de informação e de trabalho em um bem acabado.

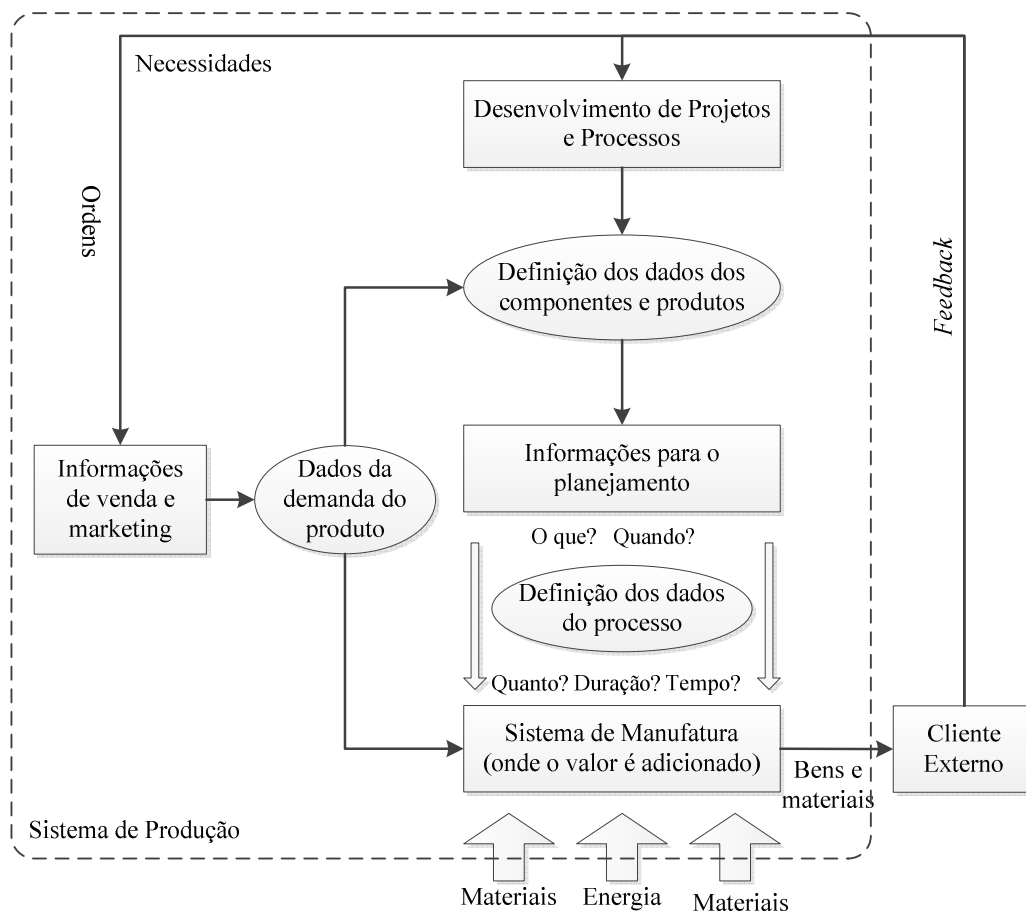
O sistema de produção, por sua vez, tem como objetivo controlar e planejar o fluxo global de produção, de modo a suportar e apoiar o sistema de manufatura. Isso significa que o sistema de manufatura é subordinado ao sistema de produção. (ANTUNES, 1998; BLACK, 1998). Dentre as funções de controle e planejamento do sistema em questão destacadas por (ANTUNES, 1998), estão: i) gestão da qualidade; ii) gestão da produção (o que, quando, onde e como produzir); iii) controle de estoques; iv) gestão da manutenção; v) gestão dos acidentes de trabalho; vi) gestão ambiental; vii) sincronização da produção e; viii) identificação e promoção de melhorias no sistema como um todo.

A Figura 6 esquematiza a visão geral do conceito de sistema de produção e de manufatura proposta por Black (1998).

---

<sup>16</sup> Com o objetivo de classificar os diferentes tipos de sistemas, Checkland (1981) identificou quatro classes, que são: i) sistemas naturais: sistemas que retratam as leis do universo como, por exemplo, sistema de águas, sistema solar; ii) sistemas físicos desenvolvidos: sistemas desenvolvidos e projetados pelos seres humanos como, por exemplo, uma casa, um sistema de produção, um carro; iii) sistema abstrato desenvolvido: sistemas abstratos resultantes da construção humana, como por exemplo, a matemática e; iv) sistema de atividades humanas: sistemas que, consciente ou inconscientemente, são estruturados, como por exemplo, família, cidade, sistema político.

Figura 6: Visão geral do sistema de manufatura e de produção



Fonte: Adaptado de Black (1998)

Observa-se, a partir da Figura 6, que o sistema de produção é um sistema aberto, que troca informações com o ambiente e que apresenta enlaces de *feedback*<sup>17</sup>, os quais o realimentam com informações relacionadas aos produtos entregues pelo sistema de manufatura. (BLACK, 1998).

Black (1998) destaca que a organização é um grande sistema que compreende dois outros sistemas: o de produção e o de manufatura. O sistema de produção é responsável pelas funções de planejamento e controle do fluxo global de produção no tempo e no espaço, enquanto o sistema de manufatura, suportado pelo sistema de produção, compreende o processamento físico através de máquinas e de pessoas. Ou seja, o sistema de manufatura transforma materiais, informações e energia em produtos acabados a partir de um conjunto de operações (atividades). Antunes (1998) e Antunes et al. (2008) destacam que o sistema de manufatura compreende a tecnologia intrínseca relacionada ao produto manufaturado, assim,

<sup>17</sup> O conceito de *feedback* originou-se na cibernética e refere-se às influências que as saídas do sistema geram nas entradas do mesmo. Em outras palavras, o momento de tempo presente é influenciado também pelo resultado obtido pelo sistema no instante anterior. (FORRESTER, 1968).



diferentes indústrias necessitam de tecnologias básicas (específicas/intrínsecas) diferentes, que comumente, estão relacionadas às diversas formações em engenharia (mecânica, elétrica, metalúrgica, minas, etc.). Já o sistema de produção, que tem como objetivo suportar o sistema de manufatura, volta-se para a gestão da produção, sendo o objeto de estudo da administração da produção e da engenharia de produção. O sistema de produção, dessa forma, partilha de conceitos aplicáveis genericamente em diferentes indústrias. (ANTUNES, 1998). Pritsker (1990) destaca que o papel do engenheiro de produção (engenheiro industrial) é utilizar técnicas para a melhoria da performance global do sistema.

Hopp e Speraman (2001) afirmam que o sistema produtivo<sup>18</sup> é uma rede de processos, orientada a objetivos, por onde entidades fluem. Essa rede compreende processos físicos (corte, peneiramento, estampagem, etc.) e processos de suporte (transporte, expedição, manutenção, etc.) organizados com um propósito definido, geralmente de obter lucro. As entidades são as partes manufaturadas e/ou processadas, assim como as informações necessárias para controlar o sistema. Hopp e Speraman (2001) diferenciam o objeto de trabalho do engenheiro mecânico e elétrico e do engenheiro industrial (engenheiro de produção). Enquanto os primeiros tratam das questões relacionadas ao processamento do material e ao desenvolvimento do produto, o segundo foca o fluxo do produto e a rede de processos.

No que tange ao objetivo do sistema, Black (1998, p. 46) destaca que as operações devem ser otimizadas em prol do todo, conforme passagem:

Um sistema de manufatura deveria ser um conjunto integrado, composto de subsistemas integrados, cada um interagindo com o sistema inteiro. O sistema terá um número de objetivos, e suas operações devem otimizar o todo. Otimizar as partes do sistema (isto é, os processos ou subsistemas) não otimiza o sistema inteiro.

A seguir, é apresentada uma breve contextualização histórica da evolução dos conceitos de gestão e de administração da produção, na qual se observa uma mudança essencial na visão de processo, devido à evolução de uma análise de operações para uma análise de processos.

---

<sup>18</sup> Hopp e Speraman (2001) não utilizam o termo sistema de produção. Os autores denominam “Big M Manufacturing system” o sistema de modo mais amplo, de acordo com a definição de sistema de produção utilizada nesta tese, e “Little m Manufacturing System” o sistema responsável pelas transformações dos inputs em output.

### 2.2.1 As melhorias nos sistema de produção

Antunes (1998) destaca a existência de três revoluções que sustentam a evolução dos modelos de gestão dos sistemas de produção, que são:

- i) período pré-pragmático da administração da produção;
- ii) período do paradigma das melhorias nas operações;
- iii) período do paradigma das melhorias nos processos.

O período pré-pragmático da administração da produção contempla o momento histórico pós-revolução industrial, no qual nenhum padrão hegemônico de organização e gestão da produção é dominante. (ANTUNES, 1998). Já o período do paradigma das melhorias nas operações tem como foco o aumento da produtividade do sistema de produção a partir das melhorias nas operações. Esse paradigma originou-se com o advento da administração científica, desenvolvida a partir dos conceitos de Taylor, que focava a melhoria individual das operações que compõem o sistema de produção. Taylor e Fayol introduziram as bases da gestão, separando as funções de planejamento e de controle das operações. (ANTUNES et al., 2008; BLACK, 1998). Esse conceito de focar a melhoria das operações em detrimento do processo se consolidou, fazendo com que o sistema de produção não fosse algo relevante para as estratégias da empresa. (SKINNER, 1969).

O período da melhoria nas operações coincide com o da ‘era das máquinas’ e do pensamento analítico discutido por Ackoff (1974). Segundo o autor, na ‘era das máquinas’ o trabalho no sistema produtivo foi reduzido a tarefas indivisíveis, e ainda, quando viável, foram utilizadas máquinas elementares para realizar essas tarefas. Somente as atividades que não podiam ser mecanizadas por motivos de restrição tecnológica ou econômica eram desempenhadas pelos homens. O homem e as máquinas passaram, então, a exercer, repetidamente, uma única ou poucas tarefas elementares, organizadas em uma linha de produção focada na produção em massa. Antunes (1998) destaca o aumento de produtividade obtido com as melhorias nas operações. No entanto, tal paradigma mostrou-se inadequado para enfrentar as novas ordens de concorrência, ou seja, para encarar um ambiente em que se observa um acirramento na competição pelo mercado consumidor. O contexto japonês durante e após a segunda guerra mundial gerou um ambiente em que a oferta era superior à demanda. Para Ohno (1997) essa lacuna de demanda em relação à oferta acirrou a competição

entre as empresas. Como consequência, a competição, que era exclusivamente por preço até então, fez com que as empresas atentassem para as necessidades do mercado. Assim, outras dimensões como qualidade do produto e confiabilidade na entrega, por exemplo, passaram a ser consideradas na gestão do sistema de produção. Constatase, nessa nova configuração dos mercados, a busca das empresas em atender às necessidades do mercado.

O paradigma das melhorias nos processos originou-se no período pós-segunda guerra mundial e foi consolidado com a crise do petróleo da década de 1970, eventos que limitaram a oferta de bens e serviços. Segundo Antunes (1998), as metodologias, os métodos e as ferramentas de gestão das operações originadas a partir dos conceitos basilares do paradigma das melhorias dos processos têm-se mostrado capazes de manter e elevar a competitividade das empresas no contexto de competição e restrição de demanda. O elemento central desse pressuposto recai sobre o Mecanismo da Função Produção. Tal mecanismo, proposto por Shingo (1996), auxilia a compreensão do sistema de produção como uma rede de operações e processos, sendo que a gestão do processo e, conseqüentemente, a compreensão e as melhorias dos sistemas, devem ocorrer, preferencialmente, nos processos e não nas operações. A função processo compreende o fluxo de materiais, de produtos ou de serviços no sistema de produção, enquanto a função operação compreende as transformações ao longo da função processo. O processo é a atividade fim e relaciona-se com o acompanhamento do objeto do trabalho (materiais, ideias) no tempo e no espaço. As operações, atividades meio, envolvem o acompanhamento do sujeito do trabalho (máquinas e trabalhadores) no tempo e no espaço.

Os elementos básicos da função processo, que são o processamento, o transporte, a inpeção e a estocagem, são generalizáveis a qualquer sistema de produção. (ANTUNES 1998). Já as tecnologias de manufatura compreendidas nas operações de processamento como, por exemplo, a curtição do couro e a eliminação das impurezas do minério de ferro, não são generalizáveis, sendo particulares para cada tipo de produto e correspondentes a um sistema específico de manufatura.

### **2.2.2 A questão da variabilidade**

A variabilidade existe em todos os sistemas de produção e pode ocasionar grandes impactos no desempenho do sistema<sup>19</sup>. (HOPP; SPEARMAN, 2001; SCHMENNER; SWINK, 1998). Quando a variabilidade em um processo aumenta há, ou um incremento de

---

<sup>19</sup> Mapes, Szejczewski e New. (2000) apresentam evidências empíricas em relação ao impacto negativo da variabilidade na performance do sistemas de produção.

estoque, ou uma redução de taxa de produção (*throughput*), ou a elevação do *lead time*, ou, ainda, as três ocorrências conjuntamente. (HOPP e SPEARMAN, 2001). Dessa forma, segundo Hopp e Spearman (2001), para que ocorra uma efetiva gestão das operações (sistema de produção), são necessárias as habilidades de medir, compreender e gerenciar a variabilidade. Para gerenciar os sistemas de produção afetados pela variabilidade, é importante entender as causas do fenômeno nos ambientes produtivos.

Hopp e Spearman (2001) apresentam as principais fontes de variabilidade nos sistemas de produção, que são os elementos explicitados a seguir:

- Variabilidade natural: esse tipo de variabilidade origina-se nas flutuações nos tempos de processamento em função das diferenças entre as máquinas, o material ou os operadores;
- Falhas dos equipamentos: a parada dos equipamentos em função de quebras aleatórias (não previstas) causa interrupções das operações e, conseqüentemente, variações nos tempos e fluxos de produção;
- Configuração de máquinas/operações: as paradas de máquinas para realização de configuração (*setup*) geram variações nos tempos e nos fluxos de produção;
- Problemas de qualidade: esses problemas, em um processo produtivo, acarretam retrabalhos ou perda de produção; assim, os tempos e os fluxos de produção são afetados pela não qualidade.

Hopp e Spearman (2001) destacam que a variabilidade no início do processo é mais impactante do que no final dele. A alta variabilidade no início do processo causa filas e estoque ao longo de todo o sistema, enquanto que a variabilidade no final, afeta somente uma pequena parte do processo. Desta forma, as ações para a redução de variabilidade devem ser priorizadas no início do processo.

Os conceitos apresentados nesta seção, até este ponto, retratam os sistemas de produção em um sentido amplo e genérico<sup>20</sup>. A seção a seguir detalha o sistema de produção e de manufatura e as suas características na indústria de propriedade.

---

<sup>20</sup> Antunes (1998) delimita o seu trabalho na indústria de forma. Porém, os elementos centrais da teoria dos sistemas de produção, baseados no Mecanismo da Função Produção proposto por Shingo, são generalizáveis para qualquer tipo de indústria, inclusive para serviços, ao contrário dos elementos do sistema de manufatura, que são exclusivos para cada tipo de indústria e produto produzido.

### 2.2.3 Caracterização da indústria de propriedade sob a ótica do sistema de produção e de manufatura

Esta seção busca enquadrar a firma mineradora ao *framework* mais amplo da indústria de propriedade conceituada por Salerno (1987) e ampliada por Hansen (1996). Essa caracterização é relevante para a busca, na literatura, de caminhos teóricos existentes que corroborem com o objetivo da pesquisa.

Os sistemas produtivos na indústria de propriedade e de forma apresentam diferentes características e, portanto, conforme destacado por Antunes (1998), Hansen (1996), Fransoo e Rutten (1994) e Klippel (2007), as abordagens para a gestão da produção não são as mesmas. Uma das características essenciais da indústria de propriedade é que a qualidade da matéria-prima tem forte impacto na qualidade do produto final e no rendimento do sistema como um todo. Ou seja, a qualidade do produto tem forte dependência da qualidade das matérias-primas (petróleo, minério, etc.). Além disso, a matéria-prima apresenta variações intrínsecas (naturais) nas suas qualidades e características. (FRANSOO; RUTTEN, 1994; HANSEN, 1996; KLIPPEL, 2007).

Na indústria de propriedade, o sistema de produção e de manufatura é composto por equipamentos integrados e sequenciais que operam continuamente. Os *inputs* (matérias-primas) são gradativamente transformados até a obtenção do produto final. Há pouca ou quase nenhuma interferência humana no processo, pois a produção é realizada por um conjunto de equipamentos sequenciados e monitorados por operadores. Normalmente não há intervenção humana direta nas operações de transformação devido às condições impróprias para os seres humanos (elevada temperatura, pressão, ruído, etc.). Os operadores intervêm no processo somente para mantê-lo em condições operacionais, ou seja, para garantir que os parâmetros dos produtos intermediários gerados ao longo do sistema de manufatura atendam às especificações aceitáveis. Os sistemas em questão utilizam fortemente a automação para as atividades de integração e de controle. (HANSEN, 1996).

A movimentação de material no processo geralmente é rápida, automática e “quase contínua”. (HANSEN, 1996). Praticamente não há tempo para a configuração (*setup*) de máquinas ao longo do processo, somente para ajustes de controle. A produção normalmente é contínua, semicontínua ou em batelada. (FRANSOO; RUTTEN, 1994; HANSEN, 1996).

Em relação às plantas, estas são projetadas para operar na capacidade máxima e ininterruptamente. Isso leva a um conjunto de desdobramentos, que são: i) o volume de

produção se dá em função das características do processo e de sua capacidade instalada; ii) a necessidade de capital para a realização de investimentos iniciais é elevada, acarretando alto custo fixo para a operação da planta<sup>21</sup> e; iii) os sistemas são projetados para operarem em um elevado grau de utilização da capacidade instalada. (HANSEN, 1996).

Quanto à operação desse tipo de indústria, o bom funcionamento dos equipamentos envolvidos no sistema produtivo é essencial para a sua continuidade; assim, a área de manutenção é importante para o desempenho da organização. (HANSEN, 1996).

O Quadro 2 sintetiza as características da indústria de propriedade:

Quadro 2: Resumo das características da indústria de propriedade

Síntese das características da indústria de propriedade
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A qualidade da matéria-prima tem forte impacto na qualidade do produto final e no rendimento do sistema como um todo</li> <li>• Não há tempo de setup nas máquinas ao longo do processo. Os parâmetros de processo são controlados.</li> <li>• A produção geralmente é contínua, semicontínua ou em batelada</li> <li>• As plantas são projetadas para operar na capacidade máxima e ininterruptamente</li> <li>• A manutenção dos equipamentos é essencial para a continuidade do processo</li> <li>• O volume de produção não é diretamente proporcional ao <i>lead time</i>.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor

Na literatura que trata dos sistemas de suporte à decisão<sup>22</sup>, Dennis e Meredith (2000) e Bakhrankova (2010) apontam a carência de estudos envolvendo a indústria de propriedade quando em comparação com as pesquisas publicadas sobre a indústria de forma. Para Dennis e Meredith (2000) e Bakhrankova (2010), apesar do elevado grau de controle e automação dos processos, características da indústria de propriedade, esta ainda fica muito aquém da indústria de forma em termos de ferramentas de gestão da produção e de utilização de técnicas para gestão de estoques.

A seguir, faz-se uma síntese da seção, destacando os elementos importantes para assegurar os objetivos da pesquisa.

## 2.2.4 Síntese da Seção

Conforme detalhado ao longo da seção, não é simples realizar uma análise integrada dos *inputs* do sistema de manufatura/produção em seus respectivos *outputs* dadas as

<sup>21</sup> Essa elevação no custo fixo decorre dos custos de capital, oriundos dos elevados investimentos iniciais (amortização, depreciação, retorno sobre o investimento, juros e outras parcelas). (HANSEN, 1996).

<sup>22</sup> Do inglês Decision Support System.

características observadas na indústria de propriedade. É necessário diferenciar os sistemas de manufatura da indústria de propriedade daqueles da indústria de forma, pois o tipo de configuração desse sistema atribui novas peculiaridades à manufatura além daquelas expostas de modo genérico. Dessa forma, o endereçamento da abordagem mais adequada para analisar e controlar o sistema pode ser diferente.

Há uma grande confusão na literatura a respeito dos termos sistema de manufatura e sistema de produção. Utilizou-se, nesta pesquisa, os conceitos de Black (1998) e Antunes (1998). O sistema de produção, objeto de trabalho do engenheiro de produção, deve ser gerido sob a lógica da Função Processo, com a finalidade de planejar e controlar o fluxo global de produção. Já a tecnologia de processamento intrínseca nas operações contidas no fluxo de processo, que é objeto de trabalho de engenheiros mecânicos, eletricitas, de minas, etc, tende a não proporcionar a visão de compreensão do sistema como um todo, a saber, a partir do fluxo global de produção.

Para Antunes (1998) o que universaliza o conceito é o fato de todos os sistemas de produção serem iguais por terem na sua base o Mecanismo da Função Produção, no qual existem processos (processamento, espera, inspeção e movimentação) e operações. Os processos (Função Processo) representam o fluxo do objeto de trabalho (materiais, pessoas, ideias) no tempo e no espaço. Já as operações representam o fluxo de trabalho (pessoas e equipamentos) no tempo e no espaço. Assim, por exemplo, seja para fazer uma pizza ou para atender a um paciente em um hospital, aplicam-se esses conceitos universais. (ANTUNES, 1998). No âmbito dos sistemas de produção o debate da tecnologia intrínseca de processamento é uma entrada importante, mas não central.

Já o sistema de manufatura, que Shingo (1996) chama de Tecnologia Intrínseca, é distinto porque trata da tecnologia envolvida no processamento em si. Nesse sentido, o processo de fabricação é diferente em cada tipo de indústria. Na indústria metal mecânica, por exemplo, observa-se processos de fabricação do tipo: corte, dobra, usinagem. Em uma empresa de calçados há processos como corte, costura, etc. Em uma indústria petroquímica ocorrem transformações químicas, etc. Todas as engenharias intrínsecas são distintas e oriundas da física e da química em suas diferentes aplicações. (ANTUNES, 1998).

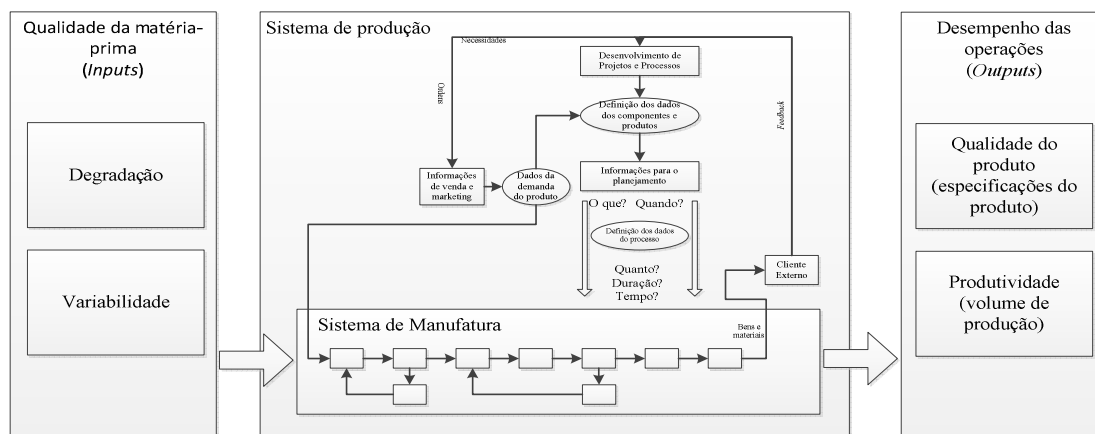
É evidente que existem inter-relações entre os Sistemas de Produção e os Sistemas de Manufatura, conforme exposto na Figura 6. Essas conexões, porém, geralmente são desconsideradas ou não detalhadas nas formulações teóricas que tratam da gestão do sistema de produção. No contexto da indústria de propriedade, de modo geral, e da mineração, em

específico, observa-se uma elevada influência da qualidade da matéria-prima no desempenho dos processamentos (sistema de manufatura) e, conseqüentemente, no sistema de produção (HANSEN, 1996; HOPP; SPEARMAN, 2001; KLIPPEL, 2007). Assim, a engenharia intrínseca preocupa-se em garantir a operação do sistema de manufatura em função das condições da matéria-prima disponível desconsiderando, em alguns casos, os postulados teóricos elaborados para os sistemas de produção. Na operação de uma usina de beneficiamento mineral, por exemplo, estoques são constituídos com o objetivo de regularizar a qualidade da matéria-prima (minimizar o efeito da variabilidade). Da teoria sobre engenharia de minas, Marques et al. (2010), destacam que quanto maior o tamanho da pilha (em toneladas) menor será a variabilidade do minério. Porém, sob a ótica dos sistemas de produção (que tratam do fluxo físico de materiais e dos sistemas de informação), estoques devem ser evitados. Na situação exposta há uma nítida contradição. Ao eliminar um estoque de regularização, a produtividade horária local de uma operação de processamento é afetada negativamente, enquanto o tempo de atravessamento do sistema é reduzido. Na situação descrita, pergunta-se o que é melhor para o desempenho da organização: elevar a produtividade horária de uma operação específica ou reduzir o tempo de atravessamento global?

Um engenheiro de minas, por exemplo, ao identificar uma solução para elevar a recuperação de ferro de uma célula de flotação, não está, necessariamente, preocupado com o impacto dessa ação sobre o fluxo global de produção. Porém, sob a ótica de melhorias nos processos e de otimização do fluxo global de produção, um investimento em melhoria, ampliação, ou incremento tecnológico em uma operação de processamento contida no sistema de manufatura, deve ser subordinado a uma análise global, sob a perspectiva do sistema de produção.

Quanto ao *framework* conceitual da pesquisa, realiza-se a primeira revisão, agregando a ele a visão de sistema de produção e de manufatura detalhada ao longo desta seção. A Figura 7 ilustra a nova versão do *framework* conceitual.





Fonte: Elaborado pelo autor

A seção a seguir aborda a modelagem de sistemas.

### 2.3 MODELAGEM DE SISTEMAS

Esta seção apresenta as abordagens existentes para a modelagem de sistemas. Segundo Pidd (2004a) o objetivo da PO e da *Management Science* (MS) é melhorar o modo como as organizações operam. Para o autor, isso é possível a partir da construção de modelos do sistema. Pritsker (1997, 1990) destaca que a modelagem é parte do processo que sustenta o aumento da performance de um sistema. Para Pritsker, os conhecimentos da engenharia industrial devem ser integrados aos da matemática e da computação para a formulação e construção de modelos para projetar, analisar, avaliar e prever o comportamento dos sistemas produtivos.

Hopp e Spearman (2001) destacam que bons modelos descritivos levam a bons modelos prescritivos. Otimizar um sistema não totalmente compreendido é futilidade. Modelos são imprescindíveis, mas devem ser utilizados de acordo com a necessidade de tomada de decisão pelos gestores. Os autores destacam que, em uma organização, modelos são o meio para suportar decisões mais apropriadas e não o fim. Para Hopp e Spearman (2001) a arte da modelagem consiste na seleção de um modelo apropriado para uma dada situação e na coordenação de diversos modelos para suportar e melhorar tanto quanto possível a tomada de decisão.

Inicialmente, cabe a definição de modelagem e modelo. A modelagem é a metodologia seguida para desenvolver e validar uma representação física, lógica, matemática ou qualquer outra forma de representação de um sistema, entidade, fenômeno ou processo. Já o modelo é o

resultado da modelagem, é a representação do sistema, entidade, processo ou fenômeno através da linguagem matemática, lógica, física ou outra forma. (MORONEY; LILIENTHAL, 2008). No contexto das organizações, Pidd (1998, p. 25) apresenta a seguinte definição:

Um modelo é uma representação externa e explícita de parte da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade.

Modelos nada mais são do que uma simplificação da realidade, permitindo a compreensão e a estimação de diferentes cenários para esta realidade (PIDD, 1998). Um dos benefícios dos modelos é a redução dos recursos financeiros e temporais em relação com a experimentação da realidade. (PIDD, 1998). Para exemplificar, pode-se imaginar o custo de experimentar o resultado de uma melhoria de processo para obter os resultados de *lead time* em um sistema produtivo complexo. Modelos podem ser pensados como veículos através dos quais os gerentes podem expressar sua visão sobre as operações que controlam. (LITTLE, 1970). Pidd (1998) e Little (1970) defendem a utilização de modelos para suportar a tomada de decisão, porém em nenhum momento indicam a simulação como substituta da experiência e da intuição dos gestores. Nesse sentido, segundo Little (1970), um modelo somente é utilizado pelo gerente quando representa uma extensão das habilidades desse gestor de pensar sobre a operação e de analisá-la. Ou seja, o modelo deve ser customizado para o contexto do tomador de decisão. Isso torna o processo de desenvolvimento do modelo diferente daquilo que o cientista deseja. O cientista busca a construção de modelos genéricos, mas isso os torna obsoletos para os gerentes. (LITTLE, 1970).

Para Little (1970)<sup>23</sup>, um modelo deve ser: i) simples (fenômenos importantes devem ser inseridos nos modelos, porém o modelador deve resistir à inclusão de complexidade até que o tomador de decisão demonstre estar preparado para isso); ii) robusto (o usuário deve ter dificuldade para gerar *outputs* errados); iii) fácil de controlar (o usuário deve ser capaz de adaptar o comportamento do modelo ao seu jeito); iv) adaptativo (o modelo deve ser atualizado quando novas informações chegam); v) completo nas questões centrais (entradas subjetivas tornam o modelo mais completo e próximo da realidade – completude conflita com simplicidade) e; vi) fácil de comunicar (o usuário deve conseguir rodar *outputs* para diferentes *inputs*).

---

<sup>23</sup> O artigo escrito por Little em 1970 foi premiado pela INFORMS como um dos 10 artigos mais relevantes para a área de *Management Science* e *Operation Research* em 2004. O artigo propõe um modelo para decisão de alocação de recursos financeiros em propaganda. O destaque do artigo não está no modelo proposto propriamente dito, mas na discussão iniciada por Little no que tange ao uso de modelos por gerentes.

Pidd (1998) destaca que os modelos utilizados nas ciências administrativas são uma forma de aplicar uma análise racional à questões complexas. A resolução de problemas gerenciais está no centro da função das ciências administrativas. (PIDD, 1998). Porém, para a resolução de um problema é necessário conhecê-lo. No entanto, o termo “problema” pode ser compreendido de diversas maneiras. Ackoff (1974) apresentou a ideia de que existem enigmas, problemas e confusões (*messes*). Os enigmas são problemas, geralmente lógicos, com regras claramente definidas, o que faz com que tenham solução única. Os problemas, ao contrário dos enigmas, não apresentam uma única resposta definitiva e correta. Ackoff (1974) destaca que no problema existe uma questão básica. Assim, para uma mesma questão básica, pode haver diferentes interpretações, tornando a resolução de um problema não necessariamente única. No conceito de Ackoff (1974), o enigma é uma confusão (*messe*) de problemas. Segundo o autor, as confusões apresentam um conjunto de questões a serem enfrentadas, as quais são inter-relacionadas, ou seja, a confusão é um sistema de problemas.

Modelos possibilitam explicar o comportamento global de um sistema, podendo integrar os diferentes elementos que o compõe. A modelagem, assim, torna possível compreender a dinâmica do sistema e as variabilidades existentes no sistema de produção e de manufatura de modo integrado. (BLACK, 1998; PIDD, 2004a; PIDD, 1998; ROBINSON, 2004). Os modelos permitem a comparação de diferentes alternativas, da forma mais objetiva possível. (HOPP; SPEARMAN, 2001; ROBINSON, 2004).

Little (2004) apresenta um interessante diálogo que teve com Marshal Fisher. Na referida interação, Marshal sugere que um modelo pode ser utilizado de duas maneiras: i) totalmente automatizado, sem interferência humana; ou como um ii) sistema de suporte à decisão, sob a direção de um gerente. O primeiro tipo tem como exemplo modelos de otimização para carregamento e descarregamento de navio, sendo que sua finalidade, nesse caso, é minimizar o tempo de permanência dos navios no porto. Após a fase de validação desse modelo, ele pode ser utilizado como “*black-box*”, ou seja, parametrizam-se os seus dados de entrada e ele disponibiliza a sequência ótima de movimentação no porto. O segundo tipo, diz respeito a modelos que devem ser simples e transparentes, sendo assim mais valiosos para os gerentes do que complexos modelos matemáticos de difícil compreensão. Fisher destaca que o uso de modelos “*black box*” em suporte à decisão geralmente falha, porque os gerentes não querem implementar recomendações que não compreendem.

Além desta breve introdução, a seção contempla o histórico da Pesquisa Operacional (PO) e as bases para consolidação da mesma no âmbito empresarial e acadêmico, as origens da crise da PO tradicional ou PO *hard*, e o surgimento das abordagens *soft*. Além disso,

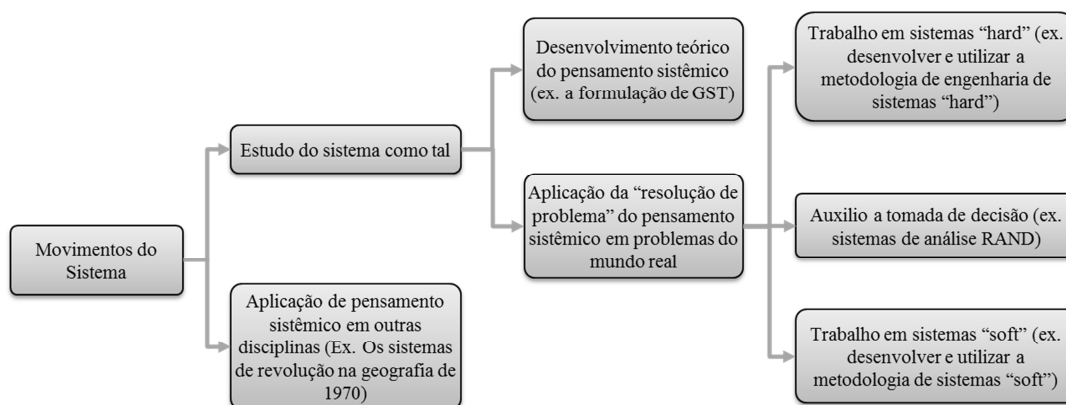
busca-se subsídios para integração das abordagens *hard* e *soft* para a modelagem de sistemas complexos. Por fim, apresenta-se uma síntese da seção.

### 2.3.1 Considerações sobre a Teoria dos Sistemas

O termo sistema é amplamente utilizado na literatura de áreas como engenharias, ciências sociais, biologia, física. Em uma tentativa de clarificar o campo da ciência dos sistemas Flood e Carson (1993) apresentam uma visão geral das origens e evoluções da teoria dos sistemas. Os autores destacam a amplitude da referida teoria e os diferentes caminhos teóricos desenvolvidos desde o surgimento desse campo de estudos.

Dada a amplitude de áreas que tratam dos sistemas, esta seção dedica-se exclusivamente às questões relacionadas à aplicação das ideias sistêmicas para a resolução de problemas no mundo real, conforme *framework* apresentado por Checkland (1999) - Figura 8. Para Ackoff (1971), a literatura sobre sistemas é dispersa e difícil de ser rastreada, resultando em termos diferentes que se referem à mesma coisa e em termos iguais que se referem à conceitos diferentes. Mingers e White (2010) também pontuam que a literatura sobre sistemas é extensa e que é aplicada em diversas áreas do conhecimento, o que torna difícil qualquer revisão abrangente. O destaque apresentado nesta seção são os sistemas artificiais construídos pelo homem, dado o problema de pesquisa proposto, que é a compreensão da degradação do recurso natural no desempenho do sistema de produção e de manufatura.

Figura 8: O movimento dos sistemas



Fonte: Adaptado de Checkland (1999)

Ackoff (1974) descreve a revolução dos sistemas e, para tanto, o autor apresenta duas visões alternativas que impulsionaram o desenvolvimento da humanidade. A primeira visão,

denominada de ‘era das máquinas’, é centrada nos ideais do mecanicismo<sup>24</sup>, determinismo<sup>25</sup> e reducionismo<sup>26</sup>, e a segunda, chamada de ‘era dos sistemas’, é baseada nas doutrinas do expansionismo<sup>27</sup> e da teleologia<sup>28</sup> e no modo de pensar em sistemas.

A teoria geral dos sistemas foi organizada por Bertalanffy, um biólogo alemão que na década de 50 buscou compreender e explicar o comportamento de diferentes fenômenos naturais e não naturais. (ACKOFF, 1974). A construção teórica de Bertalanffy (1975) é contrária à visão mecanicista do mundo e defende que um sistema é maior que a soma das partes que o compõe. Na visão defendida pelos mecanicistas o sistema deveria ser reduzido em partes menores para que leis elementares fossem obtidas. Os sistemas não eram analisados de modo integrado, pois, a visão vigente na época dava conta de que a soma das partes representava o comportamento global do sistema. Segundo Bertalanffy (1975), existem características do sistema que não podem ser identificadas quando os componentes são analisados isoladamente. É justamente a partir desse conceito de análise global do sistema em detrimento das partes que surgem as correntes teóricas baseadas na visão de sistema ou, nas palavras do Ackoff (1974), a ‘era dos sistemas’.

O desenvolvimento da teoria geral dos sistemas traz para o arcabouço teórico um conjunto de novas óticas para o estudo dos sistemas, como: a visão do todo, sistema e subsistemas, os limites e as influências entre o sistema e o ambiente, os sistemas abertos, os *feedbacks* positivos e negativos e a visão holística. (MINGERS; WHITE, 2010).

A visão e os conceitos modernos de sistema deixam para trás a percepção mecanicista e passam a incorporar a ideia de observar o todo e não das partes. Forrester (1968, p. 1-1), um precursor no estudo da dinâmica dos sistemas, apresenta o seguinte conceito:

Sistema é um agrupamento de partes que operam juntas, visando um objetivo comum. Um sistema sempre pressupõe uma interação causa-efeito entre as partes que o compõem.

---

<sup>24</sup> Na visão mecanicista o mundo é compreendido como um mecanismo cujo comportamento é completamente determinado pelas suas estruturas, nas palavras de Ackoff, um ‘relógio hermeticamente selado’. (ACKOFF, 1974).

<sup>25</sup> O determinismo é uma doutrina científica que assume que todo fenômeno pode ser reduzido a relações causais simples. (ACKOFF, 1974).

<sup>26</sup> Segundo Ackoff (1974) o reducionismo consiste em uma teoria segundo a qual tudo no mundo pode ser reduzido, decomposto e desmontado em partes que, por sua vez, são compostas por elementos simples e indivisíveis. Por exemplo, para os reducionistas os problemas podem ser reduzidos a problemas menores e a solução do problema maior é a soma das soluções individuais de cada problema reduzido.

<sup>27</sup> Segundo Ackoff (1974) o expansionismo é uma doutrina que supõe que todos os objetos, eventos e experiências são partes de um todo maior. Para Ackoff é uma nova forma, mas compatível com o reducionismo.

<sup>28</sup> A teleologia é uma doutrina alternativa ao mecanicismo, orientada para explicar os fenômenos pelos fins. (ACKOFF, 1974).

O livro de Forrester (1968), *Principle of System*, publicado em 1968, baseia-se nas construções teóricas da dinâmica de sistemas, proposta por ele mesmo no livro *Industrial Dynamics* de 1961. O trabalho de Forrester é posterior ao de Bertalanffy, mas observa-se que o autor em análise não cita o trabalho do seu antecessor, possivelmente devido aos diferentes enfoques que cada um concedeu para o tema na época em que lançou sua obra. No entanto, observam-se semelhanças entre os conceitos, como a ideia central segundo a qual um sistema é constituído por partes que interagem em prol do todo.

Ackoff (1971, p. 2) define sistema como:

Um sistema é um conjunto de elementos inter-relacionados. Assim, um sistema é uma entidade composta por pelo menos dois elementos e uma relação que existe entre cada um dos seus elementos, e pelo menos um outro elemento do conjunto. Cada um dos elementos do sistema é ligado a todos os outros elementos, direta ou indiretamente<sup>29</sup>.

O conceito proposto por Ackoff (1971) evidencia a ideia de que o sistema é composto por inúmeras partes e que essas partes estão diretamente inter-relacionadas. O autor defende que o conceito de sistema exerce um papel crítico nas ciências contemporâneas. A visão sistêmica dos cientistas da PO, os *Management Scientist*, é essencial para as abordagens de estruturação de problemas apresentadas pela MS, pois, segundo Ackoff (1971), a organização pode ser compreendida como um tipo especial de sistema. O autor apresenta uma estrutura conceitual para a ciência dos sistemas (*system Science*), que origina os princípios da PO e da MS.

A primeira obra de Ackoff, de 1971, busca conceituar um sistema sob o viés da PO, sua área de atuação. Um segundo artigo desse autor, publicado em 1974, revela a revolução da teoria dos sistemas. Nesse trabalho, Ackoff (1974) aponta que, estruturalmente, um sistema é um todo divisível, mas que, funcionalmente, é um todo indivisível, na medida em que algumas propriedades essenciais podem ser perdidas durante a divisão. No entanto, o autor compreende que um sistema pode ser composto por outros sistemas e todos os sistemas podem ser parte de um sistema maior. Essa menção de Ackoff de que os sistemas são compostos por outros sistemas e que todos eles estão contidos em um sistema maior é a base para o desenvolvimento das abordagens fundamentadas em análise de sistemas para a compreensão e a resolução de problemas das organizações<sup>30</sup>.

---

<sup>29</sup> “A system is a set of interrelated elements. Thus, a system is an entity, which is composed of at least two elements and a relation that holds between each of its elements and at least one other element in the set. Each of a system's elements is connected to every other element, directly or indirectly”.

<sup>30</sup> Esse tema é discutido na seção 2.5 (Pesquisa operacional).

Segundo Ackoff (1974), na ‘era dos sistemas’ a preocupação com o sistema traz à tona o ‘pensamento sintético’ ou ‘pensamento sistêmico’, pelo qual algo a ser explicado é visto como parte do sistema maior e é ilustrado em termos do seu papel no todo. Essa forma de pensar apresenta uma ruptura em relação ao pensamento analítico, cujo princípio estava atrelado aos ideais mecanicistas e deterministas.

O desenvolvimento do pensamento sistêmico enraizou-se na medida em que o gerenciamento e controle dos sistemas (complexos) não eram mais atendidos pela lógica do ‘pensamento analítico’, uma vez que as interações ocorridas no sistema como um todo eram tão ou mais importantes do que a análise isolada de cada componente. (ACKOFF, 1974). Para Kasper (2000) o surgimento do pensamento sistêmico foi influenciado fortemente pela cibernética, pela teoria da decisão, pela teoria da informação, entre outras. No tocante às ciências administrativas, a corrente sistêmica influenciou a criação de novas áreas de estudos, como a engenharia de sistemas, a análise de sistemas, a administração cibernética e a PO.

O modo de pensar sintético, para Ackoff (1974), aplicado de modo estruturado para a resolução de problemas dos sistemas, é chamado de abordagem de sistemas (*system approach*). Mingers e White (2010) apontam Ackoff e Churchman como os precursores da proposição da abordagem de sistemas para o desenvolvimento da PO.

A abordagem de sistemas (*the system approach*) para a resolução de problemas das organizações, que tem em Churchman um de seus primeiros pensadores, foca os sistemas como um todo e não em partes separadas, conforme preconizado por Bertalanffy. (ASSAD; GASS, 2011). Segundo Ackoff (1971), essa abordagem busca compreender o desempenho total do sistema, mesmo em situações em que se deseja mudanças em partes, haja vista existirem propriedades do sistema que só podem ser constatadas a partir de uma visão holística (integral). Para o autor, essas propriedades derivam das relações entre as partes do sistema, de como elas interagem e se encaixam.

A partir dos elementos sobre a teoria dos sistemas previamente apresentados, o conceito de sistema, para os fins desta pesquisa, é definido como um conjunto de partes (ou elementos) que interagem direta ou indiretamente para transformar um conjunto de entradas em uma ou mais saídas. Essa definição é restrita aos sistemas físicos desenvolvidos pelo homem, pois o objeto de estudo são os sistemas de produção e de manufatura desenvolvidos com o objetivo explícito de explorar os recursos naturais para atender ao desenvolvimento das sociedades.

No que tange à fronteira do sistema, não há uma posição explícita em Bertalanffy (1975), Assad e Gass (2011); Forrester (1968), Gass e Assad (2004), Checkland (1999), Ackoff (1974) e em Ackoff (1971) de como obter a delimitação do sistema, ou seja, de que elementos devem ser considerados no sistema que está sendo estudado. Antunes (1998) defende que a fronteira do sistema é definida de forma artificial e depende do objetivo do trabalho ou estudo que está sendo realizado.

Segundo Ackoff (1974), as novas construções teóricas relacionadas à visão sistêmica, apresentadas em oposição às doutrinas da ‘era das máquinas’, foram impulsionadas com o advento dos aparatos tecnológicos desenvolvidos durante a segunda guerra. Foi durante a guerra que os primeiros computadores foram desenvolvidos para coletar, analisar e tratar informações para suportar decisões nos frentes de batalha.

Para Ackoff (1974), as doutrinas do expansionismo, da teleologia e do modo sintético de pensar, centrais na ‘era dos sistemas’, são produtos da pós-revolução industrial, sendo esta revolução baseada em três tipos diferenciados de desenvolvimento tecnológico. O primeiro refere-se ao surgimento do telégrafo e do telefone, possibilitando a transmissão de símbolos e a comunicação. A segunda tecnologia foram os instrumentos, capazes de medir o comportamento de eventos e objetos. Com aparelhos como barômetro, altímetro e velocímetro, o homem passou a ser capaz de observar parâmetros da máquina, a partir de coleta de dados que apontavam o comportamento físico da mesma. A terceira tecnologia apontada por Ackoff são os computadores digitais, que possibilitaram transformar os dados em informações e as informações em instruções.

O desenvolvimento dos sistemas computacionais disponibilizou aos cientistas novos meios para a compreensão das construções teóricas. No entanto, Kasper (2000, p. 40) destaca que a potencialidade oferecida pelos computadores “escapava do arcabouço explicativo analítico”. Isso porque, segundo a doutrina determinista, os fenômenos complexos são explicados por relações simples de causa-e-efeito<sup>31</sup> e, assim, as análises de escolhas e as definições de objetivos e de metas geradas a partir dos computadores, fogem do princípio determinista.

Se, por um lado, o desenvolvimento da teoria dos sistemas segue diferentes rumos e desdobramentos a partir das ideias iniciais de Bertalanffy, por outro, observa-se que tal teoria é central para o desenvolvimento da PO. A seção a seguir apresenta os vieses tanto do

---

<sup>31</sup> Relações causais simples apontadas como essência do determinismo, pressupõem que um dado fenômeno pode ser explicado pela relação de duas ou mais variáveis de modo aditivo (linear). Por exemplo, A causa B ou E mais F causam G. Assim, sabendo o valor de A, é possível obter o valor de B.



pensamento analítico quanto do pensamento sistêmico, central na ciência dos sistemas, para o desenvolvimento da área de PO. Mostra, também, as influências desses pensamentos nos métodos, técnicas e ferramentas de modelagem disponíveis na literatura para a resolução dos problemas das organizações.

### **2.3.2 A Pesquisa Operacional: o estabelecimento de uma área do conhecimento**

A PO, como atualmente é conhecida, iniciou-se na Inglaterra durante a segunda guerra mundial. Na época, os ingleses estavam interessados em estudar a operação dos radares, criados em 1934 para interceptar aviões inimigos que sobrevoavam o solo inglês. O problema, na ocasião, era a insuficiência de radares para cobrir todo o território inglês, sendo necessário distribuí-los de modo a ampliar a área de cobertura. (GASS; ASSAD, 2004; KIRBY, 2007; KJELDSSEN, 2008; ROSENHEAD, 2009). Em 1941, foi instituído um grupo de pesquisa operacional do comando da força aérea de combate do Reino Unido. Na época, o grupo de pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento como matemática e engenharia, além de especialistas em guerra, reuniu-se para pesquisar sobre operações militares como alocação de tropas, transporte de artilharia e disposição de radares. As técnicas e ferramentas utilizadas para suportar as decisões envolvendo as operações e as funções militares durante a segunda guerra eram similares às usadas pelas firmas para enfrentar o pós-guerra, em síntese, a alocação de recursos escassos: matéria-prima, dinheiro, mão de obra, etc. Os ganhos financeiros promovidos pela PO para as empresas resultou em acelerada aceitação das referidas técnicas por parte das organizações. (GASS; ASSAD, 2004; KIRBY, 2007; KJELDSSEN, 2008; ROSENHEAD, 2009).

A PO estabeleceu-se como área de estudos e como importante campo do conhecimento nos vinte anos subsequentes ao fim da segunda guerra. (GASS; ASSAD, 2004; KIRBY, 2007; KJELDSSEN, 2008; ROSENHEAD, 2009). Os precursores ingleses, Charles Goodeve, Patrick Blackett, Stafford Beer e o americano Philip Morse introduziram a PO como uma área para auxiliar no processo decisório nas organizações. (ASSAD; GASS, 2011). Na década de 1950, sociedades e institutos de pesquisa foram fundados, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, para discutir as questões relacionadas à nova área do conhecimento. Dada a sua origem no âmbito militar e a sua acelerada difusão após a segunda guerra mundial, em institutos, centros de pesquisas, empresas e governos, não há uma definição precisa para o termo PO. Inicialmente, Goodeve (1948) definiu-a como uma

metodologia com base matemática para decisões relativas às operações controladas por um gestor. Já Morse e Kimball (1951, p. 1) conceituaram a PO como “um método científico que provê executivos com uma base quantitativa para decisões concernentes às operações sob seu controle”. Morse (1951) defende que a PO oferece oportunidade aos cientistas de contribuírem para a utilização mais eficaz dos recursos humanos e materiais, ao mesmo tempo em que desenvolve importantes pesquisas aplicadas para a ciência.

Ao longo do processo de estabelecimento da PO como uma disciplina no meio acadêmico, tal conceito foi debatido nos primeiros periódicos e conferências sobre o tema. Na ocasião, Morse tentou acabar com as discussões sobre a definição conceitual da PO, sem sucesso. (KJELDTSEN, 2008). Segundo Kjeldsen (2008), os motivos pelos quais o debate ainda perdura são a ampla gama de métodos e abordagens existentes na PO e a sua abrangente área de atuação, em campos como, por exemplo, marketing, finanças e manufatura. Gass e Assad (2004) realizaram um esforço para detalhar a evolução da PO no livro intitulado “*An Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History*”. Na obra, os autores buscam identificar os limites da PO e, conseqüentemente, definir precisamente o termo. Eles, porém, não chegam a essa definição, pois percebem que as relações interdisciplinares da PO, na sua origem como, por exemplo, a engenharia industrial, a matemática, a computação, a estatística e a economia, tendem a desaparecer com o tempo, tornando as influências de outras áreas também presentes.

A revisão histórica realizada por Gass e Assad (2004) estende-se até o ano de 2004. Observa-se que dada a amplitude da área da PO nos últimos anos, a construção da evolução histórica a partir da década de 1980 torna-se confusa. Há um elevado número de publicações sobre o tema, o que torna a linha do tempo apresentada pelos autores meramente informativa. A pesquisa do termo “*operation research*”<sup>32</sup> realizada na plataforma da *Microsoft Academic Search*, retornou um total de 9018 publicações, conforme frequência anual representada na Figura 9.

Miser (1997) apresenta um significado contemporâneo para a PO, definindo-a como uma disciplina aplicada que: i) observa o fenômeno das operações (ou das funções) de uma organização, constituído pelas pessoas, pelos materiais, pela tecnologia, pela sociedade e pelo dinheiro; essas operações convergem para um objetivo, uma necessidade ou um problema e; ii) concede a devida consideração às percepções conhecidas, desconhecidas, e implícitas dos

---

<sup>32</sup> As variações pesquisadas foram: *operational Research*, *operation research*, *operating research*, *operative Research*, *Operations Researcher*. É importante destacar que no Reino Unido o termo usualmente utilizado é *operational research*, enquanto que nos Estados Unidos é *operation research*.

atores humanos presentes nas operações. A PO representa esses fenômenos em modelos (ou teorias) e os manipula para desenvolver novos entendimentos sobre eles. Com a intenção de alcançar os fins desejados, os pesquisadores da PO/MS aplicam o entendimento obtido à problemas da realidade a partir da qual as observações se originam.

Figura 9: Número de artigos e citações relacionados à chave de busca “*operation research*”



Fonte: Elaborado pelo autor

Hillier e Lieberman (2013, p. 2) expressam que

[...] a pesquisa operacional envolve “pesquisa sobre operações”. Portanto, a PO é aplicada a problemas que compreendem a condução e a coordenação das operações (isto é, as atividades) em uma organização.

A definição de PO fornecida pelo *Institute for Operations Research and the Management Science* (INFORMS, 2012), importante instituto norte americano que coordena um conjunto de publicações científicas e congressos relacionados à PO, expõe que ela é a disciplina que utiliza soluções analíticas para modelar sistemas complexos com o intuito de proporcionar melhores decisões com menor risco<sup>33</sup>, em níveis estratégico, tático e operacional. Já a *Association of European Operational Research Societies* (EURO, 2012), define a PO como uma “abordagem científica para a solução de problemas no gerenciamento de sistemas complexos”<sup>34</sup>. Por fim, a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional

<sup>33</sup> Frequentemente risco e incerteza são utilizados indiferentemente na literatura. Frank Knight, economista americano, em 1921 propôs conceitos para risco e para incerteza que foram aceitos pela literatura. Segundo Knight (1921) o risco pode ser estimado a partir de uma distribuição de probabilidade. Já a incerteza não pode ser estimada. No contexto da PO, em geral, e desta pesquisa, em especial, esses conceitos de risco e de incerteza são apropriados.

<sup>34</sup> “as a scientific approach to the solution of problems in the management of complex systems”

(SOBRAPO) conceitua a PO como “uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais. Tendo como foco a tomada de decisões, aplica conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas.” (SOBRAPO, 2012).

As definições contemporâneas para a PO usualmente apresentadas em livros, periódicos, institutos e sociedades que abordam o tema, convergem para os seus elementos centrais, que são:

- a noção de sistema: representação do sistema real em um modelo matemático ou lógico que possibilita a experimentação ou a otimização do mesmo;
- a estruturação e a solução de problemas: a abordagem dos sistemas (*system approach*) consiste no processo de estruturação de uma situação problemática e na solução de problemas usualmente utilizados pela PO;
- o suporte à tomada de decisão: suporte à tomada de decisão no sentido de fornecer informações quantitativas que apresentam resultados na modelagem do sistema com o objetivo de promover uma melhor utilização dos recursos.

A natureza da PO olha para o todo e não para as partes, conforme destacado por Hillier e Lieberman (2013, p. 2):

[...] a PO adota um ponto de vista organizacional. Assim, tenta solucionar os conflitos de interesses entre as unidades de modo que seja a melhor solução para a organização como um todo. Isso não implica que o estudo de cada problema deva considerar explicitamente todos os aspectos da organização; ao contrário, os objetivos devem ser consistentes com aqueles de toda a organização.

A PO é compreendida nesta tese como uma área do conhecimento que apresenta uma coleção de abordagens (métodos, técnicas e ferramentas) para a modelagem de sistemas complexos, visando a compreensão, estruturação e solução de problemas. Usualmente, a PO é vista como uma disciplina orientada exclusivamente para a resolução de problemas. Miser (1997) apresenta uma visão mais ampla, a partir da qual a modelagem de sistemas não busca exclusivamente a solução de problemas de cunho prático, ela também procura compreender o funcionamento de sistemas em geral para testar formulações teóricas.

Outro ponto importante da PO é que ela ajuda no processo de aprendizagem<sup>35</sup> individual e coletivo, pressuposto que passou a ser explicitado no desenvolvimento teórico da PO *soft*, que será apresentado na seção a seguir.

A PO tem se desenvolvido desde a década de 1960 a partir do uso de métodos para resolução de problemas centrados no indivíduo, ou seja, no pesquisador ou praticante. (ROSENHEAD, 1996). As formulações padrão da metodologia de PO compreendem as etapas de formulação do problema, teste, solução e implantação. Cabe ressaltar que variações em relação a esse processo padrão são apresentadas por diferentes autores, como Ackoff (1956), Arenales, Armentano e Morabito (2007) e Hillier e Lieberman (2013).

A metodologia proposta por Ackoff (1956) apresenta as seguintes etapas: i) formulação do problema; ii) construção do modelo matemático para representar o sistema sob análise; iii) derivação de uma solução para o problema; iv) teste do modelo e da solução derivada; v) estabelecimento dos controles sobre a solução e; v) operacionalização da solução. Ackoff (1956) destaca que a execução dessas etapas não é necessariamente linear. São comuns as situações em que a formulação do problema não se encontra completa até a conclusão do projeto. Observa-se, nesta passagem do artigo de 1956, que Ackoff não se sentia confortável com o caminho que a PO veio a tomar quando passou a exigir que o problema deve ser previamente conhecido para então ser modelado.

Arenales, Armentano e Morabito (2007) destacam que a formulação do problema nem sempre ocorre no início do ciclo do processo de trabalho. Usualmente, há constantes interações entre as diferentes etapas do processo de modelagem até que o modelo esteja apto para suportar as decisões relacionadas ao problema analisado. Segundo os autores, o processo de modelagem da PO *hard*, inicialmente, a partir de um sistema ou problema real, formula o problema e conduz a modelagem dele em termos matemáticos e/ou lógicos. A segunda etapa consiste em deduzir e analisar as respostas geradas pelo modelo. Na sequência, as análises são interpretadas, a fim de inferir a decisão mais adequada para o problema. Por fim, a decisão apontada é avaliada e julgada no sistema real.

Hillier e Lieberman (2013) resumem o processo de modelagem da PO em seis etapas. A primeira compreende a definição do problema de interesse e a coleta de dados relevantes. A segunda etapa consiste na formulação do modelo matemático para representar o problema e a terceira etapa equivale ao desenvolvimento de procedimentos computacionais para derivar a solução do problema através do modelo. Na quarta etapa, o modelo é testado e refinado, caso

---

<sup>35</sup> Morecroft (1994) e Senge (1990) abordam a questão da aprendizagem e da modelagem.

necessário. A quinta etapa consiste na preparação do modelo para suportar a decisão na organização. E, finalmente, a sexta etapa, indica a implantação da decisão.

A seção a seguir apresenta os principais métodos, técnicas e ferramentas da PO *hard*.

### 2.3.2.1 As abordagens da Pesquisa Operacional Tradicional (*Hard*)

O desenvolvimento da PO após a segunda guerra mundial seguiu caminhos diferentes nos Estados Unidos e na Inglaterra. Se por um lado os praticantes da PO nos Estados Unidos desenvolveram métodos, técnicas e ferramentas fundamentalmente baseadas em modelos matemáticos, por outro lado os ingleses propuseram abordagens não puramente matemáticas.

Ackoff (1956) justifica as preferências norte americanas por abordagens baseadas em modelos matemáticos devido à formação em matemática e física dos precursores da PO no país. A esse grupo, juntaram-se economistas, engenheiros industriais e cientistas comportamentais, que auxiliaram a moldar a PO nos Estados Unidos até chegar aos padrões atuais, a saber, focada em soluções analíticas<sup>36</sup> baseadas em modelos matemáticos, comumente fundamentados em teorias econômicas e modelos cognitivos.

Os modelos analíticos requerem, geralmente, uma elevada dose de simplificação para tornar o problema analisado solucionável. Além disso, segundo Freitas Filho (2008), tais modelos apresentam um número limitado de medidas de desempenho do sistema. Na programação linear, por exemplo, uma função objetiva (otimização) limita-se a uma única ou a poucas variáveis. Segundo Chung (2003), a necessidade da modelagem analítica para a otimização de um sistema limita o uso desses métodos e ferramentas, fazendo com que as mesmas sejam restritas a sistemas simples. Os métodos e técnicas de otimização analisam o problema de modo estático, ou seja, em um dado instante de tempo, enquanto a simulação possibilita a análise dinâmica do sistema. (CHUNG, 2003).

O desenvolvimento da PO na Inglaterra e nos Estados Unidos levou ao surgimento de um conjunto de técnicas, classificadas em: i) estatísticas: controle de estoque, teoria das filas; ii) técnicas matemáticas (otimização): programação linear, programação dinâmica, teoria dos

---

<sup>36</sup> A introdução de modelos analíticos para analisar os fenômenos econômicos, por Alfred Marshal, no final do século XIX, influenciou o desenvolvimento da teoria econômica, que passou a formular modelos para explicitar a lógica de funcionamento das firmas e do mercado. No sentido mais amplo, a modelagem analítica, geralmente, assume um conjunto de simplificações e delimitações sobre o complexo sistema que compreende as firmas e o mercado. A existência das delimitações e simplificações promoveu um amplo quadro analítico para tratar as questões da firma e do mercado desenvolvendo, assim, diferentes abordagens para a teoria da firma. (TIGRE, 1998).

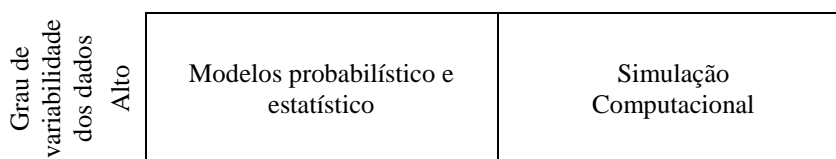
jogos, nos EUA e; iii) técnicas não puramente matemáticas: simulação computacional, na Inglaterra. (ROSENHEAD, 2009).

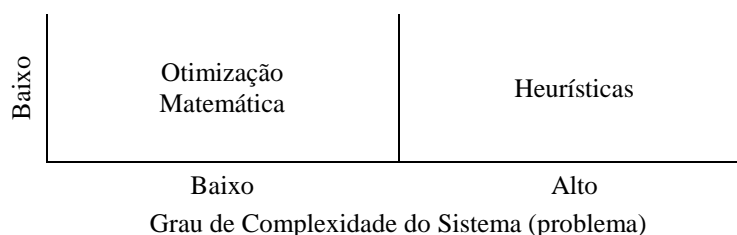
Já a INFORMS (2012) destaca que para atingir os resultados de proporcionar melhores decisões com menor risco, o conjunto métodos, técnicas e ferramentas utilizadas pelos pesquisadores resume-se em três classes: i) simulação (testar ideias e novas abordagens de melhorias); ii) otimização (apontar a melhor opção quando há um conjunto de opções viáveis) e; iii) probabilidade e estatística (mensurar o risco, encontrar conexões e realizar previsões). (INFORMS, 2012).

Optar por qual abordagem de modelagem utilizar para compreender e melhorar um sistema no mundo real depende de elementos como: i) predisposição do pesquisador; ii) qual é o problema ou situação problemática e; iii) quais os objetivos da modelagem. Não é excludente o uso de mais de uma abordagem conjuntamente (*hard-hard; hard-soft; soft-soft*), conforme destacado anteriormente. Rodrigues (1995) sugere um *framework* simplificado para auxiliar na escolha do método, técnica ou ferramenta de PO *hard* em função da complexidade do sistema e do nível de variabilidade existente nele. A Figura 10 ilustra o *framework* proposto por Rodrigues (1995).

O *framework* proposto por Rodrigues (1995) baseia-se em dois eixos. O primeiro é relacionado à variabilidade dos dados que representam o sistema e o segundo, ao grau de complexidade do problema. Esses eixos são segmentados em intensidade alta e baixa e, nos quadrantes, os métodos, técnicas e ferramentas são classificados. Segundo Rodrigues (1995), a complexidade do problema é atribuída em função do número de variáveis necessárias para representá-lo. Os eixos propostos pelo autor retratam dois elementos centrais da área de modelagem: a complexidade do sistema e a variabilidade. Apesar de simples, o quadro apresentado para segmentação dos diferentes métodos, técnicas e ferramentas de modelagem é uma referência adequada para o direcionamento da definição do método, da técnica e da ferramenta a serem utilizados para a resolução de um problema de cunho prático ou de pesquisa.

Figura 10: Adequação dos diferentes métodos, técnicas e ferramentas de modelagem (PO *hard*) em relação ao nível de complexidade e de variabilidade no sistema analisado.





**Fonte:** Adaptado de Rodrigues (1995)

A literatura relacionada aos diferentes métodos, técnicas e ferramentas de modelagem *hard* é muito extensa. Há diferentes tipos de trabalhos/pesquisas disponíveis em periódicos científicos e livros, dentre os quais se destacam: i) trabalhos que tratam de questões metodológicas, ou seja, propõem novos métodos, técnicas e ferramentas, ou ainda a adaptação dos existentes; ii) pesquisas que descrevem aplicações práticas que evidenciam os benefícios, dificuldades e fragilidades do arsenal da PO e; iii) pesquisas que testam teorias através da modelagem, utilizando os recursos existentes e consolidados na literatura.

A próxima seção discute os novos caminhos que a PO tem seguido a partir da década de 1980, quando novas abordagens para tratar os problemas das organizações foram propostas.

### 2.3.2.2 A Modelagem *soft*

As primeiras críticas a PO tradicional (*hard*) surgiram no Reino Unido. O movimento que a questionava, preconizado por Ackoff, despertou o interesse daqueles que não simpatizavam com as abordagens de otimização matemática fortemente estabelecidas e defendidas pelos norte-americanos. (KIRBY; ROSENHEAD, 2011). Segundo Kirby e Rosenhead (2011), Ackoff foi um dos dissidentes americanos que questionou os métodos e as técnicas dominantes nos Estados Unidos, focadas em otimização matemática, tornando-se um dos idealizadores do desenvolvimento de abordagens alternativas à PO *hard* no Reino Unido, sendo Checkland um dos seus “seguidores”.

Os pesquisadores e praticantes da PO no Reino Unido, que desde a origem da área focaram o desenvolvimento de metodologias e caminhos alternativos em relação aos métodos, técnicas e ferramentas de otimização, oportunizaram o progresso das ideias alternativas sugeridas por Ackoff. A questão central dos críticos da PO *hard* (tradicional), que tem Ackoff (1979) e Checkland (1999) como expoentes, é a fragilidade da abordagem em lidar com problemas sociais ou até mesmo com questões organizacionais que interagem com os



sistemas sociais. Tal movimento crítico levou ao desenvolvimento do Método de Estruturação de Problemas (*Problem Structuring Methods - PSM*<sup>37</sup>) ou a PO *soft* ou ainda *soft system* (KIRBY e ROSENHEAD, 2011). Kirby (2007) aponta dois fatores que, segundo ele, são a causa para o surgimento do paradigma alternativo no Reino Unido e para o seu não desenvolvimento nos Estados Unidos. O primeiro está relacionado com a crise econômica enfrentada pelo Reino Unido, e o segundo com a desindustrialização ocorrida a partir da década de 1970. No momento em que uma nação passa a concentrar sua economia em serviços, a esfera de problemas, antes localizada nos sistemas de produção da indústria, sendo portanto, tangível e observável, translada para um outro nível de problemas. Assim, por exemplo, uma fila de reclamações de clientes em uma central de atendimento, torna-se uma questão mais subjetiva e menos tangível.

Assim, a crise do petróleo na década de 70, que desencadeou uma nova ordem de concorrência, ou seja, oferta maior que demanda e a desindustrialização na Inglaterra e Estados Unidos, levaram a PO a uma crise de existência, em especial na Inglaterra. (KIRBY, 2007; ROSENHEAD, 2009). Como consequência dessa crise, surgiu uma nova abordagem, a “*soft system*”, a partir das ideias de Ackoff (1979) e Checkland (1999). Ackoff (1979) critica a abordagem clássica da PO, que assume centralmente que a solução ótima de um modelo é a solução ótima de um problema ou de um sistema. Para Ackoff (1979), como os modelos não são representações perfeitas do problema, o resultado deles nunca será uma solução ótima para o problema ou para o sistema.

O termo modelagem *soft* é utilizado por Pidd (1998) para se referir aos novos métodos, técnicas e ferramentas da PO apresentadas a partir das críticas seminais de Ackoff (1979) e Checkland (1999). Na modelagem *soft*, ao contrário da modelagem *hard* (PO *hard*), os modelos são utilizados para explorar as consequências das diferentes visões em relação a uma situação problemática ou a uma confusão. Ou seja, segundo Pidd (1998), a modelagem *soft* contém metodologias para compreender situações em que ocorrem divergências entre os atores em relação ao problema e aos objetivos. Assim, os métodos, as técnicas e as ferramentas da PO *soft* visam auxiliar um grupo na compreensão de um problema a partir da exposição de pontos de vistas de diferentes atores.

Pidd (1998) apresenta uma síntese das principais diferenças entre a PO *hard* e a PO *soft*, baseada na discussão apresentada em Checkland (1999). Segundo Pidd (1998), a ideia do

---

<sup>37</sup> Segundo Kotiadis e Mingers (2006) o termo PSM foi popularizado por Rosenhead no livro *Rational Analysis for a Problematic World* (1989). O termo foi utilizado como alternativa aos termos *soft* ou *soft system*, que levaram a conotações infelizes para o termo e para a área.

quadro é explicitar as principais diferenças entre as abordagens e destacar que existem divergências sutis entre elas. O Quadro 3 resume as principais diferenças entre as abordagens *hard* e *soft* da PO.

Para Pidd (1998), a definição e a estruturação do problema constituem-se as principais diferenças entre as abordagens *hard* e *soft*. Essa posição está ligada ao elemento central da crítica apresentada por Ackoff (1979). Na visão *hard*, o problema e os objetivos são bem definidos antes de se iniciar a modelagem. Desta forma, a solução para o problema pode ser encontrada. Por outro lado, sob a ótica *soft*, é difícil definir qual o problema a ser tratado, sendo essa compreensão uma construção coletiva. Na abordagem *soft* o problema é multifacetado e a definição dele não é direta, sendo que normalmente emerge a partir de debates e discussões em grupo. Desta forma, o objetivo das abordagens *soft* não é encontrar uma solução para o problema, mas sim aprender sobre a situação problemática. (RODRIGUES, 2006).

Quadro 3: Diferenças fundamentais das abordagens *soft* e *hard* da PO

<b>Dimensão</b>	<b>PO Hard</b>	<b>PO Soft</b>
Definição do problema	Vista como direta, unitária	Vista como problemática, pluralista
A organização	Assumida tacitamente	Requer negociação
O modelo	Compartilha uma representação do mundo real	Uma forma de gerar debate e <i>insight</i> a respeito do mundo real
O resultado	Um produto ou recomendação	Progresso através da aprendizagem

Fonte: Adaptado de Pidd (1998)

Quanto à natureza da organização, na visão *soft* ela não é compreendida como um conjunto de máquinas, em que as pessoas são designadas de acordo com a sua função e orientadas por objetivos comuns. Ao contrário, a visão *soft* entende que as pessoas, correta ou incorretamente, defendem as suas posições, podendo inclusive confrontar os objetos que lhe são impostos. Desta forma, de acordo com as abordagens *hard*, a organização é tida como uma entidade composta por pessoas que desempenham as funções para as quais foram designadas e, conforme as abordagens *soft*, a organização é uma entidade composta por pessoas que são compreendidas como parte da organização como um todo. (PIDD, 1998).

No que diz respeito aos modelos, frutos da modelagem, na abordagem *hard* eles são simplificações e abstrações da realidade e devem representar adequadamente as operações do sistema modelado. Já nas abordagens *soft*, os modelos têm um papel de auxiliar as pessoas a pensarem e a testarem suas ideias, para então construírem uma visão compartilhada a partir do debate. (PIDD, 1998).

Quanto ao resultado esperado dos indivíduos/atores envolvidos, ao utilizar uma abordagem *hard* a ideia é gerar recomendações que indiquem uma solução ótima para um problema ou então uma boa solução. Já o resultado principal esperado ao se aplicar uma abordagem *soft* não é, necessariamente, um conjunto de recomendações, mas sim a aprendizagem organizacional, de grupo e individual em relação a como enfrentar as situações problemáticas. (PIDD, 1998).

O movimento iniciado por Ackoff (1979) e Checkland (1999) levou ao desenvolvimento de métodos, técnicas e ferramentas alternativos para a estruturação e a solução de problemas. Segundo Pidd (1998), destacam-se: a Metodologia de Sistema Soft (*Soft System Methodology - SSM*); o Desenvolvimento e Análise de Opções Estratégicas (*Strategic Options Development and Analysis - SODA*); o Mapeamento cognitivo e; a Dinâmica de sistemas. Rosenhead (1996) e Mingers e White (2010) apresentam uma revisão do desenvolvimento da PO *soft*, com atenção aos diferentes métodos e técnicas e destacam, além daqueles já mencionados por Pidd, o pensamento e o método sistêmico. A seguir, esse pensamento é detalhado.

### **Pensamento Sistêmico**

O pensamento sistêmico emergiu paralelamente com as abordagens de engenharia de sistemas tradicionais, focando em sistemas sociais e na gestão das empresas. (CHATHA; WESTON, 2006). Para Andrade et al. (2006), o método sistêmico é um conjunto de passos sistematizados que leva a aplicação do pensamento sistêmico. O método sistêmico sugerido e apresentado em Andrade et al. (2006, p. 96) contempla nove passos que são:

- Passo 1: Definir uma situação complexa de interesse;
- Passo 2: Apresentar a história por meio de eventos;
- Passo 3: Identificar as variáveis-chave;
- Passo 4: Traçar os padrões de comportamento;
- Passo 5: Desenhar a estrutura sistêmica;
- Passo 6: Identificar modelos mentais;
- Passo 7: Realizar cenários;
- Passo 8: Modelar em computador;
- Passo 9: Definir os direcionadores estratégicos, planejar ações e reprojeter o sistema.

O primeiro passo tem como objetivo definir a situação de interesse. Segundo Andrade et al. (2006) o método sistêmico é recomendado não só para problemas de complexidade combinatória, mas também de multidimensionalidade do sistema, de relações não lineares entre as variáveis e de atrasos entre as relações de causa-e-efeito e/ou devido aos modelos mentais que influenciam a realidade observada. O segundo passo consiste em apresentar a história da situação de interesse a partir de eventos. Para Andrade et al. (2006) a identificação de eventos faz com que haja o compartilhamento da história entre os diferentes membros que compõem o estudo. O resultado final desse passo é uma lista de eventos. O terceiro passo visa identificar variáveis capazes de explicar o comportamento dos eventos identificados no passo 2. O quarto passo busca a coleta de dados para expor o comportamento das variáveis identificadas no tempo. (ANDRADE et al., 2006). A estrutura sistêmica é o resultado obtido ao final do quinto passo. O mapa sistêmico tem como objetivo explicitar as relações de causa-e-efeito entre as variáveis que representam a situação problemática estudada. Para a construção da estrutura sistêmica utiliza-se a linguagem sistêmica<sup>38</sup>, conforme destacado por Andrade et al. (2006). O passo seguinte visa identificar os modelos mentais presentes nas relações mapeadas na estrutura sistêmica. Segundo Andrade et al. (2006), as estruturas do mundo real são influenciadas pelo comportamento do indivíduo, sendo esse comportamento regido pelo modelo mental do sujeito. Assim, identificar as crenças e pressupostos de cada modelo mental que rege a situação problemática é importante para entender o funcionamento do sistema. Finalmente, os passos sete, oito e nove referem-se ao uso de simulação, via dinâmica de sistemas, para avaliar o comportamento do sistema. Essas simulações testam o comportamento do sistema em diferentes cenários e buscam apontar direcionadores estratégicos robustos para alavancar o sistema e conduzi-lo a um patamar de interesse (ANDRADE et al., 2006).

Dada a sua natureza de envolver um elevado número de pessoas no estudo, o método sistêmico é conduzido, geralmente, em reuniões sistemáticas. Esses encontros agrupam um conjunto de participantes, os quais detêm o conhecimento da situação problemática de interesse, bem como um grupo de especialistas no método sistêmico. Nesse sentido, Moreira e Rodrigues (2006), a partir de aplicações do método sistêmico, destacam a necessidade de uma estrutura de papéis sistematizada para a condução do método apresentado anteriormente. Os

---

<sup>38</sup> A linguagem sistêmica, segundo Sterman (2000) e Andrade et al. (2006) utiliza-se de setas para conectar duas variáveis. Um sinal de mais (+) na ponta da seta ou uma seta contínua indica que as variáveis conectadas têm uma relação direta. Por outro lado, o sinal de subtração (-) ou uma seta tracejada representa que há uma relação inversa entre as variáveis.

autores sugerem uma organização para divisão dos trabalhos, entre os condutores do método, em três níveis, denominados de n1, n2 e n3. O papel do n1 é conduzir o método sistêmico de modo a atingir os objetivos do trabalho. O n2 tem a função de verbalizar as questões centrais discutidas, porém não deve envolver-se nas discussões promovidas pelos participantes. Já o n3 tem como função observar e registrar as discussões e questões tratadas ao longo dos encontros, além de auxiliar na coleta de dados.

O método sistêmico tem sido utilizado em diferentes contextos de aplicação prática. Corcini Neto (2010) apresenta uma ampla revisão de trabalhos sobre pensamento sistêmico e método sistêmico no contexto de empresas produtoras de minério de ferro.

Segundo Pidd (1998), as diferenças entre as abordagens *hard* e *soft* não significam que elas não possam ser utilizadas conjuntamente. Checkland (1999) também é defensor da visão de que ambas as abordagens podem e necessitam ser integradas. A seção a seguir apresenta a literatura que aborda a integração entre as abordagens *hard* e *soft* da PO.

#### 2.3.2.3 Integração entre as abordagens *Hard* e *Soft*

Desde o surgimento das abordagens *soft*, na década de 1980, conflitos com os praticantes e pesquisadores da PO *hard* marcaram o estabelecimento da nova abordagem. Rodrigues (2006) destaca que a década de 1990 foi marcada por “conflitos escolásticos” entre a ‘escola da PO *hard*’ e a ‘escola da PO *soft*’, nos quais cada uma defendia que seus métodos, técnicas e ferramentas eram mais eficazes e que os métodos, técnicas e ferramentas da outra eram excludentes.

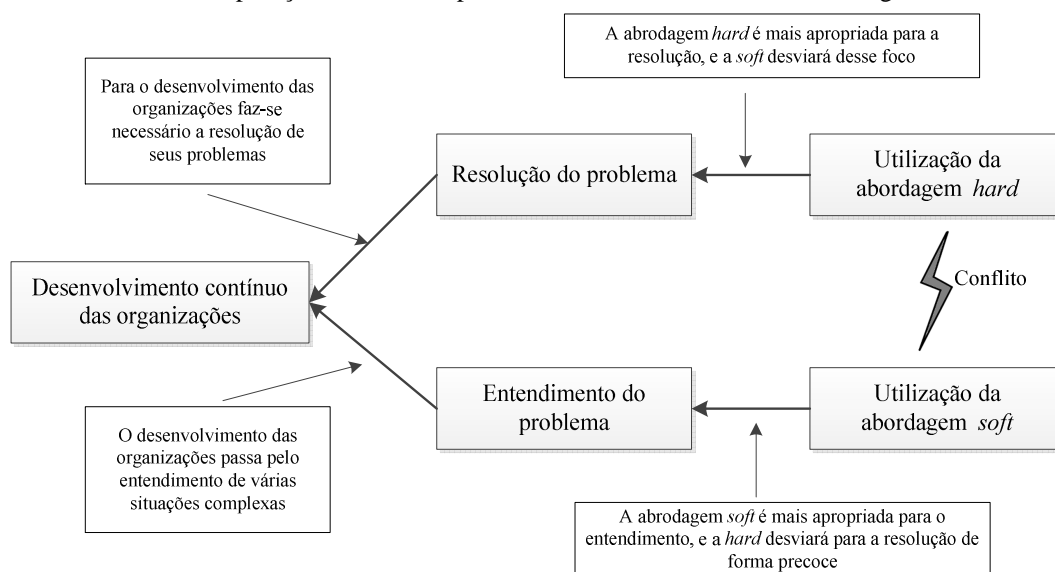
Segundo Rodrigues (2006), o modelo mental dos pesquisadores e praticantes da escola *hard* em relação à escola *soft* é de que não adianta entender o problema se o mesmo não pode ser resolvido. Em contrapartida, o modelo mental dos pesquisadores e praticantes da escola *soft* é de que as abordagens *hard* geram números para uma solução, mas estes são insignificantes em relação ao entendimento da situação. Em face desses modelos mentais conflitantes, o uso de cada uma das duas abordagens passou a ser determinado para auxiliar no processo decisório, basicamente, em função da complexidade do problema. Para Rodrigues (2006), há contraposições e contradições entre os modelos mentais das abordagens *hard* e *soft* que podem levar a uma nova ideia, baseada na potencialidade de integração das duas

abordagens. Para explicitar esse conflito dialético, Rodrigues (2006) utiliza-se de um gráfico de Evaporação das Nuvens<sup>39</sup> representado na Figura 11.

O diagrama da Figura 11 deve ser lido da direita para esquerda. Percebe-se que, na visão *hard*, para o “desenvolvimento contínuo da organização”, é necessária a “resolução de problemas”, portanto, é preciso “a utilização da modelagem *hard*”. Já na visão *soft*, para o “desenvolvimento contínuo da organização” é essencial o “entendimento do problema”, e para isso é necessária a “utilização da modelagem *soft*”. Ambas as visões estão sustentadas por um conjunto de pressupostos, os quais estão representados na figura através de caixas de texto ligadas à estrutura central de cada visão. (RODRIGUES, 2006).

No entanto, segundo Rodrigues (2006), há um pressuposto oculto no conflito explicitado entre as abordagens *hard* e *soft*: os métodos, as técnicas e as ferramentas, oriundos de cada abordagem, não podem ser utilizados em conjunto para tratar de uma mesma situação problemática. Desse modo, o uso integrado das abordagens surge como uma solução possível para o conflito entre elas.

Figura 11: Gráfico de Evaporação das Nuvens para o conflito dialético entre as abordagens *hard* e *soft*



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2006)

A possibilidade de integração entre as abordagens *hard* e *soft* explicitada por Rodrigues (2006) é tratada em Pidd (2004a) e Kotiadis e Mingers (2006). Ambos os trabalhos apontam que a integração entre as abordagens é possível e que pode trazer benefícios para as

<sup>39</sup> A Evaporação das Nuvens é uma das ferramentas do Processo de Pensamento da Teoria das Restrições (TOC) para identificação e solução de problemas. (RODRIGUES, 2006).

organizações, porém, destacam que a literatura sobre o assunto é limitada e que, na época em que pesquisaram, existiam poucas evidências empíricas comprovando os benefícios. Segundo Kotiadis e Mingers (2006) e Pidd (2004a), na época em que foram escritos os artigos, havia poucos casos que descreviam e estudavam a integração entre as abordagens *hard* e *soft*<sup>40</sup>. De modo geral, segundo Kotiadis e Mingers (2006) e Pidd (2004a), a referida integração se dá com o uso de métodos *soft* para o entendimento do problema e para a definição dos objetivos e, a partir disso, as abordagens *hard* são utilizadas para a resolução do problema, ou pelo menos de parte dele. Um artigo mais recente apresentado por Pidd (2012) revisa o uso complementar de abordagens (*hard-hard* e *hard-soft*). A revisão buscou trabalhos que tratam de metodologias que agregam a simulação computacional com outra abordagem (por exemplo, otimização, PSM, etc.) no setor hospitalar. As conclusões do autor apontam para o aumento de artigos que tratam de mistura de abordagens, sendo que houve um salto de zero por cento em artigos publicados entre 1983 e 1999, para cerca de 45% em artigos publicados entre 2000 e 2011. Porém, o número de pesquisas que retratam a integração *soft* e *hard* ainda é pequeno, cerca de 4% dos artigos analisados.

A seção a seguir aborda a modelagem de sistemas a partir da ótica dos sistemas produtivos e de manufatura.

### **2.3.3 Modelagem de sistemas produtivos e sistemas de manufatura**

A literatura sobre modelagem destaca os sistemas de produção e de manufatura como objeto de estudo amplamente utilizado para aplicação dos métodos, das técnicas e das ferramentas das abordagens da PO. (MINGERS; WHITE, 2010; PIDD, 1998; ROBINSON, 2004).

Materiais, pessoas e equipamentos são elementos combinados no sistema de manufatura para a produção de bens. Segundo Black (1998), cada empresa apresenta um conjunto de problemas únicos, pois mesmo que as combinações dos recursos produtivos (materiais, pessoas e equipamentos) sejam semelhantes, as interferências do ambiente externo (ambiente social, político, comercial) não são necessariamente iguais. Essas peculiaridades

---

<sup>40</sup> O artigo apresentado por Chatha e Weston (2006) destaca o uso integrado da abordagem *hard*, no caso simulação por eventos discretos, e a abordagem *soft*, o pensamento sistêmico, para suportar decisões em empresas manufatureiras. Na proposta apresentada pelos autores, utiliza-se, inicialmente, a simulação computacional e, somente na sequência, o pensamento sistêmico, para suportar a decisão como métodos complementares para enriquecer o processo decisório.

trazem complexidade para a construção de métodos, técnicas, ferramentas e teorias universais para a administração e gestão do sistema de produção e de manufatura.

Para Black (1998), modelos são utilizados para compreender como um dado sistema trabalha e se comporta. Conforme o autor, o sistema somente pode ser compreendido e controlado por intermédio de um modelo. Nesse sentido, segundo Black (1998), para controlar o sistema de produção e de manufatura, em geral, os modelos são utilizados para descrever o comportamento do mesmo. A modelagem de um sistema, por sua vez, necessita que: i) os limites e restrições do sistema sejam identificados; ii) as transformações ocorridas ao longo do sistema de manufatura sejam compreendidas e; iii) o comportamento do sistema em resposta aos estímulos externos seja conhecido.

No entanto, segundo Black (1998), é difícil conhecer os limites e restrições do sistema, bem como compreender todas as transformações ocorridas no sistema de manufatura e o efeito dos estímulos externos sobre ele. Assim, para Black (1998) modelar o sistema de manufatura e o de produção não é simples, pois:

- O sistema é complexo e extenso;
- Existem relações dinâmicas entre o sistema de produção, o sistema de manufatura e o meio ambiente;
- As relações podem ser difíceis de serem expressas em termos analíticos;
- Dados ou informações podem não estar disponíveis;
- Os objetivos são difíceis de serem definidos;
- O ato de observar e controlar tende a mudar o comportamento do sistema;
- Os algoritmos de análise e controle do sistema estão sujeitos a erros de omissão e confiança.

Já Robinson (2004) destaca que as principais dificuldades para analisar e controlar um sistema são: i) a dificuldade de análise integrada do sistema e; ii) a falta de previsão da performance global do sistema, considerando a natureza do sistema de produção e de manufatura. Para Robinson (2004), as dificuldades em compreender o comportamento de um sistema derivam de três elementos centrais que são: a complexidade do sistema, a interconectividade e dinâmica entre os elementos que o compõem e a variabilidade. As interações dos elementos que constituem o sistema de produção e de manufatura, usualmente



não percebidas, é que tendem a gerar a complexidade do sistema. Assim, a dinâmica entre as interações dos elementos e a estocasticidade pode gerar resultados inesperados.

Para Holst (2001), os sistemas de produção e manufatura são caracterizados pela complexidade, dinâmica e por constantes mudanças. Nesse sentido, o autor destaca a relevância dos modelos para representar, analisar e avaliar a complexidade e a dinâmica. Segundo ele, a simulação deve ser integrada ao desenvolvimento de processo (sistema produtivo) das organizações. Na pesquisa apresentada por Holst (2001), o autor aponta que há uma nítida carência de integração entre a área de simulação e o desenvolvimento de sistemas produtivos. As soluções desenvolvidas através da simulação são fragmentadas e desestruturadas em relação aos mecanismos formais de desenvolvimento de processo nas organizações.

Em sua tese, Holst (2001) aborda um relevante debate entre o desenvolvimento da área de simulação computacional propriamente dita e o uso da simulação computacional nos processos decisórios das organizações. Se por um lado a literatura de simulação foca na tecnologia propriamente dita, ou seja, em simuladores mais eficientes computacionalmente, em tratamento de dados de entrada, em mecanismos de validação de modelos, etc., por outro lado somente tangencia as questões relacionadas ao uso da simulação computacional no dia a dia das organizações. Em seu trabalho, Holst (2001) sugere um *framework* estruturado para que a simulação computacional seja contemplada formalmente nos mecanismos de desenvolvimento de processos das organizações como, por exemplo, na área de melhoria contínua.

A seguir é exposto a síntese desta seção.

#### **2.3.4 Síntese da seção**

A modelagem de sistema é amplamente utilizada para a compreensão, estruturação e solução de problemas práticos e teóricos nas mais diversas áreas do conhecimento. No que tange às organizações, num sentido amplo, e ao sistema de produção e manufatura, em específico, muitos trabalhos são reservados para tratar do tema. Os modelos construídos através do processo de modelagem visam, primeiramente, gerar informações para compreender o problema ou a situação problemática. Em segundo lugar, focam analisar as diferentes políticas de ações dos sistemas com a finalidade de suportar, de maneira mais

eficaz, a tomada de decisão na organização. Em terceiro lugar, procuram gerar aprendizagem para os indivíduos envolvidos no estudo de modelagem e para a organização.

A visão de sistemas e o modo de pensar sistemicamente são os elementos centrais para o surgimento e o crescimento da área de PO. No entanto, ao longo do seu desenvolvimento, houve certo grau de separação, a partir de duas diferentes abordagens. A primeira, a PO *hard* como normalmente conhecida, é focada em métodos, técnicas e ferramentas que enfatizam a otimização dos sistemas através da modelagem matemática e da modelagem computacional. Já a segunda abordagem, criada a partir da década de 1970 quando da crise da PO *hard*, é a PO *soft* ou *soft system*, focada no entendimento e na compreensão do problema para gerar aprendizagem e consenso.

A principal diferença entre as abordagens se dá em relação à compreensão do problema. Enquanto a PO *hard* assume que o problema é bem definido e passível de solução, a PO *soft* interpreta que o problema não é facilmente identificado nas organizações e que há necessidade de compreensão da situação problemática. (PIDD, 1998). Nesse sentido, a partir do conceito de enigmas, problemas e confusões proposto por Ackoff (1974), Pidd (2004a) destaca que a abordagem de modelagem mais indicada a cada situação relaciona-se ao tipo de problema (enigmas, problemas e confusões). De acordo com essa proposição, em uma situação em que há uma rede de problemas (as confusões), por exemplo, o uso de métodos da PO *hard* não seria efetivo, pois, nesse contexto, não se sabe qual é o problema a ser modelado.

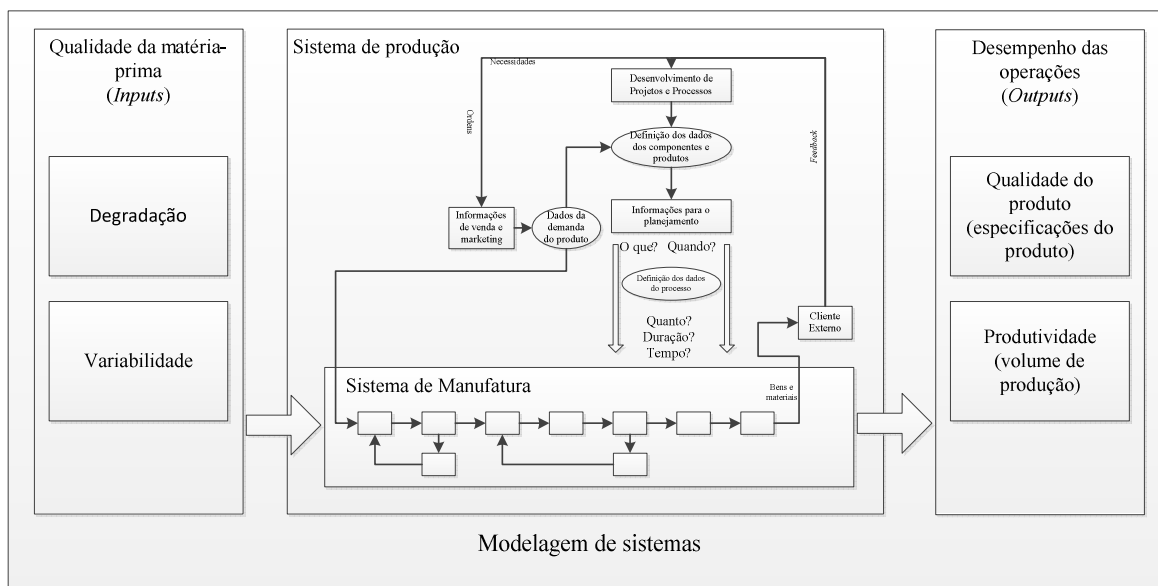
Apesar do conflito estabelecido entre as escolas *hard* e *soft*, há correntes na literatura que defendem a integração dessas duas abordagens, conforme apresentado no diagrama que explicita o conflito dialético entre elas, proposto por Rodrigues (2006). A integração *hard* e *soft* é indicada por autores como Kotiadis e Mingers (2006) e Pidd (2004a), os quais destacam a sinergia do uso dos métodos *soft* para a compreensão e estruturação dos problemas e dos métodos *hard* para a solução dos problemas.

De modo geral, a literatura destaca a relevância da modelagem e simulação para estudar o comportamento dos sistemas produtivos, dada a natureza dinâmica, estocástica e complexa dos mesmos. Porém, conforme apontado por Holst (2001), há uma ausência de estudos na literatura que auxiliem na integração da modelagem e da simulação com os mecanismos formais de melhoria de processos. Quanto à natureza do sistema de produção e de manufatura, apresentado por Black (1998), pode-se observar na literatura de modelagem e simulação os seguintes tratamentos dados a esses sistemas:

- Modelagem do sistema de produção: atenta ao fluxo global de produção no tempo e no espaço. Esse é o objeto de estudo no nível de gestão da produção – visão ampla do todo;
- Modelagem do sistema de manufatura: compreensão detalhada do fenômeno de transformação/fabricação (modelos especialistas oriundos, por exemplo, das engenharias). Visão detalhada de uma parte do todo.

A visão de modelagem de sistemas é agregada ao *framework* conceitual da pesquisa. Desta forma a Figura 12 apresenta a segunda atualização promovida no *framework* inicial.

Figura 12: Segunda atualização do desenho do framework conceitual



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 12, destaca-se que a modelagem de sistemas é compreendida como o caminho metodológico para lidar com o problema da degradação e da variabilidade da matéria-prima no desempenho do sistema de produção e de manufatura.

Finalizada a revisão sobre a literatura de modelagem de sistemas, a próxima seção dedica-se a ampliar a visão de modelagem de sistemas sob a ótica da simulação computacional. A simulação computacional é destacada em detrimento dos demais métodos, técnicas e ferramentas da PO, pois:

- No contexto do problema de pesquisa deseja-se observar o desempenho do sistema a partir de múltiplas variáveis de desempenho (qualidade do produto, produtividade);
- A simulação é indicada para representar sistemas complexos que apresentam variabilidade e cuja dinâmica seja objeto de interesse do pesquisador.

A seção a seguir destaca uma breve revisão sobre simulação computacional, destacando os conceitos centrais e, principalmente os métodos e mecanismos disponíveis para modelar o problema da pesquisa.

## 2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Simulação é um termo muito amplo pois aplica-se a diferentes circunstâncias e áreas do conhecimento. Moroney e Lilienthal (2008) destacam o amplo uso do termo em questão. Os autores apresentam exemplos do cotidiano aos quais o termo simulação pode ser aplicado como, por exemplo, uma árvore de natal artificial, um material sintético que substitui o algodão, uma peça de teatro que retrata uma passagem histórica, entre outras situações. No entanto, no contexto da pesquisa, foca-se a simulação enquanto área de conhecimento, ou seja, busca-se a compreensão e análise de processo, sistemas e teorias. A simulação teve início no Reino Unido e é o método de abordagem *hard* mais utilizado. (PIDD, 1998).

Em um sentido mais amplo, a simulação é um método da PO *hard* que envolve a modelagem de sistema para o desenvolvimento de um modelo que represente o funcionamento de um processo ou sistema. Já em um sentido estrito, a simulação é a mera execução de um modelo. (MORONEY; LILIENTHAL, 2008). Para Banks (1998), simular é imitar a operação de um processo ou sistema do mundo real. Assim, a simulação envolve a geração de uma história artificial de um sistema qualquer, a partir de uma representação matemática e/ou lógica, e a observação dessa história artificial para inferir as características da operação do sistema ou do processo real representado.

A simulação é utilizada para descrever e analisar o comportamento de um sistema, possibilitando experimentações em relação a sua operação, ou seja, busca responder perguntas do tipo “o que aconteceria se<sup>41</sup>”. (BANKS, 1998; CENTENO, 1996; GOGG; MOTT, 1993; PIDD, 1998). Segundo Freitas Filho (2008), o principal ganho com o uso da simulação computacional é a oportunidade de realizar experimentos em um ambiente virtual sem a necessidade de interferência no sistema físico. Desta forma, Pidd (2012) destaca que o mais poderoso aspecto da simulação é a capacidade do modelo de mimetizar o comportamento dinâmico do sistema. Hillier e Lieberman (2013, p. 939) destacam que a simulação “[...] fornece uma maneira de experimentação com sistemas ou políticas propostos, sem na verdade, implementá-los”. Quanto às situações em que a simulação é recomendada, Robinson (2004) sugere o uso de tal método quando o sistema apresenta três elementos centrais: complexidade, interconectividade, dinâmica e variabilidade.

Segundo Freitas Filho (2008), os modelos de simulação podem ser classificados de acordo com o seu propósito, a saber:

- Modelos voltados para previsão: estudos em que a simulação é utilizada para prever o comportamento futuro do sistema. (FREITAS FILHO, 2008);
- Modelos voltados à investigação: estudos que buscam a compreensão do sistema em determinadas situações. Nesse tipo de modelo, o problema e o objetivo não são claros no início do estudo. Assim, as variáveis de resposta auxiliam o entendimento do fenômeno e do sistema analisado. (FREITAS FILHO, 2008);
- Modelos voltados à comparação: estudos que visam identificar alternativas mais adequadas para um sistema. As alternativas são testadas no modelo a partir de parametrização das variáveis que representam o sistema. (FREITAS FILHO, 2008).

Quanto ao propósito de aplicação e uso do modelo, para Freitas Filho (2008) eles podem ser classificados como específicos ou genéricos:

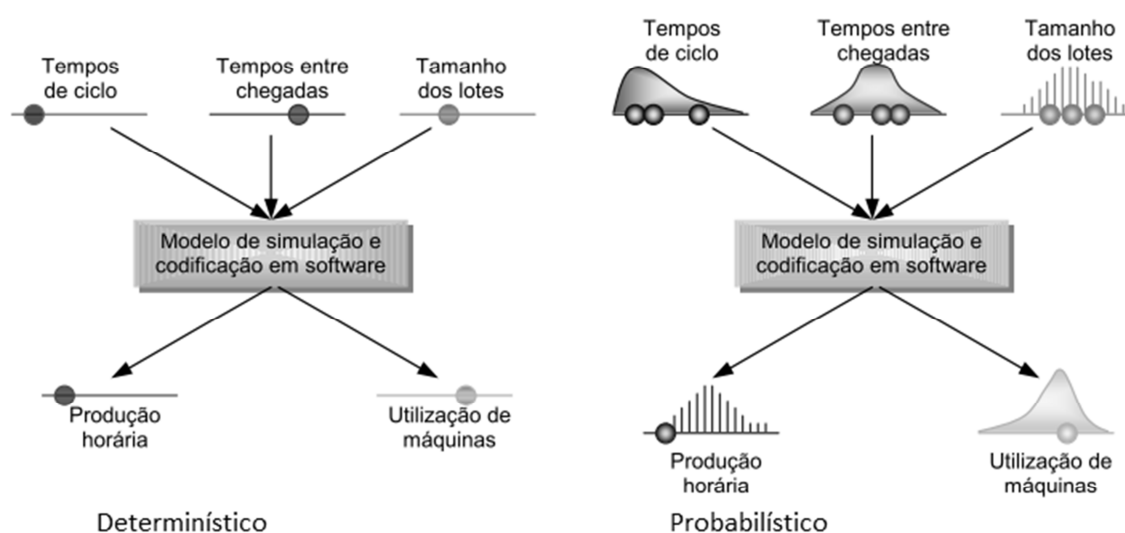
---

<sup>41</sup> Do ingles what-if

- Modelos específicos: são modelos de curta utilização, desenvolvidos para suportar decisões pontuais ou para estudar um problema específico. (FREITAS FILHO, 2008);
- Modelos genéricos: modelos de longa utilização, desenvolvidos para suportar processos continuamente em uma organização. Esses modelos demandam alterações frequentes nos dados e na configuração do processo por eles contemplados. (FREITAS FILHO, 2008).

Em uma tentativa de explicitar a relevância da simulação estocástica em detrimento da modelagem determinística, Kelton (1994) apresenta a seguinte ilustração - Figura 13.

Figura 13: Diferença entre modelo determinístico e modelo probabilístico.



Fonte: Adaptado de Kelton (1994)

A partir da Figura 13 observa-se que ao utilizar um modelo determinístico em uma situação em que há variabilidade nos *inputs* do sistema, o resultado desse modelo será um

valor pontual. Cada conjunto de valores nos *inputs* do modelo gera um único valor para cada variável observada no *output*. Entretanto, ao utilizar modelos de simulação que representam o comportamento estocástico do sistema, os *inputs* deixam de ser um valor pontual e assumem o comportamento de uma distribuição de probabilidade. Desta forma, os *outputs* não são uma única medida, mas sim uma distribuição que representa os possíveis resultados obtidos pelo sistema.

A origem da simulação data da década de 1950, sendo ela uma extensão do Método de Monte Carlo<sup>42</sup>. Esse método foi desenvolvido durante a segunda guerra mundial para resolver numericamente problemas matemáticos cuja solução analítica não era viável. O método de Monte Carlo logo passou a ser aplicado na solução de diversos outros problemas matemáticos complexos. Desta forma, foi adaptado para a solução de modelos probabilísticos como, por exemplo, modelos de filas de espera. (SALIBY, 1989). Segundo Saliby (1989), a ideia de amostragem aleatória apresentada no método de Monte Carlo foi utilizada por Tocher em 1963 para simular um processo, com a finalidade de estimar os parâmetros de operação. Nascia, assim, a simulação computacional. Já em relação ao uso de computadores para suportar à simulação, segundo Hollocks (2005) foi apresentado no trabalho precursor de Godon da IBM em 1961, com o desenvolvimento da linguagem GPSS (*General Purpose System Simulation*).

Widman e Loparo (1990) defendem o uso da simulação computacional em detrimento das abordagens analíticas (aquelas que buscam a otimização do sistema) porque estas raramente conseguem descrever um sistema complexo real. Um modelo de simulação é executado, enquanto um modelo de otimização é resolvido. Essa diferença apresentada por Freitas Filho (2008) recai sobre o fato de que os modelos de simulação são dinâmicos, não sendo desenhados para a busca de uma solução ótima. Assim, os modelos de simulação são recomendados em situações nas quais se deseja compreender e analisar o comportamento dinâmico e estocástico do sistema em condições específicas. Hillier e Lieberman (2013) defendem que a simulação é recomendada para os casos em que o sistema é complexo e apresenta um comportamento estocástico, elementos que dificultam a modelagem matemática. Apesar de ser menos precisa do que a modelagem matemática, em algumas situações a simulação é o único método disponível.

Segundo Pidd (1998), a simulação computacional é a ferramenta analítica da PO mais utilizada, constatação também destacada por Jahangirian et al. (2010). Esses autores

---

<sup>42</sup> O Método de Monte Carlo, proposto por Von Neumann e Ulam, utiliza-se da amostragem aleatória para avaliação de integrais múltiplas. (SALIBY, 1989).

acrescentam que a simulação por eventos discretos é o tipo de simulação mais utilizada e difundida na literatura. Dos artigos revisados pelos autores, 40% utilizam a técnica de simulação em questão. O termo simulação por eventos discretos refere-se ao modo como ocorre o avanço do tempo no simulador. Nesse tipo de simulação o tempo é incrementado em resposta a um evento, ou seja, o tempo no simulador avança sempre que há algum novo evento que necessita ser tratado. Já na simulação contínua, o avanço de tempo não sofre interrupções, sendo tal técnica modelada através de equações diferenciais.

A simulação por eventos discretos é adequada para análises detalhadas do processo, sendo apropriada para suportar decisões nos níveis operacionais e táticos de uma organização. (JAHANGIRIAN et al., 2010). Já Robinson (2004) afirma que essa técnica é a mais indicada quando há necessidade de detalhamento das operações do sistema de interesse, por exemplo, em detrimento da simulação contínua. Segundo Thesen e Travis (1991), ao optar pela simulação por eventos discretos, por um lado perde-se a capacidade de captar detalhes que somente podem ser descritos através de mudanças temporais contínuas, mas, por outro lado, ganha-se a simplicidade, que possibilita a captura de importantes características do sistema que seriam muito complexas de serem obtidas através da simulação contínua<sup>43</sup>.

Segundo Banks (1998) as vantagens da simulação computacional são:

- Explorar diferentes possibilidades: a partir de um modelo de simulação válido, é possível explorar novas políticas, procedimentos operacionais ou métodos sem a necessidade de intervenção no sistema real;
- Expandir e comprimir o tempo para investigar o fenômeno de interesse;
- Diagnosticar problemas: possibilita considerar todas as interações que ocorrem em um dado momento em um sistema. A simulação permite entender melhor as interações entre as variáveis que compõem tais sistemas complexos. Diagnosticar problemas e obter conhecimento sobre a importância dessas variáveis aumenta a compreensão dos efeitos importantes sobre o desempenho do sistema em geral;
- Identificar as restrições: por meio de simulação para realizar a análise de gargalo, pode-se descobrir a causa dos atrasos no estoque em processo, por exemplo, falta de informação, materiais ou limitação de outros processos.

---

<sup>43</sup> A complexidade referida pelos autores remete às equações diferenciais que são estimadas para tratar as transformações ao longo do sistema de forma contínua.



- Desenvolver a compreensão: a simulação auxilia a compreender como o sistema realmente funciona em vez de indicar previsões de alguém sobre como um sistema irá operar.
- Gerar consenso: usando a simulação para apresentar alterações de *design* cria-se uma opinião objetiva. A ideia é evitar inferências nas aprovações ou desaprovações de projetos, porque é possível simplesmente selecionar os projetos e modificações que proporcionaram os resultados mais desejáveis como, por exemplo, o aumento da produção ou a redução do tempo de espera para o serviço;
- Treinar a equipe: os modelos de simulação podem ser utilizados para treinar, quando projetados para essa finalidade.

Robinson (2004) classifica as vantagens da simulação a partir de três perspectivas. A primeira busca comparar a simulação e a experimentação com o sistema real. A segunda procura comparar a simulação em relação a outras abordagens de modelagem. A terceira perspectiva aborda a simulação sob o ponto de vista da gestão. As vantagens da simulação em relação à experimentação com o sistema real são:

- Custo: realizar experimentos com o sistema real é caro e, em muitos casos, torna-se inviável a interrupção das operações, caso haja necessidade;
- Tempo: a experimentação no sistema real pode levar muito tempo, dependendo do tipo de intervenção, ao passo que um modelo de simulação, após desenvolvido, pode realizar experimentos em horas, para casos de modelos complexos;
- Controle do experimento: a simulação possibilita que as condições de contorno de cada experimento sejam mantidas as mesmas em todos os cenários, enquanto na experimentação do sistema real não há como garantir essas condições;
- Sistemas inexistentes: a experimentação somente é possível em sistemas reais existentes. A simulação possibilita que sistemas inexistentes sejam experimentados.

Segundo Robinson (2004) as vantagens da simulação em relação as outras abordagens de modelagem, são:

- Modelagem da variabilidade: apesar de ser possível a modelagem da variabilidade do sistema em modelos analíticos, a tarefa é trabalhosa e, potencialmente, com resultados aquém do esperado em sistemas extensos e com inúmeras interações e interconexões;
- Reduzida necessidade de premissas: a simulação, ao contrário das demais abordagens *hard*, não carece de premissas rígidas como, por exemplo, a teoria das filas, que pressupõe que a taxa de chegada de clientes deve seguir uma distribuição exponencial. As premissas na simulação são essenciais para delimitar e modelar conceitualmente o sistema estudado, mas não há premissas que o sistema simulado deva atender;
- Transparência: a simulação pode ser apresentada e detalhada ao grupo envolvido no projeto. Comunicar ao público geral conceitos de simulação é mais simples que expor o funcionamento de um modelo matemático.

Por fim, sob a perspectiva da gestão, as vantagens da simulação são (ROBINSON, 2004):

- Testar diferentes ideias sem risco. Isso pode estimular a criatividade para a resolução de uma situação problemática;
- Auxiliar na aquisição de conhecimento e na compreensão e solução dos problemas;
- Visualizar e comunicar boas ideias de melhorias no sistema. São comuns situações em que boas ideias são desconsideradas porque não se consegue mostrar os benefícios delas para os tomadores de decisão;
- Auxiliar na construção de consenso.

Além das melhorias apontadas anteriormente, Saliby (1989) destaca outras duas vantagens da simulação: a liberdade para construção de modelos mais aderentes à realidade e a característica evolutiva que o processo de simulação oferece, ou seja, níveis de complexidade e particularidades podem ser adicionados ao modelo na medida em que o sistema é modelado.

Em relação às desvantagens impostas pelo uso da simulação computacional, os autores indicam que são (BANKS, 1998; CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991; ROBINSON, 2004):

- A construção de modelos demanda elevado grau de conhecimento em simulação e ferramentas estatísticas;
- Baixa precisão dos resultados em função dos métodos de amostragem utilizados para representar o comportamento estocástico do sistema;
- Os resultados da simulação são difíceis de serem interpretados dada a aleatoriedade inserida no modelo para representar o comportamento real do sistema;
- A simulação consome muito tempo e elevada quantidade de recurso;
- A dificuldade em traduzir um problema ou sistema num modelo de simulação.

Em uma tentativa de analisar empiricamente as vantagens e desvantagens da simulação, Mchaney e Cronan (2000) apresentam um *framework* que possibilita esse tipo de análise em relação ao sucesso da implantação de modelos de simulação. No caso, simulação de sucesso é aquela que gera resultado acurado e informações úteis para a tomada de decisão e que atende às restrições de tempo, orçamento e cronograma. A partir desse *framework*, Mchaney, White e Heilman (2002) realizaram uma *survey* com 199 respondentes entre praticantes e pesquisadores, com o objetivo de compreender porque os projetos de simulação são bem sucedidos ou não. Com base nos resultados obtidos, parece possível afirmar que os projetos fracassam devido a altos custos de operação, de treinamento e de modificação dos modelos, bem como em função de modelos extensos que apresentam desempenho computacional inadequado. Com relação aos projetos que obtêm sucesso, os fatores que auxiliam são o trabalho em equipe, que promove a cooperação, e a apresentação de informações para os tomadores de decisão, de modo efetivo, através de síntese e gráficos. Além disso, a utilização de *software* computacional que possui suporte e documentação adequada é outro elemento que corrobora para o sucesso de um projeto. Por fim, também é importante o alinhamento entre os objetivos estratégicos e o projeto de simulação.

A seção a seguir descreve o processo de desenvolvimento de modelos de simulação usualmente apresentados na literatura de simulação.

### 2.4.1 Elementos, conceitos e terminologia básicos em simulação

Os elementos e termos apresentados a seguir são usualmente utilizados na literatura de simulação. As definições apresentadas são baseadas em Saliby (1989), Freitas Filho (2008), Georges (2005), Chwif e Medina (2010) e Robinson (2004).

- Variáveis de estado: são variáveis cujos valores indicam o estado de um sistema. O conjunto de variáveis de estado que representa um dado sistema aponta o que ocorre no sistema em um dado instante de tempo. (FREITAS FILHO, 2008);
- Eventos: São acontecimentos, predefinidos ou não, que modificam o estado do sistema. Sempre que um evento ocorre, pelo menos uma variável de estado é afetada (por exemplo, chegada de peças, uma saída de cliente, etc..) (FREITAS FILHO, 2008);
- Entidades: são os objetos ou componentes do sistema que necessitam ser representados no modelo. Entidades dinâmicas são as que percorrem o fluxo lógico do sistema, por exemplo, os clientes em um banco ou um carro em uma praça de pedágio. Entidades estáticas são, por exemplo, as máquinas. (FREITAS FILHO, 2008; GEORGES, 2005);
- Atributos: são características (propriedades) atribuídas às entidades. Os atributos permitem caracterizar e individualizar as entidades. (FREITAS FILHO, 2008);
- Recurso: é uma entidade estática que fornece serviço às entidade dinâmicas. (FREITAS FILHO, 2008);
- Atividades: execução de algum processamento sobre uma entidade dinâmica. Geralmente, as atividades estão associadas a tempos de processamento (FREITAS FILHO, 2008);
- Tempo simulado: diz respeito ao tempo do sistema real simulado. Por exemplo, ao dizer que o tempo simulado é sete dias, isto significa que no simulador o tempo simulado será de sete dias. (FREITAS FILHO, 2008);
- Replicações: consiste na repetição da simulação do modelo para os mesmos parâmetros de entrada e mesmo tempo de simulação, porém para uma semente de número aleatória diferente. (Chwif e Medina, 2010);

- Rodada de simulação ou corrida: uma rodada de simulação é o período de tempo em que o sistema realiza as simulações. Uma rodada pode conter inúmeras replicações e pode dar origem a um conjunto (amostra) de estimativa para cada variável de interesse do estudo. Essa variável mede o desempenho do sistema como, por exemplo, o tempo médio de atendimento em um banco ou a quantidade de peças produzidas em um dia. (SALIBY, 1989). Mais de uma rodada de simulação é realizada para estimar o desempenho do sistema (variável de resposta) em termos de média e desvio padrão;
- Variável de resposta (variável de desempenho): variável que mede o desempenho do sistema. (SALIBY, 1989). Segundo (SALIBY, 1989), modelos com múltiplas variáveis de resposta são mais complexos;
- Estimativas e precisão: por definição, cada rodada dá origem a uma estimativa para cada variável do sistema representada no modelo. As estimativas variam somente quando a amostra de números aleatórios variar. Ou seja, quando mais de uma rodada de simulação é executada, cada uma delas é realizada para um conjunto de número aleatórios diferentes. Logo, em cada rodada, o valor da variável de resposta é diferente. Segundo Saliby (1989), a variância obtida a partir da média dos valores de resposta de uma variável é uma boa medida de precisão das estimativas. Em outras palavras, a média global e a variância são calculadas com base nos resultados individuais de cada corrida. Saliby (1989) destaca que essa variância é um erro imposto pelo processo de simulação devido ao mecanismo de representação da variabilidade a partir de números aleatórios. A variância é inversamente proporcional ao número de rodadas de simulação segundo lei geral da estatística, ou seja, se foram rodadas infinitas rodadas de simulação, a variância tende a zero. No entanto, isso é computacionalmente inadequado, assim, utilizam-se recursos estatísticos para determinar o número de rodadas de simulação dado um erro admissível<sup>44</sup> e um nível de confiança<sup>45</sup> determinado pelo pesquisador;
- Simulação terminante e simulação não terminante: a simulação é dita terminal quando se observa uma situação em que há turnos de trabalho. Nesse caso, por exemplo, as características do sistema no início de cada turno retornam para

---

<sup>44</sup> Erro admissível ou precisão é a margem de erro estipulada pelo pesquisador para calcular, por exemplo, o tamanho de amostra necessária para estimar uma média (DOANE; SEWARD, 2008).

<sup>45</sup> Nível de confiança (ou coeficiente de confiança) é a probabilidade de que um intervalo contenha o verdadeiro valor de uma estimativa, por exemplo, uma média. (DOANE; SEWARD, 2008).

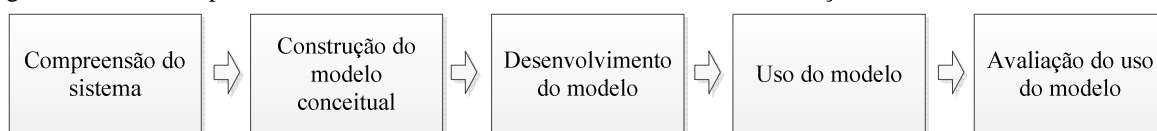
um estado inicial. As simulações não terminantes são situações em que não se tem uma clareza quanto ao momento em que o sistema é encerrado. (CHWIF; MEDINA, 2010; ROBINSON, 2004). Como exemplo, cita-se uma empresa de fluxo contínuo que opera 24 horas por dia e 365 dias ao ano, sem interrupções programadas.

A simulação computacional é amplamente utilizada em diversas situações e áreas. Cada estudo executado apresenta peculiaridades em função do ambiente e das características do sistema. Entretanto há, na literatura, métodos que auxiliam a condução de um estudo ou projeto de simulação. A seguir, alguns dos métodos usualmente citados pela literatura, são apresentados.

#### 2.4.2 Método para desenvolvimento de modelos de simulação

Trabalhos que abordam métodos para a modelagem e simulação de sistemas são usuais na literatura. Observa-se, sobre o tema, no contexto de processos industriais, em obras de autores como Withers et al. (1993), Pritsker (1997), Law e Kelton (1991), Banks (1998) e Hillier e Lieberman (2013), a proposição de métodos para a condução de projetos de simulação. A partir da análise desses métodos, constata-se que eles são estruturados em etapas e que há macro etapas compartilhadas por todos os métodos analisados ocorrendo, geralmente, variações no detalhamento das fases contidas em cada macro etapa. As macro etapas, baseadas em Withers et al., (1993), encontram-se representadas na Figura 14.

Figura 14: Macro etapas do método de desenvolvimento de modelos de simulação



Fonte: Adaptado de Withers et al., (1993).

O Quadro 4 desdobra as etapas previstas no método de condução de um trabalho de simulação apresentado em Withers et al. (1993), Pritsker (1997), Law e Kelton (1991), Banks (1998) e Hillier e Lieberman (2013), a partir das macro etapas apresentadas na Figura 14.

Quadro 4: Desdobramento dos método para desenvolvimento de modelos de simulação

	<b>Withers et al. (1993)</b>	<b>Pritsker (1997)</b>	<b>Law e Kelton (1991)</b>	<b>Banks (1998)</b>	<b>Hillier e Lieberman (2013)</b>
Compreensão do sistema	a. Definição da equipe de modelagem b. Definir o problema a ser resolvido c. Determinar as restrições do cliente e o plano de desenvolvimento	a. Formular o problema	a. Formular o problema e planejar o estudo	a. Formular o problema b. Definir os objetivos	a: Formular o Problema e Planejar o Estudo
Construção do modelo conceitual	a. Compreender o sistema b. Desenvolver (revisar) o modelo conceitual c. Desenvolver os requisitos de dados d. Validar o modelo conceitual e os requisitos de dados	a. Especificar o modelo	a. Coletar dados e formular o modelo b. Validar	a. Conceber o modelo conceitual b. Coletar os dados	a: Coletar os Dados e Formular o Modelo de Simulação b: Verificar a Precisão do Modelo de Simulação
Desenvolvimento do modelo	a. Determinar a classe do modelo b. Desenvolver o modelo de dados e a documentação c. Verificar as especificações do modelo d. Validar os requisitos do modelo e. Lançar o modelo	a. Desenvolver o modelo b. Coletar dados c. Definir controles do experimento d. Rodar o modelo e. Verificar o modelo f. Validar o modelo	a. Construir programa computacional e verificar o programa b. Fazer rodadas piloto c. Validação	a. Transcrever o modelo b. Verificar o modelo c. Validar o modelo	a: Selecionar o Software e Construir um Programa de computador b: Testar a Validade do Modelo de Simulação
Uso do modelo	a. Planejamento de experimentos b. Executar o experimentos c. Validar os resultados d. Tomar decisões sobre mudança no sistema	a. Usar o modelo b. Suportar a tomada de decisão	a. Planejar os experimentos b. Fazer rodadas produtivas c. Analisar os dados de saída d. Documentar, apresentar e implementar os resultados	a. Planejar experimentos b. Executar a análise c. Analisar a necessidade de novas rodadas de simulação d. Documentar e. Implantar a solução	a: Planejar as Simulações a serem Realizadas b: Realizar as Execuções de Simulação e Analisar os Resultados c: Apresentar Recomendações à Administração
Avaliação do uso modelo	a. Executar a operação b. Avaliar o desempenho do ambiente das operações c. Operar o modelo d. Comparar a performance mensurada pelo modelo e. Documentar o uso do modelo				

Fonte: Adaptado de Withers et al. (1993).

A primeira macro etapa consiste na compreensão do sistema. Observa-se que todos os métodos contemplados no quadro resumo destacam a necessidade de formulação do problema e dos objetivos da simulação. Nessa etapa, as variáveis de desempenho que serão modeladas são definidas e necessitam estar alinhadas aos objetivos do trabalho, assim como ao problema em questão. Não há consenso na literatura quanto à definição do problema. Por um lado, alguns autores como Law e Kelton (1991), Chwif e Medina (2010) e Banks (1998) afirmam que a modelagem pode se dar somente após uma clara e precisa definição do problema e dos objetivos do estudo. Chwif e Medina (2010) destacam que os objetivos e o entendimento do sistema devem ser de domínio do analista, domínio este que advém da discussão do problema com especialistas. Por outro lado, Freitas Filho (2008) e Robinson (2004) defendem que o problema nem sempre é claramente conhecido. Nesses casos, há a necessidade de criação de consenso sobre a estruturação do problema entre os envolvidos na modelagem.

A macro etapa seguinte contempla a modelagem conceitual do problema/sistema. Esta consiste em definir os limites do sistema, bem como os componentes que compõem o modelo, as variáveis e as interações lógicas que compreendem o sistema estudado. Autores como Chwif e Medina (2010) e Robinson (2004, 2008) abordam em profundidade a modelagem conceitual do sistema. Para esses autores, a etapa em questão é essencial para a construção de um modelo apropriado da realidade para suportar decisões. Já autores como Law e Kelton (1991) e Banks (1998) não detalham e nem discutem a modelagem conceitual do sistema, pois seu foco está no tratamento de dados de entrada e saída do modelo, bem como na matemática envolvida na simulação.

A terceira macro etapa consiste no desenvolvimento do modelo de simulação propriamente dito. Nessa fase o modelo conceitual é transcrito em uma linguagem computacional e os dados necessários para representar o sistema são coletados e tratados. A etapa de tratamento dos dados requer amplo apoio das teorias estatísticas para, por exemplo, determinar o tamanho de amostra de cada variável e para estimar as distribuições de probabilidade que representam o comportamento estocástico de cada variável. Além disso, o modelo necessita ser verificado e validado, sendo que a verificação se refere às garantias de que computacionalmente o simulador se comporta conforme o esperado e a validação atua no sentido de assegurar que o modelo tem capacidade de representar adequadamente a realidade a partir da qual ele foi construído. As técnicas e ferramentas para a análise de dados de entrada e saída para a modelagem de modelos de simulação são tratadas em detalhes na literatura por autores como Chwif e Medina (2010), Freitas Filho (2008), Law e Kelton (1991), Pidd (2004b) e Robinson (2004). Uma síntese dessas técnicas e ferramentas é descrita



a seguir. Quanto à validação de modelos, Pidd (2004b) destaca que existem duas abordagens. A primeira é a validação ‘*black box*’, que desconsidera o funcionamento interno do modelo atentando-se apenas às variáveis de resposta. A segunda é a validação ‘*white box*’, que valida o comportamento interno do modelo. Os testes estatísticos úteis são as técnicas de comparação de médias simuladas (amostra simulada) em relação a médias observadas no mundo real ou então a um valor pontual.

A quarta macro etapa dedica-se ao uso do modelo para compreender o problema e analisar as possíveis soluções da questão. Há um aparato estatístico para auxiliar o processo de definição dos experimentos e a análise dos resultados das simulações. Observa-se que todos os processos apresentados pressupõem que a decisão será efetivamente tomada a partir do estudo de simulação e para garantir o uso contínuo de modelos computacionais nos processos decisórios das organizações.

Finalmente, a última macro etapa visa suportar as análises de efetividade e aderência dos resultados simulados e utilizados para tomar as decisões em relação ao desempenho real do sistema após a implantação das ações. Destaca-se que somente o método proposto em Withers et al. (1993) atém-se a essa questão de suma relevância para justificar o papel da simulação.

Uma análise minuciosa dos processos resumidos no Quadro 4 aponta que há pouco detalhamento de como operacionalizar as etapas de delimitação e delineamento do problema e de desenvolvimento da modelagem conceitual, ou seja, de representação do sistema real de modo simplificado para a condução das análises cabíveis sobre esse sistema. Chwif e Medina (2010) e Robinson (2008) destacam a importância dessas etapas e aprofundam questões relacionadas à modelagem conceitual. Esses autores apontam um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar na construção do modelo conceitual, como por exemplo, as técnicas de *brainstorm* e de construção de diagramas. Para Robinson (2008), a modelagem conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação, pois essa fase acarreta desdobramento para as etapas de coleta de dados e de construção do modelo. Porém, segundo observação realizada por Robinson (2008), os livros sobre modelagem e simulação dedicam pouca atenção a essa etapa. Essa mesma negligência pode ser observada em artigos científicos que tratam do tema modelagem e simulação. (ROBINSON, 2008).

Tal situação também foi constatada por Georges (2005) que, após uma revisão de diferentes autores que apresentam métodos para a condução de projetos de simulação,

verificou a carência desses métodos em detalhar e auxiliar na realização da modelagem conceitual do problema. Dentre as conclusões de Georges (2005, p. 217), o autor destaca:

A problemática da modelagem ainda não figura entre as principais preocupações da simulação, mas, deveria. A modelagem é elemento mais fundamental na simulação e, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem esta tarefa é de grande importância para seu uso, aperfeiçoamento e disseminação.

A partir do exposto, constata-se uma carência na literatura quanto a abordagens para auxiliar a modelagem conceitual do problema antes da modelagem quantitativa do mesmo. A modelagem conceitual é importante para todas as abordagens da PO que visam a análise, a compreensão e a otimização de um sistema sendo, assim, relevante a discussão de caminhos para a condução dessa etapa do processo de modelagem de sistemas, num sentido mais amplo, e da simulação, em específico.

Outro aspecto relevante apontado por Pidd (1998), Robinson (2004) e Chwif e Medina (2010) é que a modelagem não é linear. Ao longo do processo de desenvolvimento de um modelo de simulação ocorrem revisões, principalmente em relação às delimitações do sistema e aos objetivos do modelo.

A seguir, os princípios de funcionamento da simulação computacional são apresentados, com destaque para as técnicas utilizadas para a modelagem da variabilidade.

### **2.4.3 Princípios de funcionamento da simulação estocástica**

O método de simulação visa suportar o desenvolvimento de um modelo, geralmente computacional, que represente um sistema que evolui probabilisticamente ao longo do tempo. A estocasticidade e a dinâmica retratadas nos modelos de simulação, elementos de interesse desta pesquisa, são detalhadas a seguir.

Um modelo computacional executa um conjunto de instruções para a simulação de um sistema. Ao longo da execução das instruções, pelo simulador, os valores das variáveis que representam o sistema são alterados para replicar o comportamento do sistema de interesse. Como a simulação representa o comportamento do sistema dinamicamente, as variáveis alteram seus valores ao longo do tempo. Assim, a dinâmica compreende a representação do comportamento do sistema ao longo do tempo. Segundo Chwif e Medina (2010), Robinson (2004), Law e Kelton (1991) e Pidd (2004b), existem diferentes soluções para modelar o avanço do tempo, dentre as quais, destacam-se:

- Simulação por fatiamento do tempo<sup>46</sup>: O tempo avança em intervalos predefinidos. A cada intervalo de tempo, o status das variáveis que representam o sistema é atualizado;
- Simulação contínua: O estado das variáveis do sistema é atualizado continuamente ao longo do tempo. Como exemplo, cita-se o movimento de fluído de um tanque para outro;
- Simulação por eventos discretos: Nessa abordagem, a simulação atualiza o estado do sistema somente no momento em que ocorre algum evento. Por exemplo, a chegada de uma peça em uma máquina de usinagem promove um conjunto de instruções para lidar com esse evento.

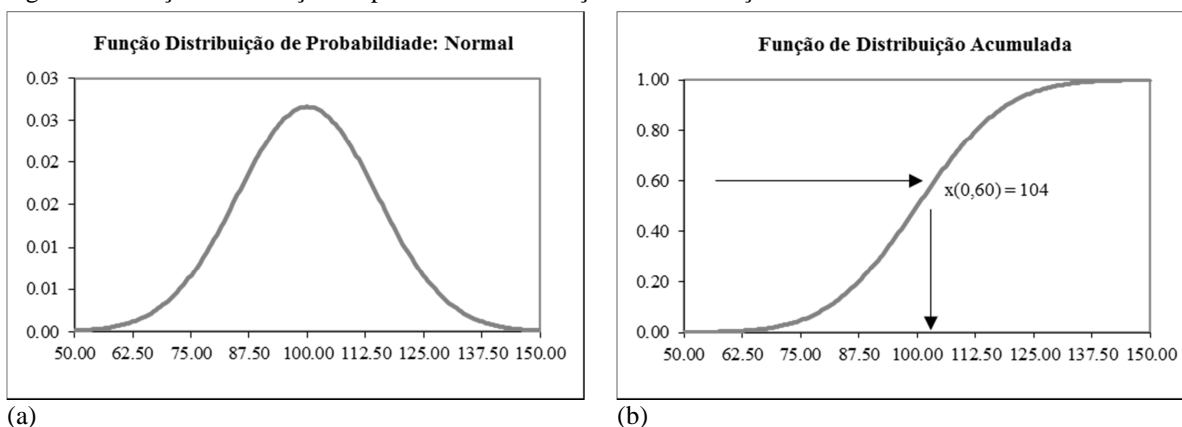
Conforme mencionado anteriormente, a variabilidade é um dos elementos que levam ao uso da simulação para representar um sistema de interesse. A variabilidade faz com que o comportamento das variáveis que compõem o sistema seja incerto. Ou seja, não há certezas em relação ao comportamento futuro das variáveis e, conseqüentemente, do sistema. Para reproduzir essas incertezas do sistema, a simulação utiliza-se de modelos probabilísticos (distribuições de probabilidade) que representam o comportamento estocástico das variáveis (por exemplo, o tempo de processamento de uma operação ou o tempo em que um equipamento fica indisponível). A questão ainda pendente até este ponto é como utilizar esses modelos probabilísticos em um modelo computacional. A saída encontrada na literatura para representar o comportamento estocástico das variáveis foi o uso de geradores de números pseudo-aleatórios (simulação de Monte Carlo). (LAW; KELTON, 1991). Desta forma, dado que há uma distribuição de probabilidade associada a cada uma das variáveis do sistema, o simulador determina o valor dessas variáveis a partir do uso de um gerador de números aleatório, mecanismo matemático que gera, aleatoriamente, valores que variam entre zero e um. O valor obtido a partir do gerador de números aleatórios é projetado sobre a função distribuição de probabilidade acumulada e, assim, o valor da variável é atribuído pelo simulador. (LAW; KELTON, 1991). Um exemplo torna mais simples a compreensão desse mecanismo. Supõe-se um conjunto de dados que segue uma distribuição normal com parâmetros de média e desvio padrão que valem 100 e 15, respectivamente. A função distribuição de probabilidade (FDP) e a função distribuição acumulada (FDA) estão

---

<sup>46</sup> Do inglês *time-slice*.

representadas nas Figura 15 (a) e Figura 15 (b), respectivamente. Na função distribuição acumulada, o eixo  $Y$  representa a probabilidade acumulada, variando de zero a um e o eixo  $X$  apresenta os valores de  $X$  para cada valor de  $Y$ . Supondo que o gerador de número aleatório tenha sorteado o valor 0,60, o valor de  $X$  correspondente a essa probabilidade é 104, conforme ilustrado na Figura 15 (b).

Figura 15: Função distribuição de probabilidade e função de distribuição acumulada



(a) Fonte: Elaborado pelo autor

(b)

Assim, a modelagem da variabilidade segue os seguintes passos (ROBINSON, 2004; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991):

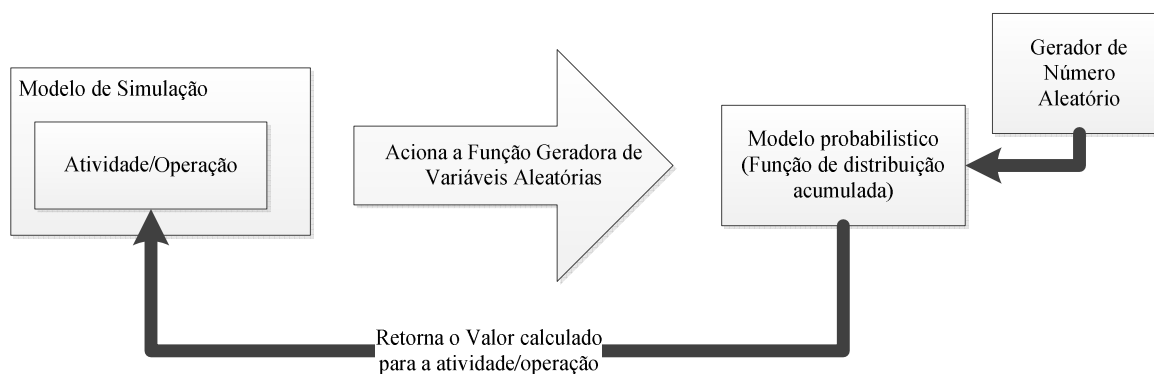
- Estimar a distribuição de probabilidade (as variáveis que representam o sistema são especificadas por uma distribuição de probabilidade): assume-se que as variáveis em um modelo de simulação são aleatórias. Assim, a partir de dados históricos de uma atividade e/ou operação do sistema, estima-se um modelo probabilístico (distribuição de probabilidade) que represente o comportamento histórico dos dados. Um conjunto de testes estatísticos<sup>47</sup> é disponibilizado na literatura para avaliar a aderência dos dados coletados à distribuição de probabilidade teórica;
- Gerar número pseudo-aleatório: a geração de um número pseudo-aleatório consiste em obter aleatoriamente um número real, que varie entre zero e um, baseado em um algoritmo matemático;
- Amostra na distribuição de probabilidade: a geração de números aleatórios é a essência da simulação computacional, pois a partir desse número gerado pelo

<sup>47</sup> Detalhes sobre o tratamento dos dados de entrada do modelo são descritos na seção 2.4.4.

simulador é possível recorrer à distribuição de probabilidade modelada para representar o fenômeno de interesse e, assim, obter o valor correspondente da variável para o número aleatório gerado. Observa-se aqui as bases conceituais da modelagem computacional, abordadas na literatura, de que a variabilidade observada no sistema real é replicada no modelo computacional a partir das distribuições de probabilidade e dos números aleatórios.

Freitas Filho (2008) apresenta uma ilustração, detalhada na Figura 16, para representar o sequenciamento de eventos do mecanismo de obtenção do valor de uma variável aleatória em um modelo computacional.

Figura 16: Mecanismo de funcionamento<sup>48</sup> da estimação do valor de uma variável em um modelo computacional



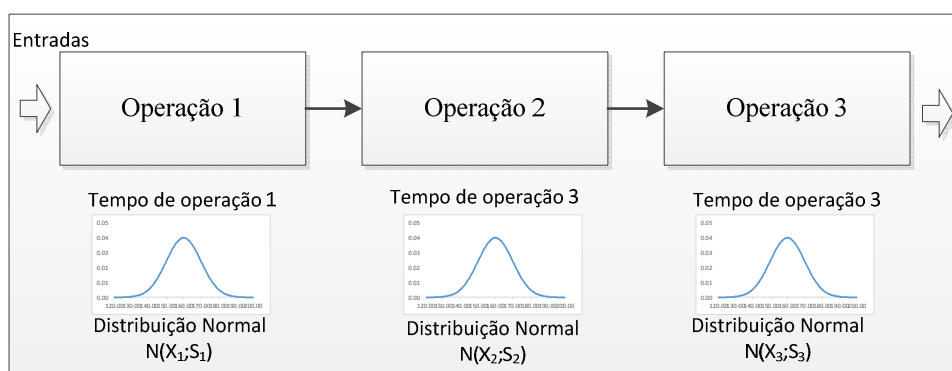
Fonte: Adaptado de Freitas Filho (2008)

A partir da Figura 16, observa-se o mecanismo de obtenção do valor de uma variável estocástica. O mecanismo inicia a partir de uma solicitação de uma atividade ou operação, a qual possui uma variável associada para representar o seu comportamento, por exemplo, o tempo de processamento em um caixa bancário. Dessa forma, toda vez que algum cliente chega ao caixa para ser atendido, essa atividade aciona uma função geradora de variáveis aleatórias. Tal função, por sua vez, a partir de um número aleatório indicado pelo gerador de números aleatórios e do modelo probabilístico (por exemplo, uma distribuição normal), calcula o comportamento da variável. Esse valor é, então, atribuído à atividade ou operação em questão. (FREITAS FILHO, 2008; ROBINSON, 2004). Denomina-se o mecanismos representado na Figura 16 por mecanismo tradicional.

<sup>48</sup> O princípio de funcionamento de um simulador computacional, no que tange à estocasticidade exposta nesta seção, não contempla todo o formalismo matemático e todos os detalhes de funcionamento de um simulador computacional. Detalhes em relação a essas questões podem ser obtidas em Law e Kelton (1991), Robinson (2004) e Saliby (1989).

Assumindo que se deseja compreender o tempo de processamento de um sistema qualquer composto por múltiplas operações, no exemplo citado o tempo referente a cada operação é representado através de uma distribuição de probabilidade, geralmente estimada a partir de dados históricos. Ao representar esse sistema em um ambiente computacional o simulador, para obter, por exemplo, o tempo de processamento de uma peça, utiliza-se do gerador de números aleatórios e das distribuições de probabilidade. Como a simulação é dinâmica, a peça se movimenta virtualmente por todas as operações na medida em que o tempo de simulação avança. O tempo de processamento pode ser obtido através da soma dos tempos individuais da peça em cada operação. A Figura 17 exemplifica o mecanismo tradicional de representação da variabilidade em um modelo de simulação computacional.

Figura 17: Ilustração da representação da variabilidade em um sistema através de distribuições de probabilidade independentes.



Fonte: Elaborado pelo autor

Um pressuposto não explicitado da simulação computacional é que as distribuições utilizadas para representar as variáveis que representam o sistema são independentes umas das outras. Isso significa que o tempo de processamento da operação 2 independe do tempo que a entidade (peça, produto, etc.) levou para ser processada na operação 1. Esta é uma questão central para a modelagem da degradação da qualidade da matéria-prima, e que é detalhada no Capítulo 3.

Uma última questão abordada nesta seção, mas não menos importante, refere-se à análise dos resultados obtidos a partir de um modelo de simulação. Dada a natureza da simulação estocástica, que pressupõe que os resultados do sistema estudado são obtidos a partir de sorteios aleatórios, segundo Freitas Filho (2008), é necessário ter cuidado ao interpretar os resultados obtidos em um modelo computacional, pois não se tem certeza em relação ao resultado simulado. Segundo Freitas Filho (2008), os resultados obtidos após

simular um sistema uma única vez não permitem que conclusões sobre o comportamento do sistema sejam obtidas. Isso acontece porque, segundo Law e Kelton (1991), caso os valores sorteados (pelo gerador de números aleatórios) sejam diferentes, então os resultados obtidos podem ser diferentes. Essa característica da simulação, no entanto, é contornável. Através de replicação da simulação para diferentes sorteios aleatórios, é viável obter um intervalo de valores possível para a variável de resposta. Desta forma, podem ser realizados tratamentos estatísticos adequados que mitigam a incerteza do resultado. (BANKS, 1998; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991).

Esta seção tangenciou a questão dos dados necessários para representar o comportamento do sistema, as variáveis de entrada do modelo, bem como as variáveis de saída. Ambos os tipos de variáveis carecem de tratamentos estatísticos para assegurar a validação do modelo. A próxima seção descreve os procedimentos para tratamento dos dados para a modelagem e simulação de sistemas, usualmente destacadas pela literatura especializada.

#### **2.4.4 Análise de dados em simulação**

A análise de dados na simulação contempla um amplo aparato estatístico para auxiliar nas diferentes etapas de um projeto de modelagem. A literatura destaca ampla atenção a essas questões; uma discussão detalhada sobre o tema pode ser observada em Banks (1998), Chwif e Medina (2010), Freitas Filho (2008), Law e Kelton (1991) Pidd (2004b) e Robinson (2004). A presente seção atém-se a compilar as principais questões relacionadas ao tema tratamento de dados em simulação.

As técnicas e ferramentas estatísticas são utilizadas em dois momentos distintos ao longo do método de modelagem e simulação. O primeiro ocorre durante a etapa de desenvolvimento do modelo, quando os dados necessários para representar o sistema são tratados. O segundo momento acontece na etapa de validação do modelo, quando os dados de saída são comparados com os dados reais. Trata-se a questão da análise dos dados em duas frentes, que são:

- Análise dos dados de entrada do modelo;
- Análise dos dados de saída do modelo.

Tradicionalmente, a análise dos dados de entrada consiste em tratá-los<sup>49</sup> de modo que representem o comportamento estocástico e dinâmico do sistema de interesse. Tal análise consiste em modelar, através de modelos determinísticos ou probabilísticos, cada uma das variáveis de um modelo. (BANKS, 1998; CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991; PIDD, 2004b; ROBINSON, 2004). Os modelos determinísticos são aqueles que contemplam uma expressão matemática, baseando-se em alguma lógica racional e/ou fenômeno conhecido. Já as variáveis probabilísticas são aquelas que representam a variabilidade do sistema. A análise dessas variáveis consiste em: i) selecionar um modelo probabilístico para a distribuição dos dados; ii) verificar estatisticamente a aderência dos dados aos modelos teóricos.

Os dados de saída do modelo são aqueles gerados pelo simulador computacional. Sobre esses dados, procedimentos estatísticos são promovidos com os objetivos, primeiro de validar os resultados gerados pelo modelo, e segundo de responder objetivamente às questões tratadas pelo estudo. (BANKS, 1998; CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991; PIDD, 2004b; ROBINSON, 2004).

Banks (1998) descreve um conjunto de técnicas estatísticas para a análise de dados em simulação. Outros autores como Robinson (2004), Law e Kelton (1991) e Pidd (2004b) dedicam amplo espaço para apresentação das ferramentas estatísticas úteis na simulação computacional. A seguir, são apresentadas as principais técnicas e ferramentas para a modelagem dos dados de entrada.

#### 2.4.4.1 Análise dos dados de entrada do modelo

O tratamento dos dados de entrada viabiliza a representação do sistema e a variabilidade existente no mesmo. Entretanto, conforme destacado por Georges (2005), a coleta de dados é um tema negligenciado na literatura, embora tenha impacto direto no resultado do tratamento dos dados. Desta forma, o planejamento da coleta de dados é uma etapa importante do processo de análise dos dados de entrada.

O processo de análise dos dados de entrada do modelo consiste, além do planejamento e da coleta dos dados, na definição de um modelo probabilístico que consiga representar o comportamento dos dados observados. Na linguagem comum da área de simulação e

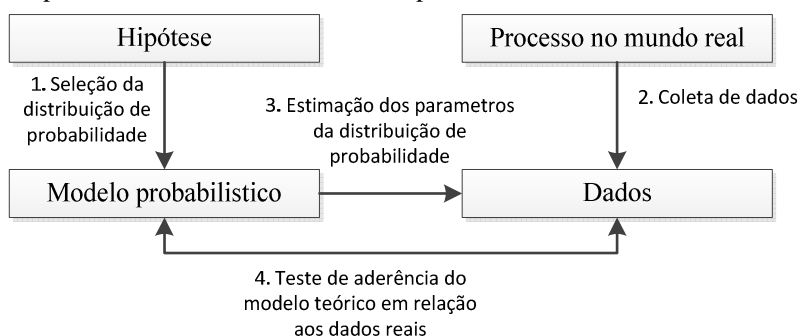
---

<sup>49</sup> O tratamento dos dados consiste, basicamente, nas atividades de coleta dos dados, limpeza dos mesmos e estimação do modelo matemático (determinístico ou probabilístico) que melhor representa o comportamento dos dados.



estatística, isso significa identificar uma distribuição de probabilidade que represente o comportamento das variáveis reais. Segundo Banks (1998), a verificação da adequação dos modelos probabilísticos em simulação, consiste em quatro etapas, que são: i) selecionar a distribuição de probabilidade; ii) coletar dados; iii) estimar os parâmetros da distribuição de probabilidade e; iv) testar a aderência dos dados ao modelo teórico. A Figura 18 ilustra o processo apresentado por Banks (1998).

Figura 18: Processo para testar a aderência de modelos probabilísticos



Fonte: Adaptado de Banks (1998)

A partir da Figura 18, observa-se que, após a coleta de dados e a seleção do modelo probabilístico, os parâmetros do modelo devem ser estimados. Para isso, inicialmente, ocorre a escolha do modelo apropriado para a descrição dos dados da população. Em seguida, estimam-se os parâmetros do modelo escolhido, geralmente a partir de uma amostra de dados. A escolha do modelo se dá a partir do conhecimento do analista, caso pouco comum, ou, geralmente, a partir de testes estatísticos de aderência dos dados em relação a diferentes modelos teóricos. Os testes de aderência consistem em avaliar se os dados observados seguem o comportamento de um modelo teórico. Essa consistência entre os dados e o modelo teórico é testada via testes de hipótese<sup>50</sup>. O teste de aderência dos dados observados é a primeira parte do processo de tratamento dos dados de entrada. Após a identificação da distribuição que melhor representa o comportamento dos dados, devem-se estimar os parâmetros da distribuição com base na amostra de dados coletados. Por exemplo, se a distribuição normal é uma boa aproximação para representar uma dada variável, neste caso é necessário estimar dois parâmetros para essa distribuição, que são a média e o desvio padrão. Os estimadores

<sup>50</sup> O teste de hipótese é um conjunto de técnicas suportado pela teoria estatística e probabilística para auxiliar na decisão em relação a hipóteses geradas sobre um conjunto de dados. Nos testes de hipótese, elabora-se uma hipótese nula e uma hipótese alternativa e, a partir de um nível de significância ( $\alpha$ ), o teste, baseado em uma estatística, aceita ou rejeita a hipótese nula. (HAIR et al., 2007).

permitem replicar o comportamento da distribuição normal. A estimação de parâmetros é uma área de estudo da estatística e detalhes sobre suas diferentes distribuições podem ser observados na literatura especializada. (BANKS, 1998; HAIR et al., 2007; LAW; KELTON, 1991). Um exemplo clarifica o processo exposto. Supondo um conjunto de dados coletado para uma dada variável ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), assumindo uma distribuição normal, a qual é representada pelos parâmetros média ( $\bar{X}$ ) e desvio padrão ( $S$ ). Nesse caso, ambos os parâmetros são estimados a partir dos dados coletados e de expressões específicas<sup>51</sup> apontadas na literatura. Por fim, realiza-se o teste de aderência que compara o comportamento dos dados coletados ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) em relação a distribuição normal teórica<sup>52</sup> com parâmetros ( $\bar{X}$ ) e  $S$ . Os testes de aderência são utilizados para comparar o padrão dos dados reais com a distribuição normal teórica. Esses testes são apresentados a seguir.

### Método para verificação de adequação dos modelos probabilísticos

A verificação formal da adequação dos modelos probabilísticos consiste em conduzir testes estatísticos para identificar se o modelo probabilístico escolhido pelo pesquisador consegue representar o comportamento da variável observada. Os testes mais comuns para avaliar a aderência<sup>53</sup> dos dados são o Teste Chi-Quadrado ( $\chi^2$ ) e o Teste de Kolmogorov-Smirnov. (BANKS, 1998; HAIR et al., 2007; LAW; KELTON, 1991). O Teste Chi-quadrado consiste em comparar a frequência esperada, a partir de um modelo teórico, em um intervalo predefinido, com a frequência observada nos dados. O fato de haver definição prévia dos intervalos pode acarretar análises equivocadas. Assim, o teste é recomendado para amostras grandes, pois, nesses casos, o modelo Chi-quadrado torna-se mais sensível. Já o Teste de Kolmogorov-Smirnov realiza a comparação pontual da frequência esperada de uma distribuição teórica em relação à distribuição observada nos dados coletados. Como o teste compara todos os pontos, não apresenta a mesma limitação do teste Chi-Quadrado. Banks

---

<sup>51</sup> O estimador da média ( $\bar{X}$ ) é dado pela expressão  $\bar{X} = \sum x_i / n$  e o desvio padrão ( $S$ ) é estimado a partir da expressão  $S = \sqrt{\sum (x_i - \bar{X})^2 / (n - 1)}$ . Estimadores para as demais distribuições de probabilidade podem ser observados em livros de estatística e de simulação, por exemplo, Doane e Seward (2008) e Law e Kelton (1991)

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{t - \mu}{\sigma} \right)^2}, \quad t \in \mathfrak{R}$$

<sup>52</sup> O modelo normal é dado pela expressão

<sup>53</sup> Detalhes sobre os testes de aderência são amplamente apresentados na literatura sobre estatística e simulação como, por exemplo, em Doane e Seward (2008) e Law e Kelton (1991). Esses testes não serão detalhados neste trabalho.

(1998) destaca que quando nenhum modelo teórico ajusta-se aos dados observados, a saída existente é o uso de distribuições empíricas. (BANKS, 1998). Segundo Banks (1998), uma distribuição empírica representa a distribuição de frequência de dados reais observados no modelo computacional em detrimento de uma distribuição de probabilidade teórica.

#### 2.4.4.2 Análise dos dados de saída do modelo

A análise dos dados de saída de um modelo de simulação necessita receber um tratamento estatístico, dada a natureza estocástica (uso de números aleatórios e distribuições de probabilidade) do processo de simulação. Isso significa que os componentes aleatórios que alimentam um modelo de simulação causam variações nos resultados em cada replicação. Tais variações inviabilizam que uma decisão seja tomada a partir de uma única replicação do modelo. Desta forma, a análise dos dados de saída compreende gerar uma quantidade de dados (amostra) que represente medidas verdadeiras (como a média populacional) para as variáveis de saída do modelo. (BANKS, 1998; CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991; PIDD, 2004b; ROBINSON, 2004). A análise de dados de saída se dá em dois momentos distintos que são:

- Para validar o modelo;
- Para auxiliar na condução de experimentos a partir do modelo computacional validado.

Segundo Law e Kelton (1991) as técnicas para validação são executadas uma única vez ao longo do processo de desenvolvimento do modelo. Após a validação, não há necessidade de novos testes a menos que sejam realizadas alterações no modelo. Assim, a questão central dessas técnicas é garantir que o modelo desempenhe para as variáveis validadas o mesmo comportamento observado nos dados reais. Por outro lado, as técnicas para condução de experimentos visam auxiliar o analista ou pesquisador a seguir uma sequência de testes para conduzir e analisar os resultados das experimentações realizadas a partir do modelo computacional.

A análise de dados de saída compreende um conjunto de técnicas e ferramentas estatísticas, conforme detalhado em Banks (1998), Chwif e Medina (2010), Freitas Filho (2008), Law e Kelton (1991), Pidd (2004b) e Robinson (2004), que visam garantir confiança

dos resultados obtidos para as variáveis de desempenho analisadas. A partir de dados confiáveis, diferentes experimentos podem ser conduzidos com o modelo para suportar as decisões.

Robinson (2004) destaca que a análise de dados de saída de um modelo de simulação é determinada pela natureza da simulação (terminante ou não terminante) e pela natureza dos *outputs* do modelo (transitória ou de estado estacionário). A natureza da simulação e dos dados de saída influencia no tipo de análise recomendada para evitar problemas de autocorrelação nos dados de saída<sup>54</sup> e o problema do viés inicial<sup>55</sup>.

### Sistemas terminantes

A análise de sistemas terminante consiste em compreender o comportamento do sistema ao longo do tempo por um período de tempo fixo. (CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; ROBINSON, 2004). Nos sistemas do tipo terminante, o principal fator controlado é o número de replicações do modelo necessárias para assegurar o nível de confiança e de erro admissível, dado que as condições iniciais e o tempo de simulação são predefinidos. Assim, em modelos terminantes, busca-se dimensionar o número de replicações do modelo.

O dimensionamento do número de replicações de um modelo visa estimar medidas confiáveis para as variáveis de resposta do sistema, dada a característica estocástica da simulação. Ou seja, obter dados de saída para uma variável a partir de múltiplas replicações possibilita a determinação do intervalo de confiança<sup>56</sup> para os parâmetros estimados de uma variável de resposta, por exemplo, a média. A definição do número de replicações do modelo está relacionada à variabilidade observada nos *outputs* do modelo. O procedimento iterativo compreende estimar uma amostra piloto de, por exemplo, 30 rodadas e, a partir dessa amostra piloto, estimar o erro amostral gerado pelo modelo. Sobre os dados gerados, determina-se o

---

<sup>54</sup> O problema da autocorrelação nos dados de saída deriva da violação do pressuposto da análise estatística de que os dados sejam provenientes de variáveis aleatórias. Na situação de variáveis aleatórias, dada uma variável  $X$  aleatória, tem-se a garantia de que o estimador de média e a variância de uma amostra de  $X$  ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) não são viesados. O problema da autocorrelação, então, deriva do fato de que, dada a natureza da simulação, os dados de saída gerados a partir de múltiplas replicações do modelo não são independentes. (THESEN e TRAVIS, 1991).

<sup>55</sup> O problema do viés inicial ocorre devido à característica de um modelo de simulação que deve ter as suas variáveis inicializadas com algum valor. Esses valores iniciais tendem a viesar as estimativas do modelo (THESEN e TRAVIS, 1991).

<sup>56</sup> O Intervalo de Confiança (IC) é um de intervalo de números em que o limite inferior é o menor valor da média e o limite superior é o maior valor da média. O IC é obtido a partir dos dados de uma amostra ou população a um nível de confiança, que expressa a probabilidade de que o IC contenha a verdadeira média. (DOANE e SEWARD, 2008).

tamanho de amostra suficiente para garantir o respaldo estatístico requerido. (BANKS, 1998). Para indicar o número de replicações necessárias a fim de apontar quão acurados são os valores simulados (média e intervalos de confiança), recomenda-se o processo iterativo apresentado por Law e Kelton (1991) e detalhado a seguir:

- Passo 1: Rodada piloto do modelo. Esta rodada piloto deve conter  $n$  replicações, sendo  $n$  maior que um;
- Passo 2: A partir da amostra obtida para as variáveis de interesse, calcula-se o tamanho de amostra necessária. Para estimar o número de replicações ( $n$ ) que atenda um erro absoluto admissível e um dado nível de confiança, utiliza-se a expressão  $n = (t\sigma/E)^2$ , onde  $n$  é o tamanho de amostra,  $t$  é o valor da distribuição t-student para o nível de confiança,  $\sigma$  é o desvio padrão da população e  $E$  é o erro absoluto. Se o valor de  $n$  calculado é inferior ao número de replicações realizadas na rodada piloto, o processo pode ser interrompido;
- Passo 3: Rodar o modelo de simulação e obter replicações adicionais, ou seja, a diferença entre o  $n$  calculado no passo 2 menos o número de replicações realizadas na rodada piloto;
- Passo 4: Retornar para o passo 2.

Após a finalização do processo exposto, torna-se possível determinar o intervalo de confiança para a média e para o desvio padrão, conforme expressões fundamentais da estatística. O uso de múltiplas replicações garante que os valores obtidos em cada replicação sejam independentes, condição requerida para evitar o problema da autocorrelação.

### **Sistemas não terminantes**

Na análise de sistemas não terminantes, geralmente deseja-se estudar o comportamento do sistema em regime, quando as condições iniciais não mais influenciam os estados do sistema. (CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; ROBINSON, 2004). Nesse tipo de sistema, necessita-se determinar:

- A duração da fase transiente (fase transitória);

- O tempo de simulação.

Dado que o interesse está relacionado com sistemas em regime (estado estacionário), deve-se identificar a fase transiente do modelo a fim de remover esses dados das análises. Primeiramente, é preciso definir as condições iniciais do modelo. No entanto, tais condições interferem diretamente no problema do viés inicial e, conseqüentemente, no pressuposto de independência dos dados (problema da autocorrelação). Desta forma, as condições iniciais do modelo devem ser tratadas de modo adequado, a fim de minimizar os problemas expostos. Robinson (2004) apresenta três mecanismos para evitar o viés das condições iniciais dos modelos: i) estabelecer um tempo de aquecimento (*warmup*), período no qual os dados obtidos pelo modelo são descartados; ii) definir condições que inicializam o modelo em uma condição realística e; iii) misturar os mecanismos (i) e (ii).

A definição da fase transiente do modelo, também chamada de período de aquecimento (*warmup*), pode ser obtida a partir de diferentes métodos e técnicas<sup>57</sup> que vão desde análises gráficas, passando por heurísticas até testes estatísticos. Dentre as técnicas disponíveis na literatura, Law e Kelton (1991) e Robinson (2004) destacam o Método de Welch por ser um teste conservador em relação a outras formas. O teste de Welch calcula a média móvel (janela arbitrada) das médias das variáveis de resposta do modelo. No momento em que a série temporal apresenta valores suavizados, o modelo computacional encontra-se aquecido.

Uma vez definido o tempo de aquecimento do modelo deve-se estabelecer o período de simulação, no intuito de conceder confiabilidade para os resultados simulados. Nesse sentido, segundo Freitas Filho (2008), Chwif e Medina (2010) e Robinson (2004), recomenda-se o uso do método de múltiplas replicações para a estimação do intervalo de confiança para as variáveis de resposta do sistema, conforme detalhado anteriormente. Desta forma, minimiza-se o efeito da autocorrelação. Nesse método, os dados observados no período de aquecimento do modelo devem ser eliminados dos resultados. Quanto ao tempo de simulação de cada replicação, para Law e Kelton (1991) e Robinson (2004) o período deve ser muito maior do que o tempo de aquecimento. Já Banks (1998) recomenda que o tempo de simulação deve ser dez vezes maior do que o tempo de *warmup*. Freitas Filho (2008) destaca que além

---

<sup>57</sup> Uma discussão detalhada destes métodos e técnicas pode ser observada em Robinson (2004).

das replicações independentes existem outros dois métodos para determinação do período de simulação, que são os métodos da regeneração e do loteamento<sup>58</sup>.

### **Condução de experimentos a partir do modelo computacional**

A partir do modelo validado, torna-se possível comparar os resultados obtidos em diferentes alternativas. Para isso, testes elementares de hipóteses podem ser conduzidos para comparar o desempenho do modelo em diferentes cenários. Testes de hipóteses estão disponíveis para testar, por exemplo, a média dos dados de uma variável ‘Y’ observada em múltiplas replicações ( $y_1, y_2, \dots, y_n$ ) e essa amostra de médias é comparada a um valor de referência (valor real). Nesse caso, utiliza-se o *teste-t*. Ainda é possível comparar os parâmetros obtidos a partir de  $n$  replicações em dois cenários. Nessa situação obtêm-se duas amostras que são comparadas a partir do *teste-t* ou teste de análise de variância (ANOVA) para comparação de médias. (Doane e Seward, 2008).

#### **2.4.5 Modelos de simulação que avaliam a produtividade do sistema e a qualidade do produto**

Na revisão da literatura sobre simulação computacional Jahangirian et al. (2010) salientam que os sistemas de produção e manufatura concentram boa parte dos trabalhos de simulação. Segundo Black (1998), a simulação computacional dos sistemas de manufatura produtivos é amplamente utilizada para análise e projeto dos sistemas de produção e de manufatura. O autor sugere que a simulação é o único método capaz de lidar com sistemas complexos.

No contexto da indústria de propriedade (mineração<sup>59</sup>, petróleo, floresta, cimento, siderurgia, petroquímica, etc.), em específico, trabalhos de simulação são encontrados com frequência. (MEYER et al., 2011; SHARDA; BURY, 2010; DAM et al., 2009). Uma característica relevante oriunda das aplicações de simulação na indústria de propriedade é que os modelos analisam o sistema de produção de modo integrado e não somente em uma etapa de produção isolada. Isso significa que os modelos de simulação propostos compreendem

---

<sup>58</sup> Uma discussão detalhada desses métodos e técnicas pode ser observada em Freitas Filho (2008).

<sup>59</sup> A literatura que trata especificamente de modelagem e simulação na indústria de mineração é apresentada no capítulo a seguir, quando o contexto do estudo é amplamente apresentado e discutido.

todas as operações que compõem o sistema de manufatura e de produção (MEYER et al., 2011; SHARDA e BURY, 2010; DAM et al., 2009).

O artigo apresentado por Sharda e Bury (2010) destaca o uso de modelo de simulação computacional (simulação por eventos discretos) para estudar as restrições do processo de fábrica de produtos químicos. O modelo representa todas as operações da fábrica, sendo o uso da simulação justificado por visar capturar a dinâmica da planta. Segundo os autores, o uso de modelagem analítica não se enquadrava no estudo devido às inúmeras interações do sistema, aos fluxos discreto e contínuo de produção e à variabilidade associada às diferentes etapas de processamento. O artigo não menciona nada em relação à qualidade da matéria-prima e do produto final. A simulação proposta despreza esses elementos.

Já Dam et al. (2009) descrevem o uso da simulação para realizar uma análise integrada de uma cadeia produtiva na indústria química. Para os autores, problemas contemporâneos em sistemas produtivos geralmente requerem ferramentas de suporte à decisão baseadas em modelos. Os sistemas produtivos na indústria química são artefatos desenvolvidos pelo homem, nos quais se observam interações físico-químicas. Porém, cadeias produtivas (*supply chains*) são mais bem pensadas como sistemas sócio técnicos, em que tecnologias de produção complexa interagem com entidades distribuídas, inteligentes e autônomas – cada uma delas com sua própria dinâmica, objetivo, desejo e planos. A modelagem a qual os autores se referem lida com modelos especialistas para a representação de projetos de engenharia.

Em Meyer et al. (2011) observa-se o uso da simulação para auxiliar nas decisões operacionais e de investimento em uma indústria petrolífera. Os autores concluem que as abordagens tradicionais (otimização, modelos químicos específicos e planilhas eletrônicas) não atendem a necessidade da organização justificando, dessa forma, o desenvolvimento do método de suporte à decisão baseado em simulação computacional por eventos discretos.

Apesar da densa literatura sobre simulação computacional, de modo geral, e na indústria de propriedade, em particular, há uma carência de estudos que tratem o desempenho do sistema de produção e de manufatura em termos de produtividade e qualidade do produto conjuntamente. (CHAN; SPEDDING, 2003). Na revisão sobre simulação realizada por Jahangirian et al. (2010), dos 199 artigos analisados, somente quatro abordam o tema qualidade. No entanto, nenhum deles modela a qualidade do produto e a produtividade do sistema conjuntamente, o que reforça a carência desse tipo de estudo.



Para Chan e Spedding (2003), os modelos de simulação computacional encontrados na literatura, normalmente, avaliam a produtividade, o custo e a qualidade dos produtos transformados em um sistema produtivo de modo separado. Ou seja, ou o modelo avalia o desempenho em termos da qualidade do produto, ou representa a produtividade do sistema. Quando essas dimensões são avaliadas isoladamente, as conexões entre elas deixam de ser consideradas como, por exemplo, as relações entre os custos de produção e a qualidade do produto e vice-versa. Dessa forma, com o objetivo de avaliar conjuntamente a produtividade, o custo e a qualidade do produto, Chan e Spedding (2003) propuseram uma metodologia para desenvolvimento de modelos de simulação computacional denominado *Integrated Multidimensional Process Improvement Methodology* (IMPIM). A metodologia proposta pelos autores contempla, em um mesmo modelo de simulação computacional, a capacidade de avaliar o desempenho do sistema em termos da qualidade do produto, da produtividade e do custo.

Na metodologia proposta por Chan e Spedding (2003), a simulação é utilizada como plataforma para implementar a metodologia para análise integrada de processos, incorporando a qualidade do produto, a produtividade e a dimensão custo de uma forma unificada, sistemática e holística. Segundo os autores, a simulação de eventos discretos é uma ferramenta utilizada, geralmente, para estudar a produtividade de um sistema e não para resolver problemas de controle de qualidade do processo. Propagações de erros através do sistema também não são identificadas se os componentes são investigados individualmente. Assim, a metodologia IMPIM apresentada por Chan e Spedding (2003), sugere a construção de um modelo de simulação convencional para representar o comportamento do sistema em termos de produtividade. Para tanto, gráficos de controle de qualidade são programados no *software* de simulação para tratar a dimensão da qualidade do produto. A propagação dos defeitos (não qualidade) através do sistema é realizada por intermédio de modelos estatísticos conhecidos por *Autoregressive Integrated Moving Average* (ARIMA)<sup>60</sup>. O modelo ARIMA, estima a propagação dos erros ou defeitos, ao longo do sistema de produção. A premissa dos autores é que um defeito gerado em uma estação pode ocasionar uma peça defeituosa em outra estação, assim como um defeito em uma estação pode ser ocasionado por defeitos anteriores ocorridos na mesma estação. No caso descrito pelos autores, o modelo ARIMA relata a taxa de defeitos baseado nas probabilidades de erro em estações/operações anteriores e em relação a tempos passados.

---

<sup>60</sup> Modelo probabilístico utilizado para modelagem e estimação de séries temporais.

No entanto, na metodologia IMPIM proposta por Chan e Spedding (2003), não há como representar o impacto da qualidade intermediária de uma peça produzida na produtividade da próxima etapa. Além disso, não é possível avaliar o efeito acumulado das transformações do produto, ao longo do processo produtivo, na qualidade do produto. Portanto, a proposição de Chan e Spedding (2003) não consegue lidar com o problema da degradação da matéria-prima.

Uma segunda iniciativa encontrada na literatura para modelar conjuntamente a qualidade do produto e a produtividade foi apresentada por Turkseven e Ertek (2003). O modelo proposto no artigo agrega parâmetros de qualidade aos produtos entregues pelo sistema de manufatura. Porém, a não qualidade é aplicada ao modelo como uma variável aleatória, que adiciona não qualidade à matéria-prima utilizada no processo. No entanto, o que gerou a não qualidade e qual a influência da não qualidade na produtividade das etapas seguintes do processo, não são aspectos considerados na modelagem proposta.

Se por um lado a simulação computacional é difundida na literatura, por outro, modelos que retratam o desempenho do sistema em função da produtividade e qualidade do produto são escassos. A seguir, encontra-se a síntese da seção que tratou do tema simulação computacional.

#### **2.4.6 Síntese da Seção**

O método de simulação é tido, pela literatura, como uma opção para avaliar e compreender o comportamento de um sistema. Os modelos computacionais possibilitam que, a partir de uma situação real traduzida em um modelo, experimentos em relação a esse sistema sejam testados e analisados dinamicamente. Os métodos para construção de modelos de simulação permitem compreender e analisar um sistema de forma integrada, além de possibilitarem a antecipação do desempenho do sistema dada uma alteração no mesmo (e *se/what if?*). A essência do método de simulação busca compreender o sistema sob um prisma global, em detrimento de uma análise local e superficial.

A seção apresentou os principais métodos para o desenvolvimento de modelos de simulação, seja para resolver um problema prático, seja para estudar um problema de pesquisa. Destacou-se que esses métodos apresentam um conjunto de etapas semelhantes entre si, sendo que alguns concedem maior atenção à questão do tratamento dos dados, outros à modelagem conceitual do sistema ou, ainda, ao uso do modelo. No entanto,

observou-se uma carência de métodos, técnicas e ferramentas para auxiliar na etapa de modelagem conceitual. Observa-se, da literatura analisada sobre modelagem e simulação, que uma atenção significativa é concedida à exposição e ao detalhamento dos métodos e técnicas para análise dos dados de entrada do modelo e, principalmente, para a análise das saídas do modelo. (LAW; KELTON, 1991). Além disso, não há enfoque para a construção de modelos de uso contínuo, mas sim para o equacionamento de um problema pontual, conforme destacado por Holst (2001) e Klingstam e Olsson (2000). Ainda com relação à modelagem conceitual, observa-se pouca atenção da literatura sobre o tema no que tange a como transformar o sistema real em um modelo tratável computacionalmente. Robinson (2008) destaca, em artigo que trata exclusivamente da modelagem conceitual, a necessidade de realizar estudos associados a essa agenda específica. Segundo o autor, geralmente os pesquisadores da área abordam a modelagem conceitual como vital no processo de modelagem, porém há uma lacuna de tentativas de desenvolvimento de abordagens e definições úteis para o desenvolvimento de um modelo conceitual. Georges (2005) destaca, em sua pesquisa, a ausência de profundidade na literatura em relação à modelagem conceitual.

A modelagem da variabilidade, elemento crucial na simulação, usualmente apresentada na literatura, centra no uso de distribuições de probabilidade independentes e em mecanismos de geração de números aleatórios. (BANKS, 1998; CHWIF; MEDINA, 2010; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991; PIDD, 2004b; ROBINSON, 2004). Esse mecanismo acarreta perda de precisão de resultados, o que pode ser contornado com o uso de métodos estatísticos como a replicação do experimento e a definição de intervalos de confiança. Ainda com relação à representação da variabilidade através de distribuições de probabilidade independentes umas das outras, denominadas aqui de mecanismo tradicional, destacam-se os seguintes pontos: i) o desempenho do sistema analisado via simulação ocorre em relação ao comportamento médio do sistema (mais os intervalos de confiança), sendo que a independência entre as variáveis que representam as operações do sistema não tem impacto nos resultados da simulação e; ii) esse mecanismo tem se mostrado eficiente para representar sistemas em diferente ambientes. (JAHANGIRIAN et al., 2010).

O tratamento da variabilidade através do mecanismo tradicional não é apropriado em algumas situações como: i) quando existe fenômeno com algum tipo de condicionante entre as variáveis, por exemplo, a variável Y depende do valor da variável Z e; ii) quando o comportamento da variável altera-se em função do tempo e de parâmetros de entrada no

sistema. Esse tema é ampliado no Capítulo 5, que debate o mecanismo tradicional e suas limitações para lidar com o problema da degradação da qualidade da matéria-prima.

Finalmente, a seção tratou da literatura sobre simulação na indústria de propriedade e da importância e relevância de modelar a produtividade e a qualidade do produto conjuntamente. Constatou-se que a análise simultânea dessas dimensões não é corriqueira na literatura devido a um conjunto de fatores. Primeiramente, porque os sistemas de produção e de manufatura interagem e afetam de diferentes formas as dimensões qualidade, custo, tempo e produtividade. Um segundo motivo é o foco dos métodos de construção de modelos de simulação, que objetivam resolver um problema pontualmente e não se preocupam em desenvolver um sistema de suporte à decisão para uso contínuo na análise de melhorias, ampliações e proposições de políticas operacionais. Esse segundo argumento evidencia o viés da PO *hard* enraizado nos métodos de desenvolvimento de modelos (Quadro 4). É possível observar que todos os métodos para construção de modelos apontam como primeira etapa a necessidade de formulação do problema, evidenciando que os modelos são estruturados e desenvolvidos geralmente, para atender um problema específico.

Esta seção finaliza o referencial teórico elaborado para o endereçamento da pesquisa. A seção a seguir apresenta as considerações finais do capítulo.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O referencial teórico apresentado neste capítulo abordou os temas relacionados ao objeto de pesquisa. Dessa forma, inicialmente foram apresentadas as questões relacionadas aos recursos naturais, em especial o problema da degradação dos recursos promovido pelo esgotamento da reserva. Na sequência, tratou-se da literatura de sistemas de produção e de manufatura de modo amplo, examinando as características desses sistemas na indústria de propriedade, em específico. Primeiramente foram apresentados os conceitos de sistema de produção e de manufatura, que são utilizados de diferentes formas na literatura gerando confusão; as definições abordadas são as propostas por Black (1998) e Antunes (1998). A partir dessa conceituação identificou-se que, se por um lado o sistema de produção olha para o fluxo global de produção, por outro o sistema de manufatura foca as transformações das entradas em produtos acabados, a partir da tecnologia intrínseca particular de cada indústria (por exemplo, a tecnologia para produzir minério de ferro é diferente daquela necessária para produzir carros). Outro tema central, a questão da variabilidade nos sistemas de produção e de

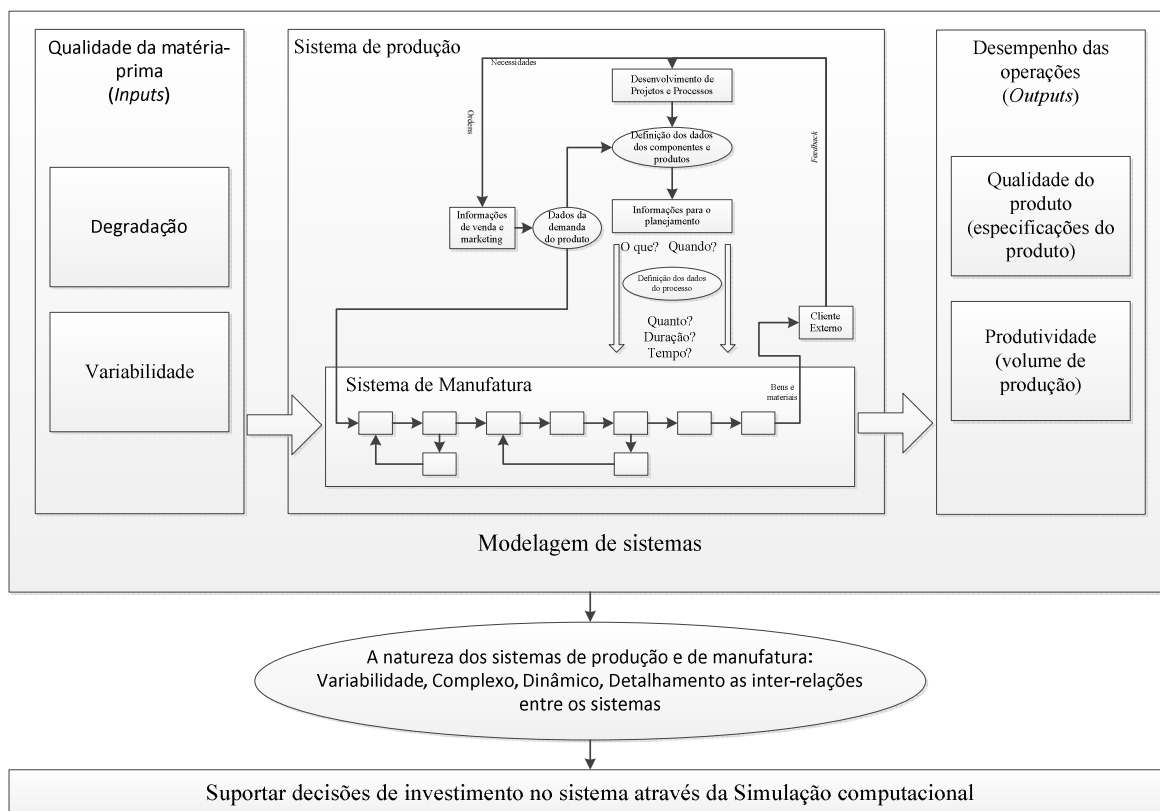
manufatura, foi apresentado, no texto, com destaque para o impacto negativo que esse aspecto pode trazer ao desempenho do sistema. (HOPP; SPEARMAN, 2001).

Na continuidade da apresentação do referencial teórico, tratou-se a modelagem de sistemas, de modo geral, e dos sistemas produtivos, de modo específico. A seção iniciou com considerações sobre a teoria dos sistemas, que promoveu a visão sistêmica para a compreensão, estruturação e resolução de problemas. A PO e as diferentes abordagens *hard* e *soft* foram expostas, sendo destacadas as diferenças principais entre elas. Na abordagem *hard* o problema é considerado como claro e objetivo. Já na abordagem *soft* não há um problema explícito, mas sim uma rede de problemas (confusões) a qual necessita ser compreendida ao invés de solucionada. A seção destaca como um eixo propositivo de trabalho a integração entre o *hard* e *soft* em detrimento a eventuais abordagens excludentes. Finalmente, abordou-se o uso da modelagem no contexto dos sistemas de produção e de manufatura.

A última seção, mas não menos importante, apresentou a simulação computacional. A simulação foi destacada dentre os diferentes métodos, técnicas e ferramentas da PO como necessária para a compreensão, de modo integrado e dinâmico, de sistemas complexos que apresentam variabilidade que impactam na sua operação. Destacou-se ainda que a simulação por eventos discretos é a abordagem mais utilizada e difundida na literatura. Além disso, contextualizou-se a limitação dos métodos para desenvolvimento de modelos no que tange à modelagem conceitual do sistema. Nesse sentido, identifica-se uma necessidade de complementar os métodos já difundidos na literatura no que diz respeito à modelagem conceitual. Ao final da seção, foi apresentado o mecanismo de modelagem (chamado de mecanismo tradicional) da variabilidade. A partir da explicitação da natureza de tal mecanismo, mostrou-se algumas situações com as quais o mesmo não consegue lidar como, por exemplo, a degradação da qualidade da matéria-prima ao longo do tempo. As limitações do mecanismo tradicional levam à necessidade de proposição de novos meios para modelar a degradação da qualidade da matéria-prima.

No final de cada seção do referencial teórico foi sendo construído o *framework* conceitual que sustenta o trabalho. A Figura 19 esquematiza o *framework* conceitual, destacando: i) as interpelações entre o sistema de produção e de manufatura; ii) a ideia de avaliar o desempenho do sistema em termos da produtividade e da qualidade do produto; iii) o problema da degradação da qualidade da matéria-prima e a variabilidade das qualidades e; iv) a visão de modelagem de sistemas através da simulação computacional.

Figura 19: Visão geral do framework conceitual da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

O próximo capítulo descreve a caracterização do contexto de estudo, com destaque para a unidade de análise da pesquisa.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DO CONTEXTO DE ESTUDO

Neste capítulo, inicialmente, é descrita a caracterização do ambiente de pesquisa com foco na unidade de análise do estudo: a indústria de mineração. Na sequência, é exposta a literatura de modelagem e simulação aplicada na indústria de mineração. Finalmente, são realizadas a síntese e as considerações do capítulo.

#### 3.1 A UNIDADE DE ANÁLISE: A INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

A indústria de mineração, conforme mencionado no Capítulo 1, representa uma parcela significativa do PIB industrial do Brasil. Dentre os diferentes minérios explorados no país, destaca-se o minério de ferro.

O Brasil figura hoje como um importante ator no mercado mundial transoceânico de minério de ferro, devido às elevadas reservas disponíveis em seu território. Segundo dados divulgados pela *United State Geological Survey* – USGS (2012), referentes a 2011, os maiores produtores mundiais de minério de ferro foram China, Austrália, Brasil e Índia, respectivamente, correspondendo a 82% da produção mundial. No que tange às estimativas de reservas de minério de ferro disponíveis para exploração, Austrália, Brasil e Rússia apresentam as maiores reservas mapeadas, representando 59% do total. (USGS, 2012).

O ferro é um elemento<sup>61</sup> encontrado em abundância na natureza. Aproximadamente 4,2% dos minerais<sup>62</sup> encontrados na crosta terrestre contêm o ferro em sua composição. (BRASIL, 2009; SIVRIKAYA, 2011). Segundo a *U.S. Environmental Protection Agency* (1994) mais de 300 minerais contêm o ferro como elemento, mas somente cinco são as fontes básicas para a produção de minério de ferro: magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e pirita ( $\text{FeS}_2$ ) (BRASIL, 2009). Denomina-se minério de ferro o mineral que contém na sua composição química elevadas quantidades do elemento ferro e cuja extração seja economicamente viável, ou seja, cuja ocorrência seja abundante. O teor de ferro, conforme destacado pela *U.S. Environmental Protection Agency* (1994), deve ser de pelo menos 25%. Segundo Sivrikaya (2011), os óxidos de ferro normalmente utilizados para a produção de ferro são a hematita e a magnetita, que apresentam 72,4% e 70% de teor de ferro

---

<sup>61</sup> O termo elemento é utilizado no sentido de elementos químicos como, por exemplo, o elemento hidrogênio (H).

<sup>62</sup> Mineral é um composto de diferentes elementos químicos, apresentando uma estrutura definida.

em uma massa total. A produção de minério de ferro visa, quase que na sua totalidade, aproximadamente 98%, abastecer a produção de aço. (CGEE, 2010; SIVRIKAYA, 2011).

O minério de ferro é, geralmente, classificado em três categorias em função do seu teor de ferro médio (*grande*). A primeira categoria, denominada de alto teor, contempla o minério cujo teor de ferro é superior a 65%. A segunda, chamada de médio teor, compreende o minério com teor de ferro entre 65% e 62%. Já a terceira categoria, de baixo teor, corresponde ao minério cujo teor de ferro é inferior a 62%. (GUIMARÃES et al., 1999; ROCHA, 2008; SIVRIKAYA, 2011).

A indústria de minério de ferro viveu na última década, mais especificamente entre os anos de 2003 e 2008, um elevado crescimento motivado pelo aumento dos preços no mercado internacional. Grande parte desse desenvolvimento ocorreu em função da economia chinesa, que demandou cerca de 50% do minério produzido no mundo. Segundo Humphreys (2010) o crescimento anual do preço do minério de ferro (comércio transoceânico) foi de 8,2%, em média, entre 2003 e 2008, enquanto que o crescimento entre 1980 e 1990 havia sido de 2,2% ao ano. O aumento dos preços desencadeou a introdução de novos projetos para a elevação da oferta de minério no mercado. Porém, em função da demora no desenvolvimento dos projetos (entrada em operação), o crescimento da oferta não conseguiu acompanhar o volume da demanda. Outro fator que desencadeou a elevação de preços foi a concentração do mercado em grandes empresas. O descompasso entre oferta e demanda e a concentração do mercado em poucas empresas foram os principais fatores apontados pelos especialistas para a forte elevação nos preços do minério nos últimos anos. (HUMPHREYS, 2010). A crise econômica de 2008 retraiu a taxa de elevação, gerando desconfiança na indústria de mineração quanto à sustentação do patamar de subida e/ou manutenção dos níveis de preços atuais. (HUMPHREYS, 2010). As empresas mineradoras, no contexto de indefinição sobre os preços futuros, passaram a atentar as questões relacionadas à competitividade no mercado e não somente a temas associados à ampliação da capacidade instalada.

Segundo Sánchez e Schmitz JR (2002), a pressão competitiva na mineração de ferro depende da localização das operações e dos custos produtivos. Everett (2001) destaca que a competitividade no mercado de minério de ferro não se dá apenas por preço e confiabilidade da entrega, mas também pela uniformidade nas características do produto, ou seja, pelo atendimento às especificações dos clientes. Segundo Gaggiato (2010) a competitividade é definida por custo, qualidade da pelota e questões logísticas, no contexto do mercado de minério de ferro.



O estudo conduzido por Sánchez e Schmitz JR (2002) aponta que a indústria de mineração, após o colapso da indústria siderúrgica<sup>63</sup> no começo da década de 80, impulsionou a elevação da produtividade<sup>64</sup> em países onde os custos produtivos eram maiores (por exemplo, Estados Unidos, Canadá e Suécia). No entanto, segundo Sánchez e Schmitz JR (2002), em países como Brasil e Austrália, grandes produtores de minério de ferro, por entregarem ao mercado produtos com baixo custo de produção, não obtiveram os mesmos ganhos de produtividade na indústria de mineração. Os autores destacam que esse ganho de produtividade não se deu por introdução de novas tecnologias ou de novos produtos, mas sim através do melhor uso da mão de obra. Apesar das limitações do estudo, principalmente no modelo utilizado para medir a produtividade, o artigo destaca o impacto do custo produtivo na competitividade da indústria de mineração de ferro, bem como os efeitos causados pelo ambiente externo.

A seção a seguir caracteriza o sistema de produção e de manufatura na indústria de mineração.

### **3.1.1 Caracterização do sistema de produção e de manufatura**

A configuração do processo produtivo e a tecnologia intrínseca para mineração, em uma empresa mineradora, é diretamente relacionada às características da reserva mineral. (TOPP et al., 2008 e LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). A exploração de reservas que possuem minério de ferro com alto teor de ferro e baixo teor de impurezas (alta qualidade)<sup>65</sup>, geralmente é realizada através de processos produtivos de baixa complexidade. Nesses casos, o minério de ferro é processado diretamente pela indústria de aço sem necessidade de nenhum tipo de beneficiamento prévio por parte das empresas. O produto entregue pelas mineradoras para a indústria siderúrgica são pedaços maciços de ferro (também chamado de *lump*). Na rota de produção de aço, os pedaços de minério de ferro (*lump*) são fundidos em plantas de alto-forno ou redução direta para a produção do aço. No que tange ao sistema de produção e de manufatura, o mesmo resume-se a três etapas: i) etapa de extração; ii) etapa de britagem (*crushing*) e; iii) etapa de regulação do tamanho das partículas. Um segundo produto gerado

---

<sup>63</sup> Sánchez e Schmitz JR (2002) apontam a crise do petróleo e o desenvolvimento de materiais substitutos ao aço como fatores que desencadearam o colapso da indústria siderúrgica.

<sup>64</sup> A produtividade foi obtida pelos autores a partir da razão entre a produção anual pelas horas de trabalho (ou pelo número médio anual de trabalhadores, quando as horas anuais trabalhadas não estavam disponíveis).

<sup>65</sup> Segundo Sivrikaya (2011), as impurezas geralmente analisadas são a sílica e a alumina.

após a etapa de peneiramento é o *sinter feed*, geralmente utilizado em alto-forno na indústria siderúrgica. (CGEE, 2010; SIVRIKAYA, 2011).

No entanto, segundo Sivrikaya (2011), Yellishetty, Ranjith e Tharumarajah (2010) e CGEE (2010), não há oferta suficiente de minério de alto teor de ferro e de alta qualidade para atender à demanda de aço mundial. Assim, há a necessidade de beneficiar o minério com médio e baixo teor de ferro. Nos casos em que a reserva apresenta minério de ferro com médio e baixo teor de ferro, faz-se necessária uma configuração de processo produtivo mais complexa em relação ao processo apontado anteriormente. Sivrikaya (2011), *U.S. Environmental Protection Agency* (1994), Dalstra e Guedes (2004) e Prior et al. (2012) destacam que o processamento de minério de médio e baixo teor de ferro necessita de um sistema produtivo mais extenso, custoso e complexo em relação ao minério de alto teor. Essas questões advêm da adição do processo de beneficiamento, geralmente composto por uma etapa de concentração e uma de aglomeração. O beneficiamento produz dois diferentes produtos que são: i) *pellet feed* e; ii) pelota de ferro<sup>66</sup> (*iron pellet*). A pelota de ferro é o principal produto gerado por uma planta de beneficiamento, e é usada, principalmente em alto forno na indústria siderúrgica.

Não só a demanda por minério de ferro tem pressionado as mineradoras a beneficiarem o minério explorado. Conforme destacado no relatório publicado em *U.S. Environmental Protection Agency* (1994), os avanços tecnológicos na indústria de aço têm demandado minério de ferro com características uniformes, atingidas somente com a adição de etapas de beneficiamento ao sistema de produção. Além disso, segundo a CGEE (2010) outros três fatores tem estimulado a indústria de mineração na implantação de etapas de beneficiamento: i) a degradação da qualidade do minério; ii) as restrições ambientais quanto ao uso de sinterização<sup>67</sup>, principalmente em países europeus e; iii) o aumento da difusão da tecnologia de redução direta na indústria siderúrgica.

O beneficiamento objetiva elevar o teor de ferro do produto através da eliminação de minerais indesejados (sílica, alumina, fósforo, magnésio, etc.), contidos junto com os óxidos de ferro, bem como uniformizar as características físicas, químicas e mineralógicas a níveis aceitáveis pela indústria siderúrgica. (CGEE, 2010; MEYER, 1980). Usualmente, o

---

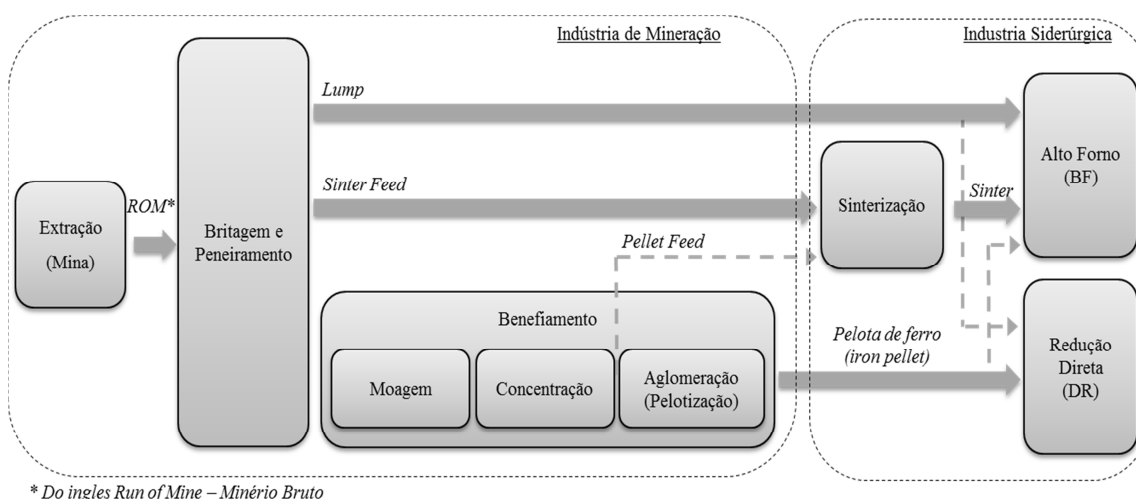
<sup>66</sup> As pelotas de ferro são bolas produzidas a partir de minério de ferro, de diferentes composições mineralógicas e químicas, que apresentam as seguintes características: i) tamanho uniforme (variação no diâmetro entre 9-16mm); ii) elevada porosidade; iii) elevado teor de ferro (maior que 63%); baixa perda por calcinação (perdas de massa durante a queima); iv) qualidade da matéria-prima uniforme; v) força mecânica elevada e uniforme e; vi) baixa tendência a abrasão – degradação do formato da pelota (tamboramento). (MEYER, 1980).

<sup>67</sup> O processo de sinterização, encontrado na rota de produção de aço via alto fornos, acarreta elevadas quantidades de emissões de gases tóxicos para a atmosfera. (CGEE, 2010).

beneficiamento é constituído por duas etapas: uma para concentrar o material e outra para elevar as características desejadas pela siderúrgica. A primeira etapa compreende um processo de moagem e concentração. Nesse momento, o minério é moído visando quebrar e separar o mineral desejado (óxido de ferro) dos minerais indesejados. A quebra do minério em partículas pequenas não é adequada para a indústria siderúrgica na rota de produção através da redução direta, pois o processo de fundição é ineficiente para partículas finas. Assim, a segunda etapa do beneficiamento visa aglomerar as partículas finas de óxido de ferro, para atender aos requisitos da siderurgia. (SIVRIKAYA, 2011).

A Figura 20 ilustra as rotas de produção típicas da indústria de mineração e seus relacionamentos com a indústria siderúrgica.

Figura 20: As rotas de produção típicas da produção de minério de ferro e os diferentes relacionamentos entre a mineração e a siderurgia.



Fonte: Adaptado de Meyer (1980)

A partir da Figura 20, observa-se que há duas configurações básicas do sistema de produção denominadas, a partir deste momento, como sistema básico e sistema complexo. O sistema básico compreende, exclusivamente, as operações de extração, britagem e peneiramento. Tal rota de produção é possível somente quando o teor de ferro da reserva é elevado. Já o sistema complexo contempla não só as operações contidas no sistema simples, mas também a operação de beneficiamento. Esse sistema é utilizado, usualmente, em situações em que existe minério de baixo e médio teor de ferro. Segundo CGEE (2010), o sistema de produção e de manufatura de uma mineradora depende diretamente do tipo de

minério disponível na reserva e das restrições de mercado em relação aos parâmetros de qualidade do produto.

O sistema básico contempla as operações de extração, britagem e peneiramento. Após o peneiramento, o produto é despachado para o cliente. As qualidades intrínsecas das reservas tem baixo impacto nas operações, ou seja, no desempenho dos processamentos em si, realizados ao longo do sistema de produção e de manufatura. A qualidade de matéria-prima afeta direta ou indiretamente a qualidade do produto final, sendo esta variabilidade de qualidade regularizada através de estoques de produtos acabados que são misturados<sup>68</sup> para atingir as especificações do cliente. Esse tipo de processo é encontrado com frequência na Austrália. (EVERETT, 1996, 2001; HOWARD; CARSON; EVERETT, 2005).

Já o sistema complexo é composto pelas operações do processo básico somadas às operações de moagem, concentração e aglomeração. As atividades de processamento das duas últimas operações são fortemente dependentes das qualidades intrínsecas das reservas minerais. A tecnologia intrínseca de mineração é necessária para suportar as atividades de moagem do minério, de separação do ferro dos elementos indesejados e também da operação de aglomeração que resulta, geralmente, nas pelotas de ferro que atendam às dimensões e especificações delimitadas pela indústria siderúrgica. (LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA, 2004). A Figura 21 ilustra o fluxograma típico de tratamento de minério de ferro.

O fluxo de processo é semicontínuo em ambas as configurações de sistema, pois há estoque entre as principais operações que compõem o sistema produtivo. Ou seja, existem estoques entre a operação de extração e a operação de britagem e peneiramento; entre a britagem e peneiramento e a moagem/concentração; e entre a concentração e aglomeração. Segundo Marques et al. (2010) e Costa et al. (2008) esses estoques são necessários para minimizar a variabilidade nas qualidades da matéria-prima, nas qualidades intermediárias e nas qualidades do produto final. As operações de concentração e aglomeração, por sua vez, ocorrem através de fluxos contínuos e são constituídas por consecutivas transformações (misturas, separações, reações químicas, formação) até a obtenção do produto final.

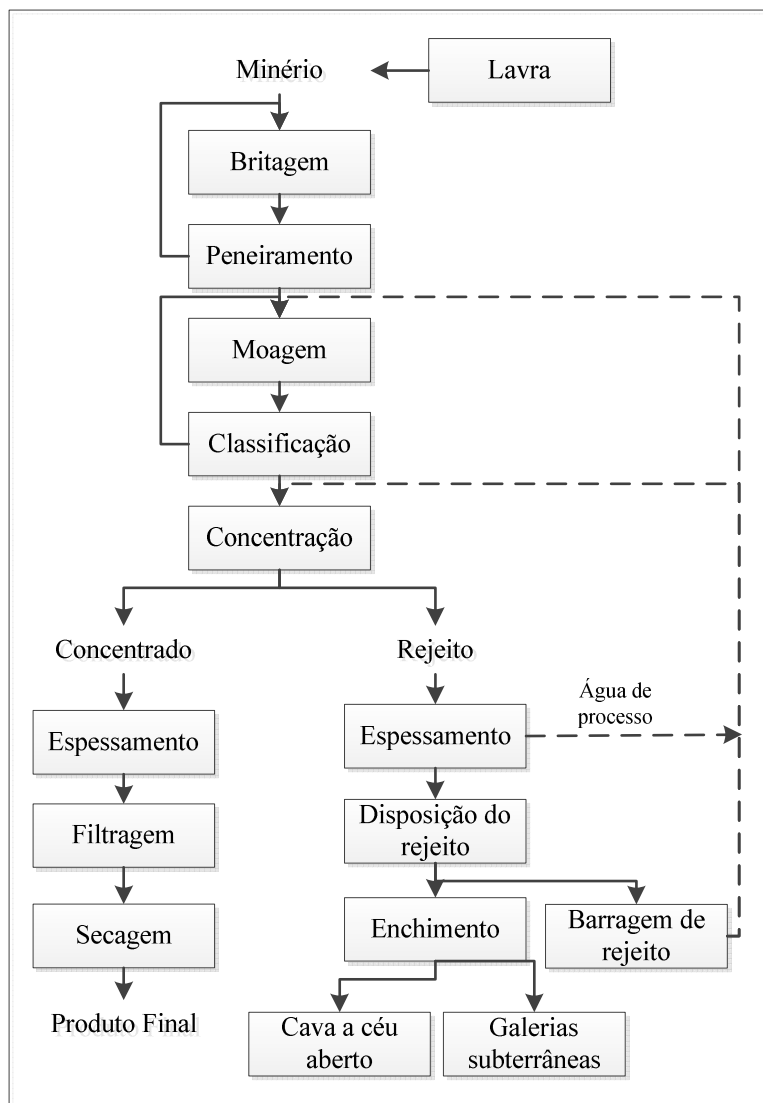
A qualidade do produto final é direta ou indiretamente impactada pela qualidade da matéria-prima. Essa relação também é verdadeira para a indústria de forma. Porém, esse tipo de indústria se utiliza de mecanismos para rejeitar a matéria-prima que não atende às especificações de qualidade (por exemplo, peças sem as dimensões, materiais sem as características específicas, etc.). (KLIPPEL, 2007). Além disso, a qualidade da matéria-prima

---

<sup>68</sup> O termo mistura deriva do Inglês blend.

afeta negativamente o desempenho do sistema de produção e de manufatura. (TOPP et al., 2008). Segundo Topp et al. (2008), apesar de relevante, o impacto das qualidades da matéria-prima no desempenho do sistema produtivo não é tratada pela literatura.

Figura 21: Fluxograma típico de tratamento de minério



Fonte: Adaptado de Luz, Sampaio e Almeida (2004)

No sistema produtivo em análise, usualmente não há nenhuma interferência humana direta no processo, sendo a produção realizada por um conjunto de equipamentos sequenciados e monitorados por operadores. A ação humana ocorre apenas na parametrização de variáveis operacionais como, por exemplo, velocidade de esteiras, temperaturas de fornos, pressões em bombas, etc. No entanto, nas operações dos equipamentos de carga (caminhões e carregadeiras), há a intervenção humana diretamente no processo. O processo produtivo é

projetado para operar sem interrupções e com elevado fator de utilização. Os investimentos são elevados (na ordem de bilhões de dólares) e, geralmente, os projetos de ampliação de capacidade ou desenvolvimento de uma nova planta necessitam de um longo tempo para entrarem em operação. (TOPP et al., 2008).

A seção a seguir trata da variabilidade na indústria de mineração.

### **3.1.2 A questão da variabilidade na indústria de mineração**

De modo geral, conforme destacado por Hopp e Spearman (2001), a variabilidade (tema apresentado na seção 2.2) afeta negativamente o desempenho do sistema. Hopp e Spearman, (2001) reforçam que a variabilidade no início do processo é mais prejudicial do que no final. Desse modo, baseando-se em tal observação, conclui-se que a variabilidade na matéria-prima tem impacto negativo ainda maior no desempenho global do sistema de produção.

A qualidade da matéria-prima disponível nas reservas apresenta duas características elementares, conforme explorado na seção 2.1. Em primeiro lugar, apresenta elevada variação. A segunda característica é que, na medida em que a reserva se esgota, ocorre a degradação da qualidade da matéria-prima ao longo do tempo.

A variabilidade e a degradação das qualidades da matéria-prima ocorrem devido a não uniformidade das formações geológicas, ou seja, devido a cada metro cúbico de minério da reserva apresentar um teor de ferro e uma qualidade diferente. (CGEE, 2010; KLIPPEL, 2007). Somado a isso, as qualidades e o teor de ferro alteram-se ao longo do tempo, também resultando em variabilidade nas características da matéria-prima. Essa variabilidade, conforme mencionado anteriormente, é amenizada com o uso de estoque de regularização ou então através da extração de minério de diferentes frentes de lavra na mina (MARQUES et al., 2010). Os estoques minimizam o efeito da variabilidade, pois neles o minério é misturado e, assim, as qualidades tendem para um valor médio. Marques et al. (2010) e Costa et al. (2008) apresentam estudos baseados em modelos estatísticos para comprovar o efeito do tamanho do estoque para reduzir a variabilidade das características da matéria-prima. Porém, mesmo com tais mecanismos de regularização não há, até então, solução para eliminar completamente a variabilidade. A degradação, que também tem relação com a variabilidade, representa a redução da qualidade média ao longo do tempo.

Sob a ótica da Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*), os pulmões (estoques) servem para controlar e gerir a variabilidade do processo, não para reduzi-la. (GOLDRATT; COX, 2003). Já Shingo (1996) na construção teórica do Sistema Toyota de Produção destaca que a redução da variabilidade é possível através da padronização das operações. Constata-se que o uso de estoques na mineração para regularizar a variabilidade da qualidade através da mistura de minério busca a padronização, conforme a ideia apresentada por Shingo (1996).

A próxima seção descreve questões relacionadas ao uso de modelos para suportar decisões na indústria de mineração, com destaque para os modelos de simulação.

### 3.2 MODELAGEM APLICADA AO SETOR DE MINERAÇÃO

No Reino Unido, a PO passou a ser utilizada na indústria de mineração no final dos anos 1950. Nesse período a *London School of Economics* criou um grupo de pessoas qualificadas (graduados), denominado de BISRAs OR *group* para tratar da PO nesse segmento. (KIRBY; CAPEY, 1998). Dois projetos desenvolvidos pelo grupo e descritos em Kirby e Capey (1998) contemplaram a simulação (o problema não pôde ser modelado analiticamente através da teoria da fila, dada a complexidade do sistema adicionada por diferentes características de cada porto considerado no estudo) de um porto de descarga de minério de ferro. Um dos trabalhos mostrou-se importante dado o crescimento da importação de minério de ferro no Reino Unido e apontou que as operações de descarga limitavam o desempenho do sistema. O segundo projeto utilizou a programação matemática para definir o programa de reparo ótimo dos fornos das siderúrgicas.

Observa-se que há uma relação estreita entre o desenvolvimento da PO e a área de mineração. Recentemente Bjørndal et al. (2011) e Newman et al. (2010) revisaram a literatura de PO na área em questão. A revisão apresentada por Newman et al. (2010) focou no tema do planejamento de mina. A indústria de mineração tem conhecimento dos métodos de PO a mais de 50 anos, porém há poucos trabalhos na literatura que evidenciam o estado da arte do campo de atuação e desenvolvimento da PO nessa indústria. Newman et al. (2010) destacam modelos de otimização e simulação que focam na melhoria de operações de mina. O artigo divide a revisão entre modelos para mina a céu aberto e minas subterrâneas. Para Newman et al. (2010) as modelagens envolvendo mina a céu aberto são classificadas em três tipos: i) modelos para *layout* de mina e modelos estratégicos para planejamento de extração; ii)

modelos táticos de sequenciamento de extração de blocos e; iii) modelos táticos e operacionais para alocação de equipamentos nas operações de extração. Os modelos sintetizados não retratam o problema da degradação dos recursos naturais no desempenho do processo produtivo. A maioria dos modelos citados por Newman et al. (2010) tratam exclusivamente do planejamento de extração do minério, ou seja, da determinação da sequência de extração de blocos de minério de curto e longo prazo. Nesses modelos a degradação da qualidade da matéria-prima é levada em consideração. Embora, existam modelos que destacam e incorporam a variabilidade das qualidades da matéria-prima e as restrições do processo de beneficiamento, as abordagens não modelam conjuntamente o desempenho do sistema produtivo. Newman et al. (2010), na seção de áreas emergentes, apontam a necessidade de abordagens que analisam integradamente as operações de mina e beneficiamento para o planejamento de longo prazo.

A revisão realizada por Bjørndal et al. (2011) é mais abrangente e trata da exploração de recursos naturais, de modo geral, e da mineração, em específico. Segundo os autores, a PO está se tornando cada vez mais prevalente no setor de recursos naturais, nos últimos 40 anos, especialmente na pesca, agricultura, mineração e florestamento. O problema dos recursos não renováveis, para os pesquisadores, é um diferenciador em relação a outras áreas que utilizam a PO. Segundo Bjørndal et al. (2011), os objetivos centrais da indústria de mineração são: i) maximizar o Valor Presente Líquido (VPL) das reservas naturais; ii) minimizar o desvio entre o valor de recurso extraído e uma quantidade especificada contratualmente; iii) reduzir o impacto ao meio ambiente; iv) maximizar a produção ou o rendimento e/ou; v) maximizar a flexibilidade operacional, a fim de minimizar os riscos. O primeiro desses objetivos aparece com mais frequência na literatura de PO, conforme apontado em Newman et al. (2010) e Caro et al. (2007). Os artigos revisados por Bjørndal et al. (2011) focam nos problemas relacionados ao planejamento de mina.

As revisões da literatura de PO realizadas por Bjørndal et al. (2011) e Newman et al. (2010) abordam exclusivamente modelos de PO que buscam otimizar o sistema de mineração, em especial o sistema de extração do mineral das reservas. No que tange aos modelos de planejamento de mina, identifica-se uma carência de modelos e abordagens que atentem a questão da degradação das qualidades da matéria-prima na produtividade do sistema de produção e na qualidade do produto. Poucas exceções preocupam-se com a variabilidade das qualidades dos blocos de minérios disponíveis na reserva, mas não avaliam o impacto dessa característica no sistema de produção e de manufatura. Observa-se que o modelo de extração,



comumente abordado nos artigos revisados por esses autores, considera o sistema de mineração simples, ou seja, não aponta para situações complexas nas quais existam as operações de beneficiamento. Percebe-se uma nítida ausência de referência a trabalhos que tratam a mineração sob o olhar de modelos de simulação computacional. A postura dos autores é clara quanto à visão propositiva norte americana em relação a PO. A dificuldade em otimizar um sistema complexo e não claramente definido foi o que originou as correntes alternativas da PO.

Caro et al. (2007) destacam as limitações das modelagens em mineração, pois não consideram o sistema mina-beneficiamento a partir de uma abordagem integrada. Segundo os autores, traçar planos de longo prazo de investimentos e produção na indústria de mineração (no caso de cobre) é um problema, pois aderir ao plano de longo prazo com os fatores que influenciam os planos de curto e médio prazo é complexo na indústria de mineração por alguns motivos, a saber: i) vida útil da mina e; ii) restrições técnicas dos recursos minerais, restrições ambientais, restrições físico-químicas e restrições relacionadas aos processos (produtivos). O plano de longo prazo deve, pois, encontrar soluções para três problemas centrais: i) produção de minério; ii) análise, seleção e sequenciamento dos projetos e; iii) políticas de operação da planta. Esses problemas são interconectados e os dois primeiros são *inputs* para o segundo. Na prática, porém, são tratados sequencialmente e isoladamente pois, se cada problema individualmente já é complexo, abordá-los de maneira integrada é ainda mais difícil. Entretanto, segundo Caro et al. (2007) uma solução integrada poderia oferecer maiores benefícios.

Caro et al. (2007) afirmam que um plano de investimento faz sentido somente se ele estiver harmonizado com a produção de mina e com o processo produtivo. A operação ótima da cadeia produtiva na mineração vai depender do volume e das características do minério de ferro que alimenta o processo. Em planos de produção de mina, os coeficientes de operação da planta (cadeia produtiva) são, geralmente, assumidos como constantes ou lineares, uma simplificação que supõe um nível de produção para um conjunto de características do minério. No entanto, a modelagem deveria considerar/refletir a operação da planta que apresenta relações não lineares. Por exemplo, o impacto da granulometria do minério afeta a taxa de produção na operação de moagem, resultando em uma relação que não se dá de forma linear, mas exponencial.

A seguir é apresentada uma revisão de trabalhos que tratam da modelagem de sistemas de mineração através da simulação computacional.

### 3.2.1 A Simulação computacional na indústria de mineração

Em 1999 o periódico *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* publicou uma edição especial tratando exclusivamente do método de simulação computacional na indústria de mineração. A edição apresenta sete artigos retratando o uso e estado da arte, na época, da simulação em mineração na América do Sul, Europa, Austrália, Ásia, África do Sul, Estados Unidos e Canadá.

Knights e Bonates (1999) revisam trabalhos de simulação computacional na América do Sul. Em face das dificuldades de localizar materiais em bases de dados de artigos científicos, a revisão concentrou-se em trabalhos publicados no Brasil e no Chile. O artigo destaca 16 modelos de simulação, dos quais 12 tratam de questões relacionadas ao despacho de caminhões e/ou equipamentos de transporte em minas a céu aberto e subterrâneas. Os outros três modelos abordam a operação de extração e/ou beneficiamento. Em função do objeto de estudo desta pesquisa ser o desempenho global do sistema de produção e manufatura como um todo, e não somente partes desses sistemas, o Quadro 5 resume os artigos apresentados no trabalho de Knights e Bonates (1999) que modelam o sistema de produção.

Quadro 5: Síntese dos artigos apresentados na revisão realizada por Knights e Bonates (1999)

<b>Autor(es)</b>	<b>Síntese do artigo</b>
Tavares e Rubio (1990)	Modelo de simulação de uma planta de processamento de carvão. O modelo foi desenvolvido para Companhia Riograndense de Mineração (CRM) e utilizado para determinar o teor de cinza adequado para alimentar a planta.
Bustamante et al. (1994)	Os autores desenvolveram um modelo de fundição de cobre na Mina da Codelco Chile Teniente. Este modelo é uma contribuição interessante, uma vez que utiliza simulação discreta para simular um sistema com variáveis de estado inerentemente contínuas.
Vargas (1997)	O autor descreve o uso de um modelo de simulação discreta para analisar a viabilidade de instalação de uma unidade produtiva de mistura de níquel. O depósito de níquel apresenta alta variabilidade nas qualidades. Segundo o autor para prevenir a degradação do forno, é importante garantir que a etapa de concentração entregue produto com limites controlados e elevados teores de níquel. O modelo sugere que, para minimizar o efeito da variabilidade, foi necessário considerar uma pilha entre a britagem e a planta de beneficiamento.

Fonte: Elaborado pelo autor

A revisão dos modelos em periódicos na Europa foi realizada por Panagiotou (1999). O autor destaca que a simulação é uma técnica cada vez mais popular para planejamento e análise de projeto de novas operações de mineração ou para modificação e melhorias de

plantas existentes. A simulação possibilita estudar o comportamento do sistema de mineração antes de realizar as melhorias/alterações. Para Panagiotou (1999), a simulação tem se estabelecido como a única técnica que pode lidar com os complexos sistemas de mineração, que são: i) estocásticos em sua natureza intrínseca; ii) alteram dinamicamente em relação ao tempo e espaço e; iii) operam em um contexto econômico variável, no qual os preços oscilam significativamente. O autor destaca que a simulação não resolve qualquer problema diretamente, mas fornece informações sobre eles, indicando como o sistema de mineração deve funcionar quando certos parâmetros selecionados são alterados. Segundo Panagiotou (1999), o primeiro trabalho de simulação de mina, realizado manualmente, ocorreu nos anos de 1950, na Suécia. Uma característica desse trabalho precursor é que ele modelava a operação de sistemas de transporte subterrâneo. Panagiotou (1999) afirma que a natureza dinâmica e estocástica que caracteriza praticamente qualquer sistema de mineração faz da simulação o único método confiável para manipular tais sistemas. O artigo escrito descreve 13 modelos de simulação. Todos eles destacam o sistema de transporte na mina e a alocação de caminhos e equipamentos.

A simulação na Austrália foi revisada por Basu e Baafi (1999). O artigo desses autores destaca 12 modelos, nos quais as aplicações de simulação na mineração envolvem principalmente aplicações de movimentação de materiais; seleção de equipamentos; dimensionamento de armazenagem e avaliação de procedimentos operacionais. Os trabalhos analisados são sobre operações de minas a céu aberto e subterrâneas, em minas de metais e carvão.

A simulação na mineração da Ásia foi retratada por Konyukh, Galiyev e Li (1999). O artigo destaca a carência de *expertise* dos engenheiros de mineração em relação às técnicas de simulação, o que provoca uma carência de trabalhos sobre o tema no continente. No caso especial da China, o autor destaca o ceticismo da gestão quanto ao valor dos estudos de simulação para a organização. Segundo Konyukh, Galiyev e Li (1999) os estudos de simulação publicados e analisados pelos autores são classificados em três categorias: i) melhoria nas operações; ii) projeto de mina e; iii) controle de processo. A categoria de melhoria de processo compreende trabalhos como: i) elevar a utilização dos equipamentos de mina; ii) analisar gargalos; iii) verificar impacto nas saídas do simulador em função das quebras de equipamentos; iv) analisar oportunidades de investimento; v) uso de novos equipamentos e; vi) gestão/gerenciamento. Já os estudos da categoria projeto de mina são: i) coordenação de máquinas no tempo e no espaço; ii) volumes de estoques; iii) reservas de

equipamentos; iv) dados de equipamentos e; v) avaliação de estruturas tecnológicas. Finalmente, na categoria controle de processo: i) métodos de controle de processo; ii) fluxo de informação; iii) comparação de algoritmos; iv) requisitos para controle do sistema; v) estrutura do sistema de controle e; vi) eficiência do controle.

Turner (1999) revisa o uso de modelos de simulação na África do Sul. O autor destaca que a indústria de mineração da África do Sul utiliza extensivamente a simulação. Segundo ele, a simulação tem emergido como útil para a exploração do impacto de novos investimentos de capital e para a proposição de novos métodos de mineração. Geralmente, a simulação é classificada nas seguintes categorias: i) avaliação de novos empreendimentos em mineração; ii) pré-viabilidade e estudos de viabilidade; iii) avaliações de capacidade; iv) otimização de estudos; v) avaliação de métodos alternativos de propostas ou tecnologias; vi) planejamento de mina de operações existentes; vii) modelagem do negócio; viii) planejamento da produção; ix) investigações de melhorias contínuas das operações existentes e; x) teste de novos métodos e equipamentos em planta existente. Turner (1999) destaca projetos e modelos que tratam tanto da operação de extração como da operação de beneficiamento

Modelos de simulação em operação de mina nos Estados Unidos foram revisados por Sturgul (1999). Segundo esse autor, os engenheiros de minas norte-americanos foram os primeiros a reconhecer a importância dos modelos de simulação para planejamento e projeto na mineração. Sturgul (1999) destaca o uso da técnica de simulação por eventos discretos. Operações de minas são exemplos de sistemas discretos desde que as diversas atividades possam ser contadas em diferentes tempos. Por exemplo, no tempo  $t = 100$  um caminhão pode terminar de carregar, no tempo  $t = 101$  o caminhão inicia o percurso para o triturador, no tempo  $t = 101,01$  um caminhão descarrega no britador, no tempo  $t = 103,5$  uma carregadeira pode estar em manutenção, etc. (STURGUL, 1999).

Por fim, o sétimo artigo, escrito por Vagenas (1999), analisa o uso de modelos de simulação na mineração do Canadá. O pesquisador destaca que durante os anos 90 a indústria de mineração canadense mostrou sensibilidade e interesse na aplicação de simulação por eventos discretos para operações de mina a céu aberto e subterrânea. Os trabalhos de simulação são realizados pelas mineradoras ou em parcerias com instituições acadêmicas mas, infelizmente, muito do trabalho produzido não tem sido publicado devido à confidencialidade. As aplicações da simulação, usualmente, focam em estudos para: i) despacho de caminhões/carregadeiras e; ii) sistema de gestão da informação em tempo real. Segundo Vagenas (1999), as tendências futuras da simulação por eventos discretos em operações de

mineração canadenses incluem: i) uso de animação tridimensional para visualizar corpos de minério inteiros; ii) integração de análise de confiabilidade de sistemas de avaliação de equipamentos de mineração em modelos de simulação; iii) integração da simulação com sistemas em tempo real das minas de gestão e dos bancos de dados e; iv) desenvolvimento de modelos de minas estratégicas e táticas de simulação para fornecer uma visão dos requisitos a longo e a curto prazo na operações da mina.

A partir da análise dos sete artigos publicados na edição especial do periódico *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, dedicado à simulação computacional na indústria de mineração, observa-se que:

- A simulação é amplamente utilizada para modelar sistemas de mineração;
- Os modelos, geralmente, representam o sistema de carregamento e transporte do minério entre a mina e o embarque e/ou operação de beneficiamento;
- Modelos que analisam integradamente todo um sistema produtivo complexo, ou seja, extração e beneficiamento, não são tão corriqueiros;
- A variabilidade na matéria-prima é destacada em alguns modelos. Já a degradação dos recursos é tratada somente naqueles que avaliam os limites físicos da reserva e o sequenciamento de extração do minério na mina. Estudos sobre o efeito da degradação no desempenho do sistema de produção e de manufatura não foram identificados nesses artigos.

Chinbat (2009) avalia os benefícios do uso da técnica de simulação para análise de projetos de mineração para mitigar e minimizar os riscos associados aos projetos desse segmento. Segundo Chinbat (2009), a atividade apresenta mais risco do que outras áreas de negócio, devido à incerteza, à complexidade e ao elevado custo. A simulação é utilizada pois possibilita analisar a performance e o risco do projeto, uma vez que reproduz com razoável fidelidade a dinâmica do sistema produtivo em situações em que o mesmo apresenta relativa complexidade operacional, dificuldade de modelagem e em que causa transtornos para os usuários. O modelo descrito por Chinbat (2009) utiliza a simulação para avaliar um novo projeto de mineração na Mongólia. O processo produtivo analisado contempla a extração do minério e a etapa de concentração do material. No entanto, o artigo não comenta nenhuma questão relacionada à degradação das reservas para análise de risco e variabilidade na matéria-prima.

Chinbat e Takakuwa (2008) destacam o uso da simulação computacional como suporte à metodologia DMAIC, da abordagem *six-sigma*, no contexto da indústria de mineração. Segundo Chinbat e Takakuwa (2008), utilizar a simulação do processo produtivo em todas as fases do ciclo DMAIC tem promovido melhorias de processos mais adequadas e acuradas. O estudo apresentado foi desenvolvido em uma mineradora na Mongólia. O processo produtivo analisado contempla a extração do minério e a etapa de concentração do material. Assim como em Chinbat (2009), o artigo não comenta questões relacionadas à degradação das reservas. A conclusão apontada por Chinbat e Takakuwa (2008) destaca que os gerentes seniores notam que a simulação computacional permite que as equipes de *six-sigma* tenham uma visão clara dos gargalos e dos demais problemas do sistema de produção.

A pesquisa realizada por Stothard e Swadling (2010) buscou identificar o nível de maturidade da simulação computacional no setor de mineração. Os autores sugerem que tal nível se baseia em três categorias<sup>69</sup>: i) extensão no uso da simulação; ii) regras, regulamentações e infraestrutura (no que tange à simulação na área) e; iii) aceitação pela comunidade (acadêmica e de praticantes). A partir das categorias propostas pelos autores, a aceitação da simulação na mineração, quando comparada a outras indústrias, aparece imatura, em especial nas áreas de risco e redução de riscos, de projeto de simulação, de políticas operacionais e de controle e de quadro de implementação formal.

Na visão do autor desta tese, não importa qual a régua utilizada para medir o nível de maturidade da simulação computacional no setor de mineração, o importante é que as diferentes áreas foram analisadas a partir de uma mesma régua e, para efeitos comparativos, essa medição é razoável de ser aceita. O estudo aponta que a maturidade na indústria de mineração está atrás (menos madura) de outras indústrias como aviação, defesa e transporte (transporte ferroviário). No entanto, os autores destacam que nas três categorias a maturidade vem crescendo ao longo das últimas décadas (de 1960 a 2010).

Por fim, destacam-se alguns trabalhos acadêmicos brasileiros (teses e dissertações) que tratam do tema simulação de operações de processamento de mineral, em especial do minério de ferro, que são brevemente apresentados a seguir. Castro Neto (2006) realizou a modelagem de uma cadeia produtiva de minério de ferro no contexto de uma empresa que produz pelota de ferro. A pesquisa busca avaliar, através da simulação computacional, o *trade-off* entre os custos de não embarque das pelotas de ferro e finos (*pellet feed*) nos navio em função de falta de produto e os custos de estoque. As operações de extração e

---

<sup>69</sup> A quantificação das categorias se dá através de uso de especialistas. Detalhes podem ser obtidos em Stothard e Swadling (2010).

beneficiamento (concentração e aglomeração) foram modeladas em um nível agregado. Por exemplo, a operação de pelotização é modelada em função da capacidade de produção projetada e de um coeficiente de variação na produção. Paradas de manutenção são modeladas e as variações da produção se dão a partir de distribuições de probabilidade. O modelo proposto na pesquisa suporta as decisões relacionadas com: i) o tamanho de estoques de segurança e; ii) o tempo de duração de cada campanha.

A pesquisa realizada por Ceciliano (2007) apresenta a modelagem de uma cadeia produtiva de pelota de ferro através da simulação e da otimização para suportar decisões que envolvem o sistema produtivo. As simulações realizadas pelo autor apontam discrepâncias entre o resultado esperado de ‘empreendimentos’ no sistema (local) e o ganho global do sistema. O autor destaca o uso da simulação para suportar decisões de investimento e para analisar as restrições no sistema (gargalos) e, somente a partir dessa compreensão, recomenda o uso de métodos e técnicas para otimização.

Já o trabalho de Juliá (2010) descreve o uso da simulação computacional para modelar um sistema de estocagem e embarque de pelota de ferro. Considerando o foco do modelo nas operações de estocagem e embarque, o trabalho não detalha as operações de extração e beneficiamento do minério de ferro. O modelo apresentado pelo autor assume uma distribuição de probabilidade para representar a chegada de pelotas no pátio.

A seção a seguir descreve sucintamente os principais desafios para a modelagem de sistemas de produção e de manufatura na indústria de mineração, dada as características intrínsecas da qualidade da matéria-prima.

### **3.2.2 Os Desafios para a modelagem do sistema de produção na indústria de mineração**

A modelagem de sistemas de produção e de manufatura de uma empresa mineradora, em face das características intrínsecas da matéria-prima, é um desafio, devido a uma série de questões. O primeiro ponto é o fato de as operações serem do tipo semicontínuo e operarem em batelada. Cott e Macchietto (1989) e Meyer et al. (2011) apontam que os processos em batelada são intrinsecamente mais complexos do que processos contínuos. Isso porque um mesmo conjunto de equipamentos processa diferentes tipos de produtos.

Um segundo desafio diz respeito aos sistemas de produção e de manufatura serem extensos e complexos, sendo a complexidade, em boa parte, dada em função da qualidade da matéria-prima disponível nas reservas. Por exemplo, a exploração de minério de pior

qualidade (baixo grade) demanda operações de beneficiamento, tornando o sistema ainda mais complexo.

Como terceiro elemento, tem-se que as características intrínsecas da matéria-prima, a degradação e a variabilidade, afetam negativamente a performance do sistema. (KLIPPEL, 2007; TOPP et al., 2008). Como os sistemas produtivo e de manufatura são projetados para lidar com essas características, desconsiderar os impactos delas ao desenvolver a modelagem não é o caminho mais apropriado. A tecnologia intrínseca de mineração utilizada no sistema de manufatura atenta apenas para uma pequena parte do sistema. Em um sistema amplo e complexo, o conhecimento especialista da tecnologia de mineração encontra-se espalhado na organização. Considerando as questões elencadas anteriormente, modelar o sistema de produção e de manufatura de modo integrado não é tarefa simples.

O capítulo a seguir descreve o método de pesquisa e de trabalho utilizado para a realização deste estudo.



## 4 MÉTODO

Neste capítulo é apresentado o método de investigação e o método de trabalho proposto para a construção da pesquisa. Para isso, o capítulo contempla uma breve discussão sobre o papel da modelagem nas ciências administrativas. Na sequência, é descrito o delineamento da pesquisa em relação à natureza, ao objetivo, ao método científico e ao tipo de pesquisa. A terceira seção detalha o método de investigação modelagem e simulação e, finalmente, a última seção compreende o método de trabalho utilizado.

### 4.1 INTRODUÇÃO

A administração da produção é um campo aplicado, diferente de outras áreas do conhecimento como a física e a química, cujas pesquisas tem como objetivo central compreender as leis que regem o universo e a natureza. O laboratório da administração da produção são as empresas, que são sistemas desenvolvidos pelo homem, geralmente com o objetivo de ganhar dinheiro hoje e no futuro. (HOPP; SPEARMAN, 2001; GOLDRATT e COX, 2003). Nesse sentido, Simon (1996) destaca a diferença entre os sistemas naturais e os artificiais ao distinguir os sistemas observados na natureza daqueles construídos pelo homem. Para Simon (1996) a ciência natural busca compreender como as ‘coisas’ são. Já as ciências artificiais focam na identificação de como as ‘coisas’ devem ser. A ciência do artificial pode ser compreendida como um corpo de conhecimento sobre objetos ou fenômenos artificiais (criados pelo homem), que buscam satisfazer certos objetivos. (SIMON, 1996).

Na física, o modelo apresentado por Isaac Newton para explicar a relação entre a força e a aceleração indica que a força é igual à massa vezes a aceleração. (LITTLE, 1992). Esse modelo é intuitivo, ou seja, ao dobrar a força aplicada sobre um objeto, isso implica o dobro de aceleração. Tal modelo simples e determinístico possibilita identificar a força de um objeto sabendo a sua massa e a sua aceleração, ou vice e versa. No caso da administração da produção, não há leis gerais simplificadas, como as expostas e demonstradas pela física (LITTLE, 1992). Observa-se que Little (1992) mostra-se cético quanto à descoberta de leis, como aquelas descritas pelos modelos físicos, para explicar o comportamento dos sistemas de produção e de manufatura, porque esses sistemas tendem a ser complexos e confusos. Cada organização apresenta peculiaridades que diferenciam o sistema de produção e manufatura de uma para outra. Assim, Little (1992) destaca que esses sistemas são uma criação humana e

que se caracterizam pela sua amplitude, pelas complexas interações entre pessoas e equipamentos, em um dado espaço e tempo, e pela sua estrutura organizacional. Já os fenômenos físicos são explicitados a partir de experimentos que resultam em leis universais, ou seja, na física os problemas são ‘quebra-cabeças’ decifrados ou ainda sem solução até o momento.

A missão central das teorias e pesquisas na área de administração da produção (classificada como ciência social) é conduzir estudos que possam contribuir tanto para o meio científico quanto para aprimorar as práticas de gestão. Para tal, é indicado que os pesquisadores conduzam seus estudos orientados para o entendimento de problemas reais de gestão e de aplicação de conhecimentos que, de certa forma, possam gerar teorias que ampliem a capacidade de lidar com essas questões de forma ‘científica’. A boa teoria é precisamente prática porque avança o conhecimento em uma disciplina científica e guia a pesquisa para as perguntas cruciais da gestão. (VEN, 1989).

A seção a seguir descreve o delineamento da pesquisa e o método de trabalho adotado para conduzi-la.

#### 4.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Esta seção visa localizar os diversos aspectos que influenciam o método de trabalho utilizado para a condução da pesquisa. Antunes (1998) destaca que a decisão sobre o método a ser utilizado não é trivial e nem consensual na literatura. Apesar dessa dificuldade, considerar os preceitos do método científico é essencial para a construção e o avanço do conhecimento científico. O primeiro aspecto de posicionamento diz respeito à natureza da pesquisa, ou seja, se ela é aplicada ou básica. (SILVA; MENEZES, 2001). Este trabalho é classificado como pesquisa aplicada, pois o problema e os objetivos declarados derivam de um contexto prático das organizações. Além disso, busca-se produzir conhecimento voltado à solução de um problema de cunho prático.

Um segundo aspecto classificatório diz respeito ao objetivo do estudo. Nesse sentido, para Gil (2007), existem três tipos básicos para a classificação de uma pesquisa, que são: i) exploratória; ii) descritiva e; iii) explanatória. Quanto ao objetivos, a pesquisa enquadra-se como descritiva, pois visa descrever o comportamento de um fenômeno a partir do estabelecimento de relações entre variáveis.

O método científico, por sua vez, compreende as atividades realizadas para o desenvolvimento de conhecimento científico. (MARCONI; LAKATOS, 2010). Algumas abordagens relacionadas aos métodos científicos são debatidas e apresentadas na literatura, sendo as duas principais vertentes as seguintes: i) o método indutivo e; ii) o método dedutivo. Demo (2000) destaca a necessidade de explicitação do posicionamento em relação ao método científico do pesquisador para evitar contradições. Desta forma, quanto ao método científico, esta pesquisa é caracterizada pelo método dedutivo. Utiliza-se o quadro teórico apresentado por Filippini (1997) que sugere uma tipologia para classificação das pesquisas na área de operações. Essa tipologia é construída a partir de dois eixos principais. O primeiro eixo trata da forma como ocorre a geração do conhecimento, cujos extremos são demarcados pela lógica indutiva e dedutiva. O segundo eixo refere-se à fonte e ao tipo de informações utilizadas, variando desde a informação direta de um fato até o subjetivismo. Dentro do quadro proposto por Filippini (1997), observa-se que a modelagem e a simulação caracterizam-se pela lógica dedutiva e por informações advindas de uma reconstrução artificial da realidade a partir de dados objetivos. O caráter dedutivo da modelagem e da simulação ocorre quando um modelo é utilizado para testar uma teoria já existente ou até mesmo para sugerir uma nova proposição teórica. Portanto, o caráter dedutivo desta pesquisa justifica-se pela sua característica de partir de teorias e conhecimentos previamente existentes a respeito do desempenho dos sistemas de produção e de manufatura e de teorias que apontam o problema da degradação dos recursos naturais. A partir do conhecimento existente e documentado na literatura, sugere-se um método para construir um modelo simplificado da realidade para testar e avaliar o comportamento dessas teorias. O modelo visa não só testar teorias, mas também suportar o processo de decisão das organizações que se deparam com o problema da degradação das qualidades dos recursos naturais.

Finalmente, uma última classificação diz respeito ao tipo de pesquisa, qualitativa ou quantitativa, seguido pelo método de investigação. O método de investigação (método de pesquisa) compreende um conjunto de passos sistemáticos e lógicos que possibilitam o atingimento do objetivo do estudo. (MARCONI; LAKATOS, 2010). A pesquisa é caracterizada como quantitativa, sendo a modelagem e simulação o método de investigação utilizado. A seção a seguir detalha o método de investigação, no caso, a modelagem e simulação.

### 4.3 MÉTODO DE INVESTIGAÇÃO: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

O uso de modelos para resolver problemas das organizações levou ao desenvolvimento da área de PO e de MS, conforme detalhado na Seção 2.3. Para Manson (2006), o avanço do conhecimento, tanto na área de PO quanto na de MS, ocorre de diferentes formas, conforme detalhado a seguir:

- desenvolvimento de novos ou melhoria de modelos de sistemas;
- desenvolvimento de novos ou melhoria de algoritmos para resolver modelos;
- desenvolvimento de novas ou melhoria de metodologias;
- desenvolvimento de novos ou melhoria de ferramentas e *software*;
- elevação da compreensão de um fenômeno que afeta a implantação ou a adaptação de modelos e metodologias da PO.

Esses avanços na teoria surgem como uma resposta aos críticos que defendem que a resolução de problema práticos, por intermédio da PO, não caracteriza a construção de teoria. Em contrapartida, há contribuições metodológicas em forma de métodos, técnicas e ferramentas para o desenvolvimento de pesquisas. Little (1970, 1992) destaca a diferença entre pesquisa e modelos para resolver problemas práticos. Uma coisa é gerar um modelo para explicar um novo fenômeno ou propor um novo método para resolver um problema já estudado. Outra coisa é aplicar, por exemplo, o método de otimização linear Simplex para otimizar o *mix* de produção de uma empresa produtora de calçados. Little (1992) defende que o primeiro caso promove avanços na teoria, já o segundo é uma mera aplicação das ferramentas de PO em um caso específico.

Quanto à predisposição da modelagem e simulação em resolver problemas reais, Little (2004) afirma que a pesquisa científica é mais interessante quando ela suporta a melhoria do mundo real das empresas. O autor destaca, no seu texto, que alguns acadêmicos tentam classificar o trabalho de *OR/MS* como “consultoria”, desmerecendo a área. É verdade que muitos modelos propostos e desenvolvidos são criados e testados no contexto de consultoria. Nesse sentido, Little (2004) defende que a aplicação das proposições em um ambiente real é um meio para observar se o modelo funciona ou não. E é justamente esse movimento de propor e testar no mundo real que leva ao desenvolvimento de novos conceitos e conhecimentos. (LITTLE, 2004).

O objetivo da pesquisa, apresentado no Capítulo 1, alinha-se ao objeto central das pesquisas em PO, de modo geral, e ao método de investigação modelagem e simulação, em específico. Logo, a pesquisa busca desenvolver uma solução instrumentalizada para tratar um fenômeno ainda não abordado na literatura pesquisada. (LITTLE, 1992).

Nesse sentido, a modelagem e simulação, enquanto método de investigação, possibilita ao pesquisador o entendimento de um problema. Harrison et al. (2007) destacam que a resolução de problemas através da modelagem e simulação pode ocorrer a partir de dois enfoques. O primeiro centra-se em resolver um problema de pesquisa provendo, assim, a construção de teoria. Já o segundo foca a resolução de problemas corriqueiros, levando, por exemplo, à análise e prescrição de políticas. Como método para o avanço de conhecimento científico, a modelagem e simulação torna possível o estudo de problemas complexos que não são facilmente endereçados por outras abordagens de pesquisa. (HARRISON et al., 2007).

Para Harrison et al. (2007), a modelagem e simulação é um método eficaz para o avanço da teoria em sistemas complexos. Ainda segundo os autores, a partir de uma análise da literatura, 8% dos artigos sobre gestão e ciência social utilizam a modelagem e simulação como método de pesquisa. (HARRISON et al., 2007). Essa representação é ainda maior quando analisados estudos específicos da área de gestão de operações. Segundo Gupta, Verma e Victorino (2006), cerca de 38% das pesquisas utilizam a modelagem e métodos analíticos como método de investigação.

O método de investigação de modelagem e simulação é comumente apresentado na literatura de PO, por exemplo em Hillier e Lieberman (2013), Arenales, Armentano e Morabito (2007) e Pidd (1998). Esses autores, em especial, preocupam-se em expor o método modelagem e simulação para resolução de problemas das organizações e não dispensam muita atenção ao uso do método para o avanço do conhecimento. Já Morabito e Pureza (2012) e Harrison et al (2007) destacam o método de modelagem e simulação como suporte metodológico para a condução de pesquisas.

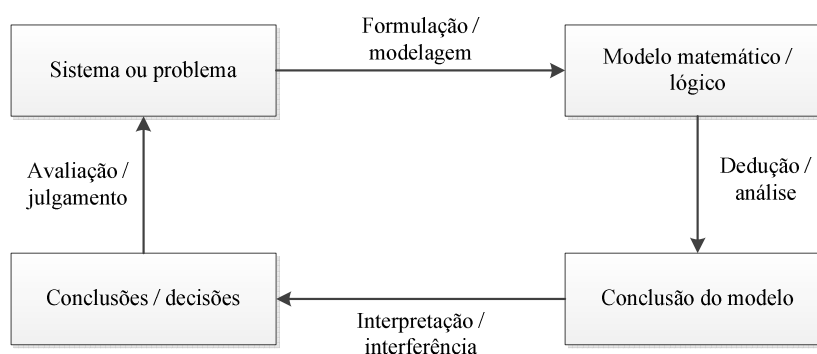
O método de pesquisa de modelagem e simulação, sob a ótica da PO, consiste em um conjunto de etapas, mostradas na Figura 22<sup>70</sup>. Segundo Arenales, Armentano e Morabito (2007), o método de investigação de modelagem e simulação compreende quatro etapas elementares, que são: i) formulação/modelagem; ii) dedução/análise; iii) interpretação/inferência e; iv) avaliação/julgamento. A primeira etapa, que consiste na

---

<sup>70</sup> Na Figura 22 observa-se o método simplificado, que expõe somente as ideias centrais. Métodos detalhados para a resolução de problemas da PO e para a resolução de problemas através da simulação computacional de modo específico são descritos no Capítulo 2, nas Seções 2.3 e 2.4, respectivamente.

formulação/modelagem, tem como objetivo definir as variáveis e as relações matemáticas e/ou lógicas que descrevem o comportamento do sistema ou problema de interesse. A segunda etapa, intitulada dedução/análise, utiliza o modelo matemático ou lógico para realização de experimentos a fim de gerar conclusões acerca do problema, via modelo. A terceira etapa, interpretação/inferência, compreende a avaliação dos resultados gerados pelo modelo e verifica se os modelos têm capacidade para resolver o problema em questão. A quarta e última etapa, avaliação/julgamento, visa destacar a adequação das soluções apresentadas pelo modelo e discute a necessidade de um novo ciclo de atualização da modelagem.

Figura 22: Método de investigação: modelagem e simulação



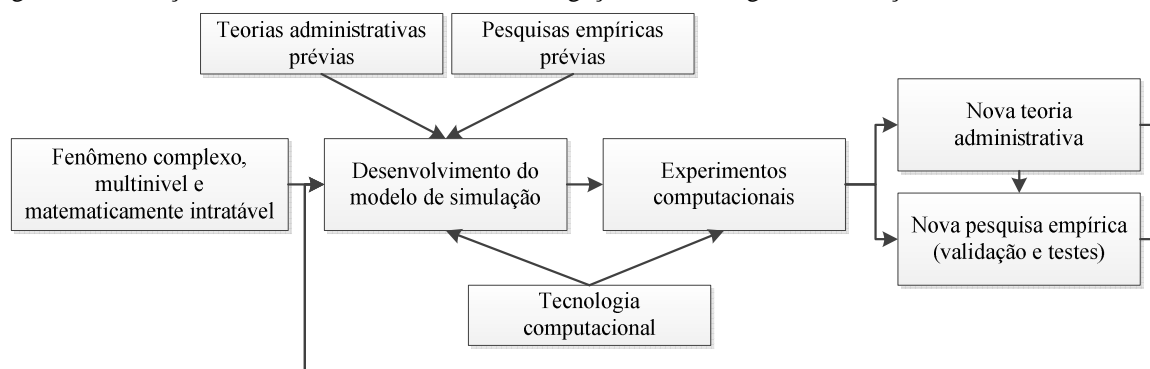
Fonte: Arenales, Armentano e Morabito (2007)

Conforme apresentado no capítulo 2 (seção 2.4.2) existem, na literatura, diversos métodos que sustentam o desenvolvimento de modelos de simulação, denominados, a partir deste momento, de métodos tradicionais. Cada um dos métodos detalhados explicita uma sequência de etapas únicas. Porém, segundo defendido por Withers et al. (1993), geralmente os métodos de simulação compartilham cinco macro etapas, que são: i) compreensão do sistema; ii) construção do modelo conceitual; iii) desenvolvimento do modelo; iv) uso do modelo e; v) avaliação do uso modelo.

Segundo Morabito e Pureza (2012), o método representado na Figura 22 pode ser utilizado tanto para a resolução de problema de pesquisa como para a solução de problema de cunho prático/gerencial. No que tange ao uso da modelagem e simulação para a construção de teoria, Harrison et al (2007) ampliam o método de investigação apresentado na Figura 23, destacando as interfaces do processo de construção do modelo para a resolução de problema propriamente dito, com o suporte de teorias existentes e os avanços nas teorias promovidos pelos modelos. A Figura 23 ilustra o processo iterativo das relação entre as teorias que

sustentam a construção do modelo e os avanços na teoria indicados pelos experimentos realizados a partir do modelo. (HARRISON et al., 2007).

Figura 23: Interação entre teoria e o método de investigação de modelagem e simulação



**Fonte:** Harrison et al. (2007)

A próxima seção detalha o método de trabalho utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

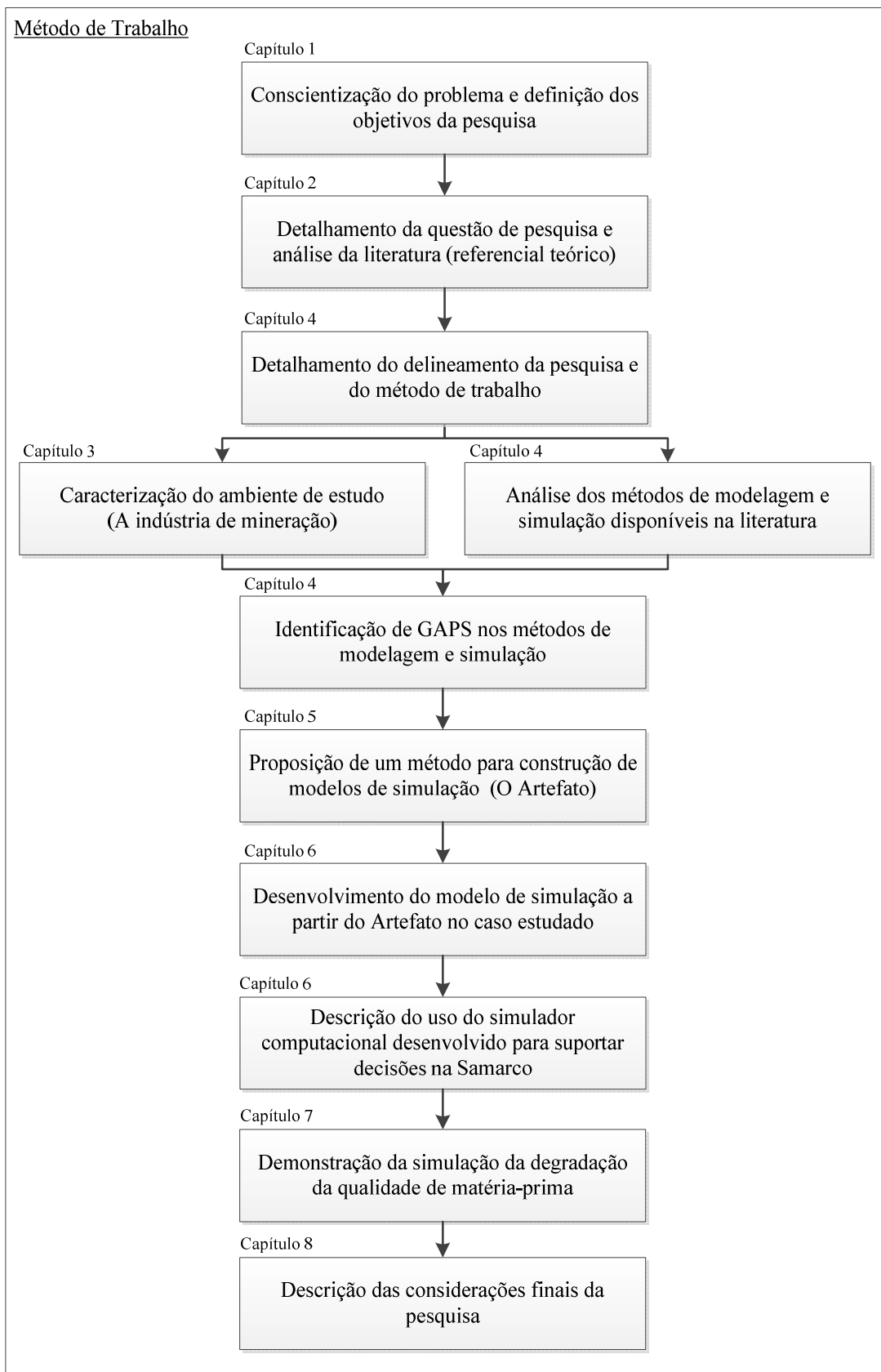
#### 4.4 MÉTODO DE TRABALHO

O método de trabalho consiste na sequência lógica de passos seguidos para a execução da pesquisa. (MARCONI; LAKATOS, 2010). Tal método possibilita maior clareza e transparência para replicação futura do trabalho. A

Figura 24 esquematiza o método de trabalho desta pesquisa.

Figura 24: Método de trabalho





Fonte: Elaborado pelo autor

## **Passo 1: Conscientização do problema e definição dos objetivos da pesquisa**

O primeiro passo do método de trabalho consistiu na conscientização do problema, ou seja, na identificação da questão e dos objetivos da pesquisa. O problema central a ser respondido é ‘como a degradação das qualidades da matéria-prima afeta o desempenho global do sistema de produção e de manufatura em termos de produtividade e qualidade do produto na indústria de mineração’. Essa questão, conforme descrito ao longo dos Capítulos 1 e 2, não é adequadamente endereçada pela literatura.

De acordo com o relatado no Capítulo 2, há uma lacuna na teoria de administração da produção, de modo geral, e na literatura de PO, em específico, para compreender o fenômeno da degradação dos recursos naturais no desempenho do sistema de produção e de manufatura. Há uma explícita dificuldade em avaliar antecipadamente, de modo comparativo, integrado e dinâmico, os efeitos de modificações no sistema de produção e de manufatura. Assim, a justificativa de investimento de capital em melhorias nesses sistemas torna-se complicada. As abordagens tradicionais para estimar o desempenho gerado pelas alterações no sistema de manufatura (tecnologia específica de mineração) e as suas consequências no sistema de produção (fluxo global da produção) são limitadas. A estimativa do desempenho, visando justificar os investimentos, tende a desconsiderar as características dinâmicas, estocásticas, circulares e sistêmicas existentes no sistema produtivo de pelota de ferro, provocadas em boa parte pela degradação e variabilidade da matéria-prima, dificultando a aprovação dos investimentos.

A literatura sobre modelagem e simulação destaca a importância de analisar, de modo integrado e dinâmico, o sistema de produção e de manufatura. Ao mesmo tempo, ressalta a importância de analisar o desempenho do sistema, tanto em termos de qualidade do produto, quanto em termos de produtividade. (LI et al., 2009; CHAN; SPEDDING, 2003). No entanto, os modelos encontrados na literatura não modelam conjuntamente a produtividade e a qualidade do sistema. (KNIGHTS; BONATES, 1999; BASU; BAAFI, 1999; KONYUKH; GALIYEV; LI, 1999; PANAGIOTOU, 1999; STURGUL, 1999; TURNER, 1999; VAGENAS, 1999). Os modelos localizados na literatura tratam a qualidade do produto ou a produtividade isoladamente. (CHAN; SPEDDING, 2003; MINGERS; WHITE, 2010).

No contexto da indústria de propriedade, de modo amplo, e de mineração, em específico, a literatura sobre simulação destaca a importância dos modelos para auxiliar na compreensão do sistema produtivo de modo integrado e antecipado. Esses modelos podem ser

utilizados com o objetivo de permitir a experimentação de diferentes ações no sistema de produção e de manufatura em termos do desempenho da produção. No que tange à modelagem específica de cadeia produtiva de pelota de ferro no Brasil, foram identificados trabalhos científicos como as dissertações de mestrado de Castro Neto (2006), Juliá (2010) e Ceciliano (2007). Esses trabalhos utilizam-se de modelos por eventos discretos e não incorporaram o fenômeno da degradação das características das reservas ao longo do tempo, assim como não possibilitam avaliar o desempenho do sistema de manufatura em função da qualidade do produto e da taxa de produção da cadeia produtiva.

Assim, busca-se a proposição de um modelo computacional que integre o sistema de produção e de manufatura, com o objetivo de proporcionar a compreensão do desempenho global desse sistema em termos de produtividade e qualidade do produto. Esse modelo poderia suportar a decisão de investimento de capital, seja em melhorias ou em ampliações no sistema de produção e manufatura.

## **Passo 2: Detalhamento da questão de pesquisa, e da análise da literatura (referencial teórico)**

O passo dois do método de trabalho compreendeu a revisão da literatura e o desenvolvimento do referencial teórico apresentado no Capítulo 2. O referencial teórico foi elaborado a partir de artigos científicos nacionais e internacionais disponíveis nas bases de dados Ebsco, Proquest, Google Acadêmico e no Portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), além de livros que tratam dos temas de interesse.

A partir da revisão da literatura, identificou-se as potenciais abordagens e limitações existentes para a modelagem do problema de pesquisa. Através dos estudos apresentados no referencial teórico – que trata de modo mais amplo a literatura sobre modelagem e simulação – e da seção que examina a modelagem aplicada ao setor de mineração (seção 3.2), constatou-se um conjunto de limitações das abordagens de modelagem e simulação disponíveis na literatura (programação matemática, modelos fundamentais de engenharia de minas, modelos de simulação tradicional), justificando, assim, a necessidade de uma nova proposição para modelar o problema exposto anteriormente. A partir das limitações de abordagens encontradas, elaborou-se o Quadro 6. No Quadro 6 cada linha apresenta um atributo relevante para a modelagem do problema da pesquisa. Nas colunas constam os diferentes métodos e técnicas de modelagem localizadas na literatura. Para cada atributo indica-se se o método/técnica atende ou não o atributo em questão.

Quadro 6: Comparação das abordagens disponíveis na literatura para tratar o problema de pesquisa em comparação com a modelagem proposta

	Programação matemática (modelos otimizantes)	Modelos fundamentais de engenharia de minas	Modelos de simulação 'tradicional'	Modelo de simulação Proposto
Possibilita integrar toda a cadeia produtiva (sistema de produção e de manufatura)	Não	Não	Sim	<b>Sim</b>
Permite avaliar os efeitos da variabilidade e degradação da qualidade da matéria-prima	Sim	Sim	Não	<b>Sim</b>
Permite avaliar os efeitos da variabilidade de modo dinâmico	Não	Sim	Sim	<b>Sim</b>
Possibilita avaliar os efeitos da qualidade da matéria-prima de modo dinâmico	Não	Sim	Não	<b>Sim</b>
Considera as transformações das qualidades ao longo da cadeia produtiva (sistema de produção e de manufatura)	Não	Sim	Não	<b>Sim</b>
Permite suportar decisões de investimento (desempenho global) e decisões de cunho operacional	Sim	Não	Sim	<b>Sim</b>
Apresenta flexibilidade para expandir e atualizar o modelo	Parcialmente	Sim	Sim	<b>Sim</b>
Exemplos típicos encontrados na literatura	Bjørndal et al. (2011); Newman et al. (2010)	King (2001); Meyer (1980)	Knights e Bonates (1999); Basu e Baafi (1999); Konyukh, Galiyev e Li (1999); Panagiotou (1999); Sturgul (1999); Turner (1999); Vagenas (1999)	

Fonte: Elaborado pelo autor

### **Passo 3: Detalhamento do delineamento da pesquisa e do método de trabalho**

Nesse passo ocorreu a definição do método de investigação e a descrição do método de trabalho, detalhados nesta seção.

### **Passo 4: Caracterização do ambiente de estudo**

O quarto e o quinto passo ocorreram paralelamente. A quarta etapa refere-se ao detalhamento da unidade de análise, apresentado no Capítulo 3. Nesse passo, as questões da produtividade e da qualidade do produto e o problema da degradação são explicitados no caso estudado.

No contexto estudado, foi possível identificar que a modelagem e simulação de sistemas, sob a ótica do sistema de produção, tem como objetivo central a compreensão do sistema de modo global. Sob a ótica do sistema de manufatura, entretanto, a tecnologia intrínseca de processamento é o foco central das preocupações. Percebe-se que o primeiro desconsidera os detalhes e as peculiaridades específicas do segundo, enquanto que o segundo tende a desconsiderar a visão do todo, preocupação central do primeiro. No âmbito da tecnologia intrínseca de processamento, o conhecimento tende a encontrar-se disperso entre diversos especialistas no processo. É nesse nível, entre a tecnologia de transformação e a qualidade da matéria-prima, que o conhecimento interage. Assim, por um lado, há uma visão global do sistema, sem atentar os detalhes que podem limitar esse olhar. De outro, uma visão especialista em relação à tecnologia de processamento, que tende a não considerar a busca do ótimo global do sistema.

#### **Passo 5: Análise dos métodos de modelagem e simulação disponíveis na literatura**

O quinto passo consistiu na análise dos métodos para a modelagem e simulação de sistemas disponibilizados pela literatura, no contexto estudado. O Quadro 6 sintetiza as principais abordagens de modelagem identificadas na literatura. A partir da literatura observada nas abordagens propostas no Quadro 6, realizou-se a primeira tentativa de resolução do problema de pesquisa. Deste modo, inicialmente buscou-se utilizar os métodos consolidados na literatura para o desenvolvimento de modelos de simulação. Porém, conforme explicitado ao longo do referencial teórico (Capítulo 2), os métodos de desenvolvimento de modelos de simulação e o mecanismo de modelagem de variabilidade identificados na literatura, não são adequados para modelar a produtividade e qualidade do produto. Entretanto, essa funcionalidade justifica-se quando se deseja observar o fenômeno da degradação da qualidade dos recursos naturais e o impacto negativo desta no desempenho do sistema.

#### **Passo 6: Identificação de GAPS nos métodos de modelagem e simulação tradicionais**

O passo seis destacou os *gaps* identificados a partir da análise dos métodos de modelagem e simulação de sistemas existentes (métodos tradicionais) para modelar o problema tratado nesta pesquisa. A partir dos métodos tradicionais detalhados na Seção 2.4.2, observou-se que eles concedem pouca atenção a um conjunto relevante de questões. Primeiro,

desconsideram situações em que não há uma clareza em relação ao problema a ser modelado. Segundo, os métodos de desenvolvimento são voltados para modelos específicos (resolvem apenas um problema ou suportam apenas uma decisão) ou para teste e análise de teorias, e não para modelos genéricos para uso contínuo. (FREITAS FILHO, 2008). Terceiro, a modelagem conceitual é tratada como uma etapa na qual a ciência dá espaço para a arte. Ela geralmente se restringe ao mapeamento de fluxo e dos recursos de um sistema qualquer. Ainda, as relações de causa-e-efeito entre a qualidade do produto e a produtividade do processo não são contempladas. Banks (1998) afirma que a modelagem conceitual do sistema “[...] é provavelmente muito mais arte que ciência”. Essa visão explicita a necessidade de adaptações nos métodos existentes. Um quarto aspecto é que estudos que modelam qualidade do produto e produtividade são escassos, ou seja, não há uma agenda de discussão relacionada à modelagem de múltiplas variáveis de resposta, a saber, qualidade do produto e produtividade. Por exemplo, Chan e Spedding (2003) afirmam que a qualidade do produto é negligenciada na modelagem. Por fim, mas não menos importante, o tratamento da variabilidade não viabiliza a modelagem da degradação da qualidade da matéria-prima. Entretanto, os métodos de modelagem e simulação, no que tange ao tratamento de dados de entrada, dados de saída, validação e *software* que permitem o desenvolvimento de modelos, destacam amplamente a questão dos dados de entrada e saída, sendo aparatos importantes para os propósitos desta pesquisa.

Considerando os *gaps* explicitados, identificou-se a necessidade de adaptar os métodos expostos na literatura. O resultado disso é a elaboração de um método complementar aos já existentes, com o objetivo de desenvolver modelos de simulação. A partir deste momento, denomina-se o método proposto de Artefato.

### **Passo 7: Proposição de um método para construção de modelos de simulação (O Artefato)**

O sétimo passo compreendeu a proposição do Artefato, um método para a construção de modelos de simulação. Dado o objetivo da pesquisa, identificou-se a necessidade de adaptação dos métodos existentes de modelagem e simulação. O desenho inicial agregou aos métodos tradicionais de modelagem e simulação novas etapas e/ou adaptações. Essas mudanças buscam incorporar as seguintes questões: i) tratar o fenômeno da degradação das características da matéria-prima; ii) realizar a modelagem conceitual, dado o fenômeno da degradação; iii) estimar o desempenho do sistema em termos da qualidade do produto e da

produtividade; e iv) possibilitar o uso contínuo do modelo computacional para apoiar e suportar decisões. Essas adaptações visam suprir as limitações em termos da modelagem conceitual e da variabilidade, que são insuficientes para modelagem e simulação do problema de pesquisa. O Artefato apresenta um mecanismo alternativo para modelar a variabilidade, para então incorporar o efeito da degradação da qualidade da matéria-prima. O Capítulo 5, a seguir, detalha e descreve o Artefato e o mecanismo propostos.

O Artefato consiste em um conjunto de etapas sugeridas e passíveis de generalização para diferentes indústrias e empresas, o que será melhor detalhado nas conclusões desta pesquisa.

### **Passo 8: Desenvolvimento do modelo de simulação a partir do Artefato no caso estudado.**

O oitavo passo, descrito no Capítulo 6, consistiu na aplicação do Artefato ao caso estudado, para o desenvolvimento de um modelo de simulação que compreende a produtividade, qualidade do produto e a degradação.

### **Passo 9: Descrição do uso do simulador computacional desenvolvido para suportar decisões no caso da Samarco**

O passo nove compreendeu a descrição de situações reais em que o modelo computacional foi utilizado para suportar decisões no caso estudado. Tal passo encontra-se detalhado no final do Capítulo 6.

### **Passo 10: Demonstração da simulação da degradação da qualidade de matéria-prima**

O décimo passo descreveu a utilização do modelo desenvolvido para avaliar o problema da degradação da qualidade da matéria-prima. A avaliação teve como objetivo comparar o Artefato (método e mecanismo proposto) em relação ao mecanismo tradicional apontado na literatura para tratar a variabilidade. Essas análises estão no Capítulo 7.

### **Passo 11: Descrição das considerações finais da pesquisa**

Por fim, o último passo, descrito no Capítulo 8, contemplou as considerações finais da pesquisa.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O capítulo descreveu as questões relacionadas aos métodos de investigação e de trabalho utilizados para a elaboração da pesquisa. A seção apresentou, de modo amplo, o método de investigação chamado de modelagem e simulação e, de modo específico, os métodos para construção de modelos de simulação. Por um lado, o método de modelagem e simulação concede o *framework* para a resolução de problemas através do uso de modelos. Por outro, os métodos para desenvolvimento de modelos de simulação fornecem os caminhos para construção de modelos de simulação.

Na apresentação do método de trabalho destaca-se as limitações dos métodos para a construção de modelos de simulação no contexto do problema tratado pela pesquisa. Assim, verifica-se a necessidade de proposição de um novo método, baseado nos já existentes, chamado de Artefato, para lidar com o problema da degradação e variabilidade de qualidade da matéria-prima. Desta forma, a seção a seguir destaca o Artefato apresentado para o desenvolvimento de modelos de simulação que considerem a degradação da matéria-prima e modelem o desempenho do sistema em termos de produtividade e qualidade do produto.



## 5 PROPOSIÇÃO DO MÉTODO PARA O DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO: ARTEFATO

Este capítulo descreve o Artefato – um método para a construção de modelos de simulação. A questão central tratada pelo Artefato é a representação do desempenho do sistema de produção e de manufatura em termos de produtividade e qualidade do produto no contexto do problema da degradação e variabilidade da qualidade da matéria-prima.

O Artefato descrito nesta seção surge dos *gaps* dos métodos existentes destacados nos Capítulos 2 e 4. Ele integra as abordagens da PO *hard* e da PO *soft* com o objetivo de mitigar as lacunas identificadas. A integração, conforme destacado por Rodrigues (2006), é a solução para o conflito entre as abordagens *hard* e *soft*. Desta forma, utiliza-se um método *soft*, o método sistêmico (pensamento sistêmico), para a compreensão da situação problemática e o entendimento do sistema de interesse do estudo, seguido pelo método de modelagem e simulação da PO *hard*. Portanto, a integração *hard* e *soft* visa minimizar as deficiências dos métodos para a construção de modelos de simulação tradicionais. (ROBINSON, 2008; Georges, 2005).

A integração entre o método do Pensamento Sistêmico (*soft*) e o método de Simulação Computacional não é novo na literatura. Nesse sentido, Kasper (2006, p. 53) destaca o uso do método Sistêmico para a compreensão da realidade na perspectiva das abordagens de PO *hard*. Assim, o:

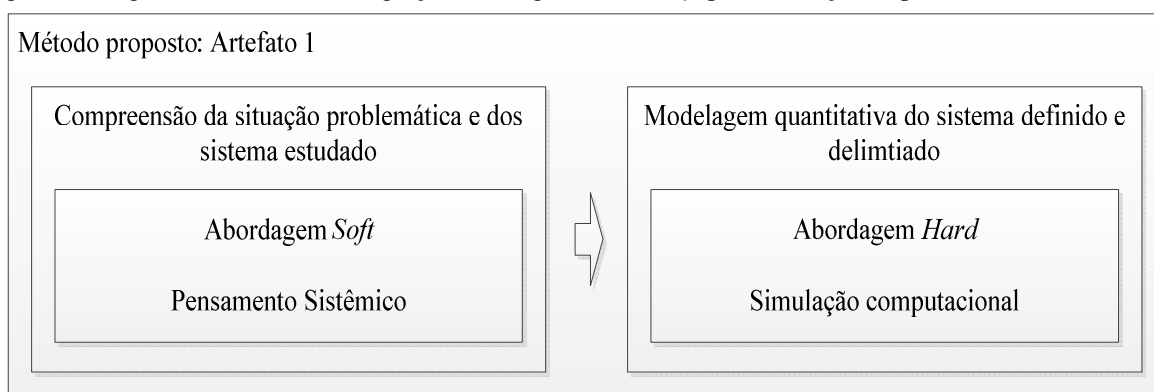
Pensamento Sistêmico como meio de estruturação de conhecimentos acerca da realidade é uma das formas de aplicação que vem despontando, especialmente em aplicações a organizações. Seja na perspectiva da ciência *hard* – como meio de ampliar a capacidade humana – seja como forma de melhorar o entendimento sobre problemas e situações que interferem a subjetividade humana, o foco é ampliar ou melhorar a capacidade de aprendizagem. Na perspectiva tradicional, a construção de modelos – especialmente utilizando simulação computacional – visa ampliar a capacidade da mente humana para lidar com um grande número de variáveis, confrontando os resultados do modelo com uma performance observada ou desejada.

Além disso, o trabalho desenvolvido por Borges (2000) destaca as sinergias entre a aplicação simultânea e paralela do Pensamento Sistêmico e da Simulação Computacional em um mesmo ambiente. Na proposição do autor, ambos os métodos podem ser utilizados paralelamente como estudos independentes, sendo que as informações originadas no Método Sistêmico podem ser utilizadas para direcionar os estudos de Simulação. De outro lado, os resultados do estudo de Simulação podem ser utilizados para validar as percepções sobre a

realidade. Borges (2000) conclui que o Pensamento Sistêmico auxilia no entendimento e na estruturação do problema, enquanto que a Simulação detalha e explora os problemas estruturados.

A partir da integração entre as abordagens da PO *hard* e *soft*, a Figura 25 ilustra uma primeira visão do Artefato.

Figura 25: Sugestão do Artefato: Integração abordagens *hard* e *soft* para resolução de problemas.



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma série de argumentos apoiaram o desenvolvimento do Artefato. Em primeiro lugar, é necessário considerar a complexidade e as inter-relações entre o sistema de produção e de manufatura que afetam a qualidade do produto e a produtividade do sistema como um todo no contexto do problema da degradação da qualidade da matéria-prima. Em segundo lugar, a variabilidade do processo produtivo e da matéria-prima afetam significativamente as decisões relacionadas à gestão das operações. Nesse sentido, Hodouin e Jämsä-Jounela (2001) destacam a fragilidade dos sistemas automatizados de controle na indústria mineral, o que pode levar a interferências humanas no processo. Em terceiro lugar, o alto nível de investimento necessário no setor de mineração para melhoria e ampliação das operação implica na necessidade de adotar mecanismos eficazes de apoio à tomada de decisão em relação ao investimento de curto, médio e longo prazo.

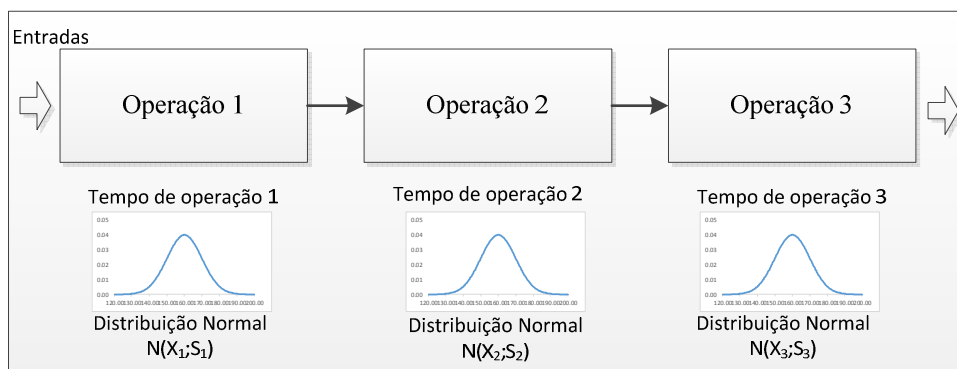
A seção a seguir destaca a necessidade de proposição de um mecanismo alternativo para a modelagem da variabilidade. O mecanismo tradicional, distribuição de probabilidade independente, é insuficiente para lidar com as relações entre a qualidade da matéria-prima, as qualidades intermediárias, a qualidade do produto, a produtividade e a degradação. O Artefato é detalhado somente após a apresentação do mecanismo proposto, pois foi construído a partir de tal mecanismo. Este, por sua vez, é exposto na seção a seguir.

## 5.1 MECANISMO PROPOSTO PARA A MODELAGEM DA VARIABILIDADE E DA DEGRADAÇÃO

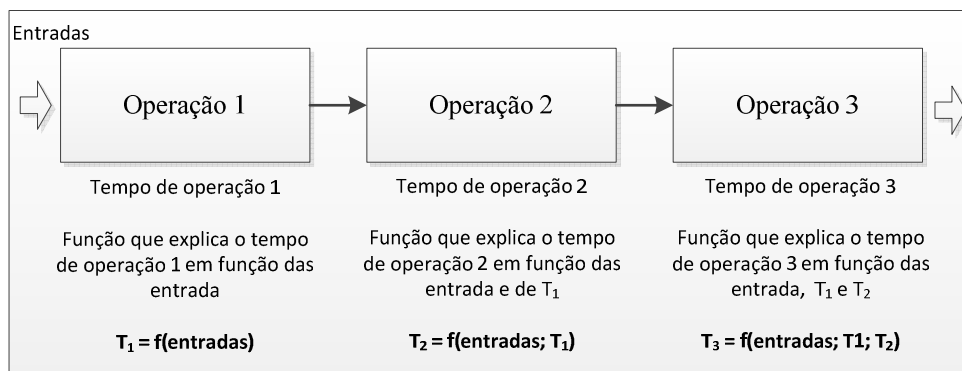
Tradicionalmente, a variabilidade é representada nos modelos de simulação através de distribuições de probabilidade, denominadas de mecanismo tradicional. (BANKS, 1998; FREITAS FILHO, 2008; LAW; KELTON, 1991; ROBINSON, 2004). Porém, a utilização do mecanismo tradicional, via distribuições de probabilidade, é recomendado nas situações em que se deseja obter o desempenho dos sistemas em função das taxas/volumes de produção, de custos ou de tempo. Esse mecanismo não lida com o problema da degradação da qualidade da matéria-prima, dado que, geralmente, as distribuições de probabilidade são atribuídas independentemente das características da entidade.

O mecanismo proposto nesta pesquisa para contornar as limitações do tradicional consiste na substituição das distribuições de probabilidade, utilizadas para representar de modo estocástico e independente o comportamento das taxas de processamento de cada uma das operações de um dado sistema, por expressões matemáticas. Essas expressões são compostas por termos que representam as relações entre a qualidade (da matéria-prima, intermediária e do produto), a produtividade e a degradação. Assim, o mecanismo proposto baseia-se no uso de expressões matemáticas que, por exemplo, podem ser estimadas a partir de dados empíricos - modelos econométricos (modelos regressão) para explicar o comportamento da produtividade e da qualidade (da matéria-prima, intermediária e do produto). Através dos modelos econométricos, as relações de causa-e-efeito entre as variáveis que afetam uma dada produtividade e/ou qualidade (da matéria-prima, intermediária e/ou do produto) são modeladas. Tais modelos são capazes de descrever o comportamento da produtividade e da qualidade (intermediária e do produto) ao longo de todo o sistema produtivo, desde a matéria-prima até o produto acabado. Os esquemas ilustrados na Figura 26 e Figura 27 ilustram o princípio de funcionamento do mecanismo tradicional e do mecanismo proposto.

Figura 26: Esquema ilustrativo do mecanismo tradicional de modelagem da variabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27: Esquema ilustrativo do mecanismo proposto para a modelagem da variabilidade<sup>71</sup>

Fonte: Elaborado pelo autor

Um exemplo auxilia no entendimento das diferenças essenciais entre o mecanismo proposto e o mecanismo tradicional. Em um suposto sistema composto por três operações em série, como ilustrado na Figura 26, observa-se o mecanismo de modelagem da variabilidade tradicional. Nesse exemplo, três distribuições de probabilidade, independentes uma da outra, são utilizadas para representar o tempo de processamento das operações um, dois e três. O tempo de processamento total de cada entidade (peça) é dado pela soma dos três tempos. No mecanismo tradicional, para uma dada entidade (peça), o tempo de processamento da operação dois independe do tempo de processamento da operação um, ou seja, os tempos de processamento em cada operação são independentes e representados pela distribuição de probabilidade.

<sup>71</sup> Detalhes do mecanismo ilustrado na Figura 27 são observados ao longo do Capítulo 6.

No mecanismo proposto, representado na Figura 27, o tempo de processamento da operação um é representado por uma função matemática ( $T_1$ ), que depende das entradas no sistema. Isso significa que o tempo não é mais representado por uma distribuição, mas sim por uma função que depende daquilo que está entrando no sistema. Assim, quando uma entidade for processada na operação um, o tempo da operação será um modelo matemático ( $T_1$ ), por exemplo, estimado a partir de um modelo econométrico ( $T_1$ ) que explica a relação entre o tempo de processamento e as características de entrada (características que são atribuídas a cada entidade). Quando a entidade for processada pela operação dois, o tempo de processamento, nessa operação, é apontado pela expressão ( $T_2$ ), que leva em consideração não só os parâmetros de entrada atribuídos à peça, mas também o tempo que ela levou para ser processada na operação um. Transcrevendo o exemplo da Figura 27 para o contexto da mineração, as entradas passam a ser as qualidades do minério, as entidades são o próprio minério, e a função tempo de operação é um modelo matemático que indica a taxa de produção da operação em função da qualidade da matéria-prima. Assim, a taxa de produção da operação um depende da qualidade da matéria-prima que é processada pela operação um. Estabelece-se aí um mecanismo para representar as relações entre a produtividade e a qualidade, não só a qualidade da matéria-prima, mas também as qualidades intermediárias<sup>72</sup> e qualidades do produto.

Em síntese, o mecanismo proposto sugere o uso de expressões matemáticas para representar a produtividade e as transformações de qualidade ocorridas ao longo do processamento. Desta forma, os parâmetros de qualidade que afetam a produtividade e vice versa podem ser contemplados nas expressões. Assim como, todas as variáveis operacionais que influenciam a produtividade e qualidade. Se por um lado as expressões viabilizam a modelagem conjunta da qualidade e da produtividade, por outro elas também tornam possível modelar o problema da degradação da matéria-prima. Como as produtividades são representadas em termos de qualidades, dentre elas as qualidades da matéria-prima, então o modelo passa a ser sensível às variações das qualidades da matéria-prima. Importante destacar que as expressões matemáticas podem ser obtidas de duas formas:

---

<sup>72</sup> O sistema de produção e de manufatura na indústria de propriedade constitui uma sequência de operações que transformam a matéria-prima no tempo e no espaço até a obtenção do produto acabado, no final do processo. (FRANSOO ; RUTTEN, 1994; HANSEN, 1996; KLIPPEL, 2007). A matéria-prima utilizada para alimentar o processo produtivo possui um conjunto de atributos de qualidade associada a ela. Na medida em que a matéria-prima é processada nas diferentes operações do sistema, novos atributos de qualidade podem surgir, ao que se dá o nome de qualidades intermediárias.

- Modelos específicos da engenharia de minas que explicam a produtividade (taxa de produção) e as transformações de qualidade. Nessa linha, King (2001) relata modelos matemáticos que descrevem relações elementares observadas no processamento mineral como, por exemplo, a taxa de produção de um britador em função da granulometria do minério;
- Modelos estocásticos estimados através de técnicas estatísticas a partir de dados históricos. Esses modelos apresentam a intensidade com que cada variável explicativa afeta as variáveis dependentes.

Modelos específicos são mais representativos para explicar relações em um sistema de processamento de minério de ferro. No entanto, esses modelos geralmente representam o comportamento de uma parte muito pequena da operação, o que torna difícil compreender o sistema de produção como um todo. A literatura que os apresenta é fragmentada e não há obras que tratam de todos os elementos de uma cadeia produtiva de minério de ferro complexa. O livro de King (2001), por exemplo, apresenta modelos somente para as operações de concentração, com foco exclusivo na tecnologia intrínseca de processamento de minério de ferro. Já Hodouin e Jämsä-Jounela (2001) e Hodouin (2011) destacam que ainda é muito difícil de compreender os verdadeiros mecanismos de uma planta de flotação e de moagem reais. Assim, modelos fundamentais dessas operações são difíceis de serem construídos. Os autores também expõem que a modelagem da integração entre as operações de extração e concentração ainda são incipientes. Segundo Hodouin e Jämsä-Jounela (2001) o uso da modelagem empírica para representar o comportamento das operações minerais é uma alternativa ao uso de modelos fundamentais. No entanto, os autores destacam as limitações inerentes aos modelos empíricos, que requerem constantes atualizações devido às contínuas mudanças nos processos e nas propriedades do minério.

Finalmente, vale destacar que as distribuições de probabilidade não são abandonadas no mecanismo proposto. Elas são necessárias para representar comportamentos independentes, aleatórios e estocásticos observados no sistema como, por exemplo, quebras e reparos de equipamentos.

Para modelar o mecanismo proposto em um simulador computacional, optou-se por desenvolver um simulador, em detrimento do uso de simuladores comerciais (por exemplo, Arena, Microsaint, ProModel, etc.). O simulador foi idealizado e desenvolvido de modo a

lidar (justificativa apresentada a seguir) com o mecanismo proposto. Dessa forma, a seção a seguir descreve o simulador computacional desenvolvido ao longo desta pesquisa.

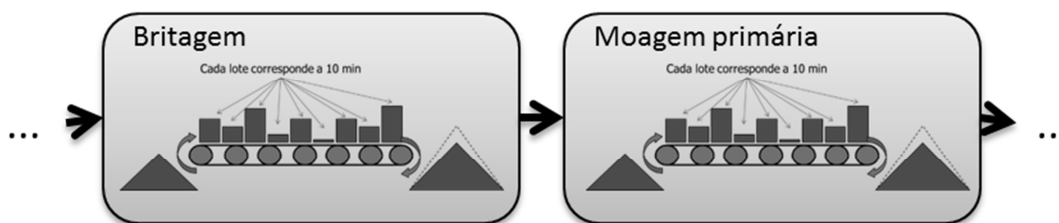
### 5.1.1 Representação lógica e computacional do mecanismo proposto

Conforme já destacado, o mecanismo proposto utiliza-se de expressões matemáticas para representar a produtividade das operações e as transformações de qualidade ocorridas no tempo e no espaço ao longo do sistema produtivo. Dessa forma, cada operação que é representada no modelo computacional e que interfere na produtividade do sistema produtivo e/ou em alguma qualidade do produto, recebe uma expressão matemática que indica a taxa de alimentação e/ou a expressão que aponta o parâmetro de qualidade.

De forma lógica, o modelo computacional, a cada intervalo de tempo (por exemplo, 10 minutos), calcula a taxa de alimentação a partir da expressão matemática (expressão que explicita as relações causais entre a produtividade e a qualidade da massa em processamento). O valor calculado representa a massa desejada pela operação; o simulador computacional, então, retira a massa desejada do estoque a montante e, após o processamento, deposita no estoque a jusante. A massa desejada somente será processada se houver material disponível no estoque a montante, caso contrário a operação processa somente o que houver. Por isso, denomina-se de valor desejado. Na mesma linha, caso o estoque a jusante esteja cheio, a operação interrompe a atividade. Ao final do processamento, aquelas operações que transformam a qualidade de entrada ou agregam um novo parâmetro de qualidade, atribuem à massa processada os novos parâmetros de qualidade. O valor desses parâmetros de qualidade é obtido, também, a partir de expressões matemáticas. Estas expressões dependem do sistema modelado e das transformações de qualidade observadas ao longo do sistema produtivo e que são detalhadas no modelo conceitual.

A Figura 28 exemplifica a lógica descrita anteriormente. Nela estão representadas duas operações, sendo que em cada operação há o desenho de uma correia que interliga os dois estoques. A correia é um meio simplificado para representar o processamento de uma operação. A expressão matemática determina, em um dado intervalo de tempo, a massa desejada, que na figura é apresentada por retângulos sobre a correia. Os retângulos representam as entidades, ou seja, a massa/minério. Observa-se que as alturas dos retângulos são diferentes, indicando que as expressões retornam diferentes valores a cada intervalo de tempo.

Figura 28: Ilustração da lógica de funcionamento do mecanismo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

Em suma, a massa (ou minério) é a entidade do modelo. A quantidade de massa, por sua vez depende do valor calculado pela expressão matemática. As entidades fluem através das diferentes operações contempladas no modelo e carregam consigo um conjunto de parâmetros de qualidade. Tais parâmetros vão desde as qualidades da matéria-prima, atribuídas no início do processo, até os parâmetros de qualidade do produto acabado, aplicadas no final do processo, passando por atributos de qualidades intermediárias. Para registrar todos os atributos de qualidade, cada entidade possui um Vetor de Qualidade.

Diferentes *Software* de simulação especialista como, por exemplo, o Arena e o MicroSaint, podem ser utilizados para representar a lógica descrita anteriormente. Porém, optou-se por desenvolver um simulador computacional em linguagem C# (*C Sharp*) dedicado para atender as necessidades desta pesquisa. Esta opção de programar o simulador, segundo exposto por Silva (2006), confere maior flexibilidade ao pesquisador para determinar a lógica de funcionamento do simulador. O conceito do simulador foi elaborado pelo pesquisador e validado pelo Grupo de Pesquisa (GMAP). No simulador desenvolvido, o avanço de tempo ocorre em intervalos predeterminados, por se tratar de simulação de fluxo contínuo ou semicontínuo. (PIDD, 2004b). Em cada avanço de tempo, o simulador computacional atualiza todas as variáveis de estado. Apesar da abordagem de avanço de tempo fixo ser menos eficiente do que a abordagem por eventos discretos (PIDD, 2004), não foi observado limitações de tempo de simulação no caso tratado no Capítulo 6.

O desenvolvimento do simulador consumiu sete meses de trabalho, entre março de 2010 e setembro de 2010. Nesse período, inicialmente, estabeleceu-se conceitualmente o funcionamento do *software*. Em seguida, um protótipo foi desenvolvido por um especialista em programação computacional possibilitando, então, o início dos testes funcionais do



simulador. Ao fim desses testes, o simulador estava apto para modelar o problema da degradação da qualidade da matéria-prima. O simulador desenvolvido não foi patenteado e a licença é propriedade da empresa Samarco.

O simulador desenvolvido nesta pesquisa, diferentemente dos simuladores comerciais, não apresenta recursos avançados para tratamento dos dados de entrada e saída do modelo, nem interface gráfica que ilustra o comportamento do sistema. Em contrapartida, as principais vantagens do simulador desenvolvido são: i) customização para modelar o mecanismo proposto (seção 5.1); ii) simplificação para representar a configuração do *layout* da cadeia produtiva (correias, operações, estoques, etc.); iii) facilidade em atribuir as qualidades da matéria-prima, as qualidades intermediárias e as qualidades do produto e; iv) no tocante a quebra de equipamentos, o simulador possibilita que sejam imputadas manutenções programadas, consideradas em cada etapa da cadeia produtiva; nesse caso, há uma lógica que atenua o efeito das paradas corretivas. Maiores detalhes sobre o funcionamento do simulador computacional desenvolvido encontram-se descritos no Anexo A.

Ao final da exposição do mecanismo proposto para tratar conjuntamente a produtividade e a qualidade do produto em função das características da matéria-prima, a próxima seção detalha as etapas previstas no Artefato para desenvolvimento do modelo de simulação.

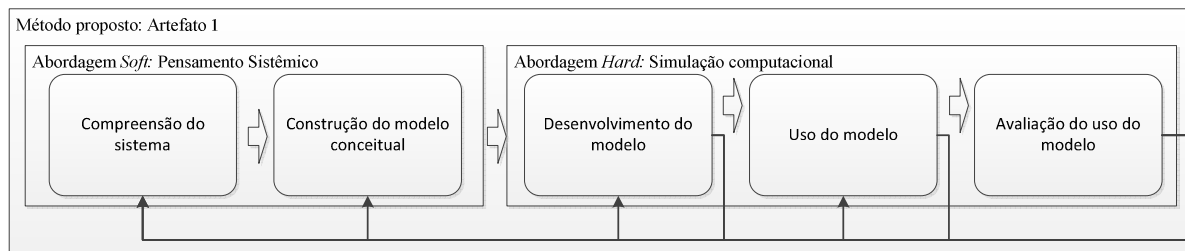
## 5.2 DETALHAMENTO DO ARTEFATO

Conforme já exposto o Artefato sugere a integração de abordagens *hard* e *soft*. Por um lado, o método sistêmico (abordagem *soft*) é sugerido para auxiliar nas etapas de identificação da situação problemática, na definição dos objetivos do modelo e na compreensão e delimitação do sistema (modelagem conceitual). Por outro lado, o método de modelagem e simulação (abordagem *hard*) sustenta as etapas de tratamento de dados (construção do modelo), a validação do modelo computacional e as experimentações no sistema através do modelo.

As contribuições do pensamento sistêmico ao Artefato proposto derivam do método sistêmico detalhada em Andrade et al. (2006). Já os métodos de modelagem e simulação que serviram de base para o Artefato proposto foram aqueles apresentados por Law e Kelton (1991) e Withers et al. (1993). A Figura 29 esquematiza uma visão geral do Artefato, destacando a integração entre as abordagens *hard* e *soft* e os seus inter-relacionamentos. O Artefato propõe-se a desenvolver modelos de simulação para uso contínuo e não para uma

decisão pontual. Dessa forma, utiliza-se a proposta de Withers et al. (1993) como referência. Na proposição desses autores, há previsão de que o modelo seja avaliado após o seu uso. Segundo destacado por Goldmeyer (2012), essa avaliação pós-uso é importante para que o modelo seja utilizado de modo contínuo para suportar decisões.

Figura 29: Visão geral do Artefato – método para construção de modelos de simulação

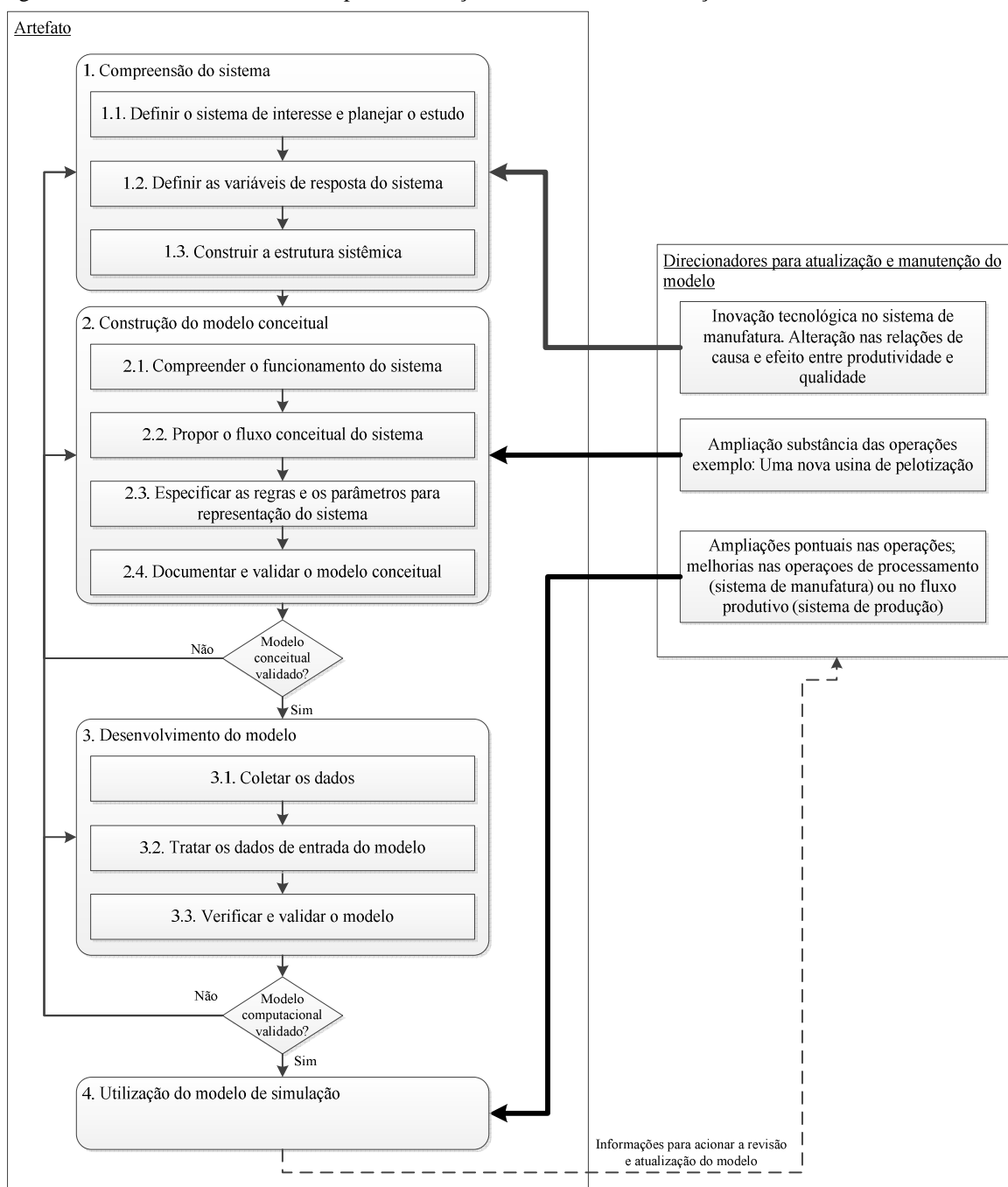


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 29 apresenta cinco fases para o desenvolvimento do modelo de simulação para uso contínuo. As duas primeiras são suportadas pelo método sistêmico e as três últimas pelos métodos de modelagem e simulação. O desenvolvimento do modelo computacional propriamente dito ocorre na fase chamada de desenvolvimento do modelo. A penúltima fase busca sistematizar o uso contínuo do modelo computacional no processo decisório, ao passo que a última objetiva promover a manutenção do uso do modelo. Cada uma das cinco fases é desdobrada em um conjunto sistemático de etapas, conforme ilustrado na Figura 30.

As fases e etapas são detalhadas nas próximas seções. A descrição das etapas é genérica, pois o método é aplicável não exclusivamente na indústria de mineração. Exemplos ilustrativos ao longo da descrição do método focam na indústria de mineração, na qual se identificou a necessidade de construção do Artefato.

Figura 30: Detalhamento do método para construção de modelos de simulação – Artefato



Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.2.1 Compreensão do sistema

A primeira fase dedica-se à compreensão do sistema em um sentido amplo. Assim, inicialmente, busca-se a identificação da situação problemática, do objetivo da modelagem, da delimitação do sistema estudado e da explicitação e do detalhamento das relações entre a produtividade, a qualidade do produto e a degradação da matéria-prima. A etapa é realizada com o suporte do método do Pensamento Sistêmico, conforme apresentado em Andrade et al. (2006).

Considerando o amplo espectro de conhecimentos necessários para a condução das etapas previstas no Artefato, recomenda-se a constituição de um Grupo de Trabalho (GT) multidisciplinar composto por especialistas em pensamento sistêmico (conforme estrutura de papéis n1, n2 e n3, apresentados na seção 2.3.2.2), especialistas em tratamento de dados e modelagem computacional, especialistas nas diferentes operações que compõem o sistema de produção e de manufatura (por exemplo, operação de extração, de concentração e de aglomeração) e por usuários do modelo propriamente dito (demandadores da ferramenta computacional). A coordenação geral do projeto se dá através da figura do n1, que fica responsável pela proposição do cronograma de trabalho e pela definição dos momentos em que ocorrem as reuniões do GT. Diferentemente de um projeto de simulação tradicional, o Artefato proposto consiste em utilizar-se do método sistêmico para compreender o comportamento do sistema. Portanto, principalmente, nas primeiras etapas do desenvolvimento do modelo é necessário um grupo multidisciplinar.

A fase de compreensão do sistema engloba as seguintes etapas:

- Definir o sistema de interesse e planejar o estudo;
- Definir as variáveis de resposta do sistema;
- Construir a estrutura sistêmica.

#### 5.2.1.1 Etapa 1.1: Definir o sistema de interesse e planejar o estudo

O estudo de modelagem e simulação se inicia com a definição do sistema de interesse, seguido pela compreensão do problema. O Artefato é elaborado visando atender o problema da degradação da matéria-prima através da análise de desempenho do sistema de produção e

manufatura em função da qualidade do produto e da produtividade horária do sistema para, então, gerar informações que suportem a decisão de investimento.

A definição do sistema consiste no entendimento geral do negócio da empresa, visando identificar se o Artefato é indicado para a modelagem do sistema em questão e, principalmente, se os esforços da modelagem se justificam na organização. Legitimado o desenvolvimento de um modelo de simulação para suportar decisões, deve-se realizar o planejamento do projeto. O planejamento, realizado pela figura do n1 (condutor do método sistêmico), consiste na determinação e alocação de recursos humanos necessários e na elaboração de um cronograma de execução de todas as etapas previstas nas fases um, dois e três da Figura 30. Law e Kelton (1991) destacam que previamente ao desenvolvimento do modelo computacional, algumas questões necessitam ser discutidas, como: i) objetivos gerais do estudo; ii) a questão geral tratada pelo modelo e; iii) o escopo do modelo. Além disso, Andrade et al. (2006) destacam que o primeiro passo do método sistêmico busca definir a situação de interesse. O GT constituído é convidado a participar das definições dessas questões.

As etapas descritas a seguir, assumem que o GT esteja constituído.

#### 5.2.1.2 Etapa 1.2: Definir as variáveis de resposta do sistema

Essa etapa, assim como as questões relacionadas à declaração dos objetivos do trabalho e à exposição da situação problemática, deve ocorrer em uma reunião do GT.

A primeira definição do GT consiste em identificar as variáveis de resposta do sistema. Embora se saiba que o desempenho é avaliado em termos de produtividade e de qualidade do produto, faz-se necessário determinar as variáveis de qualidade que serão modeladas, bem como a variável que indica a produtividade do sistema. As variáveis de desempenho são elementares para a construção da estrutura sistêmica, conforme detalhado na etapa a seguir. Law e Kelton (1991) destacam a importância dos medidores de performance do sistema para avaliar a eficiência de diferentes configurações de investimentos. Dado o problema tratado nesta pesquisa destaca-se que as variáveis de desempenho relevantes são as taxas de produção (produtividade horária) do sistema e as principais parâmetros de qualidade do produto.

#### 5.2.1.3 Etapa 1.3: Construir a estrutura sistêmica

A terceira etapa consiste na construção da estrutura sistêmica. Ela é a ferramenta de comunicação do pensamento sistêmico, utilizada para compreender os detalhes de funcionamento do sistema. Nesta etapa do Artefato, faz-se necessário recuperar o conceito de sistema de produção e do sistema de manufatura, apresentado por Black (1998) e ampliado por Antunes (1998). O sistema de manufatura, conforme exposto é onde encontra-se a tecnologia de processamento em si. No caso da indústria de mineração é neste sistema onde estão internalizados os conceitos da engenharia de minas que suportam e sustentam a produção mineral. Por outro lado, o sistema de produção compreende o fluxo global de produção no tempo e no espaço. A compreensão do sistema, citada anteriormente, passa necessariamente pela compreensão das relações elementares de processamento mineral propriamente dito, bem como pelo entendimento e visualização do fluxo de produção como um todo.

Segundo Andrade et al. (2006), o pensamento sistêmico é o arcabouço que proporciona a descrição coerente de um todo complexo. Essa descrição se dá através da linguagem sistêmica, que resulta em uma estrutura sistêmica capaz de explicitar a complexidade do sistema estudado. (ANDRADE et al., 2006). A partir da estrutura sistêmica obtém-se o mapeamento e a compreensão das relações de causa-e-efeito e as circularidades<sup>73</sup> entre a produtividade e a qualidade<sup>74</sup> (da matéria-prima e/ou intermediária) ao longo de toda a cadeia produtiva.

Dada a amplitude e a complexidade do sistema de processamento de minério de ferro, em especial dos sistemas que trabalham com minério de baixa qualidade, a organização do trabalho se dá em função de especialidades. Embora um engenheiro de processo ou engenheiro de minas detenha conhecimento sobre toda a cadeia produtiva, esse saber é, em geral, superficial. O domínio profundo se dá apenas em uma parte do processo. Dessa forma, o conhecimento sobre as transformações das características do minério de ferro ao longo do sistema de manufatura são de domínio de especialistas que estão distribuídos localmente ao longo da cadeia produtiva. Sendo assim, para compreender e explicar todas as transformações de qualidade (intermediária e do produto)), todas as circularidades e todas as relações de causa-e-efeito entre essas características e as produtividades das diversas operações compreendidas ao longo da cadeia, é necessário envolver especialistas de diferentes partes do processo. Devido à limitação cognitiva de compreensão de todas as relações ao longo de um

---

<sup>73</sup> Um exemplo detalhado das circularidades observadas entre produtividade e qualidade pode ser observado na Figura **Erro! Apenas o documento principal.**

sistema extenso e complexo, o método do pensamento sistêmico é utilizado para capturar o conhecimento específico das partes, visando a visualização global de todo o sistema de produção. Dessa forma, a estrutura sistêmica consolida o conhecimento de diferentes especialistas em um grande mapa que explicita as relações de causa e efeito entre as variáveis que representam o sistema.

Conforme proposto no método sistêmico, a construção e validação da estrutura sistêmica se dá a partir de uma sequência de encontros do GT. Inicialmente, um encontro do GT é conduzido para a construção de uma primeira versão da estrutura sistêmica, geralmente realizada em papel (*draft*). Após a consolidação dos mapas preliminares, uma nova reunião pode ser promovida para o detalhamento e a validação da estrutura sistêmica.

Ao final da fase de compreensão do sistema, obtém-se a estrutura sistêmica, que explicita um conjunto amplo de variáveis e relações que são essenciais para as demais etapas do Artefato. Tais variáveis e relações são:

- As variáveis de reposta do sistema;
- As variáveis que influenciam as variáveis de resposta do sistema;
- O mapa com as relações de causa-e-efeito entre todas as variáveis destacadas anteriormente.

A seção a seguir descreve as etapas propostas para a elaboração do modelo conceitual.

### **5.2.2 Construção do Modelo Conceitual**

A segunda fase do Artefato consiste no desenvolvimento do modelo conceitual. Trata-se de uma etapa de suma importância para o método proposto nesta pesquisa. Conforme destacado no referencial teórico sobre simulação, a modelagem conceitual, abordada nos diversos métodos de modelagem e simulação, recebe pouca atenção da literatura. (CHWIF; MEDINA, 2010; ROBINSON, 2004, 2008). Por exemplo, o método apresentado por Law e Kelton (1991) não detalha o processo de modelagem conceitual.

Essa é a etapa em que o funcionamento e a delimitação do sistema estudado são detalhados, para posterior tradução na linguagem computacional. (GEORGES, 2005; ROBINSON, 2004). No Artefato, a modelagem conceitual consiste em explicitar: i) as

relações entre as variáveis de interesse; ii) o efeito da degradação e da variabilidade em todas as operações que compõem o sistema e; iii) o desenho do fluxo do processo.

A modelagem conceitual é realizada a partir da estrutura sistêmica, de informações de especialistas do GT e de documentos da empresa que detalham o fluxo do processo. Da estrutura sistêmica, obtém-se a compreensão das relações o fluxo do processo. Da estrutura sistêmica, obtém-se a compreensão das relações diretas existentes entre as taxas de produções (produtividade) e as qualidades (da matéria-prima, intermediárias, do produto) ao longo da cadeia produtiva. Do fluxo do processo, identifica-se os principais elementos/operações que compõem a cadeia produtiva estudada. Tanto as relações entre as variáveis como as operações que compõem o fluxo do processo são inter-relacionadas e agrupadas, com o intuito de gerar o modelo conceitual do sistema.

O modelo conceitual deve incluir todas as principais operações compreendidas no sistema produtivo e apontadas na estrutura sistêmica. O modelo em questão é uma simplificação do sistema real, ou seja, a modelagem é uma abstração simplificada do funcionamento do sistema. Portanto, conforme destacado por Pidd (1998), deve-se ter o cuidado de evitar que o modelo torne-se demasiadamente extenso e complexo. É importante que ele seja validado pela equipe envolvida no processo de construção do modelo de simulação, a fim de evitar o descrédito nos resultados gerados pelo simulador. Goldmeyer (2012) e Pidd (1998) alertam para o problema de falta de credibilidade no modelo, em situações nas quais os usuários e especialistas no processo não são envolvidos na etapa de modelagem conceitual.

As etapas previstas no Artefato para o desenvolvimento do modelo conceitual são:

- Compreender o funcionamento do sistema;
- Propor o fluxo conceitual do sistema;
- Especificar as regras e parâmetros necessários para a representação do sistema;
- Detalhar, validar e documentar o modelo conceitual.

#### 5.2.2.1 Etapa 2.1: Compreender o funcionamento do sistema

A primeira etapa para a modelagem conceitual consiste na compreensão detalhada do funcionamento do sistema de produção e de manufatura. Esse entendimento se dá a partir da estrutura sistêmica, assim como da leitura de textos especializados, de documentos internos da



empresa e de informações coletadas com os especialistas do processo. Nessa etapa, questões como quais são os produtos produzidos pela empresa e quais são as rotas de produção, etc., devem ser respondidas. A proposta, nesse momento, é inteirar e preparar o especialista em simulação (pesquisador) para auxiliar na elaboração do fluxo detalhado do sistema. De um lado está o pesquisador, que conhece em profundidade o funcionamento da simulação, de modo geral, e do Artefato proposto, em especial. De outro lado, estão os especialistas da empresa, que conhecem profundamente o fluxo de processo e os detalhes das operações. Esse estudo inicial visa minimizar o *gap* de compreensão do sistema de produção e de manufatura do caso estudado existente entre o pesquisador e os especialistas.

#### 5.2.2.2 Etapa 2.2. Propor o fluxo conceitual do sistema e detalhar os processos

A segunda etapa visa instituir os limites do sistema analisado. Nesse momento é estabelecido o fluxo conceitual do sistema produtivo, bem como o nível de detalhamento do mesmo. Além disso, cada operação e/ou processo representado no fluxo conceitual deve ser detalhada de modo a explicitar as variáveis relevantes para modelar a cadeia produtiva.

A partir da estrutura sistêmica e do entendimento detalhado do sistema, são destacadas as operações da cadeia que impactam na produtividade e aquelas que transformam ou agregam novos atributos de qualidade intermediária. Dessa forma, a partir do levantamento das operações detalhadas na estrutura sistêmica e de posse de fluxogramas detalhados do processo produtivo, realiza-se uma primeira versão da representação conceitual do sistema. Nela, detalhes sobre as entradas e as saídas de cada operação são apontadas, bem como a relação de variáveis representadas na estrutura sistêmica que afetam a produtividade horária e/ou a qualidade intermediária e/ou qualidade do produto. Nesse instante, é necessário avaliar, com os especialistas em processamento mineral, a existência de modelos fundamentais que representam o comportamento de alguma variável de interesse contemplada no fluxo conceitual.

Ao final dessa etapa, gera-se o fluxo conceitual do sistema. Tal fluxo deve ser representativo e simples. Representativo no sentido de contemplar todas as transformações e relações entre a qualidade e a produtividade ao longo do processo e simples no sentido de evitar um modelo conceitual com elevada complexidade, que poderia inviabilizar a sua operacionalização computacional. Recomenda-se que o desenvolvimento do fluxo conceitual

do sistema ocorra, inicialmente, com os especialistas de cada etapa do processo produtivo, no intuito de coletar o maior número de detalhes possível.

#### 5.2.2.3 Etapa 2.3: Especificar as regras e os parâmetros para representação do sistema

A terceira etapa busca detalhar as variáveis necessárias para a construção do modelo e ampliar as informações necessárias para detalhamento do fluxo conceitual elaborado na etapa anterior. Dentre o conjunto de informações essenciais para a representação do sistema, que devem ser identificadas com auxílio dos especialistas no processo, destacam-se: i) capacidade de armazenamento dos estoques; ii) tempo que o material leva para percorrer cada operação (tempo de processamento) e; iii) regras de operação do fluxo produtivo, por exemplo, desvio de fluxo em caso de indisponibilidades, troca de campanha, etc.

#### 5.2.2.4 Etapa 2.4: Documentar e validar o modelo conceitual

A quarta etapa consiste na documentação e na validação do modelo conceitual. A documentação compreende o detalhamento das atividades realizadas nas etapas anteriores. Dessa forma, a documentação compreende:

- O fluxo detalhado do processo produtivo, destacando as operações, estoques e os fluxos de movimentação do minério (desenho eletrônico);
- O detalhamento de todas as operações contempladas no fluxo do processo produtivo, indicando:
  - o tempo de processamento;
  - a relação de variáveis que afetam a taxa de produção (produtividade);
  - o(s) atributo(s) de qualidade transformado(s);
  - a(s) relação(ões) entre variáveis que impactam a(s) qualidade(s);
  - os equipamentos (motores, moinhos, correias, etc.);
- As capacidades dos estoques (pilhas, tanques, silos);
- A descrição das regras do sistema, por exemplo, desvios e rotas alternativas ao longo do fluxo, etc.

O modelo conceitual documentado é validado pelo Grupo de Trabalho. Essa validação busca promover a discussão e o entendimento geral do modelo conceitual, além de gerar credibilidade para o processo posterior que versa sobre o desenvolvimento do modelo computacional.

Ao final da fase dois, obtém-se o modelo conceitual do sistema detalhado e validado. Depois dessa construção, sugere-se o desenvolvimento de um *template* para auxiliar na etapa de coleta de dados. O *template* deve apresentar a descrição das variáveis, os valores máximos e mínimos aceitáveis, a periodicidade da informação desejada (horária, diária, bi-horária, etc.) e o sistema de informação em que o dado deve ser coletado.

Com a conclusão da fase de modelagem conceitual, os seguintes documentos são gerados:

- Fluxo do processo;
- Detalhes das operações;
- Regras do sistema;
- *Template* para coleta de dados.

A próxima fase dedica-se ao desenvolvimento do modelo computacional propriamente dito.

### **5.2.3 Desenvolvimento do modelo**

A terceira fase do Artefato compreende a tradução do modelo conceitual para a linguagem computacional. O desenvolvimento do modelo inicia-se com a coleta dos dados, seguida pela etapa de tratamento das informações reunidas. Na sequência, o simulador computacional é parametrizado para, enfim, o modelo computacional ser verificado e validado. A validação, importante etapa do processo, visa certificar que o modelo computacional consegue representar o comportamento do sistema real em relação às variáveis de resposta estipuladas (qualidade e produtividade).

As etapas previstas na terceira fase do Artefato são:

- Coletar os dados;
- Tratar os dados de entrada do modelo;

- Verificar e validar o modelo.

#### 5.2.3.1 Etapa 3.1: Coletar os dados

A coleta de dados é outra etapa crucial do Artefato. Sem dados confiáveis, o resultado do trabalho, em termos quantitativos, pode não atender as expectativas. (FREITAS FILHO, 2008; PIDD, 1998). Faz-se essa ressalva, pois há benefícios secundários gerados pelo Artefato como, por exemplo, a compreensão e o nivelamento de informação no GT. As variáveis necessárias para parametrizar o modelo computacional são registradas em um *template* de variáveis, conforme citado anteriormente. Para a coleta dos dados, sugere-se o uso de planilhas eletrônicas ou outro recurso computacional para o gerenciamento dos dados. É importante documentar e padronizar a coleta de dados (por exemplo: a periodicidade da medida, o código do sistema no qual a variável foi coletada, etc.)

Os dados que necessitam ser coletados compreendem diferentes tipos de variáveis: i) variáveis de produtividade (taxa de produção horária de cada operação representada no modelo conceitual); ii) variáveis de qualidade da matéria-prima, qualidade intermediária e qualidade do produto (parâmetros químico, mineralógico e/ou físico); iii) variáveis de disponibilidade do equipamento; iv) variáveis de parâmetros de processo.

O tamanho da amostra de dados e, conseqüentemente, o horizonte de tempo em que eles devem ser coletados precisa ser adequado aos objetivos do estudo. A quantidade de dados deve atender os requisitos de nível confiança e erros absoluto que suportam a determinação do tamanho de amostra necessário para o estudo, conforme estabelecido na literatura de estatística. (LAW; KELTON, 1991; ROBINSON, 2004). Recomenda-se coletar um histórico de um ano de dados horários, pois, assim, torna-se possível compreender a sazonalidade dos dados motivada por fenômenos como as chuvas, eventos que afetam sensivelmente o desempenho do sistema produtivo de minério de ferro. Isto representa 8760 observações (365 dias vezes 24 horas/dia) para cada uma das variáveis.

#### 5.2.3.2 Etapa 3.2: Tratar os dados de entrada do modelo

O tratamento dos dados consiste na limpeza, organização e estimação dos modelos estocásticos<sup>75</sup> para representar as produtividades horárias ao longo da cadeia, bem como as transformações de qualidade. As variáveis necessárias para representar o modelo são classificadas em: i) variáveis de entrada do modelo e; ii) variáveis de parametrização do sistema.

As variáveis de entrada envolvem as informações que descrevem a qualidade da matéria-prima e da massa de minério que alimentam o processo produtivo. Essa segregação possibilita que experimentos relacionados à qualidade da matéria-prima sejam executados pelo modelo.

Já as variáveis de parametrização do sistema são aquelas necessárias para representar o modelo conceitual no ambiente computacional. Os dados coletados para essas variáveis são analisados e tratados visando desenvolver e estimar os modelos estocásticos (expressões matemáticas) e as distribuições de probabilidades necessárias para representar o sistema no ambiente computacional. Considerando o mecanismo proposto para modelagem da variabilidade e degradação, as variáveis são segmentadas em duas classes, a saber:

- Variáveis condicionadas: são as que indicam a taxa de produção das diferentes operações da cadeia produtiva e as transformações de qualidade observadas ao longo do processo. Essas variáveis são representadas no modelo por intermédio de expressões matemáticas, conforme destacado no mecanismo proposto na Seção 5.1;
- Variáveis independentes: representam eventos que ocorrem independentemente das qualidades de matéria-prima e/ou intermediárias. Como exemplo, cita-se a quebra de equipamentos, a adição de insumos, entre outras.

Cada variável condicionada representa uma expressão matemática no modelo conceitual. A obtenção dessas expressões se dá a partir de conhecimento de modelos fundamentais oriundos da engenharia de minas por parte dos especialistas do processo ou via modelagem estocástica (empírica). Estas expressões podem conter as circularidades observadas na estrutura sistêmica, por exemplo, aquela representada na Figura 32. Matematicamente a circularidade é representada como uma variável explicativa da variável que deseja-se explicar.

---

<sup>75</sup> Vale destacar que os casos onde existam modelos fundamentais que explicitam a relação desejada não há a necessidade de estimar modelos estocásticos.

Na modelagem empírica, por exemplo, modelos de regressão multivariada são estimados a partir dos dados coletados. A estimação desses modelos compreende um conjunto sistemático de passos: i) limpeza dos dados coletados; ii) elaboração do balanço de massa para as produtividades indicadas ao longo de toda a cadeia; iii) ajustes dos dados em função do balanço de massas e; iv) estimação do modelo estocástico.

Durante o processo de estimação das expressões matemáticas que representam as taxas de produção, são desconsiderados os momentos em que ocorrem interrupções de produção, ou seja, são expurgadas do banco de dados as ocorrências nas quais se observa ‘zeros’ nos dados de produção. Para a estimação dos modelos de regressão devem ser observados os testes e análises (testes de hipóteses, validação de modelo de regressão, avaliação poder explicativo, análise dos pressupostos como: normalidade, heterocedasticidade (teste de Goldfeld-Quandt)) recomendados na literatura estatística por autores como Hair et al. (2007) e Gujarati (2006).

A estimação de modelos de regressão múltipla pode resultar em modelos com baixo poder de explicação. Com o objetivo de buscar alternativas para essa situação, recomenda-se algumas técnicas para elevar o poder de explicação dos modelos estocásticos. A primeira técnica sugerida consiste em defasar temporalmente as variáveis dependentes e independentes. As variáveis defasadas possibilitam a representação matemática dos enlaces representados na estrutura sistêmica. Além disso, essa técnica possibilita ‘parear’ dados observados que, em função dos sistemas de medição, encontram-se descasados no tempo e no espaço. Por exemplo, o teor de ferro do minério extraído é medido na alimentação da primeira operação do processo produtivo (britagem). Esse parâmetro de qualidade afeta o desempenho das células de flotação. Supondo que não haja medição do teor de ferro nas células de flotação, ao querer estimar um modelo estocástico para a taxa de produção das células de flotação é razoável aceitar que o teor de ferro da massa que se encontra para ser processada apresenta o teor de ferro medido na alimentação da britagem  $t$  minutos atrás. A segunda técnica proposta para elevar o poder explicativo dos modelos de regressão consiste em estimar apenas o componente de tendência da série temporal, desprezando assim o componente sazonal e o erro aleatório.

As variáveis independentes são representadas por intermédio de distribuições de probabilidade. Nesses casos, recomendam-se as técnicas de análise de dados de entrada do modelo descrito na Seção 2.4.4.1. Finalizada a etapa de tratamento dos dados de entrada do

modelo, apresenta-se a próxima etapa, que compreende a parametrização, a verificação e a validação do modelo.

#### 5.2.3.3 Etapa 3.3 Verificar e validar o modelo

A terceira etapa consiste em verificar e validar o modelo computacional. Essa etapa segue as recomendações da literatura estabelecida sobre simulação, apresentadas na Seção 2.4. Inicialmente, deve-se escolher o *software* de simulação<sup>76</sup> e realizar a parametrização do modelo conceitual no simulador, visto que os dados de entrada já foram tratados. Robinson (2004) destaca que há três caminhos para o desenvolvimento de modelos computacionais: o primeiro através de planilhas eletrônicas; o segundo via *software* de simulação especialista e; o terceiro através de linguagem de programação. A opção por qual caminho seguir depende da extensão do sistema e da quantidade de operações. Após a escolha do caminho para o desenvolvimento do modelo em um ambiente computacional, o modelo conceitual, em conjunto com os dados tratados, são atribuídos à plataforma computacional definida.

A verificação compreende a análise da consistência lógica e se as expressões matemáticas e os modelos probabilísticos se comportam conforme o esperado. Já a validação consiste em garantir que o modelo computacional represente o comportamento do sistema real. Segundo Law e Kelton (1991) quando deseja-se construir um modelo de um sistema real existente, a validação do modelo consiste em comparar estatisticamente o dado real e o dado simulado para cada uma das variáveis de resposta do modelo, conforme sugerido e detalhado em Law e Kelton (1991), Banks (1998), Hillier e Lieberman (2013) e Robinson (2004).

O modelo desenvolvido é por natureza não terminante e as saídas geradas podem apresentar um comportamento transitório. O comportamento transitório do modelo geralmente pode e deve ser desconsiderado, pois se deseja analisar o sistema em regime. Portanto, para a validação, deve-se seguir as recomendações para análise de dados de saída do modelo para esse tipo de simulação, detalhadas na Seção 2.4.4.2.

---

<sup>76</sup> A definição do software de simulação é uma escolha particular do pesquisador. A escolha passa pelas preferências em relação às opções disponíveis no mercado. Livros sobre o tema, como Law e Kelton (1991) e Robinson (2004) descrevem os principais software de simulação disponíveis no mercado. Já o instituto INFORMS publica periodicamente uma relação dos *software* de simulação disponíveis no mercado que pode ser acessada no endereço eletrônico <http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation.html>. A única restrição com relação ao software de simulação a ser utilizado é que o mesmo deve suportar o uso de modelos matemáticos para representar a taxa de produção ou alimentação de uma operação/atividade e permitir que diversas características sejam atribuídas às entidades. Essa última funcionalidade faz-se necessária para representar a qualidade da matéria-prima e as transformações sofridas ao longo dos diversos processamentos da cadeia produtiva.

Quanto à abordagem de validação do modelo computacional, que conforme Pidd (2004) pode ser *'black box'* ou *'white box'*, recomenda-se o uso da abordagem *'white box'*, pois pretende-se validar não só o comportamento global do sistema, como também o comportamento interno do modelo, ou seja, validar se as expressões matemáticas geram valores simulados semelhantes aos observados no sistema real.

Segundo apresentado em Law e Kelton (1991) e Robinson (2004), para a análise dos dados de saída do modelo, caso do processo de validação, a determinação do tempo de *warmup* é uma etapa importante. Robinson (2004) destaca que a definição do tempo de *warmup* pode ser obtida a partir de diferentes métodos que vão desde análises gráficas, passando por heurísticas até testes estatísticos. Dentre as técnicas disponíveis na literatura Law e Kelton (1991) e Robinson (2004) destacam o Método de Welch, pois é um teste conservador em relação aos outros. O Teste de Welch calcula a média móvel das variáveis de resposta do modelo obtidas em diferentes replicações. No momento em que a série temporal apresenta valores suavizados, tem-se o período em que o modelo se encontra aquecido.

A etapa de validação do modelo é realizada em dois estágios. O primeiro estágio dedica-se à validação interna do modelo, ao passo que o segundo foca a validação das variáveis globais (variáveis de resposta). Na validação interna identifica-se, primeiramente, se os modelos estocásticos (modelos de regressão) estimam as produtividades horárias e qualidades na ordem de grandeza esperada. Esse é um procedimento de baixo rigor. Recomenda-se que a média e o desvio padrão das variáveis que são estimadas através de modelos estocásticos sejam comparados em relação aos valores médios e desvio padrão observados no mundo real. Discrepâncias elevadas entre esses valores podem indicar erros de parametrização ou de configuração do modelo computacional. A segunda etapa da validação interna certifica que a taxa de produção e as qualidades transformadas no sistema comportam-se como no sistema real. Para tanto, testes estatísticos são realizados para comparar os dados reais com os dados simulados, conforme detalhado na Seção 2.4.2.

Independente do teste estatístico utilizado para testar a validade interna do modelo, é preciso obter uma amostra de dados simulados. Para determinar o número de replicações necessárias, recomenda-se o processo iterativo apresentado por Law e Kelton (1991) e detalhado na Seção 2.4.2.

Com a definição do número de replicações necessárias para uma dada variável de interesse, calcula-se a média e o desvio padrão dessa variável. Tais parâmetros são então comparados, através de técnicas estatísticas, com um valor de referência, que é o valor real



observado para a variável, ou ainda, comparados em relação a uma amostra de valores reais. Caso o valor simulado seja estatisticamente diferente do dado real, utilizam-se fatores de ajustes nos modelos de regressão para corrigir esse erro. O uso dos fatores justifica-se porque os modelos estocásticos estimados através de modelos de regressão, por exemplo, não apresentam um ajuste perfeito em relação aos dados reais. Em outras palavras, os modelos estocásticos (modelos de regressão) não representam 100% das variações<sup>77</sup> dos dados reais.

O segundo estágio da validação consiste em avaliar as variáveis de resposta do sistema. Testes estatísticos também podem ser conduzidos nesse momento. Diferente da validação do primeiro estágio, que assegura que os modelos matemáticos calculam os valores observados no mundo real, a segunda fase preocupa-se basicamente em garantir que o modelo represente a produção de pelota, em termos de massa, igual àquela desempenhada pela cadeia produtiva na realidade. Portanto, o segundo estágio preocupa-se em garantir que o volume de pelota produzido em um dado período de tempo seja replicado pelo modelo computacional.

Ao final da terceira fase do Artefato, o modelo computacional representa o sistema de produção e de manufatura. O modelo está apto para a condução de experimentos no sistema de produção e de manufatura para a análise de diferentes configurações visando a melhoria ou a ampliação do sistema real.

#### 5.2.4 Utilização do modelo

A utilização do modelo, num sentido amplo, encontra-se inserida no processo decisório da organização. No entanto, num primeiro momento, deixa-se de lado o processo decisório que envolve inter-relacionamentos entre os sistemas social, gerencial e técnico. A presente fase prevista no Artefato dedica-se a explicitar as questões técnicas relacionadas a condução de experimentos e a resultados confiáveis a partir do modelo.

Realizada a ressalva, a quarta fase do método consiste em utilizar o modelo computacional para realizar experimentos e compreender o potencial desempenho do sistema em detrimento de alterações do *design* ou de políticas de operação do processo produtivo. A literatura de simulação recomenda o uso da técnica de planejamento de experimentos<sup>78</sup> para avaliar, dentre distintos cenários, aquele que resulta em melhor desempenho. Em linhas gerais o uso do simulador consiste em:

---

<sup>77</sup> Para o caso de modelos fundamentais este tipo de discrepância não são observadas.

<sup>78</sup> Planejamento de experimento é uma técnica estatística que auxilia na identificação dos fatores (variáveis) que tem maior impacto no desempenho do sistema. (ROBINSON, 2004).

- Definir o(s) cenário(s) a serem simulados (experimentos);
- Delinear o planejamento de experimentos;
- Determinar o número de rodadas necessárias (tamanho de amostra);
- Rodar as variações dos cenários, conforme delineamento de experimento;
- Analisar os resultados;
- Documentar os resultados das análises.

Os passos apresentados anteriormente referem-se ao procedimento recomendado pela literatura sobre simulação, representada por autores como Law e Kelton (1991), Banks (1998), Hillier e Lieberman (2013) e Robinson (2004), para análise de cenários. Cenários isolados certamente podem ser simulados no modelo computacional, desde que o número de rodadas mínimas seja estipulado.

Todo o esforço dedicado ao desenvolvimento de um modelo computacional que lida com a degradação e a variabilidade das qualidades da matéria-prima e que representa o desempenho global do sistema em termos de produtividade e qualidade do produto, somente se justifica se o modelo for efetivamente utilizado para suportar decisões relevantes na organização.

O esforço empenhado até este momento tem como objetivo central sugerir um artefato para modelar a degradação. Apesar de não ser tratado neste estudo, o processo de tomada de decisão na organização é relevante por considerar as percepções dos usuários e dos tomadores de decisão em relação ao modelo computacional. Essas percepções devem ser observadas, registradas e servir como retroalimentação para as melhorias no modelo de simulação.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ARTEFATO PROPOSTO

O Artefato apresenta um método para construção de modelos de simulação baseado nas proposições existentes na literatura. Dessa forma, o método avança algumas discussões na literatura sobre modelagem e simulação:

- Primeiro: integra abordagens *soft* para compreensão do sistema e auxílio na modelagem conceitual;

- Segundo: avança da modelagem conceitual focada para a modelagem da qualidade e produtividade;
- Terceiro: propõe um tratamento dos dados que possibilita a modelagem conjunta da qualidade e da produtividade, bem como a representação do problema da degradação.

O Artefato pode ser generalizável a outros contextos, apesar de ter sido desenvolvido para a área de mineração. O método proposto auxilia no desenvolvimento de modelos de simulação que tem o desempenho do sistema atrelado à produtividade e à qualidade do produto e que consideram o fenômeno da degradação da matéria-prima e os impactos provocados pela variabilidade da matéria-prima no controle do sistema produtivo. A abordagem proposta pode ser aplicada a outras indústrias que exploram recursos naturais, com baixa necessidade de adaptações nas etapas estipuladas. Alguns conceitos apresentados, como o mecanismo proposto para modelagem da variabilidade, podem ser extrapolados e implementados em diferentes situações como, por exemplo, quando há variação de uma ou mais características ao longo do tempo.

O resultado final do Artefato apresentado é um modelo de simulação computacional que representa, através de expressões matemáticas e distribuições de probabilidade, o comportamento estocástico, dinâmico e integrado de uma cadeia produtiva de minério de ferro. O método sugerido visa construir um modelo computacional para uso contínuo nos processos decisórios de uma organização. Nesse sentido, o modelo é compreendido como um sistema de suporte a decisões de diferentes tipos. Primeiramente, suporta decisões de investimento. Num segundo momento, por estimular a compreensão de questões técnicas do sistema de manufatura e de produção, suporta decisões operacionais (por exemplo, definir momentos para as alterações de processo). Em terceiro lugar, suporta decisões relacionadas à gestão do processo e da empresa (por exemplo, modificar regras de manutenção preventiva e avaliar os resultados técnicos obtidos ou ainda modificar a sequência de extração do minério e avaliar o potencial desempenho do sistema). O modelo resultante do método proposto neste capítulo viabiliza as análises de curto, médio e longo prazo. Destaca-se que, num cenário de curto prazo (melhorias/alterações no processo cuja efetividade prevista ocorre em tempo inferior a um ano), não há a necessidade de tratar a degradação. Já para diagnósticos de médio e longo prazo é necessário compreender e considerar a degradação da qualidade da matéria-prima.

O capítulo a seguir descreve a empresa mineradora que originou a proposição do Artefato descrito nesta seção. Além disso, apresenta o desenvolvimento do modelo de simulação no caso estudado a partir do Artefato representado na Figura 30.

## **6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NO CASO ESTUDADO A PARTIR DO ARTEFATO**

Este capítulo descreve o desenvolvimento do modelo de simulação, em um caso real, a partir do Artefato detalhado no capítulo anterior. Inicialmente, descreve-se a empresa na qual o Artefato foi aplicado e, a seguir, a descrição do desenvolvimento do modelo de simulação. Por último, promove-se uma discussão sobre o modelo desenvolvido no caso em questão.

### **6.1 DESCRIÇÃO DO CASO**

A motivação para o desenvolvimento da abordagem proposta nesta tese surgiu, além das questões já explicitadas na Introdução e no Capítulo 2, de observações dos desafios enfrentados pelas mineradoras, como a Samarco, para avaliar de forma integrada e antecipada os potenciais efeitos de ações no sistema de produção e de manufatura.

A Samarco, fundada em 1977, é uma mineradora brasileira controlada pela Vale e BHP Billiton em partes iguais. Os recursos naturais da empresa, as minas, situadas no complexo de minas de Alegria, no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, apresentam minerais de baixo teor de ferro (teor de ferro inferior a 62%). A mineradora transforma tal matéria-prima em pelota de minério de ferro. (SAMARCO, 2011).

A capacidade produtiva anual da Samarco é de 22,25 milhões de toneladas de pelotas de ferro (pelotas para alto forno e pelotas para redução direta). Toda a produção é comercializada no mercado transoceânico, para 19 países, o que faz da empresa a segunda maior exportadora de pelota de ferro do mundo. A cadeia produtiva da Samarco é verticalizada, integrada e semicontínua, vai da mina até o porto, passando por operações de extração, concentração e aglomeração.

Segundo informações divulgadas nos demonstrativos econômico-financeiros da empresa, foram investidos 2,2 bilhões de dólares, entre 2004 e 2010, em melhorias e expansão de operações. Recentemente, em 2011, os acionistas controladores da empresa aprovaram o investimento de três bilhões de dólares para expansão da capacidade produtiva em 35%. O projeto de aumento da produção em oito milhões de toneladas de pelotas por ano está previsto para entrar em operação no final de 2013. (SAMARCO, 2011).

Os produtos da Samarco são a pelota de ferro (*iron pellet*) e os finos (*pellet feed*). As pelotas de ferro são insumos em duas rotas produtivas de aço da indústria siderúrgica: a rota de redução direta e a rota de alto-forno. As características da pelota para cada rota são diferentes e, portanto, as pelotas são segmentadas em dois produtos distintos: a pelota para redução direta (*Pellet Direct Reduction - PDR*) e a pelota para alto forno (*Pellet Blast Furnace - PBF*)<sup>79</sup> (SAMARCO, 2011).

A cadeia produtiva da Samarco é composta por três grandes operações, que são: i) extração; ii) concentração; e iii) aglomeração. As operações de beneficiamento (concentração e aglomeração) são necessárias devido à baixa qualidade do minério produzido. Geograficamente, as operações de extração e concentração localizam-se no município de Mariana, no Estado de Minas Gerais, e a operação de aglomeração em Anchieta, no Estado do Espírito Santo. O beneficiamento torna o sistema de produção e de manufatura mais complexo quando comparado com os sistemas das mineradoras australianas, cujo processo compreende basicamente as operações de extração (extração, britagem e peneiramento do minério). (EVERETT, 1996, 2001; HOWARD; CARSON; EVERETT, 2005).

A extração tem como função a remoção do minério das minas com um conjunto de características químicas, físicas e mineralógicas adequadas às etapas a jusante do sistema produtivo. A Samarco opera atualmente duas minas a céu aberto no Complexo das Minas de Alegria, em Mariana, Minas Gerais. Nas minas, encontram-se sete lavras, locais onde a extração do minério é executada, denominadas de Alegria 1, Alegria 2, Alegria 3, Alegria 4, Alegria 5, Alegria 6, e Alegria 9. A extração é realizada com auxílio de equipamentos de grande porte como escavadeiras *bulldozer* e *lokotracks*. O transporte do minério extraído (ROM) até as pilhas de homogeneização (das qualidades do minério) é realizado por um sistema de correias transportadoras fixas e complementado por caminhões. Existem, no sistema produtivo da Samarco, duas pilhas de homogeneização que fornecem minério para as operações de beneficiamento.

O ROM é transportado, a partir dos sistemas de longa distância de correias (cerca de quatro quilômetros), para duas instalações, chamadas de britagem 1 e 2, onde é esmagado em britadores e peneirado em peneiras vibratórias. A britagem objetiva a regularização do tamanho das partículas do minério (as partículas devem ser menores do que 12,5 milímetros) para o subsistema de concentração. A britagem constitui um sistema fechado, no qual as partículas grandes são reprocessadas até atingirem o tamanho desejado. O material peneirado

---

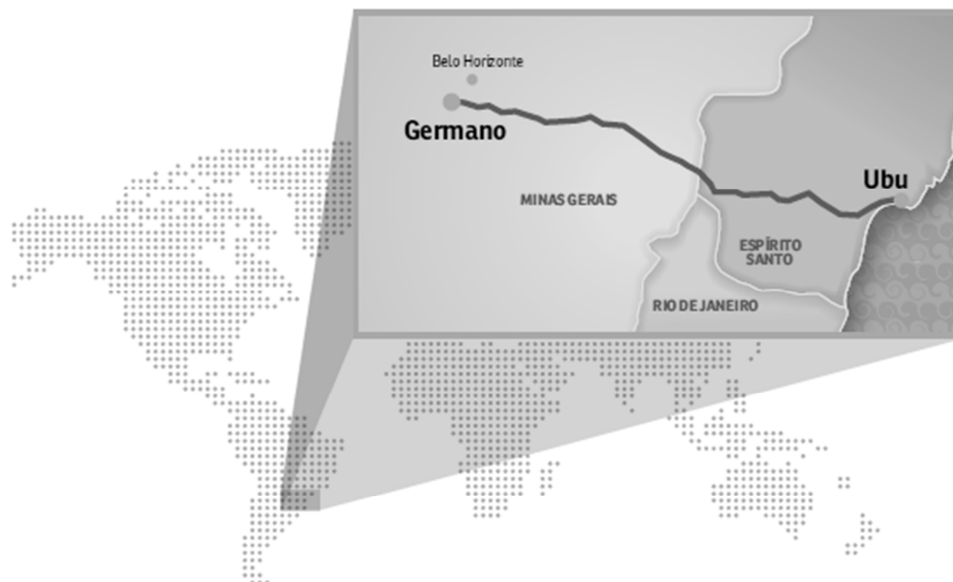
<sup>79</sup> A empresa refere-se aos seus produtos como PDR e PBF, siglas em inglês. Essas siglas são utilizadas ao longo do texto ao se fazer referência aos diferentes produtos.

é armazenado em uma pilha, localizada imediatamente antes do início da fase de concentração.

As duas usinas de concentração objetivam elevar o teor de ferro do ROM, a partir da remoção de elementos e minerais indesejados, como a sílica. Na usina de concentração, o ROM é processado por um conjunto de etapas, que são: moagem primária, deslamagem, flotação, moagem secundária e espessamento. (SAMARCO, 2011). A etapa de moagem primária é executada por moinhos de bolas que realizam a quebra das partículas do minério em pedaços menores. O rompimento do minério visa separar os pedaços que contêm ferro dos que contêm impurezas. A operação de deslamagem é desempenhada por um conjunto de ciclones, que são utilizados para remover do processo as partículas ultrafinas (menores do que 10 milímetros), tanto as que contêm ferro como as que contêm minerais indesejados. Essas partículas são rejeitos gerados pelo processo e, portanto, são depositadas na bacia de rejeitos. É importante destacar que uma parcela das partículas ultrafinas que são rejeitadas no processo apresenta ferro em sua composição, mas o seu tamanho não pode ser processado nas operações subsequentes do processo. O envio de partículas com ferro para a bacia de rejeitos é uma limitação tecnológica da operação de deslamagem. Na sequência, tem-se a flotação, que é a etapa responsável pela separação das partículas que contêm ferro daquelas que não o contêm. A moagem secundária tem como função regularizar a granulometria das partículas para otimizar o bombeamento do concentrado através do mineroduto. A última etapa da concentração é o espessamento, procedimento que remove o excesso de água adicionado ao longo do processo produtivo. O produto do processo de concentração, chamado de concentrado, é uma lama composta por, aproximadamente, 70% de minério e 30% de água. Esse material é armazenado em tanques. O teor de ferro do concentrado é, em média, de 65%. (SAMARCO, 2011).

As instalações da Samarco em Mariana/MG e Ubu/ES são interligadas por dois minerodutos com extensão de aproximadamente 400 quilômetros. Em Ubu, a Samarco possui três usinas responsáveis pelo processo de aglomeração, processo pelo qual o concentrado é submetido às etapas de filtragem, prensagem, mistura, pelotização e queima. (SAMARCO, 2011). A Figura 31 apresenta a localização geográfica das unidades industriais da Samarco.

Figura 31: Localização geográfica das plantas industriais da Samarco e o trajeto dos minerodutos



Fonte: Samarco (2011)

A etapa de filtragem tem a finalidade de reter o excesso de água existente no material recebido da unidade de Mariana. Esse processo reduz o teor de umidade para cerca de 10% do total da massa do concentrado. Após a filtragem do concentrado nos filtros, o material produzido nessa etapa recebe a denominação de *pellet feed*. O *pellet feed* é a matéria-prima das etapas subsequentes da cadeia produtiva da Samarco para a produção de pelota de ferro e, também, é um produto que pode ser comercializado para a sinterização na indústria siderúrgica. A etapa seguinte do subsistema de aglomeração é a prensagem, etapa na qual o *pellet feed* é prensado por dois rolos pressionados entre si. O objetivo dessa etapa é elevar a superfície específica das partículas, característica benéfica para o restante do processo. A etapa mistura tem a finalidade de adicionar insumos como o carvão, os aglomerantes (bentonita ou aglutinantes orgânicos) e o calcário ao *pellet feed* e misturar esse composto. Esta mistura é necessária para facilitar a fase de aglomeração e para conceder as características desejadas à pelota de ferro. A etapa de pelotização consiste em criar esferas a partir da mistura, através do uso de discos de pelotização. Essas esferas são chamadas de pelotas verdes ou cruas. As pelotas verdes, que se enquadram na faixa de tamanho entre 8 e 18 milímetros, são queimadas em um forno de indução, produzindo as pelotas de ferro. Os principais produtos da Samarco são as pelotas do tipo PBF e PDR. (SAMARCO, 2011). As



pelotas de ferro são armazenadas em um pátio de estocagem antes de serem embarcadas nos navios. Toda a produção é alocada em navios a partir do porto de Ubu, de propriedade da Samarco, com capacidade de carregamento de dois navios simultaneamente.

A qualidade do produto sob a ótica da empresa e dos seus clientes, conforme conceituado, refere-se ao conjunto de especificações técnicas (propriedades físicas e químicas da pelota de ferro) estabelecidas com o cliente. No caso da Samarco, essas especificações são: i) teor de ferro – característica química (percentual de ferro contida na pelota); ii) taxa de compressão – característica física (a ISO 4700:2007 especifica um método que fornece uma medida da carga de compressão suportada pela pelota até a sua quebra); iii) taxa pelota/finos menor que 6,3 mm – característica física (percentual de partículas com tamanho inferior a 6.3mm. Esse percentual não deve exceder 3%) e; iv) taxa tamboramento – característica física (a ISO 3271:2007 especifica um método que fornece uma medida relativa para a avaliação da resistência de minérios de ferro à degradação do tamanho por impacto e abrasão). (SAMARCO, 2011).

Esta seção apresentou o caso e descreveu resumidamente o sistema de produção e de manufatura da Samarco. A seção a seguir expõem as motivações para a aplicação do Artefato no caso apresentado.

### **6.1.1 Motivação para avaliação do método na empresa estudada**

Os desafios para a modelagem de sistemas na indústria de propriedade são observados no sistema de produção e manufatura da Samarco. Tais desafios, detalhados no Capítulo 3, encontram-se resumidos a seguir:

- O processo semicontínuo e em batelada;
- O sistema de manufatura de mineradoras que processam minério de baixa grade é complexo;
- As características intrínsecas da matéria-prima, a saber, a degradação e a variabilidade, afetam negativamente a performance do sistema;
- Os sistemas de controle são insuficientes para monitorar a qualidade e a produtividade dos sistemas. (HODOUIN; JÄMSÄ-JOUNELA, 2001). Isso acarreta a intervenção humana no controle do processo para corrigir anomalias

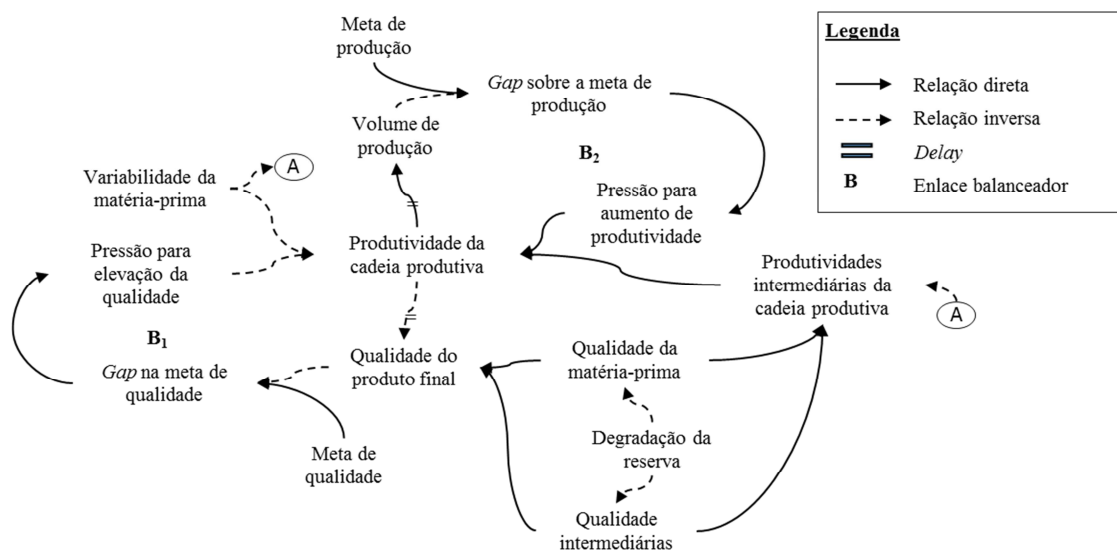
na qualidade intermediária e/ou qualidade do produto, ou então, para elevar a produtividade horária em busca do atingimento de metas;

- As características dos produtos intermediários e finais alteram-se ao longo do sistema de manufatura e são diretamente dependentes da qualidade da matéria-prima;
- A qualidade do produto tem impacto na produtividade e vice-versa.

A cadeia produtiva da Samarco é um processo semicontínuo que produz dois produtos principais: PBF e PDR, conforme detalhado na seção anterior. Ambas as pelotas são produzidas nas mesmas instalações industriais e cada uma apresenta diferentes especificações de qualidade, especialmente no que diz respeito ao teor de sílica. A complexidade da cadeia produtiva da Samarco surge a partir das interações de *feedback* entre os componentes do sistema (por exemplo, qualidade e produtividade) e a dinâmica do sistema. (STERMAN, 2000).

A variabilidade e a degradação são características intrínsecas observadas na cadeia de produção de minério de ferro da Samarco. Dentro do contexto de elevada variabilidade e degradação nas qualidades da matéria-prima, há uma dinâmica que pondera as taxas de produção e as qualidades da pelota de ferro. Para explicitar esse comportamento, foi desenvolvida uma estrutura sistêmica, com o intuito de representar, em um diagrama de relações causais, as circularidades e a dinâmica das relações entre a produtividade do sistema e a qualidade da pelota. A construção dessa estrutura sistêmica foi possível a partir de observações do comportamento do sistema produtivo.

Figura 32: Estrutura sistêmica expondo o trade-off entre a qualidade do produto e a produtividade da cadeia produtiva



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 32 ilustra, através de uma estrutura sistêmica, o *trade-off* entre a qualidade do produto e a produtividade da cadeia identificada em empresas de mineração. Com base nesta estrutura sistêmica um conjunto de relações de causa e efeito pode ser observado. O primeiro enlace (B1) indica que quanto maior a produtividade da cadeia, em um dado tempo, menor será a qualidade do produto final. Isso ocorre porque a operação acelera a taxa de produção de pelota de ferro para atender as metas de produção, dado que o mercado desse produto, desde 2004, exceto no período de pós-crise de 2008, apresenta uma situação de demanda maior do que a de oferta. (HUMPHREYS, 2010).

A consequência de acelerar a produção gera uma diferença entre a qualidade estipulada pelo mercado consumidor (conjunto de parâmetros estabelecidos em contrato entre o cliente e a Samarco) e a qualidade gerada pelo sistema de produção. As qualidades da pelota de ferro podem ser corrigidas a partir do emprego de um conjunto de ações no sistema de manufatura como, por exemplo: i) a redução das taxas de alimentação de *pellet feed* nas usinas de pelotização e/ou; ii) a utilização de minério e, conseqüentemente, de *pellet feed* com melhores qualidades para alimentar o sistema de manufatura. Quanto maior a diferença entre a qualidade desejada e a qualidade observada na pelota de ferro, maior será a pressão para aumentar a qualidade do produto, a qual, por sua vez, força uma redução da produtividade da cadeia produtiva. Um segundo enlace (B2) indica que quanto maior a produtividade da cadeia após uma defasagem de tempo, maior é o volume de produção de pelotas de ferro, o que assegura uma menor distância (*gap*) entre as metas de produção (desejado) e a produção realizada. Quanto menor for a diferença de produção, menor será a pressão para aumentar a produtividade, e conseqüentemente, menor é a pressão para atingir as metas de produção, isso porque o enlace

B1 age no sentido de melhorar a qualidade das pelotas de ferro produzidas. Observa-se no mapeamento das relações entre produtividade e qualidade que há uma dinâmica entre atingir as metas de produção de pelota de ferro e atender as metas de qualidade. Há dois enlaces que explicitam as decisões operacionais realizadas pelos gestores do sistema de produção e de manufatura: alternância de períodos de elevada taxa de produção em detrimento de baixa qualidade do produto e momentos de baixa produtividade e elevada qualidade do produto.

As variabilidades nas qualidades da matéria-prima afetam negativamente a produtividade global e intermediária (operações intermediárias) da cadeia produtiva, conforme exposto pela literatura. Além de afetar a produtividade da cadeia, a variabilidade impacta a qualidade do produto final. Tal fenômeno gera recursão e *feedback* na cadeia produtiva porque, quando há desvios nas características monitoradas ao longo das transformações realizadas no sistema de manufatura, uma série de medidas reativas necessitam ser conduzidas pelos gestores das operações. Se, por exemplo, os teores de sílica do minério concentrado na planta de concentração não atendem as especificações, o material é moído em pedaços menores, acarretando maior geração de rejeitos e perdas no sistema.

Por fim, o efeito da degradação das reservas afeta negativamente as qualidades da matéria-prima e as qualidades intermediárias que, por sua vez, impactam a qualidade do produto final e a produtividade do sistema. O problema da degradação pode ser observado a partir de um horizonte de tempo longo, como um ano ou mais, diferentemente das demais relações explicitadas na estrutura sistêmica, que ocorrem em intervalo de tempo muito curto (horas).

A seção a seguir descreve o desenvolvimento do modelo de simulação a partir do Artefato apresentado no Capítulo 5, que de alguma forma endereça as questões discutidas anteriormente, no caso estudado.

## 6.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE SIMULAÇÃO ATRAVÉS DO ARTEFATO PROPOSTO NA SAMARCO

Nesta seção é descrito o desenvolvimento do modelo de simulação a partir do Artefato apresentado no capítulo anterior. Portanto, a seguir são descritas todas as etapas previstas no método proposto. Ao final, chega-se ao modelo computacional destacado com um dos objetivos específicos desta pesquisa.

### 6.2.1 Compreensão do sistema

Conforme previsto no Artefato proposto, inicialmente foi constituído um Grupo de Trabalho (GT) composto por especialistas no método sistêmico, especialistas das operações da Samarco, usuários do modelo computacional e especialistas em modelagem e simulação. O papel central do pesquisador consistiu na construção teórica descrita no Capítulo 5 (que sustenta a construção do modelo de simulação no caso estudado). Além disso, o pesquisador desempenhou o papel de coordenação do projeto de pesquisa, bem como conduziu as etapas de modelagem e simulação previstas no Artefato proposto (Capítulo 5). O GT reuniu-se em oito momentos distintos ao longo do desenvolvimento do modelo computacional, sendo dois desses encontros realizados para definição do escopo do projeto, discussão dos objetivos do trabalho e construção da estrutura sistêmica.

O primeiro encontro do Grupo de Trabalho foi utilizado para a construção da primeira versão da estrutura sistêmica e o segundo para a validação da estrutura desenvolvida na primeira reunião. Entre o primeiro e segundo encontros, o grupo de pesquisa digitalizou o mapeamento realizado no encontro 1. O Quadro 7 detalha os dois primeiros encontros realizados para a construção da estrutura sistêmica.

Quadro 7: Detalhes dos encontros realizados para a construção da estrutura sistêmica no caso estudado

<b>Encontro</b>	<b>Duração</b>	<b>Grupo de Trabalho (GT)</b>	<b>Resultado</b>
1	Dois dias	Três especialistas em pensamento sistêmico (Unisinos); Um especialista em mina (extração); um especialista em concentração; um especialista em aglomeração; três usuários do modelo	Primeira versão da estrutura sistêmica
2	Um dia	Três especialistas em pensamento sistêmico (Unisinos); Um especialista em mina (extração); um especialista em concentração; um especialista em aglomeração; três usuários do modelo	Estrutura sistêmica consolidada e validada

Fonte: Elaborado pelo autor

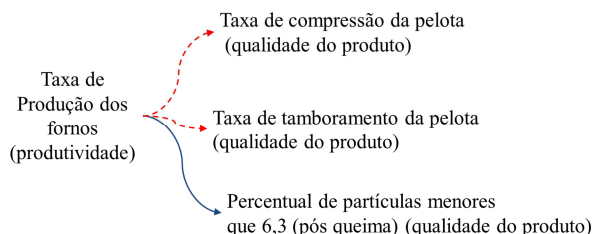
Na primeira reunião, inicialmente, foi declarado ao grupo o objetivo da pesquisa: aplicar o Artefato para modelar a cadeia produtiva da Samarco, com a intenção de observar o desempenho da cadeia produtiva em termos de qualidade da pelota de ferro e de produtividade em face da degradação das qualidades da matéria-prima. A dinâmica do primeiro encontro consistiu em reunir os pesquisadores e especialistas da Samarco em uma mesa redonda e, sobre uma folha de papel em branco, iniciar a construção da estrutura

sistêmica. A realização desse mapeamento teve a duração de dois dias e contou com a participação das pessoas descritas no Quadro 7.

Inicialmente, o condutor do grupo (pesquisador n1) estimulou os especialistas da Samarco e os usuários do modelo a apontarem as principais variáveis para medir o desempenho da cadeia produtiva (variáveis de resposta) em termos de qualidade e produtividade. As variáveis citadas pelos especialistas da Samarco para compor a qualidade do produto foram: i) taxa de compressão da pelota; ii) taxa de tamboramento da pelota e; iii) percentual de partículas menores que 6,3mm. Já a variável eleita para medir a produtividade da cadeia produtiva foi a produtividade (taxa de produção) horária dos fornos (toneladas de pelotas/hora). Essas, após consenso do grupo, foram definidas como as variáveis de interesse do modelo desenvolvido e foram escritas na folha de papel.

A partir das variáveis de interesse, o condutor do grupo indagou o especialista do processo de aglomeração, no caso da Samarco de pelotização, sobre quais são as relações entre as quatro variáveis listadas. A Figura 33 apresenta as quatro variáveis de desempenho do sistema de manufatura da Samarco<sup>80</sup> e as suas relações de causa-e-efeito, conforme a linguagem sistêmica apresentada na Seção 2.3.

Figura 33: Relação de causa-e-efeito entre as variáveis de desempenho do sistema de manufatura da Samarco



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das relações entre as variáveis de desempenho do sistema de produção, o condutor do grupo solicitou aos especialistas da Samarco para apontarem as variáveis, sejam elas relacionadas a características da matéria-prima (qualidade), a operação do processo, a adição de insumos, a interferência dos operadores, que afetam diretamente as variáveis de

<sup>80</sup> Vale destacar que o teor de ferro e o teor de sílica são dois parâmetros de qualidade de suma importância. Porém, os especialistas da Samarco assumem que a pelota produzida atende as especificações de teores de ferro e sílica. Isso porque o processo de pelotização (Ubu) não é capaz de interferir nos teores de ferro e sílica, então é possível assumir que a pelota de ferro vai apresentar teores de ferro e sílica de acordo com o material que é recebido do processo de concentração (Germano). A preocupação em avaliar e controlar estes parâmetros de qualidade é responsabilidade da planta de concentração e são avaliados, desta forma, somente na saída do processo de concentração. Para a valoração do preço da pelota de ferro se faz necessário conhecer o teor de ferro da pelota, pois o preço é definido em função do teor de ferro apresentado pela pelota.

desempenho. A relação direta e/ou inversa entre as variáveis apontadas e as variáveis de desempenho também foram extraídas dos especialistas.

O processo de construção da estrutura sistêmica seguiu a dinâmica de identificar as novas variáveis que afetam as variáveis já mapeadas em uma interação anterior, até chegar às variáveis iniciais do problema analisado, no caso, a taxa de produção dos equipamentos da mina e a qualidade do minério extraído (qualidade da matéria-prima). Em outras palavras, percorre-se toda o sistema de manufatura da qualidade do produto e produtividade até chegar às qualidades da matéria-prima e taxas de produção da mina.

A partir da primeira versão da estrutura sistêmica observou-se que:

- O conhecimento detalhado sobre uma operação de processamento específica tende a se concentrar nos especialistas da área em questão. Um especialista em pelotização, por exemplo, tende a não conhecer os detalhes das relações de causa-e-efeito apontadas por um especialista em concentração;
- As qualidades do minério extraído das minas são transformadas ao longo do sistema de manufatura e são as novas características agregadas ao material que afetam as qualidades de interesse na estrutura – compressão, tamboramento e perceptual de -6,3 mm;
- Há outras variáveis de qualidade que se modificam ao longo da cadeia produtiva. O teor de sílica, por exemplo, reduz-se após a etapa de concentração.

No final do primeiro encontro, obteve-se o desenho da primeira versão da estrutura sistêmica, em papel. Entre as duas primeiras reuniões, houve uma semana de preparação do grupo de pesquisa. Esse período foi utilizado para digitalizar a estrutura sistêmica com o auxílio do *software* MS Power Point<sup>81</sup> e para analisar documentos técnicos disponibilizados ao longo do primeiro encontro.

O segundo encontro foi usado exclusivamente para a validação da estrutura sistêmica. Durante a validação, novas relações foram adicionadas à estrutura, assim como relações redundantes ou equivocadas foram eliminadas. O resultado final pode ser observado no Anexo B. O termo variável é utilizado com frequência ao longo do texto. Portanto, cabe

---

<sup>81</sup> O uso do *MS PowerPoint* é importante para organizar a estrutura e auxiliar o processo de apresentação do trabalho para o grupo.

classificar as variáveis representadas na estrutura sistêmica em diferentes classes, o que pode ser visualizado no Quadro 8.

Quadro 8: Classes de variáveis mapeadas ao longo da construção da estrutura sistêmica (continua)

Classe de variável	Descrição	Exemplo
Taxa de produção ou alimentação (produtividade)	Esta classe agrega as variáveis que representam taxas de alimentação ou de produção de uma determinada etapa da cadeia produtiva	Taxa de produção das minas; taxa de alimentação das britagens
Disponibilidade de equipamentos	Esta classe contempla as variáveis que indicam a disponibilidade de um equipamento existente na cadeia produtiva	Motores, correias, ciclones.
Parâmetros operacionais	Esta classe apresenta as variáveis contendo informações de parâmetros do processo	Pressões, temperaturas.
Qualidades da matéria-prima	Esta classe contempla as variáveis de qualidade do ROM. Essas qualidades (mineralógica, química e física) são intrínsecas ao minério extraído das reservas	Teor de sílica do ROM, teor de ferro do ROM
Qualidades do concentrado	Esta classe agrupa as variáveis de qualidade do concentrado. Essas qualidades são mineralógica, química e física e, geralmente, transformam-se ao longo do processo de concentração e dependem das qualidades do ROM	Teor de sílica do concentrado, superfície específica das partículas do concentrado
Qualidades da pelota de ferro	Esta classe agrupa as variáveis de qualidade da pelota de ferro queimada. Essas qualidades são mineralógica, química e física e, geralmente, transformam-se ao longo do processo de aglomeração.	Taxa de compressão, taxa de tamboramento
Adição de insumos	Esta classe de variáveis agrega as variáveis que apontam as taxas de adição de um insumo em um ponto da cadeia produtiva	Consumo de aglomerante

Fonte: Elaborado pelo autor

(continua)

## 6.2.2 Modelo conceitual do sistema

A modelagem conceitual do sistema produtivo da Samarco ocorreu após a etapa de validação da estrutura sistêmica. Inicialmente, o pesquisador estudou a estrutura desenvolvida e os documentos internos da empresa que mostravam detalhadamente o fluxo produtivo da organização<sup>82</sup>.

Os ideais da abordagem *soft*, por meio do pensamento sistêmico de construção de consenso e de aprendizagem em grupo, foram balizadores desta etapa, conforme previsto no Artefato. A elaboração do modelo conceitual se deu em dois estágios. O primeiro promoveu um rabisco do fluxo do processo, contendo detalhes e regras das operações, o que foi realizado com os especialistas de cada etapa do sistema de manufatura. Nesse estágio foram

<sup>82</sup> Por motivos de sigilo, os documentos da empresa estudada não são publicados no trabalho.

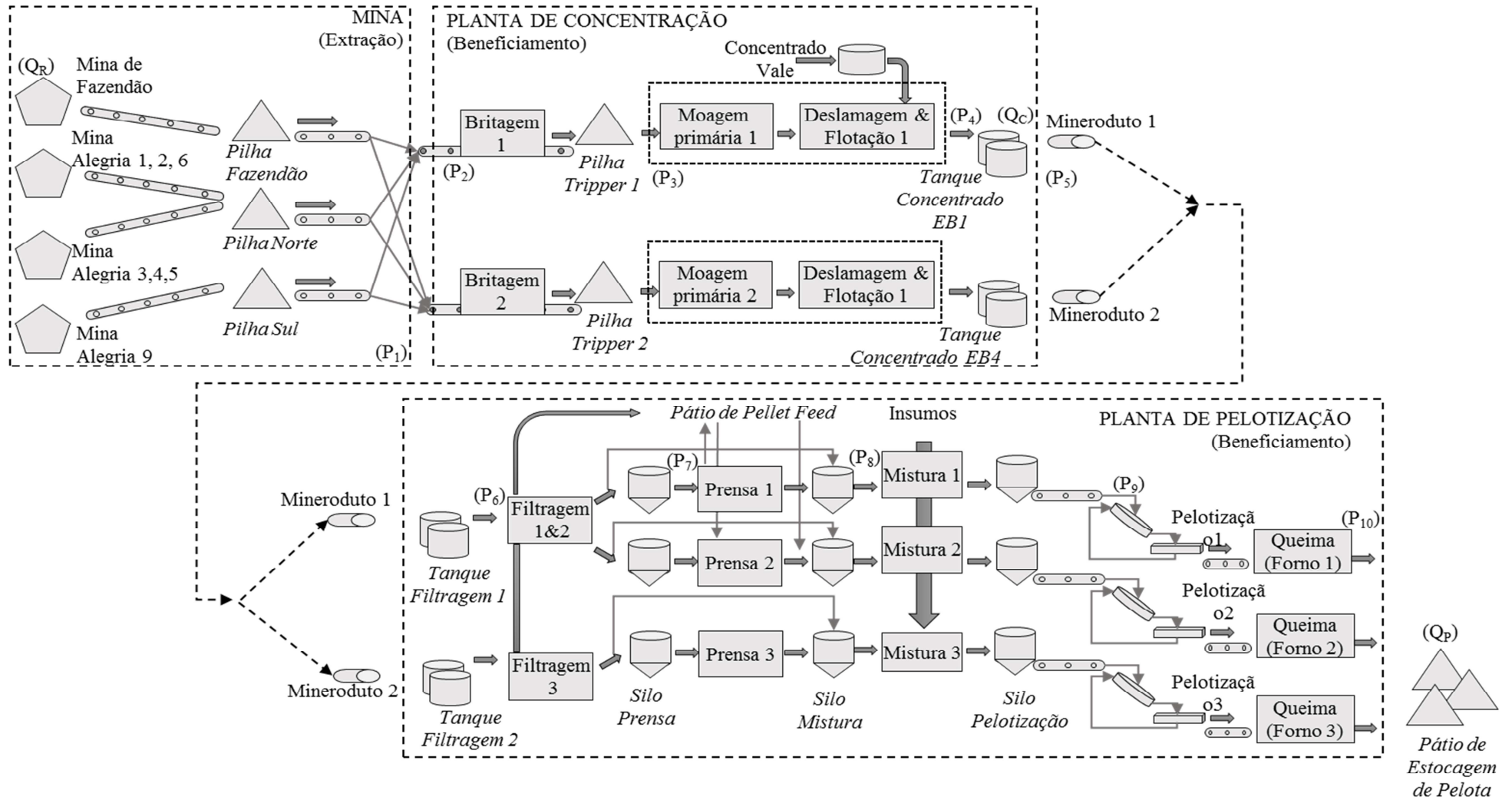


feitas visitas, com duração de dois dias, a cada uma das unidades da Samarco. Durante as visitas, foi desenvolvido um esboço do fluxo de processo e do modelo conceitual em folhas de papel, material depois transcrito para um ambiente eletrônico. O segundo estágio de validação consistiu em uma reunião de trabalho de um dia (segunda reunião de trabalho do grupo) com todas as pessoas listadas no Quadro 7 (especialista em simulação, especialista em operações, especialista de processo, usuário do modelo). Os fluxos, as regras e as operações detalhadas no primeiro estágio foram apresentados ao Grupo de Trabalho em um novo encontro, com a finalidade de identificar refinamentos e ajustes e, principalmente, de obter o consentimento em relação ao modelo conceitual do sistema. Nessa terceira reunião do grupo, os principais conceitos sobre modelagem e simulação de sistema foram apresentados, em especial a proposta de mecanismo para modelagem da variabilidade no contexto da degradação das qualidades da matéria-prima.

Um elemento importante definido no desenvolvimento do modelo conceitual diz respeito aos tipos de campanha que seriam representadas no modelo de simulação. O portfólio de produto da Samarco contempla pelo menos seis tipos de produtos das famílias de PBF e PDR, que variam suas características em relação ao teor de sílica e outras propriedades físicas e químicas. Dada a complexidade que seria inserida na modelagem para trabalhar com seis campanhas diferentes, optou-se por trabalhar com apenas duas: a campanha com teor de sílica normal (*Campaign Normal Silica - CNS*), que resulta na pelota PBF, e a campanha com baixo teor de sílica (*Campaign Low Silica - CLS*), que leva à produção de pelota PDR. Como as características da matéria-prima se alteram em função da campanha produzida, assim como a intensidade entre as relações explicitadas na Estrutura Sistêmica, é necessário estimar modelos estocásticos para cada campanha. Isso significa que deve haver um modelo estocástico para representar a taxa de produção de pelota na campanha CLS e um modelo para a campanha CNS.

O fluxo simplificado uniformizado pelo grupo para representar o sistema produtivo da Samarco no simulador encontra-se detalhado na Figura 35. Tal fluxo contempla a operação de extração, realizada em três minas a céu aberto, as operações de concentração, efetuadas em duas usinas de concentração, e as operações de aglomeração, executadas em três usinas.

Figura 34: Representação simplificada da cadeia produtiva consentida pelo grupo de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor

As operações de extração, conforme descrito anteriormente, encontram-se no Complexo das Minas de Alegria, em Mariana/MG. Nesse complexo, a extração ocorre em três locais fisicamente separados, denominados de Alegria 1,2 e 6; Alegria 3,4 e 5 e Alegria 9. Em cada uma dessas localidades, os equipamentos de extração são dispostos de modo a retirar e disponibilizar minério para as unidades de beneficiamento. Além do minério extraído de suas próprias reservas minerais, a empresa estudada compra minério de ferro da Mina de Fazendão, que pertence à Vale do Rio Doce. A representação lógica da operação de extração compreende as quatro fontes de minério descritas que armazenam o ROM em pilhas pulmão: o ROM vindo de Alegria 1,2 e 6 e Alegria 3, 4 e 5 é depositado na Pilha Norte; o ROM de Alegria 9 é armazenado na Pilha Sul e; o ROM de Fazendão é disponibilizado na Pilha Fazendão. A Figura 34 ilustra essa configuração. A quantidade de minério retirada de cada mina e transportada para a respectiva pilha pulmão, isto é, a produtividade horária das minas, é modelada a partir de modelos estocásticos. Nesses modelos a variável dependente (resposta) é a taxa de produção horária, explicada por um conjunto de variáveis que expressam a disponibilidade, a capacidade, e a utilização dos equipamentos que operam nas minas. A qualidade da matéria-prima, elemento importante na modelagem, compreende um conjunto de parâmetros que são o Teor de Ferro, o Teor de Sílica, o Teor de Alumina, o Teor de Fósforo, a Perda por Calcinação (PPC) e o Percentual de Hematita Especular.

A operação de concentração é dividida em três etapas de processamento, que são a etapa de britagem, a etapa de pré-moagem e moagem primária e a etapa de deslamagem e flotação. A britagem retira material das pilhas pulmão (Norte, Sul e Fazendão) com a função de reduzir o tamanho das partículas de minério. Após o processamento do ROM, ele é depositado em uma pilha chamada de *tripper*. A britagem 1 armazena o ROM na Pilha *Tripper* 1 e a britagem 2 deposita o ROM processado na Pilha *Tripper* 2. Há um modelo matemático que expressa a taxa de alimentação horária da britagem. Nessa etapa, o minério não ganha e nem perde massa. Assim, toda a matéria-prima que alimenta a britagem é depositada na pilha do *tripper*. O processamento do minério na etapa de britagem agrega ao material um novo parâmetro de qualidade, que é o percentual de 12,5 mm. Desta forma, há um modelo matemático que calcula o valor do percentual de 12,5mm que deve ser atribuído ao minério a cada hora. Os parâmetros de qualidade herdados da mina permanecem inalterados.

A segunda etapa de processamento é a pré-moagem e moagem primária, que visa fragmentar o minério através da separação das partículas que contêm ferro daquelas que

contêm impurezas. Essa operação recebe minério da pilha *tripper* e, após o processamento do material nos moinhos, o entrega para a etapa subsequente, que é a deslamagem e flotação. Não há perda ou ganho de massa na etapa de pré-moagem e moagem primária. Um modelo matemático é utilizado para indicar a taxa de alimentação horária do processo em questão. Durante o processamento de fragmentação do minério, ocorre a geração de partículas com tamanho indesejado. Dessa forma, um novo parâmetro de qualidade é observado, a saber, a Granulometria +100 *mesh*<sup>83</sup>. Além desse parâmetro, há outra variável monitorada, chamada de Grau de Liberação de Sílica<sup>84</sup>, que indica a eficiência da fragmentação das partículas do minério.

A última etapa da operação de concentração é a deslamagem/flotação, que tem como objetivo eliminar as partículas que contêm impurezas do processo. Essa operação recebe o minério processado na etapa de pré-moagem e moagem primária e, após o processamento em uma série de equipamentos, armazena o concentrado em tanques. Nesse processo há perda de massa, pois as partículas indesejadas são descartadas e enviadas para a bacia de rejeito. Já as partículas com ferro, chamadas de concentrado, seguem no processo produtivo. A representação da perda de massa, nessa operação, se dá através de um modelo matemático que expressa qual o percentual de massa que deve ser descartado para a bacia de rejeito e o que deve seguir no processo. Na presente etapa, um novo conjunto de atributos de qualidade é observado: Granulometria -325 *mesh*<sup>85</sup>; Granulometria +200 *mesh*<sup>86</sup>; Superfície Específica<sup>87</sup>; Teor de Ferro; Teor de Sílica; Teor de Alumina; Percentual de Sólidos; PPC; pH do Concentrado e; Hematita Especular. Conforme detalhado na Figura 34, na usina de Concentração 1 ocorre a inclusão do concentrado comprado da Vale do Rio Doce (VRD).

Conforme exposto na apresentação do processo produtivo da empresa, as etapas de concentração e aglomeração são interligadas por minerodutos. No modelo conceitual o mineroduto é representado por uma operação (duto) que retira concentrado dos tanques de

---

<sup>83</sup> A Granulometria +100 mesh representa o percentual de material retido em uma peneira cuja malha apresenta dimensões de 0,147 mm por 0,147 mm (100 mesh equivale a 0,147mm). A medição dessa variável se dá a partir da coleta de amostras de minério que são analisadas em laboratório. Essa medição indica o quão finas se encontram as partículas de minério após o processamento na pré-moagem e moagem primária. (LUZ et al., 2004).

<sup>84</sup> A variável Grau de Liberação de Sílica indica o percentual de partículas livres de sílica após o processamento nos moinhos. O cálculo do Grau de Liberação de Sílica ocorre em laboratório conforme o método de Gaudin. (LUZ et al., 2004).

<sup>85</sup> A variável Granulometria -325 mesh representa o percentual de material passante por uma peneira com malha de dimensões de 0,044 mm. (LUZ et al., 2004).

<sup>86</sup> A variável Granulometria +200 mesh representa o percentual de material retido por uma peneira com malha de dimensões de 0,074 mm. (LUZ et al., 2004).

<sup>87</sup> A Superfície Específica é a razão entre a área da partícula e a sua massa. (LUZ et al., 2004).

concentrado e armazena nos tanques de filtragem, na outra extremidade. Para tanto, há um modelo matemático que calcula a taxa de bombeamento horária. Não há perda de massa nesse processo e não há transformações em nenhum atributo de qualidade.

A operação de aglomeração é desdobrada em cinco etapas de processamento, que são a filtragem, a prensagem, a mistura, a pelotização e a queima. A primeira etapa, a filtragem, visa eliminar a água adicionada ao concentrado para viabilizar o bombeamento de Mariana para Ubu. O concentrado é retirado do tanque da filtragem e, após processado, é armazenado nos silos da prensa. A partir desse momento, o material passa a ser chamado de *pellet feed*<sup>88</sup>. Assim como nas outras etapas descritas, há um modelo matemático que calcula a taxa de alimentação da filtragem. Durante o processamento do concentrado nessa operação, ocorre a redução da umidade do material processado e, portanto, um novo parâmetro de qualidade intermediária é calculado. Dessa forma, um modelo matemático é utilizado para representar o Percentual de Umidade do *Pellet feed*. O *pellet feed* (conforme destacado na Figura 21) pode ser utilizado na sinterização (rota de produção de aço via alto forno). Assim, eventualmente, o *pellet feed* pode ser comercializado ao invés de ser utilizado para a produção de pelota de ferro. Nesse caso, a produção da filtragem pode ser desviada para um estoque, chamado de pátio de *pellet feed*.

A etapa seguinte é a prensagem, que tem como principal função elevar a superfície específica das partículas do *pellet feed*. Tal operação não gera ganho de massa e, ao mesmo tempo, não restringe a produtividade do sistema. Dessa forma, não há um modelo matemático associado a ela. A massa desejada para alimentar as prensas é informada pela mistura, operação jusante. A etapa de prensa liga o silo da prensa ao silo da mistura. Três parâmetros de qualidade são observados ao final do processamento dessa etapa. O primeiro é a Superfície Específica, o segundo é a Granulometria -325 *mesh* e o terceiro é a granulometria +200 *mesh*. Esses parâmetros são estimados através de modelos matemáticos.

Na sequência do fluxo de produção, há a etapa de mistura. Na etapa em questão são adicionados insumos que auxiliam na pelotização e na queima da pelota. A operação retira o *pellet feed* dos silos da mistura e, após o processamento, deposita o material nos silos de pelotização. Há um modelo matemático que indica a taxa de alimentação horária dos misturadores. Nessa fase, há ganho de massa em função da adição de insumos, cuja

---

<sup>88</sup> O *pellet feed* herda as qualidades do concentrado recebido na unidade de Ubu. Ou seja, as qualidades do concentrado (teor de ferro; teor de sílica; superfície específica, PPC, etc) observadas na saída do processo de concentração são mantidas no *pellet feed*.

quantidade é determinada por uma distribuição de probabilidade que a cada hora indica a medida que deve ser adicionada. Como a quantidade de insumo adicionada afeta a produtividade do forno, essa informação é necessária durante o processamento.

A etapa de pelotização transforma *pellet feed*, material muito fino, em esferas ou discos de pelotização, chamadas de pelotas cruas. Essa operação retira o material do silo de pelotização, o processa, e o entrega à grelha que alimenta o forno. Há um modelo matemático que aponta a taxa de alimentação dos discos de pelotização. O tamanho das esferas produzidas apresenta elevada variabilidade. Dessa forma, no final da etapa de pelotização, existem mesas classificatórias. Estas separam as pelotas cruas muito grandes (maior que 16mm) ou muito pequenas (menor que 8mm), as quais retornam para os silos de pelotização para serem reprocessadas. As pelotas com tamanho entre 8 e 16mm seguem para o forno para serem queimadas. O percentual de pelotas que atende os limites de diâmetro é uma nova variável de qualidade calculada a partir de um modelo matemático.

A última etapa da cadeia produtiva da Samarco é a queima da pelota, a fim de garantir as propriedades físicas e mineralógicas adequadas para o setor siderúrgico. Tal processamento é realizado em fornos que transformam as pelotas cruas em pelotas queimadas. As pelotas de ferro prontas são armazenadas no pátio de estocagem. Nessa etapa, há perda de massa em função da queima de alguns elementos (PPC e insumos adicionados na etapa de mistura) e da evaporação de umidade. Dessa forma, há um modelo matemático que expressa o percentual de perda de massa no forno a cada hora. A taxa de produção de pelota é obtida a partir da relação entre a taxa de alimentação horária do forno e a perda de massa. Ao final da etapa de queima, as qualidades da pelota são obtidas a partir de modelos matemáticos.

Essa breve descrição do fluxo conceitual do processo produtivo da Samarco foi apresentada à luz do mecanismo proposto na Seção 4.3.1.1 (o mecanismo sugere o uso de modelos matemáticos que relacionam variáveis de qualidade com variáveis de produtividade e variáveis do processo propriamente dito) para o tratamento da variabilidade e degradação da matéria-prima. Embora, a modelagem conceitual represente o processo produtivo em um nível de detalhamento relativamente superficial, representando somente macro etapas e não entrando em um nível de máquinas, o modelo representa o sistema estudado em termos de produtividade e qualidade. Vale destacar que essa representação, caso desejado, pode ser ampliada e detalhada. O modelo conceitual foi validado em dois momentos. O primeiro ocorreu individualmente com os especialistas de

cada uma das etapas representadas. O segundo momento contou com o Grupo de Trabalho, o qual avaliou o modelo conceitual como um todo.

Ao longo da descrição do fluxo do processo realizada anteriormente, destacou-se um conjunto de modelos matemáticos necessários para expressar tanto as variáveis relacionadas às produtividades horárias (taxas de alimentação e perdas de massa), quanto às transformações de qualidade. O uso de modelos matemáticos em detrimento de distribuições de probabilidade consiste na principal diferença entre o mecanismo de modelagem da variabilidade tradicional e o mecanismo proposto (detalhado na Seção 5.1).

Conforme exposto por Hodouin e Jämsä-Jounela (2001), deve-se priorizar o uso de modelos fundamentais para explicar o comportamento de uma dada variável de interesse (por exemplo, taxa de alimentação da britagem). Porém, os autores destacam as dificuldades de se encontrar, na literatura, esse tipo de modelos. Assim, após consulta aos especialistas em processamento mineral integrantes do Grupo de Trabalho, que desconheciam modelos fundamentais adequados para tratar as variáveis de interesse, optou-se por utilizar modelos estocásticos baseados em dados empíricos para representar dinamicamente o comportamento das variáveis de interesse. O Quadro 9 resume todos os modelos matemáticos necessários em cada uma das etapas do sistema de produção modelado. Esses modelos explicitam matematicamente as relações de causa-e-efeito e as circularidades representadas na Estrutura Sistêmica, sendo que o processo seguido para a estimação desses modelos é apresentada na seção a seguir. Cada modelo compreende um conjunto de variáveis (explicativas) que estão detalhadas no Anexo C<sup>89</sup>.

Quadro 9: Resumo dos modelos matemáticos necessários para a representação da cadeia produtiva da Samarco. (Continua)

<b>Operação/Etapa</b>	<b>Modelo de qualidade</b>	<b>Modelo de produtividade</b>
Extração	Não há	Taxa de produção mina Alegria 126 Taxa de produção mina Alegria 345 Taxa de produção mina Alegria 9 Taxa de produção mina Fazendão
Britagem <sup>(1)</sup>	Granulometria percentual de 12,5mm	Taxa de alimentação britagem
Pré-moagem & Moagem primária <sup>(1)</sup>	Granulometria maior que 100 <i>mesh</i> Grau de liberação de sílica	Taxa de alimentação Pré-moagem & Moagem primária

<sup>89</sup> Neste anexo é possível observar as circularidades consideradas nos modelos mencionadas ao longo do texto. Por exemplo, a qualidade do produto (taxa de tamboramento da pelota) observada na saída do sistema impactam na taxa de produção da pelotização.

<b>Operação/Etapa</b>	<b>Modelo de qualidade</b>	<b>Modelo de produtividade</b>
Deslamagem <sup>(1)</sup>	Granulometria menor que 325 <i>mesh</i> do concentrado	Recuperação mássica do concentrador
	Granulometria maior que 200 <i>mesh</i> do concentrado	
	Superfície específica do concentrado	
	Teor de sílica do concentrado	
	Teor de ferro do concentrado	
	PPC do concentrado	
	Percentual de sólido do concentrado	
Mineroduto <sup>(2)</sup>	Não há	Taxa de alimentação mineroduto
Filtragem <sup>(2)</sup>	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> <sup>(3)</sup>	Taxa de alimentação filtragem <sup>(3)</sup>
Prensagem <sup>(2)</sup>	Superfície específica	Não há
Misturador <sup>(2)</sup>	Não há	Taxa de alimentação misturador
Pelotização <sup>(2)</sup>	Granulometria pelota crua 16-8mm	Taxa de alimentação pelotização
	Granulometria pelota crua diâmetro médio	
Forno <sup>(2)</sup>	Taxa de tamboramento da pelota	Perda de massa do forno
	Taxa de compressão da pelota	
	Percentual de -6.3	

<sup>(1)</sup> Há duas plantas de concentração e são consideradas duas campanhas (CLS e CNS). Assim há um modelo para cada variável para cada planta e para cada campanha.

<sup>(2)</sup> Há três usinas de pelotização e são consideradas duas campanhas (PDR e PBF). Assim há um modelo para cada variável para cada planta e para cada campanha.

<sup>(3)</sup> Estas variáveis não existem para a Usina2, pois a operação de filtragem é compartilhada pelas Usinas 1 e 2.

Fonte: Elaborado pelo autor

(Conclusão)

Cada etapa de processamento representada na Figura 34 possui um tempo de processamento. O tempo médio de processamento (tempo que o minério leva para percorrer a operação/etapa) em minutos de cada operação foi obtido com os especialistas da Samarco, pois estas informações não estavam disponíveis para coleta. Os valores encontram-se detalhados no Quadro 10.

Quadro 10: Resumo dos tempos de processamento médio, em minutos, de cada operação da cadeia produtiva da Samarco

<b>Operação/Etapa</b>	<b>Tempo de processamento médio [minutos]</b>		
	<b>Linha 1</b>	<b>Linha 2</b>	<b>Linha 3</b>
Britagem	360	360	-
Pré-moagem & Moagem primária	60	60	-
Deslamagem	240	240	
Mineroduto	3840	4140	
Filtragem	60 <sup>1</sup>	-	60
Prensagem	10	10	10
Misturador	10	10	10
Pelotização	30	30	30
Queima	30	30	30

<sup>(1)</sup> A operação filtragem 1 alimenta as usinas de pelotização 1 e 2

Fonte: Elaborado pelo autor



As capacidades dos estoques representados no fluxo conceitual encontram-se detalhados no Quadro 11. Nos estoques representados ao longo da cadeia, ocorre a homogeneização das qualidades da matéria-prima, das qualidades intermediárias e das qualidades do produto. Conforme destacado em Marques et al. (2010) e Everett (1996, 2001) os estoques em uma cadeia produtiva de minério de ferro tem como objetivo minimizar o efeito da variabilidade da qualidade do minério. Dessa forma, o minério depositado em uma pilha/estoque é homogeneizado com o material já existente na pilha.

Quadro 11: Resumo das capacidades nominais dos estoques representados no fluxo de processo

Nome do Estoque	Capacidade [toneladas]		
	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Pilha Fazendão	60.000	-	-
Pilha Norte	120.000	-	-
Pilha Sul	120.000	-	-
Pilha Tripper	30.000	165.000	-
Tanques de Concentrado	40.000	25.000	-
Tanques da Filtragem	25.000	-	13.500 <sup>1</sup>
Silo da Prensagem	1.000	1.000	1.000
Silo da Mistura	2.000	2.000	2.000
Silo de Pelotização	1.500	1.500	1.010

<sup>(1)</sup> O tanque da filtragem da linha 2 atende exclusivamente a terceira usina de pelotização, enquanto a linha 1 atende as usinas 1 e 2.

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao longo de todo o sistema de produção e de manufatura representado na Figura 34, existem equipamentos (motores, moinhos, correias, etc.) que viabilizam os processamentos para os quais o sistema de manufatura foi projetado. O modelo computacional deve contemplar esses equipamentos, pois a quebra deles impacta as taxas de produção. Como o processo foi modelado em um nível agregado, uma dada etapa de processamento apresenta um conjunto de equipamentos. A modelagem deles foi realizada do seguinte modo:

- Os equipamentos são classificados em dois tipos: i) equipamentos que limitam a produtividade horária do sistema e; ii) equipamentos que interrompem completamente a produtividade horária;
- Os tempos entre quebras (*Time Between Failures* - TBF) e o tempo de reparo (*Time To Repair* - TTR) de cada equipamento compreendido no

modelo são representados por distribuições de probabilidade obtidas a partir de dados históricos;

- Os equipamentos que param a produção são modelados de tal forma que quando uma quebra ocorre o simulador deve interromper o processamento da etapa a qual o equipamento se refere. Já os equipamentos que apenas limitam a produção são considerados nos modelos matemáticos que expressam as taxas de alimentação. Por exemplo, existem quatro britadores (equipamentos) na Britagem 1; no modelo matemático há a variável número de britadores operando<sup>90</sup>, que recebe valores que variam entre um e quatro.

Finalmente, resta detalhar as regras do fluxo de processo explicitado no modelo conceitual de modo a representar o comportamento real do sistema analisado. Assim como as demais informações expressas nessa etapa, as regras foram validadas pelo grupo de trabalho. A primeira regra refere-se à representação da mudança de campanha (CLS ou CNS). A lógica dessa regra consiste em:

- A planilha de dados de entrada indica ao longo do tempo a campanha a ser processada pela cadeia produtiva;
- A inversão de campanha para CLS ocorre nas operações de Germano (extração e concentração) no momento de tempo indicado pela planilha;
- A inversão de campanha para CLS em Ubu (pelotização) ocorre quando duas condições se apresentarem:
  - Cadeia produtiva produzindo a campanha CLS (ou ter saído dela há menos de 36 horas);
  - Teor de sílica inferior a 1,2%.

A segunda regra refere-se à retirada de ROM das pilhas pulmão para a britagem. Tais regras visam atender a massa desejada de ROM estimada pelo modelo matemático. As regras são:

- Caso o estoque das pilhas não seja suficiente para atender o volume desejado pela britagem, a prioridade será o Concentrador 1;

---

<sup>90</sup> As variáveis relacionadas ao equipamentos que limitam a produção podem ser observadas no Anexo C.

- Caso falte massa em uma pilha, a quantidade deverá ser suprida por outra pilha. Nesse caso, há um processo recursivo, detalhado a seguir, que tenta suprir toda a massa desejada:
  - São recalculados os percentuais de alimentação de cada frente, de modo a atender a massa desejada, primeiro suprimindo a massa faltante a partir da pilha de fazendão, seguida pela pilha norte e por fim da pilha sul.
  - Caso não haja massa em nenhuma das pilhas pulmão, o processo recursivo é interrompido e a massa desejada não é entregue para a britagem; a massa disponível, entretanto, é entregue.

A terceira regra refere-se à chegada de concentrado em Ubu. A operação da Samarco sempre prioriza a terceira usina de pelotização por esta ser a mais eficiente em comparação com as outras duas. Além disso, há um subterfúgio para depósito de concentrado em situações em que ocorrem problemas de falta de sincronização no fluxo produtivo. Essa regra foi modelada, conforme destacado a seguir:

- Cada mineroduto alimenta seus respectivos tanques;
- Caso os tanques da filtragem 3 estiverem com nível baixo (menor que 10%), o concentrado recebido pelo mineroduto 1 é desviado para o tanque da filtragem 3;
- Se os tanques da filtragem 1 e 2 estiverem cheios, o mineroduto 1 é desviado para o tanque da filtragem 3;
- Se os tanques da filtragem 1 e 2 e o tanque da filtragem 3 estiverem cheios, o mineroduto 1 é desviado para a Bacia de Polpa;
- Se tanque da filtragem 3 estiver cheio, o mineroduto 2 é desviado para a Bacia de Polpa;
- Quando necessário, se o nível encontra-se baixo nos tanques da filtragem 1 e 2, ocorre o retorno de concentrado da Bacia de Polpa para os tanque da filtragem 1 e 2 a uma taxa parametrizada (aproximadamente 5.000 toneladas/dia).

Por fim, há a quarta regra, que compreende a representação das manobras operacionais de envio de *pellet feed* para o pátio e a recuperação de *pellet feed* do pátio para o sistema de produção, conforme especificado a seguir:

- Se os silos das prensas 1 e 2 estiverem cheios (com mais de noventa e cinco por cento da capacidade) as prensas podem ser ignoradas, sendo o material enviado diretamente para os silos dos misturadores 1 e 2.
- Se os silos das prensas 1 e 2 e os silos dos misturadores 1 e 2 estiverem cheios, o *pellet feed* é enviado da filtragem para o pátio;
- Se os silos dos misturadores 1 e 2 ou das prensas 1 e 2 estiverem vazios (com menos de cinco por cento da capacidade), retorna *pellet feed* do pátio para o processo, a uma taxa parametrizada (aproximadamente 8.000 toneladas/dia), conforme as seguintes especificações:
  - Prioritariamente para os silos das prensas 1 e 2;
  - Para os silos dos misturadores 1 e 2, quando as prensas estiverem paradas.

Detalhes computacionais relacionados às regras explicitadas encontram-se no Anexo A. Ao final desta fase tem-se o modelo conceitual do sistema, conforme previsto no Artefato. A seção a seguir descreve o desenvolvimento do modelo computacional propriamente dito.

### **6.2.3 Desenvolvimento do modelo computacional**

A coleta de dados ocorreu a partir do *template* de dados desenvolvido pelo pesquisador e validado pelo grupo de trabalho. Os dados foram coletados nos sistemas de controle da empresa. No caso estudado, duas foram as fontes de dados: i) o sistema de controle operacional e; ii) o sistema de gestão da organização. A coleta de dados no sistemas de informação da Samarco<sup>91</sup> foi realizada pelo pesquisador em conjunto com os especialistas de processo da empresa, integrantes do Grupo de Trabalho. As informações

---

<sup>91</sup> Todos os dados coletados para o desenvolvimento do modelo foram coletados de sistemas computacionais de informação da Samarco. Não houve a necessidade de coleta de dados manuais.

foram segmentadas em dois tipos: i) dados de entrada do simulador; e ii) dados para representação do sistema.

Os dados de entrada do simulador são os dados históricos, registrados nos bancos de dados da empresa, com as informações de volume e qualidade da matéria-prima. A planilha apresenta informações com periodicidade a cada duas horas. As informações disponíveis em cada linha da planilha eletrônica foram: i) a campanha (CLS ou CNS); ii) as qualidades da matéria-prima de cada mina (frente de lavra); iii) o volume de minério de cada mina para cada unidade de beneficiamento. O Anexo A apresenta um exemplo da planilha eletrônica que contém os dados de entrada e as qualidades da matéria-prima.

Os dados para representar o sistema foram salvos nos *templates* estabelecidos que contemplam as variáveis a serem coletadas (informações adicionais sobre as variáveis coletadas encontram-se no Anexo C). Estipulou-se um ano como horizonte de tempo de coleta de dados (janeiro de 2011 a dezembro de 2011) e uma periodicidade de coleta de uma hora<sup>92</sup>. Desta forma, para cada uma das variáveis, obteve-se cerca de 8640 observações. O horizonte de tempo estabelecido de um ano contempla a sazonalidade da produção e os fatores climáticos que afetam significativamente as operações da empresa como, por exemplo, os períodos de chuvas no verão.

Após a coleta de dados, estes foram, inicialmente, limpos e organizados. A limpeza consistiu, primeiramente, na remoção de erros de medição e registro, que são as observações de uma dada variável que apresenta valores fora dos limites superior e inferior estabelecidos no *template* de dados. Esta limpeza dos dados foi realizada, pois, os dados continham, em alguns casos, observações incompatíveis, por exemplo, a produção de uma hora de uma mina apresentar um valor igual a 10 milhões de toneladas. Essa organização compreendeu a construção de um banco de dados contendo todas as variáveis coletadas. As observações com dados faltantes foram excluídas do banco de dados. De posse do banco de dados realizou-se um procedimento para criar todas as variáveis (dependentes e independentes detalhadas no Anexo C) defasadas um, dois, três e quatro períodos (horas). Importante destacar que a defasagem deve ocorrer antes da limpeza dos dados, caso contrário podem ocorrer equívocos nas variáveis defasadas. Devido ao elevado volume de dados e às muitas variáveis, foi desenvolvido um *software*<sup>93</sup> para limpeza e organização dos dados.

---

<sup>92</sup> Dentre as variáveis coletadas, algumas não são medidas todas as horas. Nesses casos torna-se necessário transformar o dado coletado para uma base horária por intermédio de uma transformação linear.

<sup>93</sup> O *software* desenvolvido teve por objetivo limpar e organizar os dados brutos.

Através do banco de dados foram estimadas as distribuições de probabilidade e os modelos estocásticos (modelos de regressão). Aquelas variáveis representadas no modelo através de distribuições de probabilidade encontram-se detalhadas no Anexo C. Já as variáveis que são representadas por meio de modelos estocásticos estão descritas no Quadro 9 e detalhadas no Anexo C. Conforme definido na modelagem conceitual da cadeia produtiva, foram consideradas duas campanhas (CLS/PDR e CNS/PBF), assim, são estimados os modelos de regressão e as distribuições de probabilidade específicos para cada uma delas<sup>94</sup>. Portanto, o banco de dados destaca, para cada período, a campanha na qual a cadeia estava trabalhando, tornando possível segmentar os dados para realizar as estimativas dos modelos de cada campanha.

As primeiras análises realizadas sobre os dados apontaram tópicos importantes para serem discutidos. Por exemplo, observou-se que existiam erros de medição em balanços ao longo do processo produtivo, ou seja, a massa que entrava em uma operação que não gera ou elimina massa era diferente da medida da saída. Como no modelo computacional não há erros de balança, não pode haver diferença entre as massas processadas ao longo da cadeia produtiva. Assim, faz-se necessário efetuar o balanço de massas da cadeia produtiva. Para contornar os erros de medição, em uma reunião do grupo de trabalho na qual o problema foi exposto, identificou-se as medidas mais confiáveis na cadeia produtiva. A partir delas, foram calculados fatores para ajustar as massas ao longo de toda a cadeia. Vale ressaltar que todos esses ajustes aplicados aos dados foram apresentados e validados pelo Grupo de Trabalho.

No caso estudado, os modelos matemáticos que explicam as relações das taxas de produção e as transformações de qualidade foram estimados a partir da técnica estatística de regressão linear múltipla<sup>95</sup>. Os modelos de regressão foram estimados com base em testes e análises (análise de pressupostos<sup>96</sup>, testes de hipóteses, validação de modelo de regressão e avaliação do poder explicativo) recomendados por Hair et al. (2007) e Gujarati (2006). Para estimar os modelos de regressão foi desenvolvida uma rotina automatizada no

---

<sup>94</sup> As informações referentes as variáveis (modelos de regressão e distribuição de probabilidade) consideradas no modelo computacional e mencionadas ao longo desta seção estão detalhadas no Anexo C. Optou-se por destacar no corpo do texto somente as informações relevantes das variáveis utilizadas no modelo computacional.

<sup>95</sup> Vale ressaltar que o Artefato contempla o uso de modelos matemáticos para explicar a produtividade e as qualidades em função das características da matéria-prima e dos parâmetros operacionais. A estimação desses modelos pode se dar por intermédio de técnicas estatísticas como a regressão linear. No entanto, o pesquisador pode optar por outros mecanismos de modelagem de dados, ou ainda utilizar modelos elementares como, por exemplo, os expostos em King (2001).

<sup>96</sup> Os pressupostos da regressão linear testados foram: heterocedasticidade através do teste de Goldfeld-Quandt e normalidade a partir de análise gráfica.

*software* estatístico R<sup>97</sup>, apresentada no Anexo D. Essa rotina minimiza o tempo de estimação dos modelos e mostrou-se adequada no caso estudado considerando o elevado volume de dados e quantidade de modelos estimados de regressão. Cada modelo tem como variáveis independentes (variáveis explicativas) as variáveis extraídas da estrutura sistêmica que se relacionam com a variável dependente (os Quadro 18, 19, 20 e 21 destacados no Anexo C descrevem as variáveis compreendidas em cada um dos modelos de regressão). A rotina de estimação mantém nos modelos somente aquelas variáveis que são estatisticamente significativas para explicar o comportamento da variável dependente. A decisão de manter ou não uma variável no modelo é realizada pelo algoritmo *stepwise*<sup>98</sup>, implementado no código em R (o Anexo C detalha as variáveis mantidas em cada um dos modelos de regressão após a utilização do algoritmo de *stepwise*). Embora a significância estatística seja importante para remover variáveis insignificantes, em termos estatísticos destaca-se a relevância do conhecimento dos especialistas no sistema de produção da Samarco. Os especialistas indicaram o sentido esperado da correlação entre a variável dependente e a variável independente. Dessa forma, quando há um conhecimento explícito na organização que indique o comportamento de uma dada relação contrária àquela apresentada no modelo de regressão, isto leva à exclusão da variável do modelo. Realizou-se o mapeamento das relações entre as variáveis (dependente versus independentes). Esse mapeamento foi extraído da estrutura sistêmica e validado pelos especialistas da Samarco. A partir dele, desenvolveu-se uma rotina automatizada no *software* R, para excluir do modelo de regressão aquelas variáveis que indicam sentido contrário ao esperado. Tal rotina testa a correlação entre as variáveis independentes e a variável dependente. O sinal da correlação (positivo ou negativo) é comparado com uma matriz que informa, para cada par de variáveis, o sentido esperado da relação (esse sentido foi mapeado com os especialistas). Um último teste realizado no código (Anexo D) diz respeito à identificação da defasagem de cada variável a ser utilizada no modelo de regressão. Para essa decisão, o código estima a matriz de correlação. A partir dessa matriz é identificada, para cada variável, qual das defasagens apresenta maior coeficiente de correlação de Pearson em relação à variável dependente. Dessa forma, define-se a defasagem mais indicada para cada variável.

---

<sup>97</sup> R é um software estatístico distribuído gratuitamente, baseado na linguagem S-Surplus (<http://cran.r-project.org/>)

<sup>98</sup> Esse é um método de seleção de variáveis em um modelo de regressão. A seleção inicia-se pela variável independente que melhor explique a variável dependente. Variáveis independentes adicionais são selecionadas quando acrescentam poder de explicação ao modelo. (HAIR et al., 2007).

Conforme mencionado na proposição do Artefato, alguns mecanismos foram realizados para elevar o poder de explicação<sup>99</sup> dos modelos de regressão, dentre os quais dois mostraram resultados significativos. O primeiro consistiu na inserção de termos defasados das variáveis dependentes e independentes nos modelos de regressão, conforme já mencionado anteriormente. Esse processo é adequado uma vez que a medição de variáveis não ocorre em todas as fases da cadeia de produção da Samarco representado no modelo conceitual. Por exemplo, o teor de sílica do ROM impacta a taxa de produção de concentrado (etapa de deslamagem e flotação), no entanto, a empresa não realiza medições do teor de sílica do ROM na etapa de deslamagem e flotação. A medição ocorre somente na etapa de pré-moagem e moagem primária. Outra justificativa para o uso de termos defasados diz respeito aos enlaces representados na estrutura sistêmica.

O segundo mecanismo utilizado para elevar o poder de explicação dos modelos de regressão consiste em transformar a variável dependente. Essa transformação implica em manter somente a componente de tendência<sup>100</sup> da série temporal. Dessa forma, a variabilidade nas variáveis é reduzida usando a componente de tendência da série temporal como variável dependente obtendo-se, assim, modelos com poder de explicação maior em relação à variável original. A extração da componente de tendência das variáveis foi realizada no *software* R com o auxílio de uma função que decompõe uma série temporal nas suas três componentes, tendência, sazonalidade e erro aleatório, usando a média móvel<sup>101</sup>. As outras duas componentes da série temporal são adicionadas ao modelo computacional através de uma distribuição de probabilidade. Assim, o comportamento de uma variável passa a ser explicado pelo modelo de regressão, adicionado a um valor aleatório, obtido a partir de uma distribuição de probabilidade. Isso é importante para representar a variabilidade real do sistema.

A Figura 35 resume o processo de tratamento de dados e a rotina adotada para validar e elevar o poder de explicação dos modelos de regressão.

Figura 35: Fluxo de atividades para estimação dos modelos de regressão

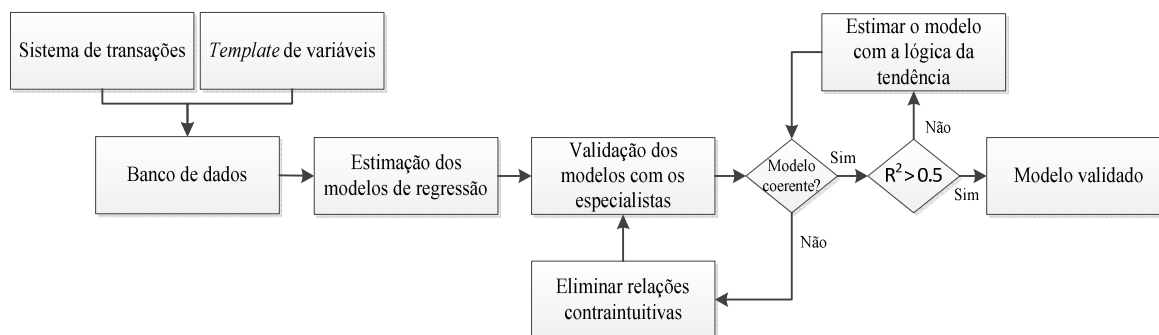
---

<sup>99</sup> O poder de explicação de um modelo de regressão é expresso a partir do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). (Hair et al., 2007).

<sup>100</sup> Segundo Gujarati (2006), uma série temporal pode ser decomposta em três componentes: tendência, sazonalidade e erro aleatório.

<sup>101</sup> Alexandrov et al. (2012) explicitam que a extração de tendência é uma das tarefas centrais no estudo de séries temporais. Segundo os autores, existem inúmeras técnicas para extração de tendência.





Fonte: Elaborado pelo autor

No total, 118 modelos de regressão foram estimados, sendo quatro na etapa de extração, 56 para representar a etapa de concentração (duas plantas, duas campanhas, 14 modelos), dois na etapa de mineroduto e 56 para detalhar a operação de pelotização (três usinas, duas campanhas, 10 modelos). A síntese dos resultados dos modelos estimados encontra-se na Tabela 1 e os detalhes destes modelos encontram-se no Anexo C. Essa tabela descreve o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), o resultado do teste F e o  $p$ -value. Os dois primeiros parâmetros apontam o poder de explicação do modelo, ou seja, a proporção da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes. (HAIR et al., 2007). Os parâmetros do teste F e do  $p$ -value indicam a significância do modelo geral estimado. Valores de  $p$ -value inferiores ao nível de significância apontam para o rejeito da hipótese nula, logo, o modelo de regressão é significativo.

A partir dos resultados expostos na Tabela 1, observa-se que todos os modelos de regressão estimados são significativos, pois os valores de  $p$ -value calculados a partir da estatística F são todos inferiores a 5% (nível de significância utilizado para as análises estatísticas). O Anexo C, além de compilar as variáveis explicativas contempladas em cada um dos modelos, descreve detalhadamente o modelo de regressão e o resultado dos testes dos pressupostos da regressão linear das variáveis i) recuperação mássica do concentrador um e dois e; ii) a taxa de tamboramento da pelota das usinas um, dois e três.

Tabela 1: Síntese dos modelos de regressão estimados

(Continua)

Etapa processo	Modelo	Campanha CNS/PBF				Campanha CLS/PDR			
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Análise de variância Teste F	P-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Análise de variância Teste F	P-valor
Mina	Taxa de produção mina Alegria 126	0.95	0.95	34815.07	< 2.2e-16				
	Taxa de produção mina Alegria 345	0.98	0.98	38875.77	< 2.2e-16				
	Taxa de produção mina Alegria 9	0.96	0.96	30347.47	< 2.2e-16				
	Taxa de produção mina Fazendão	0.95	0.95	32614.72	< 2.2e-16				
Concentração 1	Taxa de alimentação britagem 1 <sup>(a)</sup>	0.99	0.99	44890.74	< 2.2e-16	0.98	0.98	31248.60	< 2.2e-16
	Taxa de alimentação Pré-moagem/Moagem primária 1 <sup>(a)</sup>	0.99	0.99	17791.74	< 2.2e-16	0.98	0.98	19922.24	< 2.2e-16
	Recuperação mássica do concentrador 1	0.82	0.81	72.30	< 2.2e-16	0.76	0.75	80.11	< 2.2e-16
	Granulometria percentual de 12,5mm do minério na saída da britagem 1	0.97	0.97	28715.97	< 2.2e-16	0.96	0.96	22059.55	< 2.2e-16
	Granulometria +100# na saída da moagem primária 1 <sup>(a)</sup>	0.98	0.98	23383.53	< 2.2e-16	0.99	0.99	40420.20	< 2.2e-16
	Grau de liberação de sílica na saída da moagem primária 1	0.95	0.95	27056.93	< 2.2e-16	0.96	0.96	69701.56	< 2.2e-16
	Granulometria percentual -325# do concentrado (C1) <sup>(a)</sup>	0.96	0.96	5922.64	< 2.2e-16	0.98	0.98	19013.08	< 2.2e-16
	Superfície específica do concentrado (C1) <sup>(a)</sup>	0.98	0.98	9349.86	< 2.2e-16	0.98	0.98	15280.63	< 2.2e-16
	Teor de sílica do concentrado (C1)	0.68	0.68	1080.49	< 2.2e-16	0.57	0.57	582.54	< 2.2e-16
	Teor de ferro do concentrado (C1)	0.72	0.72	724.85	< 2.2e-16	0.74	0.74	1228.61	< 2.2e-16
	Perdas por calcinação do concentrado (C1)	0.75	0.75	2706.48	< 2.2e-16	0.79	0.79	3181.51	< 2.2e-16
	Percentual de sólido do concentrado (C1)	0.90	0.90	3411.93	< 2.2e-16	0.88	0.88	8076.12	< 2.2e-16
	pH do concentrado (C1)	0.98	0.98	110740.00	< 2.2e-16	0.98	0.98	94158.15	< 2.2e-16
	Granulometria percentual +200# do concentrado (C1)	0.76	0.76	1711.75	< 2.2e-16	0.83	0.83	2706.13	< 2.2e-16
Concentração 2	Taxa de alimentação britagem 2 <sup>(a)</sup>	0.98	0.98	15360.06	< 2.2e-16	0.98	0.98	30451.22	< 2.2e-16
	Taxa de alimentação Pré-moagem/Moagem primária 2	0.72	0.71	380.50	< 2.2e-16	0.59	0.58	316.14	< 2.2e-16
	Recuperação mássica do concentrador 2	0.62	0.60	32.51	< 2.2e-16	0.69	0.67	45.04	< 2.2e-16
	Granulometria percentual de 12,5mm do minério na saída da britagem 2	0.94	0.94	11502.66	< 2.2e-16	0.93	0.93	45415.66	< 2.2e-16
	Granulometria +100# na saída da moagem primária 2	0.68	0.67	325.64	< 2.2e-16	0.65	0.65	601.46	< 2.2e-16
	Grau de liberação de sílica na saída da moagem primária 2	0.96	0.96	15548.41	< 2.2e-16	0.95	0.95	24908.70	< 2.2e-16
	Granulometria percentual -325# do concentrado (C2)	0.70	0.70	474.67	< 2.2e-16	0.74	0.74	1203.90	< 2.2e-16
	Superfície específica do concentrado (C2)	0.66	0.66	497.62	< 2.2e-16	0.68	0.68	898.31	< 2.2e-16
	Teor de sílica do concentrado (C2) <sup>(a)</sup>	0.98	0.98	20768.89	< 2.2e-16	0.98	0.98	16021.70	< 2.2e-16
	Teor de ferro do concentrado (C2)	0.71	0.70	701.88	< 2.2e-16	0.74	0.74	719.11	< 2.2e-16
	Perdas por calcinação do concentrado (C2)	0.79	0.79	2130.82	< 2.2e-16	0.79	0.79	2927.93	< 2.2e-16
	Percentual de sólido do concentrado (C2)	0.95	0.95	13592.80	< 2.2e-16	0.92	0.92	11111.19	< 2.2e-16
pH do concentrado (C2)	0.94	0.94	14650.41	< 2.2e-16	0.95	0.95	35924.51	< 2.2e-16	
Granulometria percentual +200# do concentrado (C2)	0.79	0.79	2145.42	< 2.2e-16	0.82	0.82	3527.60	< 2.2e-16	

Etapa processo	Modelo	Campanha CNS/PBF				Campanha CLS/PDR			
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Análise de variância Teste F	P-valor	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Análise de variância Teste F	P-valor
Mduto	Taxa de alimentação mineroduto 1	0.94	0.94	9932.90	< 2.2e-16				
	Taxa de alimentação mineroduto 2	0.96	0.96	29907.25	< 2.2e-16				
Usina Pelotização 1	Taxa de alimentação filtragem 1	0.73	0.73	1850.86	< 2.2e-16	0.60	0.60	773.29	< 2.2e-16
	Taxa de alimentação mistura 1	0.70	0.70	1226.01	< 2.2e-16	0.61	0.61	722.28	< 2.2e-16
	Taxa de alimentação pelotização 1	0.90	0.90	1598.14	< 2.2e-16	0.88	0.88	1407.41	< 2.2e-16
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (U1)	0.76	0.76	1419.67	< 2.2e-16	0.78	0.78	2372.16	< 2.2e-16
	Superfície específica na saída prensagem 1	0.75	0.75	883.41	< 2.2e-16	0.81	0.81	1563.13	< 2.2e-16
	Granulometria pelota crua 16-8mm (U1)	0.65	0.65	307.25	< 2.2e-16	0.72	0.72	739.37	< 2.2e-16
	Granulometria pelota crua diâmetro médio (U1) <sup>(a)</sup>	0.58	0.58	268.46	< 2.2e-16	0.67	0.67	487.19	< 2.2e-16
	Taxa de tamboramento da pelota (U1)	0.63	0.63	366.76	< 2.2e-16	0.66	0.66	464.78	< 2.2e-16
	Percentual de -6,3 (U1)	0.67	0.67	616.83	< 2.2e-16	0.65	0.65	613.86	< 2.2e-16
	Taxa de compressão pelota (U1)	0.64	0.64	478.51	< 2.2e-16	0.62	0.61	429.10	< 2.2e-16
	Usina Pelotização 2	Taxa de alimentação mistura 2	0.96	0.96	8693.76	< 2.2e-16	0.96	0.96	9991.73
Taxa de alimentação pelotização 2		0.90	0.90	830.92	< 2.2e-16	0.92	0.92	333.37	< 2.2e-16
Superfície específica na saída prensagem 2		0.75	0.75	652.43	< 2.2e-16	0.79	0.79	1028.64	< 2.2e-16
Granulometria pelota crua 16-8mm (U2)		0.71	0.71	266.42	< 2.2e-16	0.71	0.70	88.01	< 2.2e-16
Granulometria pelota crua diâmetro médio (U2)		0.61	0.60	167.54	< 2.2e-16	0.70	0.69	84.06	< 2.2e-16
Taxa de tamboramento da pelota (U2)		0.67	0.67	241.59	< 2.2e-16	0.68	0.67	79.70	< 2.2e-16
Percentual de -6,3 (U2)		0.67	0.66	249.39	< 2.2e-16	0.64	0.63	72.96	< 2.2e-16
Taxa de compressão pelota (U2) <sup>(a)</sup>		0.88	0.87	779.36	< 2.2e-16	0.71	0.70	83.21	< 2.2e-16
Usina Pelotização 3	Taxa de alimentação filtragem 3	0.81	0.81	1693.40	< 2.2e-16	0.85	0.84	1532.51	< 2.2e-16
	Taxa de alimentação mistura 3	0.72	0.71	93.99	< 2.2e-16	0.68	0.67	105.84	< 2.2e-16
	Taxa de alimentação pelotização 3	0.69	0.69	291.13	< 2.2e-16	0.85	0.85	1068.27	< 2.2e-16
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (U3)	0.70	0.70	855.61	< 2.2e-16	0.68	0.68	1209.62	< 2.2e-16
	Superfície específica na saída prensagem 3	0.80	0.80	926.20	< 2.2e-16	0.82	0.82	1502.36	< 2.2e-16
	Granulometria pelota crua 16-8mm (U3) <sup>(a)</sup>	0.78	0.78	372.80	< 2.2e-16	0.84	0.84	628.22	< 2.2e-16
	Granulometria pelota crua diâmetro médio (U3) <sup>(a)</sup>	0.72	0.72	300.08	< 2.2e-16	0.89	0.89	1295.14	< 2.2e-16
	Taxa de tamboramento da pelota (U3)	0.68	0.68	317.68	< 2.2e-16	0.68	0.68	423.39	< 2.2e-16
	Percentual de -6,3 (U3) <sup>(a)</sup>	0.83	0.83	637.84	< 2.2e-16	0.81	0.81	937.13	< 2.2e-16
	Taxa de compressão pelota (U3) <sup>(a)</sup>	0.90	0.90	1107.15	< 2.2e-16	0.88	0.88	1232.12	< 2.2e-16

<sup>(a)</sup> Modelos estimados através da abordagem de tendência

(Conclusão)

Fonte: Elaborado pelo autor

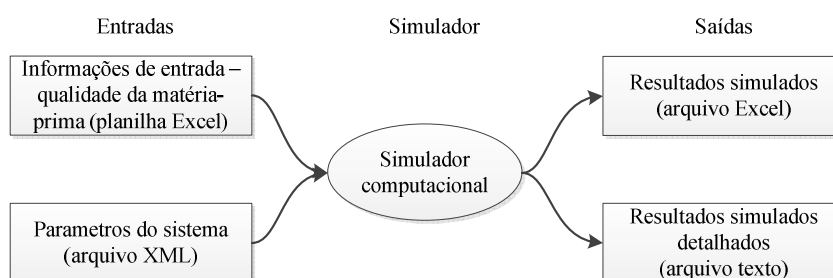
Após a estimação dos modelos matemáticos descritos anteriormente, as variáveis representadas por intermédio de distribuições de probabilidade foram estimadas conforme as recomendações apresentadas na literatura de simulação que trata de modelagem de dados de entrada, mencionado na Seção 2.4.2. Os testes estatísticos<sup>102</sup> necessários para testar a aderência das distribuições de probabilidade aos dados reais foram realizados com o suporte do *software* R.

Ao final da etapa de tratamento dos dados, foi realizada uma reunião do Grupo de Trabalho para a apresentação final dos resultados. A etapa seguinte consistiu em parametrizar o simulador, verificar a consistência da parametrização e validar o modelo computacional.

### 6.2.3.1 Verificação e validação do modelo computacional

As informações detalhadas no modelo conceitual, os modelos estimados (distribuição de probabilidade e modelos de regressão) e os dados de entrada do modelo foram parametrizados no simulador computacional. A Figura 36 ilustra as entradas do modelo que foram disponibilizadas em um arquivo *Ms Excel* e os parâmetros necessários para configurar o sistema modelado através de um arquivo XML (*eXtensible Markup Language*). Os arquivos de entrada foram processados no simulador computacional, gerando as saídas. Os detalhes referentes ao simulador computacional encontram-se no Anexo A.

Figura 36: Detalhamento do simulador



Fonte: Elaborado pelo autor

<sup>102</sup> Testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov. Vale destacar que as distribuições de probabilidade teóricas testadas foram: Uniforme; Normal; Exponencial; Gama; Triangular. O teste de hipótese foram realizados para um nível de significância de 95%. Quando os testes rejeitaram a hipótese de que alguma distribuição teórica era apropriada para representar os dados, nestes casos foram utilizadas distribuições empíricas.

Após a parametrização do simulador computacional, inicialmente, foi verificada a consistência dos dados. Algumas inconsistências são sinalizadas pelo simulador quando o mesmo executa o arquivo XML como, por exemplo, variáveis que não foram declaradas e inconsistência de nomenclatura. Finalizada a verificação do modelo, inicia-se a validação do modelo computacional. Esta garante que o modelo represente o comportamento do processo produtivo da Samarco de 2011, em termos de produtividade e qualidade da pelota.

Todas as variáveis do modelo foram configuradas, inicialmente, para operarem com o valor médio observado no sistema real. Isso significa que as condições iniciais definidas pelo modelo computacional consistiram em acenar para o modelo que o valor de uma dada variável era o valor médio observado na realidade. Como a cadeia produtiva no ambiente virtual inicia com todas as operações vazias e como os modelos dependem de variáveis defasadas no tempo, erros de cálculos indesejados poderiam ocorrer. Para a validação do modelo, definiu-se o tempo simulado (*run-length*) de 365 dias, pois, dessa forma, é possível comparar a produção de pelotas anual da empresa em relação aos valores simulados. Há uma grande sensibilidade por parte dos especialistas e usuários do modelo em relação aos volumes de produção anual desempenhado pela cadeia produtiva, sendo esta a justificativa para a definição desse tempo de simulação. O tempo de simulação é muito superior ao tempo de *warmup*, conforme sugerido por Banks (1998). O tempo de *warmup* do modelo definido segundo o método de Welch foi de dez dias. (ROBINSON, 2004). Assim, o tempo de duração da rodada parametrizada no simulador foi de 375 dias, dado que os 10 primeiros dias foram descartados dos dados de saída do modelo.

A validação interna iniciou-se pela avaliação da ordem de grandeza das variáveis calculadas a partir de modelos matemáticos, sejam elas taxas de alimentação e/ou transformações de qualidade. Por exemplo, supondo que a produtividade horária esperada para uma operação seja de aproximadamente 3.000 toneladas/hora, avalia-se, neste caso, se os valores simulados giram em torno do valor real de 3.000 toneladas/hora. Caso o valor médio da variável analisada encontra-se discrepante em relação ao valor real (maior que 20 por cento), a parametrização do simulador é revisada.

Na sequência, realizou-se a validação estatística dos modelos matemáticos. Para isso, conforme detalhado no Artefato proposto, foi necessário determinar o número de replicações necessárias para apontar o quão acurados são os valores simulados. Utilizou-se para isso o processo iterativo apresentado por Law e Kelton (1991). Primeiramente, foram simuladas 30 replicações. Calculou-se, para cada variável analisada, o tamanho de amostra (replicações)

necessária, assumindo um erro absoluto de um por cento (1%) e nível de confiança de 99%. Para nenhuma variável o número de replicações indicadas foi superior a 30. Logo, não foi necessário realizar novas replicações, além das 30 efetuadas inicialmente. Dessa forma, sabia-se que os valores médios das variáveis analisadas com 99% de nível de confiança tinham um erro absoluto de até um por cento.

Após a definição do número de replicações, o próximo passo consistiu em avaliar se as médias dos valores das variáveis intermediárias estimadas pelo modelo computacional eram estatisticamente iguais ao valor médio observado no mundo real. Em cada variável intermediária e final calculada pelo modelo computacional (listadas na Tabela 1) realizou-se o teste estatístico *teste-t* para comparação da média das amostras simuladas ( $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ ) em relação a um valor de referência, no caso, a média da variável real ( $r$ ). (HAIR et al., 2007).

Conforme descrito no Artefato, as variáveis simuladas que não são estatisticamente iguais ao valor real são ajustadas por intermédio de fatores. O fator é um multiplicador aplicado sobre a expressão matemática (modelo de regressão) visando garantir que o modelo consegue calcular valores estatisticamente iguais aos dados reais. A determinação desses fatores foi calculada a partir da diferença percentual entre o valor médio real da variável e o valor médio simulado para a mesma variável. Após a determinação desses fatores, novas replicações foram realizadas e os testes descritos anteriormente foram refeitos. Esse é um processo iterativo que é encerrado somente após todas as variáveis estarem validadas. No modelo construído na Samarco nenhum fator de ajuste excedeu três por cento.

O segundo estágio de validação – validação global – consistiu em comparar a média das variáveis de resposta obtidas a partir de ‘n’ replicações do modelo em relação aos valores realizados em 2011. Dessa forma, comparou-se os resultados da produção total de pelota das três usinas e as três qualidades do produto consideradas no estudo.

Para realizar os testes de validação do modelo, foi simulada uma rodada piloto com 30 replicações. A partir dos resultados obtidos nas 30 replicações, calculou-se a média e o desvio padrão das variáveis de respostas, no intuito de estimar o número de replicações necessárias (o tamanho de amostra<sup>103</sup>). O teste de tamanho de amostra, baseado em Doane e Seward (2008), considerou um erro absoluto de 1% em relação ao valor observado para a média e um nível de confiança de 99%. Desse modo, o teste apontou que o número de replicações

---

<sup>103</sup> A definição de tamanho de amostra necessário para assegurar um erro absoluto, estipulado em um dado intervalo de confiança estabelecido pelo pesquisador, é tratada em detalhes em Doane e Seward (2008). Na situação em que se conhece o desvio padrão da população, caso aqui abordado, o tamanho de amostra é obtido a partir da expressão  $n = (t\sigma/E)^2$ , onde  $n$  é o tamanho de amostra,  $t$  é o valor da distribuição t-student para o nível de significância,  $\sigma$  é o desvio padrão da população e  $E$  é o erro absoluto.

necessárias para garantir que a média das variáveis de resposta apresentasse erro de mais ou menos 1% em relação ao valor médio, com 99% de confiança, era de 31. Esse número de replicações foi observado para a variável de resposta produção de pelota da Usina de pelotização 2. As demais variáveis de desempenho apontaram um número de replicações inferiores a 31.

As médias da produção de pelota e das qualidades finais obtidas a partir das 31 replicações simuladas foram comparadas, estatisticamente, com os dados reais através de um teste de hipótese via estatística do *teste-t*. Esse teste foi realizado para um nível de confiança de 99%. A Tabela 2 ilustra os valores médios de produção anual acumulada, em toneladas, em números simulados e reais, bem como o resultado do teste de hipótese. Observa-se a hipótese nula de que a média dos valores simulados é estatisticamente igual aos dados reais. A Tabela 2 ainda apresenta o intervalo de confiança, calculado para o erro absoluto de 1% e para o nível de confiança de 99%. A Tabela 3 sintetiza os resultados obtidos para as variáveis de qualidade. Tais variáveis apontam que a média dos valores simulados é estatisticamente igual aos valores reais.

Tabela 2: Resultados da validação do modelo de simulação - produção

Descrição/Produção	Produção anual acumulada observada em 2011	Produção anual acumulada simulada				Comparação média		
		Média	Desvio Padrão	Intervalo de confiança		Teste t	p_valor	Teste hipótese
				Limite inferior	Limite superior			
Produção ROM	40,091,620.21	40,183,203.10	271,133.30	40,081,960.27	40,284,445.94	1.85	0.07	Aceita a hipótese nula
Produção Concentrado	22,647,397.00	22,695,607.57	146,918.17	22,640,747.43	22,750,467.72	1.80	0.08	Aceita a hipótese nula
Produção Forno 1	6,165,210.00	6,167,379.36	167,609.88	6,104,792.80	6,229,965.92	0.07	0.94	Aceita a hipótese nula
Produção Forno 2	6,711,310.00	6,699,954.57	156,969.85	6,641,341.07	6,758,568.08	-0.40	0.69	Aceita a hipótese nula
Produção Forno 3	8,575,890.00	8,541,975.77	113,271.88	8,499,679.35	8,584,272.19	-1.64	0.11	Aceita a hipótese nula
<b>Total Produção de Pelotas</b>	<b>21,452,410.00</b>	<b>21,409,309.70</b>	<b>262,377.74</b>	<b>21,311,336.24</b>	<b>21,507,283.16</b>	<b>-0.90</b>	<b>0.38</b>	<b>Aceita a hipótese nula</b>

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3: Resultado da validação das qualidades simuladas

Descrição/Qualidade	Qualidade média observada em 2011	Qualidade média simulada				Comparação média		
		Média	Desvio Padrão	Intervalo de confiança		Teste t	p_valor	Teste hipótese
				Limite inferior	Limite superior			
Taxa de tamboramento da pelota (U1)	93.77	93.72	0.15	93.66	93.77	-2.02	0.05	Aceita a hipótese nula
Taxa de compressão da pelota (U1)	318.18	319.50	11.49	315.21	323.79	0.63	0.53	Aceita a hipótese nula
Percentual de -6.3% (U1)	1.26	1.28	0.24	1.19	1.37	0.59	0.56	Aceita a hipótese nula
Taxa de tamboramento da pelota (U2)	93.63	93.60	0.36	93.46	93.73	-0.51	0.62	Aceita a hipótese nula
Taxa de compressão da pelota (U2)	310.38	304.96	30.04	293.75	316.18	-0.99	0.33	Aceita a hipótese nula
Percentual de -6.3% (U2)	1.11	1.16	0.14	1.11	1.21	1.71	0.10	Aceita a hipótese nula
Taxa de tamboramento da pelota (U3)	93.55	93.45	0.43	93.29	93.61	-1.35	0.19	Aceita a hipótese nula
Taxa de compressão da pelota (U3)	302.08	301.94	23.56	293.15	310.74	-0.03	0.98	Aceita a hipótese nula
Percentual de -6.3% (U3)	1.01	1.02	0.21	0.94	1.10	0.27	0.79	Aceita a hipótese nula

Fonte: Elaborado pelo autor



A condução dos testes estatísticos<sup>104</sup> resumidos na Tabela 2 e na Tabela 3 mostrou que tanto as produções acumuladas quanto as qualidades da pelota reais e simuladas são estatisticamente iguais (não há evidências estatísticas para acreditar que os dados simulados são diferentes dos dados reais). Assim, assume-se que o modelo encontra-se validado. Ao final da etapa de validação, uma nova reunião do Grupo de Trabalho foi agendada. Nessa ocasião, foram apresentados os resultados do modelo validado. O encontro foi utilizado para definir os experimentos a serem realizados com o modelo computacional.

Ao final do processo de validação observou-se que, a partir das etapas propostas no Artefato, foi possível chegar ao modelo de simulação que representa o sistema de produção da Samarco e explicita o desempenho do sistema em termos de produtividade e qualidade. O Artefato em sua concepção embarca, no modelo computacional, lógicas e regras internas para responder ao problema da degradação.

A próxima seção destaca exemplos de experimentos conduzidos com o modelo computacional da cadeia produtiva da Samarco para auxiliar no processo decisório da empresa.

### 6.3 ILUSTRAÇÃO DO USO DO MODELO COMPUTACIONAL NA SAMARCO

O modelo computacional desenvolvido na Samarco foi apresentado como um sistema para apoio a decisões relacionadas as operações da organização (investimento em melhorias no sistemas produtivo e definição de políticas operacionais). Esse sistema de apoio à decisão tem como objetivo indicar as melhores alternativas de investimento em melhorias e ampliações no sistema de produção e de manufatura à luz de um modelo que avalia de modo integrado e dinâmico o desempenho esperado do sistema em termos da qualidade do produto e da produtividade.

Os experimentos suportados pelo modelo computacional contemplam: variação (ampliação ou redução) na capacidade produtiva de uma ou mais etapas e/ou operações ao longo do processo produtivo; análise do impacto da variação das capacidades dos estoques;

---

<sup>104</sup> Neste momento vale destacar outros testes mais robustos como, por exemplo, testar se a variabilidade (desvio padrão) simulada e real são iguais. Mas, dado que a preocupação maior é ilustrar o potencial do Artefato proposto e os ganhos que podem ser obtidos a partir do modelo desenvolvido, esses testes não foram realizados.

ampliação física da cadeia produtiva através da inclusão de novas minas, novas usinas de beneficiamento e/ou usinas de aglomeração; avaliação do efeito da variabilidade em uma ou mais etapas representadas da cadeia; alterações nas políticas de manutenção (alterar as disponibilidades de um ou mais equipamentos representados no modelo) e avaliação do impacto de variações das qualidades da matéria-prima no desempenho do processo produtivo. Essas são algumas das principais potencialidades do modelo computacional desenvolvido para a Samarco, porém sabe-se que, como ferramenta de suporte à decisão, o modelo deve ser inserido nos mecanismos decisórios da empresa.

Na organização as decisões que demandam elevadas quantias de investimento necessitam ser aprovadas pelo conselho de administração da companhia. Dessa forma, para conseguir a aprovação de um projeto que demande recursos financeiros, há necessidade de expor e justificar os benefícios potenciais do projeto. O modelo computacional da cadeia produtiva visa justamente auxiliar os gestores da Samarco na justificativa de investimentos e na determinação de políticas operacionais da cadeia. Nesse sentido, dois exemplos, um de cada tipo, são detalhados na sequência.

### **6.3.1 Análise de investimento de uma nova pilha de minério (ROM)**

Uma situação em que o modelo foi utilizado com o propósito de justificar investimento ocorreu na operação de extração (mina). Havia uma demanda, por parte da gestão das operações de extração, de construção de uma nova pilha pulmão, a Pilha Centro (a Figura 34 destaca três pilhas pulmão, a saber, Pilha Fazendão, Pilha Sul e Pilha Norte). Porém, para justificar esse investimento vultoso, os acionistas da Samarco requisitaram um estudo que justificasse, em termos econômico-financeiros, os benefícios dessa nova pilha. Após uma série de experimentos<sup>105</sup> realizados com o auxílio do modelo de simulação, identificou-se justificativas operacionais e econômico-financeiras para a construção da nova pilha.

Considerando as operações atuais da empresa, observou-se que a Pilha Centro traria uma pequena vantagem ao sistema a partir de 2015. O aumento na produção de ROM e concentrado apresentado pelo modelo foi na ordem de 0,90%. Um segundo cenário simulado compreendeu a inclusão, no modelo computacional, da ampliação das operações

---

<sup>105</sup> Em função do sigilo das informações, não serão explicitados detalhamentos dos experimentos e resultados obtidos via simulação. O aspecto mais relevante, neste ponto, é apontar uma situação real em que o modelo de simulação foi utilizado como ferramenta de suporte à tomada de decisão.

da Samarco (projeto P4P), que prevê a elevação da capacidade produtiva em 35% até o ano de 2014. No cenário em questão, a Pilha Centro apontou um ganho de produção de ROM e concentrado de 2.1%.

Importante destacar que a elevação de produção apresentada pelo modelo foi limitada pela degradação das qualidades do minério que será explorado entre 2013 e 2015. Ou seja, a qualidade do minério imputada na simulação compreende as qualidades projetadas pela Samarco a partir dos seus estudos geológicos e do planejamento de exploração das reservas.

Os resultados simulados foram utilizados pela gestão da empresa para justificar tal investimento junto ao Conselho de Administração. A decisão de construção da nova pilha foi aprovada pelo Conselho e, atualmente, encontra-se em fase de execução.

### **6.3.2 Determinação política de manutenção do Concentrador 1**

A segunda aplicação do modelo computacional auxiliou na definição da política de manutenção da usina de Concentração 1. Assim, houve a adaptação do modelo de simulação da Cadeia Produtiva da Samarco no sentido de abranger um conjunto de cenários definidores de uma possível política de manutenção do Concentrador 1 e suas respectivas consequências para o sistema como um todo. Nessas análises, assumiu-se que as manutenções preventivas planejadas implicam horas salvas de manutenção corretiva (manutenção realizada somente quando ocorre uma quebra no equipamento). O termo ‘horas salvas’ refere-se a um período após a manutenção preventiva planejada, durante o qual não ocorrem paradas aleatórias. A quantidade de ‘horas salvas’ foi estabelecida com base em conhecimento dos especialistas da empresa. Observou-se que o uso de paradas preventivas planejadas apresenta ganho de produtividade quando comparado à condição de manutenção puramente corretiva. O projeto ainda demonstrou que a combinação do aumento dos estoques que antecedem o Concentrador 1 – *tripper* 1 – e o tanque de concentrado (tanques do mineroduto) e do uso de manutenção preventiva levaria a um aumento na produção de pelota de ferro na ordem de 200.000 toneladas/ano.

Outros experimentos foram, ainda, conduzidos na Samarco com o auxílio do modelo de simulação para suportar decisões de menor magnitude, dentre os quais se destacam:

- Priorização de projetos de melhoria (*lean-six sigma*). Diferentes propostas de melhorias, que geralmente envolvem investimento de capital, ocorrem em diferentes pontos do sistema de produção e de manufatura. Geralmente, o benefício promovido pelo projeto se dá a partir de uma ótica local do sistema;
- Definição da política de manutenção (preventiva *versus* corretiva);
- Avaliação da capacidade produtiva da cadeia produtiva, tendo em vista as metas de produção e o minério a ser lavrado, estipulados no orçamento;
- Avaliação do efeito da construção de novos estoques ao longo do processo produtivo;
- Análise do impacto do uso de minério de ferro de pior qualidade na produtividade e qualidade da cadeia produtiva.

Se por um lado o uso do modelo computacional propiciou uma plataforma para auxiliar na justificativa de investimentos e de políticas operacionais, por outro oportunizou a aprendizagem dos participantes do Grupo de Trabalho. Ainda, o uso do modelo computacional apontou a necessidade de algumas ações internas da Samarco para viabilizar o uso contínuo da ferramenta nos processos decisórios de investimento de capital, que são:

- Quanto ao simulador computacional, identificou-se que eventualmente faz-se necessário implementar novas funcionalidades não previstas como, por exemplo, programar manutenções preventivas. Para isso, pessoas especializadas em programação computacional necessitam ser acionadas para realizar as alterações necessárias no simulador;
- Quanto às relações de causa-e-efeito desenhadas na Estrutura Sistêmica, em casos em que possam ser introduzidas novas tecnologias de beneficiamento de minério no processo (por exemplo, concentração magnética em detrimento da concentração por flotação), tal ação demanda a revisão da estrutura sistêmica e, dessa forma, do modelo conceitual construído e validado;
- Quanto aos dados de entrada do simulador e aos utilizados para estimar os modelos de regressão e distribuição de probabilidade que necessitam ser

atualizados periodicamente em função das melhorias que são realizadas nas operações da Samarco ao longo do tempo, percebe-se que os modelos estimados não contemplam tais melhorias, o que pode levar a novas estimativas para as relações entre qualidade e produtividade.

O uso contínuo do modelo computacional pela Samarco demanda que haja uma equipe interna de pessoas capacitadas para gerenciar as ações necessárias para manter o modelo atualizado, em função das questões apontadas anteriormente. Além disso, as demandas de simulação devem ser centralizadas nessa equipe. Goldmeyer (2012) estudou por que os modelos de simulação são descontinuados nas organizações. Nesse sentido, o autor sugere uma proposta de governança para a continuidade de modelos de simulação nas organizações. Essa proposta destaca a necessidade de: obter apoio interno (gerência); formar uma equipe interna; capacitar a equipe interna e; difundir os conceitos elementares da simulação a todos os níveis da organização.

A seção a seguir sintetiza as questões tratadas neste capítulo.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo descreveu o desenvolvimento do modelo de simulação computacional por intermédio do Artefato proposto. O principal benefício do Artefato recai sobre a possibilidade de análise do impacto de uma decisão de investimento, no nível da tecnologia intrínseca de mineração, no desempenho global do sistema, medido em termos de produtividade horária e de qualidade do produto. O modelo resultante leva em consideração a variabilidade e a degradação da matéria-prima e as inter-relações entre a produtividade e a qualidade. O modelo permitiu suprir as lacunas identificadas na literatura de modelagem e simulação para desenvolver modelos integrados de cadeia produtiva de minério de ferro.

O método proposto ao longo do capítulo 5 é, em muitos momentos, generalista e não prescreve como desenvolver algumas etapas previstas como, por exemplo, a modelagem conceitual. Isso porque o Artefato proposto é apresentado de modo genérico, afim de, possibilitar a aplicação do mesmo em outros contextos de outras indústrias. O Artefato não foi idealizado para um caso particular. O caso particular do uso do Artefato se deu ao longo deste capítulo. Desse modo, a partir do uso do Artefato no contexto real da

empresa Samarco, observou-se a possibilidade de estabelecer um conjunto de estratégias de modelagem, não explicitadas durante a proposição do Artefato. Define-se estratégias de modelagem como um conjunto amplo de sugestões, extraídas a partir da construção do modelo no caso da Samarco, que visam auxiliar as aplicações futuras do Artefato proposto, tanto na empresa estudada, como em outras empresas mineradoras ou, ainda, em outros contextos. As estratégias de modelagem identificadas no caso da Samarco são:

- Estratégia 1: Toda operação representada na fluxo do processo compreende um processo genérico de entrada – processamento – saída. Aquelas operações que geram ganho e/ou perda de massa durante o processamento apresentam três variáveis que devem ser modeladas, a saber: i) a taxa de alimentação (entrada); ii) a perda/ganho de massa e; iii) taxa de produção (saída). Nesses casos, deve-se escolher apenas duas das três variáveis para serem representadas por modelos estocásticos (ou modelos fundamentais), sendo a terceira estimada em função das outras duas;
- Estratégia 2: Sempre que possível devem ser utilizados modelos fundamentais para explicitar as relações desejadas. Diferente dos modelos empíricos, os modelos fundamentais não necessitam ser atualizados frequentemente e retratam com precisão os mecanismos de processamento de uma operação em função dos fenômenos físicos e químicos. (HODOUIN; JÄMSÄ-JOUNELA, 2001);
- Estratégia 3: Mecanismos para tornar mais eficiente a modelagem empírica devem ser utilizados. O uso de modelos matemáticos com baixo poder de explicação pode levar a erros nas estimativas consideráveis no final da cadeia produtiva, dado que os erros são cumulativos. No caso estudado, a estimação de modelos de regressão nem sempre resultou em modelos com elevado poder de explicação. Nessas situações, optou-se por explicar a tendência dos dados em detrimento do uso de modelos com baixo poder de explicação;
- Estratégia 4: Os dados de entrada (qualidade da matéria-prima) no modelo são de suma relevância. Identificou-se que o meio mais adequado para tratar os dados da qualidade da matéria-prima é através das informações contidas nos modelos de blocos geológicos. Dessa forma, simular o comportamento

futuro do sistema é simples, basta indicar para o simulador os blocos geológicos que serão explorados;

- Estratégia 5: O nível de detalhamento do fluxo do processo depende do tipo de análises que serão realizadas com o modelo computacional. Não é possível avaliar o impacto de melhorias operacionais em elementos do sistema de manufatura que não estão representados no modelo conceitual;
- Estratégia 6: É importante gerar informações sobre os momentos em que uma determinada operação deseja massa e não há disponibilidade de material no estoque a montante e sobre as situações em que a operação desejava depositar material e não há espaço no estoque a jusante. O registro dessas informações auxilia na identificação das operações que restringem o desempenho global da cadeia produtiva, bem como das operações que operam com ociosidade.

O modelo computacional desenvolvido possibilitou à empresa realizar experimentos no sistema de produção e de manufatura e, assim, antecipar os potenciais ganhos de investimentos. Dessa forma, foi apresentado o caso de suporte à decisão de investimento em uma nova pilha pulmão nas operações de extração. Por fim, o capítulo destacou as questões relacionadas ao uso contínuo do modelo computacional nos processos decisórios de investimento e nas decisões técnicas e operacionais da Samarco.

O próximo capítulo apresenta as simulações conduzidas a partir do modelo desenvolvido para a Samarco para explicitar o efeito da degradação dos recursos naturais no desempenho do sistema produtivo. O capítulo ainda destaca a consequência de não considerar tal fenômeno nas análises de previsão de desempenho de um investimento de capital.

## 7 O PROBLEMA DA DEGRADAÇÃO TRATADO PELO MODELO

Neste capítulo, busca-se responder a questão de pesquisa explicitada na introdução: ‘em uma dada firma produtora de minério de ferro, como a degradação e a variabilidade da qualidade da matéria-prima interferem no desempenho global do processo produtivo em termos da produtividade horária do sistema e da qualidade do produto?’ O modelo desenvolvido na Samarco a partir do Artefato proposto, que compreende o mecanismo para tratar a variabilidade e a degradação através do uso de modelos de regressão condicionados no tempo e no espaço, busca responder a questão. A comparação explicitada neste capítulo busca essencialmente comparar a abordagem de simulação usualmente apresentada na literatura de simulação em comparação com a abordagem apresentada nesta pesquisa.

O modelo desenvolvido na Samarco a partir do Artefato é utilizado para realizar experimentos em comparação com um modelo que trata a variabilidade conforme o mecanismo tradicional. Portanto, os seguintes modelos concorrentes compreendem o experimento realizado:

- Modelo Tradicional: adaptação do modelo desenvolvido e validado no Capítulo 6, porém os modelos de regressão foram substituídos por distribuições de probabilidade independentes. Dessa forma, o modelo tradicional é incapaz de estimar o desempenho da cadeia produtiva em termos de qualidade, bem como se torna independente das qualidades da matéria-prima. No modelo tradicional, as taxas de produção representadas através de distribuições de probabilidade não são afetadas pela qualidade da matéria-prima. Desta forma, a degradação da qualidade da matéria-prima não causa impacto nas taxas de produção. Esta decisão, sustenta-se no fato de não ter sido observada na literatura uma forma para representar em um modelo de simulação o efeito da degradação.
- Modelo Proposto: modelo tal e qual detalhado no Capítulo 6.

Ambos os modelos foram submetidos ao problema da degradação através dos dados de entrada do modelo de simulação (qualidades da matéria prima representada em uma planilha Excel). Para representar tal problema sinteticamente, degradaram-se em um por



cento (1%) ao ano as características<sup>106</sup> da matéria-prima coletada durante o desenvolvimento do modelo. Essa taxa de degradação de um por cento ao ano<sup>107</sup> é próxima da taxa sugerida por Topp et al. (2008). Foi simulado um período de 10 anos, sendo que em cada ano as qualidades da matéria-prima foram degradadas em um por cento em relação ao ano anterior. Ou seja, os decréscimos foram constatados e iguais a 1% do ano anterior, ao longo dos 10 anos. As alterações nas qualidades da matéria-prima resultaram em uma nova planilha de entrada, porém, contendo os 10 anos com as qualidades degradadas.

Objetivando garantir a validade estatística das análises comparativas entre os resultados gerados pelo modelo tradicional e pelo modelo proposto, foram realizadas 31 replicações. Esse número de replicações foi justificado na Seção 6.2.3 e foi assumido dado que os parâmetros e qualidades iniciais (ano um) são iguais para ambos os modelos em relação àquelas utilizadas para a validação do modelo descrito na Seção 6.2.3.

Tendo em vista as 31 replicações realizadas, foi obtida a produção média de pelota em cada um dos dez períodos, bem como o intervalo de confiança para um erro absoluto de 1% e nível de confiança de 99%. Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4 e na Tabela 5, para os resultados do Modelo Tradicional e Modelo Proposto, respectivamente.

Tabela 4: Produção de pelota de ferro no Modelo Tradicional (síntese resultados das 31 replicações)

Ano	Produção acumulada anual de pelota – Média [toneladas]	Produção acumulada anual de pelota - Desvio Padrão [toneladas]	Intervalo de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
1	20,939,416	126,897	20,875,556	21,003,276
2	20,889,996	161,837	20,808,553	20,971,440
3	20,899,837	113,322	20,842,808	20,956,866
4	20,933,076	136,811	20,864,227	21,001,926
5	20,911,005	137,519	20,841,799	20,980,210
6	20,877,038	135,075	20,809,062	20,945,014
7	20,882,697	157,735	20,803,317	20,962,076
8	20,904,814	161,370	20,823,606	20,986,023
9	20,852,761	171,055	20,766,679	20,938,844
10	20,913,697	108,493	20,859,098	20,968,295
Média	20,900,434			
Desvio Padrão	26,111			

Fonte: Elaborado pelo autor

<sup>106</sup> Das características da matéria-prima monitoradas, o coeficiente de degradação de 1% ao ano foi aplicado sobre o teor de ferro, teor de sílica e PPC, sendo o primeiro reduzido em 1% e os outros dois elevados em 1%. Isso porque, com a degradação da reserva, os valores das características desejadas reduzem ao longo do tempo e os das características indesejadas aumentam.

<sup>107</sup> A taxa de degradação observada no caso estudado não foi utilizada para as simulações devido ao sigilo dessa informação. Para efeitos das simulações realizadas neste capítulo, a taxa de degradação precisa não é relevante.

Tabela 5: Produção de pelota de ferro no Modelo Proposto (síntese dos resultados das 31 replicações)

Ano	Produção acumulada anual de pelota – Média [toneladas]	Produção acumulada anual de pelota - Desvio Padrão [toneladas]	Intervalo de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
1	20.939.416	126.897	20.875.556	21.003.276
2	20.785.553	118.854	20.725.741	20.845.366
3	20.610.216	111.258	20.554.226	20.666.206
4	20.425.278	113.933	20.367.942	20.482.614
5	20.231.253	119.150	20.171.292	20.291.215
6	20.034.310	125.671	19.971.067	20.097.554
7	19.832.702	123.468	19.770.567	19.894.837
8	19.631.519	122.518	19.569.862	19.693.175
9	19.431.389	121.440	19.370.275	19.492.503
10	19.231.036	120.057	19.170.618	19.291.455
Média	20.115.267			
Desvio Padrão	582.428			

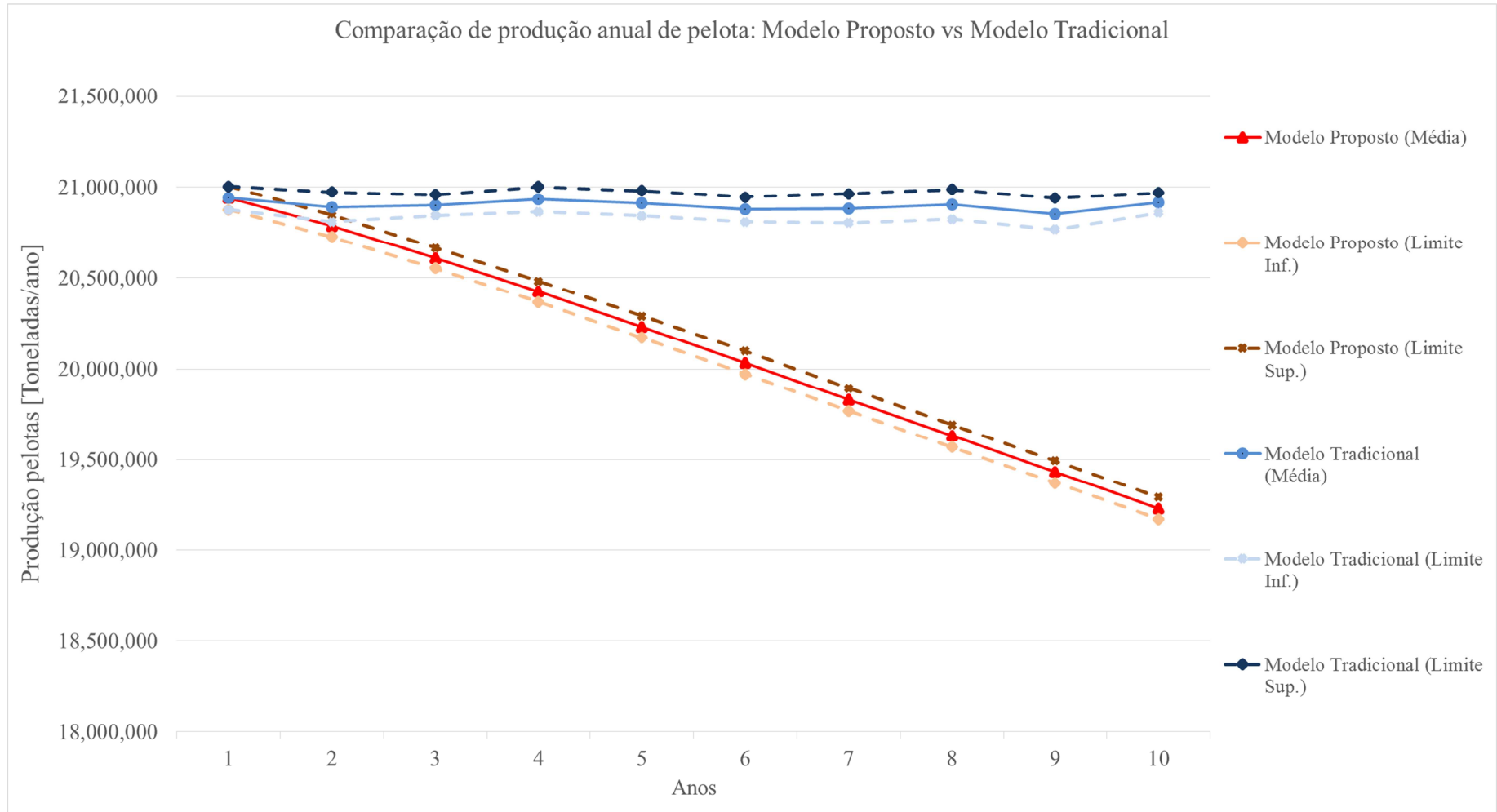
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se, nos dados compilados nas Tabela 4 e Tabela 5, que a produção de pelota nos resultados gerados pelo Modelo Proposto decai com o passar ao tempo, enquanto que, a produção no Modelo Tradicional mantém-se constante. No caso do Modelo Proposto, a perda de produção anual não é linear. A diminuição de produção do segundo ano em relação ao primeiro foi de 0,73%, do terceiro ano para o segundo foi de 0,84%, do quarto ano para o terceiro foi de 0,90%, do quinto ano para o quarto foi de 0,95%, do sexto ano para o quinto foi de 0,97%, do sétimo ano para o sexto foi de 1,01%, do oitavo ano para o sétimo foi de 1,01%, do nono ano para o oitavo foi de 1,02% e do décimo ano para o nono foi de 1,03%.

A alimentação de minério nas diferentes replicações mantém-se estável, sendo o valor médio de 40 milhões de toneladas. Esse resultado era esperado, uma vez que o Modelo Tradicional desconsidera a degradação da matéria-prima. A fim de avaliar se as produções são estatisticamente diferentes entre os dois modelos, foi realizada a comparação de médias entre os resultados do Modelo Tradicional ( $Pt_1, Pt_2, Pt_3, \dots, Pt_{33}$ ) e do Modelo Proposto ( $Pp_1, Pp_2, Pp_3, \dots, Pp_{33}$ ). O teste de hipótese comparou as duas amostras a partir da estatística do *teste-t*. O resultado da comparação de médias entre os dados do Modelo Tradicional e do Modelo Proposto mostra (*p-value* igual a 0.0018) que, para um nível de significância de 5%, a produção de pelota apresentada pelo Modelo Proposto é menor que a produção apontada pelo Modelo Tradicional. Graficamente, essa diferença pode ser observada na Figura 37.



Figura 37: Comportamento da produção de pelota ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

A discussão em torno dos resultados obtidos a partir das simulações apresentadas anteriormente encontra-se detalhada na seção a seguir.

## 7.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das simulações realizadas apontam que existem diferenças entre a produção de pelotas indicada pelo Modelo Tradicional e pelo Modelo Proposto. A produção apontada pelo Modelo Tradicional mantém-se constante ao longo do período de 10 anos simulados. Já a produção indicada pelo Modelo Proposto, mostra uma redução gradual ao longo dos 10 anos simulados, sendo que, ao final do décimo ano, a perda de produtividade é de 9,1% em relação ao primeiro ano. Este resultado era esperado, considerando que o modelo tradicional não leva em consideração o efeito da degradação da qualidade da matéria-prima.

No Modelo Tradicional, no qual as taxas de produção horária de cada etapa da cadeia produtiva foram representadas por distribuições de probabilidade independentes, a degradação das qualidades da matéria-prima não tem nenhuma influência sobre a produtividade do sistema de produção. No entanto, no nível do sistema de manufatura, a baixa qualidade da matéria-prima provoca efeitos indesejados na produtividade, conforme destacado por King (2001), May et al. (2011) e Topp et al. (2008). Assumindo que não ocorra nenhuma inovação na tecnologia de processamento do minério, conclui-se que as projeções futuras de produção de pelota de ferro apresentadas pelo Modelo Tradicional não estão corretas. Em outras palavras, o Modelo Tradicional superestima a produção de pelota no futuro, o que poderia levar a uma estimativa equivocada de retorno sobre o investimento, ou ainda priorização de projetos de capital. O Modelo Tradicional pressupõe equivocadamente que não há degradação da qualidade da matéria-prima.

No entanto, a abordagem da modelagem tradicional não é invalidada para estudos na indústria de mineração. Existem pesquisas em que não se deseja analisar o desempenho do sistema de produção e de manufatura em termos de produtividade e qualidade. Como exemplo, cita-se os trabalhos de Castro Neto (2006) e Juliá (2010), que tratam do sistema de armazenagem e embarque das pelotas de ferro, ou ainda trabalhos de busca para dimensionar os recursos de mina (caminhões, carregadeiras, tratores, etc). A modelagem tradicional é uma ferramenta eficaz para suportar decisões na indústria de mineração, embora superestime a produção futura prevista.

Em contrapartida, os resultados do Modelo Proposto apontam para uma redução na produção de pelota com o passar do tempo, dado que o modelo representa o efeito da degradação da qualidade da matéria-prima na produtividade do sistema de manufatura. Sob a ótica da tecnologia intrínseca de processamento de minério empregada no caso estudado, os resultados apresentados são coerentes. Por exemplo, a produtividade da operação de concentração tem elevada dependência do teor de sílica do ROM (matéria-prima). Quando o teor de sílica aumenta, o desempenho do sistema de manufatura é reduzido. Essa relação encontra-se explicitada nos modelos de regressão<sup>108</sup> que apontam a recuperação mássica da etapa de Deslamagem e Flotação. Logo, quando o teor de sílica do ROM diminui, é esperada a perda de produtividade da operação de Concentração. Outro exemplo que sustenta os resultados obtidos refere-se à relação entre o PPC e a perda de massa na etapa de queima da pelota. Quanto maior o PPC, característica carregada pelo minério ao longo de todo o processo, maior é a perda de massa da pelota no forno. Assim, como nas simulações há uma redução no valor do PPC de um por cento ao ano, então a perda de produtividade no forno é condizente com a tecnologia intrínseca de queima da pelota. Tanto a perda de produtividade da concentração quanto a perda de produção do forno não são explicadas exclusivamente pelo teor de sílica e PPC, respectivamente, o que torna complexa a determinação da perda de produtividade da cadeia produtiva. Como explicitado na Estrutura Sistêmica e detalhado na literatura específica de mineração, existe um conjunto de fatores que interagem e interferem na produtividade e na qualidade do produto. Esta seção focou-se nas discussões da produtividade. O Modelo Proposto através de modelos estocásticos (modelos de regressão) busca capturar e representar essas relações.

A mitigação do problema da degradação da qualidade da matéria-prima se dá, na indústria de mineração, através da inovação tecnológica no sistema de manufatura. (MAY et al., 2011; PRIOR et al., 2012; TOPP et al., 2008). Essas inovações na tecnologia de processamento podem ser incorporadas ao modelo computacional.

O próximo capítulo apresenta as considerações finais da pesquisa, bem como a proposição de trabalhos futuros.

---

<sup>108</sup> No Capítulo 6, que descreveu a construção do modelo computacional, explicitou-se, no Quadro 9, a necessidade de um modelo matemático para representar a recuperação mássica do concentrador. O modelo de regressão estimado para representar o modelo da recuperação mássica do concentrador contempla, como variáveis explicativas, o teor de sílica e o PPC.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando uma empresa explora uma reserva mineral, a qualidade do minério degrada com o passar do tempo. Além disso, em função da formação geológica da reserva, o mineral explorado apresenta elevada variabilidade no que tange a qualidade. Essas duas características intrínsecas da indústria de mineração têm impacto significativo no desempenho do sistema produtivo, e conseqüentemente, nas decisões relacionadas a investimentos em expansão, melhorias e definição de políticas operacionais. Dessa forma, a questão de pesquisa tratada nesta tese buscou compreender, através de um modelo de simulação computacional, como a degradação e a variabilidade da qualidade da matéria-prima afetam o desempenho do sistema de produção. Na pesquisa, o desempenho do sistema foi desdobrado em dois fatores: i) a qualidade do produto e; ii) a produtividade horária. Observou-se que o tema, apesar de ser abordado na literatura, não contempla trabalhos que detalham de modo sistêmico e dinâmico o problema da degradação e da variabilidade da matéria-prima no desempenho global do sistema produtivo, sob a ótica da firma/empresa.

Esta tese é uma primeira tentativa de endereçar formalmente um método para desenvolvimento de modelos de simulação computacional que lidam com o problema mencionado anteriormente. Assim, o objetivo principal da pesquisa consistiu na proposição de um método para o desenvolvimento de modelos de simulação, denominado Artefato. Esse Artefato buscou propor os seguintes elementos: i) a representação do desempenho do sistema em função da produtividade horária e da qualidade do produto; ii) a incorporação da dinâmica entre as características intrínsecas da matéria-prima, a degradação e a variabilidade, no desempenho do sistema e; iii) a modelagem das inter-relações da qualidade da matéria-prima, das qualidades intermediárias (observadas ao longo do sistema produtivo), das qualidades do produto e da produtividade horária ao longo do sistema produtivo.

A partir do estudo realizado e do modelo desenvolvido na empresa Samarco, foi ilustrado que é possível desenvolver modelos que tenham como variável de resposta a qualidade do produto e a produtividade horária do sistema, definidas em função da qualidade da matéria-prima. O Artefato proposto parte de uma estrutura sistêmica que representa as relações de causa-e-efeito entre as variáveis de interesse. A partir do caso estudado, pode-se concluir que:

- É possível estimar, antecipadamente, o impacto de decisões envolvendo investimento e/ou políticas operacionais na produtividade do sistema produtivo e na qualidade dos produtos. No contexto da empresa em que o Artefato foi construído, o uso do simulador mostrou-se adequado para análise de ciclos orçamentários futuros, priorização de projetos de melhoria, justificativa de investimento em aumento de capacidade de estoques, entre outros;
- Os modelos de simulação encontrados na literatura conseguem lidar adequadamente com questões ligadas à variabilidade dos processos (EVERETT, 1997; BASU; BAAFI, 1999; STURGUL, 1999), mas não com as questões da degradação e da modelagem conjunta da produtividade e da qualidade. Assim, este trabalho visou estabelecer as contribuições do ponto de vista teórico-conceitual para a área de PO, de modo geral, e para a área de mineração, em específico;
- As simulações (descritas no Capítulo 7) mostram, através de dados quantitativos, que a degradação, conforme previsto conceitualmente na literatura, impacta negativamente o desempenho do sistema produtivo. Assim, as simulações não só apontam o impacto da degradação no desempenho do sistema, como também concedem dados quantitativos para comprovar tal situação. No caso estudado, observou-se uma redução de aproximadamente 9% na produção de pelota ao final de dez anos, assumindo uma degradação de 1% ao ano. Essas simulações possibilitam concluir que tomar uma decisão baseada no potencial resultado de um investimento ou melhoria operacional sem considerar o efeito da degradação, pode levar a uma análise equivocada sobre o potencial retorno do investimento.

A seguir, faz-se uma discussão sucinta sobre as principais contribuições teóricas da pesquisa. Em primeiro lugar, a pesquisa promoveu uma discussão crítica sobre as limitações dos métodos de modelagem e simulação tradicionalmente utilizados para analisar o desempenho do sistema, ao tratar, simultaneamente, os tópicos produtividade e qualidade.



A segunda contribuição do trabalho recai sobre as discussões, no âmbito de análise da empresa, do problema da degradação da qualidade da matéria-prima, até então, pouco tratado na literatura.

Uma terceira colaboração foi a proposição do Artefato, que mitigou alguns *gaps* identificados na literatura de modelagem e simulação relacionados, principalmente, à modelagem conceitual e ao mecanismo tradicional de modelagem da variabilidade.

Em quarto lugar, a tese pôde contribuir com o desenvolvimento de um simulador computacional (SIMCAPS) dedicado a suportar o Artefato e o mecanismo de modelagem propostos. No que tange à modelagem da variabilidade, foi apresentada uma proposta para modelar as relações de causa-e-efeito, condicionando as produtividades horárias e as qualidades através de expressões matemáticas em detrimento das distribuições de probabilidade - mecanismo tradicional. Ainda com relação à modelagem proposta, foi destacada a possibilidade do uso de modelos fundamentais (propostos, geralmente, pela engenharia de minas). Porém, conforme destacado por Hodouin e Jämsä-Jounela (2001) e Hodouin (2011), há uma carência de modelos fundamentais que tratam do processamento mineral, dado a complexidade do tema. Justifica-se assim, o uso, no caso da Samarco, de modelos empíricos para explicar as relações necessárias.

Quanto ao Artefato e ao mecanismo de modelagem propostos, apesar de aplicados em uma única indústria, a de mineração, e em um único caso, apresentam elementos passíveis de generalização. O Artefato descrito pode ser aplicável, com as devidas adaptações, a outras indústrias que trabalham com recursos naturais, por exemplo, a indústria do petróleo. Já o mecanismo, que condiciona as produtividades e qualidades ao longo de toda a cadeia produtiva, pode ser utilizado em outras circunstâncias. Em um sentido mais amplo, o mecanismo possibilita que sejam tratadas situações em que o desempenho do sistema sofre alterações ao longo do tempo, por exemplo, quando ocorrem melhorias de processo. Nesse caso, é razoável supor que os tempos de processamento diminuam na medida em que ações efetivas surtem efeito. A modelagem dos efeitos da melhoria no processo ao longo do tempo poderia ser representada pelo mecanismo geral proposto.

Para auxiliar o desenvolvimento do objetivo principal da pesquisa, foram elencados objetivos intermediários. Nesse sentido, declarou-se como objetivo específico, primeiramente, compreender as inter-relações entre os sistemas de produção e de manufatura. Para isso, utilizou-se o *framework* proposto por Black (1998), o qual diferencia claramente os dois sistemas supramencionados. A partir da proposição e dos

conceitos de Black (1998), foi possível estabelecer os limites e as relações entre os sistemas de produção e de manufatura. Enquanto o sistema de produção preocupa-se com o fluxo global de produção e com os sistemas de controle, o sistema de manufatura compreende a tecnologia intrínseca de processamento envolvida, e é justamente neste último que a qualidade da matéria-prima interfere na produtividade horária da cadeia produtiva. Dessa forma, observou-se que os estudos relacionados ao sistema de produção buscam ser generalizáveis a qualquer sistema, ou seja, sob essa ótica, os conceitos da gestão da produção para produzir carros ou minério de ferro são similares. Já a tecnologia intrínseca de processamento é específica em cada tipo de indústria, ou seja, o sistema de manufatura para produzir carros é diferente daquele necessário para processar minério de ferro.

A partir da proposição de Black (1998) observou-se que, geralmente, os estudos não abordam as inter-relações entre os sistemas de produção e de manufatura. Por um lado a administração/engenharia da produção costuma centrar seus esforços no fluxo global de produção, concedendo limitada atenção à tecnologia de processamento. Por outro lado, as questões intrínsecas do processamento propriamente dito são tratadas pelas engenharias básicas (engenharia mecânica, elétrica, química, minas, etc.), através de modelos fundamentais que, normalmente, detalham o comportamento de uma parte muito pequena do sistema, desconsiderando o sistema como um todo. Essas diferenças explicitadas também são observadas na literatura que aborda a modelagem e a simulação de sistemas. Geralmente, a modelagem de um sistema desconsidera as inter-relações entre o sistema de produção e o de manufatura. Assim, na literatura, os modelos representam exclusivamente o desempenho do sistema, ou em termos da produtividade, ou em termos da qualidade do produto. (CHAN; SPEDDING, 2003; MINGERS; WHITE, 2010).

O segundo objetivo específico buscou avaliar a viabilidade de integração entre as abordagens de modelagem *hard* e *soft*. Apesar de a literatura sobre o tema ser incipiente, constatou-se, nos trabalhos publicados, que a associação entre as abordagens *hard* e *soft* é benéfica ao processo de modelagem. (PIDD, 2004a; 2012; RODRIGUES, 2006; CHECKLAND, 1999). A integração sugerida na pesquisa, agregada ao Artefato proposto consistiu, primeiramente, na compreensão do sistema e da situação problemática com o suporte da abordagem *soft*. Na sequência, a abordagem *hard* – simulação computacional – serviu para materializar o modelo lógico/matemático projetado.

A integração das abordagens *hard* e *soft* apresentada na pesquisa mitiga a questão da modelagem conceitual, geralmente pouco tratada pela literatura de simulação.

(GEORGES, 2005; ROBINSON, 2008). Entende-se que a utilização da abordagem *soft* no início do método de desenvolvimento de um modelo de simulação auxilia na etapa de modelagem conceitual do sistema. Observa-se, a partir do caso da Samarco, que a integração *hard* e *soft* proposta no Artefato facilitou a compreensão do sistema de produção e de manufatura. Essa compreensão passou pelo mapeamento das relações de causa-e-efeito entre as variáveis de qualidade (da matéria-prima, intermediárias e do produto), de produtividade horária e de operação do sistema de manufatura em uma estrutura sistêmica. Não há como afirmar se outros caminhos metodológicos chegariam ao mesmo resultado. O que se pode dizer é que o uso de uma abordagem *soft* tornou possível a construção do modelo conceitual à luz dos problemas da degradação da qualidade da matéria-prima.

O terceiro objetivo específico buscou avaliar os métodos, as técnicas e as ferramentas de modelagem disponíveis na literatura que poderiam auxiliar para lidar com os problemas da degradação e da variabilidade da matéria-prima no desempenho do sistema produtivo. Nesse aspecto, um ponto relevante do trabalho consistiu em mostrar que o mecanismo tradicional de modelagem da variabilidade (descrito no Capítulo 5), exposto na literatura, é inadequado para representar, em um modelo computacional, o comportamento dinâmico da degradação da qualidade da reserva no desempenho do sistema.

O quarto objetivo específico tratou do desenvolvimento de um modelo computacional em um caso real, a partir do Artefato proposto. Ao longo do Capítulo 6, descreve-se em detalhes a construção do modelo computacional na Samarco, conforme as etapas sugeridas no Artefato. A aplicação do Artefato na organização em questão possibilitou avaliar e discutir a consistência do método proposto, os potenciais benefícios promovidos por ele e os desafios para a construção de modelos de simulação a partir do Artefato. Ao final do capítulo citado, mostram-se situações em que o modelo computacional foi utilizado para suportar decisões. Destaca-se que, atualmente, o modelo continua sendo utilizado para suportar decisões, tanto de investimento de capital, quanto de questões operacionais do sistema produtivo.

Por fim, o último objetivo específico tratou de avaliar o uso do modelo computacional no processo decisório da Samarco. Tal objetivo buscou não detalhar o processo decisório da Samarco propriamente dito, mas avaliar o potencial papel do modelo computacional como um sistema de apoio à decisão. Nesse sentido, o modelo foi utilizado pela Samarco ao longo dos últimos dois anos para suportar decisões de cunho operacional,

bem como para estudar e justificar investimentos. Durante a realização da pesquisa, observou-se que o uso do modelo para suportar decisões não ocorre sistematicamente na Samarco.

A seção a seguir descreve as principais limitações da pesquisa.

## 8.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa descrita ao longo deste documento caracteriza-se por estabelecer um foco na visão técnica. Isso significa que os modelos são compreendidos como mecanismos de suporte à decisão que se baseiam centralmente nos aspectos técnico-econômicos. O estudo compartilha a visão de que o uso de um modelo de simulação (ou modelo matemático) para gerar informações que suportem decisões constitui-se em um meio no contexto mais amplo do processo decisório das organizações. Se por um lado a pesquisa não atentou o processo decisório propriamente dito, por outro, dedicou-se a avançar o conhecimento relacionado ao desenvolvimento da modelagem e simulação para suportar decisões no contexto estudado. Esse avanço de conhecimento se deu não só pela literatura de modelagem e simulação, mas, sobretudo, pelo tratamento das questões relacionadas às dimensões produtividade e qualidade do produto entregue pelo sistema produtivo.

As limitações da pesquisa são desdobradas sob a ótica do Artefato, do simulador computacional, do modelo de simulação e da aplicação do Artefato na Samarco. Primeiramente, destacam-se as principais limitações da pesquisa em relação ao Artefato, que foram:

- A tradução das informações mapeadas na estrutura sistêmica para o modelo conceitual do sistema não é explicitado no método. Algumas estratégias foram destacadas, porém elas emergiram do caso da Samarco;
- O Artefato proposto foi aplicado em um único caso. Dessa forma, não há como garantir a sua efetividade, dada a limitação de uma única aplicação. A pesquisa descreve detalhadamente as etapas necessárias para a construção de modelos de simulação que incluam a degradação da matéria-prima e retratem o desempenho do sistema em função da qualidade do produto e da produtividade, mas essa descrição não assegura que, ao utilizar o Artefato proposto, se chegará ao desenvolvimento do modelo computacional;

- O método proposto foi apresentado de forma linear, com retroalimentações em algumas etapas. No entanto, durante a aplicação do Artefato no caso, observou-se que ocorrem inúmeras idas e vindas nas diferentes etapas do método descritas ao longo do Capítulo 6. Estas, porém, não estão detalhadas, dado que podem variar em cada caso.

Já as limitações relacionadas ao simulador computacional desenvolvido ao longo da pesquisa são:

- O mecanismo de incremento de tempo, no caso 10 minutos, é fixo, ou seja, não pode ser parametrizado pelo pesquisador;
- No simulador não há uma interface gráfica amigável para a parametrização do modelo.

Quanto ao modelo computacional desenvolvido para o caso da Samarco, as limitações centrais foram:

- O sistema de produção e de manufatura representado no modelo é uma simplificação de um complexo de correias, motores, equipamentos, etc. Assim, todas as análises experimentadas no modelo computacional devem ser descritas em um nível que seja passível de representação no modelo;
- Os modelos empíricos utilizados no simulador são modelos lineares (regressão linear). Optou-se por tais modelos porque a literatura que trata das relações elementares no processamento mineral é limitada, logo não há suporte teórico para uso de modelos não lineares. (HODOUIN; JÄMSÄ-JOUNELA, 2001);
- O uso de modelos empíricos em detrimento de modelos fundamentais demanda atualizações. Quanto ao uso do modelo computacional, observou-se que modelos matemáticos (modelos de regressão), que são estimados a partir de dados históricos, necessitam ser constantemente atualizados (HODOUIN; JÄMSÄ-JOUNELA, 2001). Isso é necessário porque, com o passar do tempo, melhorias incrementais são realizadas no processo produtivo e estas deixam de ser representadas nos modelos que são

estimados em dados históricos; logo deve-se atualizar constantemente os dados do modelo. Essa atualização está prevista no Artefato.

Por fim, as limitações fundamentais referentes à aplicação do Artefato proposto na Samarco, foram:

- Não havia todos os dados disponíveis para a modelagem, por isso foram realizadas transformações e defasagens nas informações para conseguir todas as variáveis necessárias, conforme detalhado no Capítulo 6;
- Observou-se que o número de pessoas envolvidas na construção do simulador computacional é expressivo, o que implica uma demanda elevada de horas de trabalho. Além disso, o método necessita de profissionais qualificados em abordagens *hard* e *soft* para suportar todas as etapas descritas no Capítulo 5.

A seguir, são apresentadas as principais sugestões de trabalhos futuros, identificados a partir do desenvolvimento da tese.

## 8.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Ao final desta pesquisa, observou-se um conjunto de trabalhos futuros que podem ser derivados e/ou inter-relacionados com esta tese, a saber:

- Replicar o estudo em outras empresas mineradoras, com o objetivo de avaliar a viabilidade e aplicabilidade do Artefato proposto;
- Aplicar o Artefato proposto em outras indústrias, que não a de mineração, com a finalidade de avaliar a possibilidade de generalização do mesmo;
- Aprofundar o estudo em modelos fundamentais da engenharia de minas e utilizar tais modelos em substituição e/ou complementação aos modelos estocásticos (empíricos) adotados no trabalho realizado;
- Avaliar a possibilidade de integrar o modelo computacional, resultado do Artefato proposto, ao processo de tomada de decisão das empresas mineradoras.

## REFERÊNCIAS

- ACKOFF, R. L. The development of operations research as a science. **Operations Research**, v. 4, n. 3, p. 265-295, 1956.
- ACKOFF, R. L. Towards a system of systems concepts. **Management Science**, v. 17, n. 11, p. 661-671, 1971.
- ACKOFF, R. L. The Systems Revolution. **Long Range Planning**, v. 7, n. 6, p. 2-20, 1974.
- ACKOFF, R. L. The future of operational research is past. **Journal of the Operational Research Society**, v. 30, n. 2, p. 93-104, 1979.
- ALEXANDROV, T. et al. A Review of Some Modern Approaches to the Problem of Trend Extraction. **Econometric Reviews**, v. 31, n. 6, p. 593-624, 2012.
- AMAZONAS, M. DE C. **Economia do Meio Ambiente: Uma análise da abordagem neoclássica a partir de marcos Evolucionistas e Institucionalistas**. Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós Graduação em Economia. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1994.
- AMAZONAS, M. DE C. **Valor e Meio Ambiente: Elementos para uma Abordagem Evolucionista**. Tese (Doutorado em Economia) – Programa de Pós Graduação em Economia. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.
- ANDRADE, A. L.; SELEME, A.; RODRIGUES, L H.; SOUTO, R. **Pensamento sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- ANTUNES, J.; ALVAREZ, R.; BORTOLOTTI, P.; KLIPPEL, M.; PELLEGRIN, I. **Sistemas de produção: conceitos e práticas para projeto e gestão da produção enxuta**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- ANTUNES, J. A. V. **Em direção a uma teoria geral do processo na administração da produção uma discussão sobre a possibilidade de unificação da teoria das restrições e da teoria que sustenta a construção dos sistemas de produção com estoque zero**. Tese (Doutorado em Administração) – Programa de Pós Graduação em Administração. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. p. 564.
- ASSAD, A. A.; GASS, S. I. **Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators**. New York: Springer, 2011.
- BAKHRANKOVA, K. Decision support system for continuous production. **Industrial Management & Data Systems**, v. 110, n. 4, p. 591-610, 2010.

- BANKS, J. **Handbook of simulation**. New Jersey: Wiley Online Library, 1998.
- BASU, A. J.; BAAFI, E. Y. Discrete event simulation of mining systems: current practice in Australia. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 2, p. 79-84, 1999.
- BELL, J. E.; AUTRY, C. W.; MOLLENKOPF, D. A.; THORNTON, L. M. A Natural Resource Scarcity Typology: Theoretical Foundations and Strategic Implications for Supply Chain Management. **Journal of Business Logistics**, v. 33, n. 2, p. 158-166, 2012.
- BERTALANFFY, L. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1975.
- BJØRNDAL, T.; HERRERO, I.; NEWMAN, A.; ROMERO, C.; WEINTRAUB, A. Operations research in the natural resource industry. **International Transactions in Operational Research**, v. 19, n. 1-2, p. 39-62, 2012.
- BLACK, J. T. **O Projeto da Fábrica com Futuro**. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- BORGES, M. A. V. **Análise da Potencialidade de Sinergia entre o Pensamento Sistêmico e a Simulação Computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2000.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral do Brasil**, Brasília, DF, 2009. Disponível em:  
<[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3974](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=3974)>. Acesso em: 20 dez. 2012.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia - **Sinopse 2011-2010**. Brasília, DF, 2011. Disponível em:  
<<http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/publicacoes/Sinopse/SINOPSE-2011-2010.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2012.
- BRASIL. **Plano Nacional De Mineração 2030** (PNM – 2030): Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília: MME, 2010.
- BROWN, J.; COOPER, C.; PIDD, M. A taxing problem: The complementary use of *hard* and *soft* OR in the public sector. **European Journal of Operational Research**, v. 172, n. 2, p. 666-679, 2006.
- BUCHANAN, L.; O'CONNELL, A. A brief history of decision making. **Harvard Business Review**, v. 84, n. 1, p. 32-41, 2006.
- CARNEIRO, J. M. T.; SILVA, J. F. da; ROCHA, A. da; HEMAIS, C. A. Mensuração do Desempenho Organizacional: Questões Conceituais e Metodológicas. In: 3E s (Encontro de Estudos em Estratégia, 2005, Rio de Janeiro). **Anais do segundo 3E s** (Encontro de Estudos em Estratégia), 2005.
- CARO, R.; EPSTEIN, R.; SANTIBAÑEZ, P.; WEINTRAUB, A. An integrated approach to the long-term planning process in the copper mining industry. In: WEINTRAUB, A.;



ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, R.; MIRANDA, J. (Eds.) **Handbook of Operations Research in Natural Resources**, New York: Springer, 2007, p. 595-609

CASTRO NETO, L. R. **Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Logísticos. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um Método de Simulação-Otimização na Cadeia Produtiva de Minério de Ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Logísticos. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

CENTENO, M. A. An introduction to simulation modeling. **Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference**, p. 15-22, 1996.

CGEE. **Siderurgia no Brasil 2010-2025: subsídios para tomada de decisão**. Brasília, DF, 2010.

CHAN, K. K.; SPEDDING, T. A. An integrated multidimensional process improvement methodology for manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 44, n. 4, p. 673-693, 2003.

CHATHA, K. A; WESTON, R. H. Combined discrete event simulation and systems thinking-based framework for management decision support. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 220, n. 12, p. 1969-1981, 2006.

CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice**. New York: John Wiley & Sons, 1981.

CHECKLAND, P. **Systems thinking, systems practice: includes a 30-year retrospective**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

CHINBAT, U. Using simulation for reducing risk of a mining optimization project. **International Journal of Simulation Modelling**, v. 8, n. 3, p. 166-177, 2009.

CHINBAT, U.; TAKAKUWA, S. Using Operation Process Simulation for a Six Sigma project of Mining and Iron Production Factory. **2008 Winter Simulation Conference**, p. 2431-2438, 2008.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. Boca Raton: CRC, 2003.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. 3. ed. São Paulo: Afonso C. Medina, 2010.

CONSUEGRA, A. F. R. Exploring stochastic optimization in open pit mine design. **Masters Abstracts International**, 2010.

- CORCINI NETO, S. L. H. **Proposição de um Roadmap para a Implantação da Abordagem do Pensamento Sistêmico em Organizações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2010.
- COSTA, J. et al. Aperfeiçoamento da estratégia de homogeneização em pilhas chevron utilizando simulação geoestatística. **Revista Escola de Minas**, v. 61, n. 3, p. 291-296, 2008.
- COTT, B. J.; MACCHIETTO, S. An integrated approach to computer-aided operation of batch chemical plants. **Computers & Chemical Engineering**, v. 13, n. 11/12, p. 1263-1271, 1989.
- DALSTRA, H.; GUEDES, S. Giant hydrothermal hematite deposits with Mg-Fe metasomatism: a comparison of the Carajás, Hamersley, and other iron ores. **Economic Geology**, v. 99, p. 1793-1800, 2004.
- DAM, K. H. VAN et al. Critical evaluation of paradigms for modelling integrated supply chains. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 10, p. 1711-1726, 2009.
- DEMO, P. **Metodologia do conhecimento científico**. São Paulo: Atlas, 2000.
- DENNIS, D.; MEREDITH, J. An Empirical Analysis of Process Industry Transformation Systems. **Management Science**, v. 46, n. 8, p. 1085-1099, 2000.
- DOANE, D. P.; SEWARD, L. E. **Estatística Aplicada à Administração e à Economia**. São Paulo: McGraw Hill Brasil, 2008.
- EURO. What is OR, 2012. Disponível em: <<http://www.euro-online.org/web/pages/197/what-is-or>>. Acesso em: 20 dez 2012.
- EVERETT, J. E. Iron ore handling procedures enhance export quality. **Interfaces**, v. 26, n. 6, December, p. 82-94, 1996.
- EVERETT, J. E. Simulation to reduce variability in iron ore stockpiles. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 43, n. 3-6, p. 563-568, 1997.
- EVERETT, J. E. Iron ore production scheduling to improve product quality. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n. 2, p. 355-361, 2001.
- FILIPPINI, R. **Operations Management Research**: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM. v. 17, n. 7, p. 655-670, 1997.
- FLOOD, R. L.; CARSON, E. R. **Dealing with Complexity: an introduction to the theory and application of systems science**. New York: Springer, 1993.
- FORBES. The World's Biggest Public Companies, 2012. Disponível em: <[http://www.forbes.com/global2000/list/#p\\_1\\_s\\_a0\\_All](http://www.forbes.com/global2000/list/#p_1_s_a0_All)>. Acesso em: 20 dez 2012.
- FORRESTER, J. W. **Principles of systems**. Cambridge: Wright-Allen Press, 1968.

FRANKS, D. M.; BRERETON, D.; MORAN, C. J. Managing the cumulative impacts of coal mining on regional communities and environments in Australia. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 28, n. 4, p. 299-312, 2010.

FRANSOO, J. C.; RUTTEN, W. G. M. M. A Typology of Production Control Situations in Process Industries. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 14, n. 12, p. 47-57, 1994.

FREITAS FILHO, P. J. DE. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicações em Arena**. Florianópolis: Visual Books Editora, 2008.

GAGGIATO, V. C. **A Competitividade no Mercado Transoceânico de Pelotas de Minério de Ferro, seus Delineadores e o Posicionamento dos Integrantes deste Mercado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010.

GASS, S. I.; ASSAD, A. A. **An annotated time line of operations research: an informal history**. New York: Springer, 2004. v. 75

GEORGES, M. R. R. **Metodologia para Modelagem em Simulação de Sistemas: Aplicação em Manufatura Discreta**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GIURCO, D. et al. **Peak Minerals in Australia: A Review of changing impacts and benefits**. 2010.

GOGG, T. J.; MOTT, J. R. A. **Introduction to simulation**. Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, p. 9-17, 1993.

GOLDMEYER, D. B. **Construção de uma Estrutura de Governança para o Uso Continuado de Modelos de Simulação Computacional por Intermédio do Processo de Pensamento da Teoria das Restrições**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2012.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. F. **A Meta: um processo de melhoria contínua**. São Paulo: Nobel, 2003. p. 365

GOODEVE, C. Operational research. **Nature**, v. 161, p. 377-378, 1948.

GRAY, M. **The Australian iron ore industry in the 21st century**. Australia: Analytic Outcomes Pty Ltd, 2006.

GUIMARÃES, M. L. V. et al. Classificação de minérios de ferro. **II Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro**, 1999.

GUJARATI, D. N. **Econometria básica**. São Paulo: Elsevier Brazil, 2006.

GUPTA, S.; VERMA, R.; VICTORINO, L. Empirical Research Published in Production and Operations Management (1992–2005): Trends and Future Research Directions. **Production and Operations Management**, v. 15, n. 3, p. 432-448, 2006.

HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2007.

HANSEN, P. B. **Um Método Multicriterial de Avaliação e Gestão de Processos Produtivos da Indústria de Propriedade Contínua**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1996.

HARRISON, J. R.; CARROLL, G. R.; CARLEY, K. M. SIMULATION MODELING IN ORGANIZATIONAL AND MANAGEMENT RESEARCH. **Academy of Management Review**, v. 32, n. 4, p. 1229-1245, 2007.

HAYES, R. et al. **Produção, Estratégia e Tecnologia Em Busca**. Porto Alegre: Bookman COMPANHIA ED, 2008.

HEIDARI, S. M.; FROYLAND, G. On quantifying the space of uncertainty of stochastic simulations, 2011. Disponível em: [http://web.maths.unsw.edu.au/~froyland/Heidari\\_Froyland.pdf](http://web.maths.unsw.edu.au/~froyland/Heidari_Froyland.pdf). Acesso em: 20 dez 2012.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

HODOUIN, D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. **Journal of Process Control**, v. 21, n. 2, p. 211-225, 2011.

HODOUIN, D.; JÄMSÄ-JOUNELA, S.-L. State of the art and challenges in mineral processing control. **Control Engineering Practice**, v. 9, n. 9, p. 995-1005, 2001.

HOLLOCKS, B. W. Forty years of discrete-event simulation—a personal reflection. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 12, p. 1383-1399, 2005.

HOLST, L. **Integrating Discrete-Event Simulation into the Manufacturing System Development Process A Methodological Framework**. Department of Mechanical Engineering, Lund University, Lund, 2001.

HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L. **Factory physics: foundations of manufacturing management**. New York: McGraw-Hill, 2001.

HOTELLING, H. The economics of exhaustible resources. **The Journal of Political Economy**, v. 39, n. 2, p. 137-175, 1931.

HOWARD, T. J.; CARSON, M. W.; EVERETT, J. E. Simulation modeling of iron ore product quality for process and infrastructure development. Proceedings MODSIM 2005 **International Congress on Modelling and Simulation**, p. 1251-1257, 2005.

HUMPHREYS, D. The great metals boom: A retrospective. **Resources Policy**, v. 35, n. 1, p. 1-13, 2010.

HYMAN, E. L. Natural resource economics: Relevance in planning and management. **Resources Policy**, v. 10, n. 3, p. 163-176, September 1984.

INFORMS. EXECUTIVE GUIDE TO OPERATIONS RESEARCH, 2012. Disponível em: <[http://www.scienceofbetter.org/or\\_executive\\_guide.pdf](http://www.scienceofbetter.org/or_executive_guide.pdf)>. Acesso em: 20 dez 2012.

JAHANGIRIAN, M.; ELDABI, T.; NASEER, A.; STERGIOULAS, L. K.; Young, T. Simulation in manufacturing and business: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 1-13, 2010.

JEFFREY, P.; SEATON, R. The use of operational research tools: a survey of operational research practitioners in the UK. **Journal of the Operational Research Society**, v. 46, n. 7, 1995.

JULIÁ, A. F. **Desenvolvimento de um Modelo de Simulação para Dimensionamento de um Sistema Integrado Pátio-Porto na Cadeia do Minério de Ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós Graduação em Sistemas Logísticos. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

KASPER, H. **O Processo de Pensamento Sistêmico: Um Estudo das Principais Abordagens a partir de um Quadro de Referência Proposto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2000.

KASPER, H. Perspectiva em Pensamento Sistêmico. In: ANDRADE, A. L.; SELEME, A.; RODRIGUES, L. H.; SOUTO, R. (Eds.) **Pensamento sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade**. Porto Alegre: Bookman, 2006. p. 49-57.

KELTON, W. D. Analysis of output data. 1994 Winter Simulation Conference, p. 62-68, 1994.

KING, R. P. **Modeling and simulation of mineral processing systems**. Oxford: Elsevier, 2001.

KIRBY, M. W. Paradigm Change in Operations Research: Thirty Years of Debate. **Operations Research**, v. 55, n. 1, p. 1-13, 2007.

KIRBY, M. W.; CAPEY, R. The origins and diffusion of operational research in the UK. **Journal of the Operational Research Society**, v. 49, n. 4, 1998.

KIRBY, M. W.; ROSENHEAD, J. Russell Lincoln Ackoff. In: ASSAD, A. A.; GASS, **Profiles in Operations Research Pioneers and Innovators**. (Eds.) New York: Springer, 2011. p. 387-402.

KJELDSEN, T. H. Operations Research and Mathematical Programming: From War to Academia—A Joint Venture. **History of Mathematics in Encyclopedia of Life Support Systems**, 2008.

KLASSEN, R.; MENOR, L. The process management triangle: An empirical investigation of process trade-offs. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 5, p. 1015-1034, 2007.

KLINGSTAM, P.; OLSSON, B.-G. Using simulation techniques for continuous process verification in industrial system development. 2000 **Winter Simulation Conference Proceedings**, v. 2, p. 1315-1321, 2000.

KLIPPEL, A. F. **Implementação da gestão enxuta em empresas de mineração a partir de um modelo de gestão integrada**: uma perspectiva de sinergia entre a engenharia de minas. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) -- Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

KNIGHT, F. H. **Risk, Uncertainty, and Profit**. Boston: Houghton Mifflin, 1921.

KNIGHTS, P. F.; BONATES, E. J. L. Applications of discrete mine simulation modeling in South America. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 2, p. 69-72, 1999.

KONYUKH, V.; GALIYEV, S.; LI, Z. Mine simulation in Asia. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 2, p. 57-67, 1999.

KOTIADIS, K.; MINGERS, J. Combining PSMs with hard OR methods: the philosophical and practical challenges. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 7, p. 856-867, 2006.

LANE, D. C. With a little help from our friends: how system dynamics and soft OR can learn from each other. *System Dynamics Review*, v. 10, n. 2/3, p. 101-134, 1994.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LI, J.; BLUMENFELD, E. D.; HUANG, N.; ALDEN, M. J. Throughput analysis of production systems: recent advances and future topics. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 14, p. 3823-3851, 2009.

LITTLE, J. D. C. Models and managers: The concept of a decision calculus. **Management science**, v. 16, n. 8, p. 466-485, 1970.

LITTLE, J. D. C. TAUTOLOGIES, MODELS AND THEORIES: CAN WE FIND "LAWS" OF MANUFACTURING? **IIE transactions**, v. 24, n. 3, 1992.

LITTLE, J. D. C. Comments on?Models and Managers: The Concept of a Decision Calculus? **Management Science**, v. 50, n. 12 Supplement, p. 1854-1860, 2004.

LUZ, A. B. DA; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. DE. **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004

MANSON, N. J. Is operations research really research. **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155-180, 2006.

MAPES, J.; SZWEJCZEWSKI, M.; NEW, C. Process variability and its effect on plant performance. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 20, n. 7, p. 792-808, 2000.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 2010.

MARQUES, D. M. et al. A comprovação da relação volume x variância na homogeneização da sílica em minério de ferro. **Revista Escola de Minas**, v. 63, n. 2, p. 355-361, 2010.

MARTINICH, J. S. **Production and operations management: An applied modern approach**. New York: John Wiley & Sons, 2008.

MASON, L.; PRIOR, T.; MUDD, G.; GIURCO, D. Availability, addiction and alternatives: three criteria for assessing the impact of peak minerals on society. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9-10, p. 958-966, 2011.

MAY, D. et al. Peak Minerals: Theoretical Foundations and Practical Application. **Natural Resources Research**, v. 21, n. 1, p. 43-60, 2011.

MCHANNEY, R.; CRONAN, T. P. Toward an empirical understanding of computer simulation implementation success. **Information & Management**, v. 37, n. 3, p. 135-151, 2000.

MCHANNEY, R.; WHITE, D.; HEILMAN, G. E. Simulation Project Success and Failure: Survey findings. **Simulation & Gaming**, v. 33, n. 1, p. 49-66, 2002.

MEREDITH, J. R.; SURESH, N. C. Justification techniques for advanced manufacturing technologies. **International Journal of Production Research**, v. 24, n. 5, p. 1043-1057, 1986.

MEREDITH, J. R.; RATURI, A.; AMOAKO-GYAMPAH, K.; KAPLAN, B. Alternative research paradigms in operations. **Journal of Operations Management**, v. 8, n. 4, p. 297-326, 1989.

MEYER, K. **Pelletizing of iron ores**. Dusseldorf: Springer-Verlag, 1980.

MEYER, M. et al. Innovative Decision Support in a Petrochemical Production Environment. **Interfaces**, v. 41, n. 1, p. 79-92, 2011.

MINGERS, J.; WHITE, L. A review of the recent contribution of systems thinking to operational research and management science q. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 3, p. 1147-1161, 2010.

- MISER, H. J. The easy chair: Is it possible to have a good definitional description of operations research and management science? **Interfaces**, v. 1997, n. December, p. 16-21, 1997.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. M. C. (Ed.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2º ed. p. 165-194, Rio de Janeiro: Campus, 2012.
- MORECROFT, J. D. W. **Executive Knowledge, Models, and Learning**. Portland: Productivity Press, v. 59, n. 1, 1994.
- MOREIRA, G.; RODRIGUES, L. H. A Organização do Trabalho: Os papéis do n1, n2 e n3. In: ANDRADE, A. L.; SELEME, A.; RODRIGUES, L. H.; SOUTO, R. (Eds.) **Pensamento sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade**. Porto Alegre: Bookman, 2006. p. 106-118.
- MORONEY, W. F.; LILIENTHAL, M. G. **Human Factors in Simulation and Training: An Overview**. In: VINCENZI, D. A.; WISE, J. A.; MOULOUA, M.; HANCOCK, P. A. (Eds.). **Human factors in simulation and training**. Boca Raton: CRC Press, 2008. p. 3-38.
- MORSE, P. M.; KIMBALL, G. E. **Methods of Operations Research**. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- NEWMAN, A. M.; RUBIO, E.; CARO, R.; WEINTRAUB, A.; EUREK, K. A Review of Operations Research in Mine Planning. **Interfaces**, v. 40, n. 3, p. 222-245, 2010.
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção Além da Produção**: Porto Alegre: Bookman, 1997.
- PANAGIOTOU, G. N. Discrete mine system simulation in Europe. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 2, p. 43-46, 1999.
- PIDD, M. **Modelagem Empresarial, Ferramentas Para a Tomada de Decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- PIDD, M. **Systems modelling: theory and practice**. Chichester: Wiley, 2004.
- PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science**. Chichester: Wiley, 2004.
- PIDD, M. Mixing other methods with simulation is no big deal. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, 2012.
- PRIOR, T. et al. Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 577-587, 2012.
- PRITSKER, A. A. B. **Papers, experiences, perspectives**. Systems Publishing Corporation, 1990.
- PRITSKER, A. A. B. Modeling in performance-enhancing processes. **Operations research**, v. 45, n. 6, p. 797-805, 1997.



PRITSKER, A. A. B. Principles of Simulation Modeling. In: BANKS, J. (Ed.). **Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

RAGHUNATHAN, S. Impact of information quality and decision-maker quality on decision quality: a theoretical model and simulation analysis. **Decision Support Systems**, v. 26, n. 4, p. 275-286, 1999.

ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. New York: Wiley, 2004.

ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**, v. 59, n. 3, p. 278-290, 2008.

ROCHA, J. M. DE P. **Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfibolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2008.

RODRIGUES, L. H. **Simulação Computacional**. Anotações de Aula. Porto Alegre: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção - UFRGS, 1995.

RODRIGUES, L. H. As Abordagens Hard e Soft. In: ANDRADE, A. L.; SELEME, A.; RODRIGUES, L. H.; SOUTO, R. (Eds.) **Pensamento sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade**. Porto Alegre: Bookman, 2006. p. 81-85.

ROGERS, P.; BLENKO, M. **Who Has the D? How Clear Decision Roles Enhance Organizational Performance**. Harvard Business Review, 2006.

ROSENHEAD, J. **What's the problem? An introduction to problem structuring methods**. Interfaces, v. 26, n. 6, p. 117-131, 1996.

ROSENHEAD, J. Reflections on fifty years of operational research. **Journal of the Operational Research Society**, 2009.

ROYSTON, J. P. An Extension of Shapiro and Wilk's W Test for Normality to Large Samples. **Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)**, v. 31, n. 2, p. 115-124, 1982.

SALERNO, M. **Automação e processos de trabalho na indústria de transformação**. XI ANPOCS, Águas de São Pedro, 1987.

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

SAMARCO. Samarco Technical Information. 2011. Disponível em: <[www.samarco.com.br/uploads/xgccbf.pdf](http://www.samarco.com.br/uploads/xgccbf.pdf)>. Acesso em: 30 dez 2012.

SÁNCHEZ, J. E. G.; SCHMITZ JR, J. A. Competitive Pressure and Labor Productivity: World Iron-Ore Markets in the 1980's. **American Economic Review**, v. 92, n. 4, p. 1222-1235, 2002.

SCHMENNER, R. W.; SWINK, M. L. On theory in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 17, n. 1, p. 97-113, 1998.

SENGE, P. M. **A quinta disciplina: arte, teoria e prática da organização de aprendizagem**. São Paulo: Best Seller, 1990.

SHARDA, B.; BURY, S. J. Bottleneck analysis of a chemical plant using discrete event simulation. 2010 **Winter Simulation Conference**, n. 2009, p. 1547-1555, 2010.

SHINGO, S. **O Sistema Toyota de Produção Do Ponto**. Porto Alegre: Bookman, 1996.

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

SILVA, A. K. **Método para avaliação e seleção de softwares de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Programa de Pós Graduação em Sistemas Logísticos. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

SILVA, N. C. S. **Metodologia de Planejamento Estratégico de Lavra Incorporando Riscos e Incertezas para a Obtenção de Resultados Operacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.

SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial**. 3. ed. Boston: The MIT Press, 1996.

SIVRIKAYA, O. **Use of Boron Based Binders in Pelletization of Iron Ores: Alternative Binders to Bentonite for Iron Ore Pelletization**. Tese (Doctor of Philosophy in Mining Engineering Department) - The Graduate School of Natural and Applied Sciences. Middle East Technical University, Ankara, 2011.

SKINNER, W. **Manufacturing-missing link in corporate strategy**. Harvard Business Review, 1969.

SOBRAPO. Pesquisa Operacional, 2012. Disponível em: <[http://www.sobrapo.org.br/o\\_que\\_e\\_po.php](http://www.sobrapo.org.br/o_que_e_po.php)>. Acesso em: 30 dez 2012.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. New York: Irwin/McGraw-Hill New York, 2000.

STOTHARD, P.; SWADLING, P. Assessment of maturity of mining industry simulation. **Mining Technology**, v. 119, n. 2, 2010.

STURGUL, J. R. Discrete mine system simulation in the United States. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 2, p. 37-41, 1999.

TAVARES, L. M. M.; RUBIO, J. Desenvolvimento de um Sistema para Simulação do Beneficiamento de Carvão. **IV Seminário Nacional o Computador e sua Aplicação no Setor Mineral**, Belo Horizonte, p. 157-172, 1990.

THESEN, T.; TRAVIS, L. E. Introduction to simulation. **Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference**, 1991.

TIGRE, P. B. Inovação e teorias da firma em três paradigmas. **Revista de Economia Contemporânea**, p. 67-111, 1998.

TOPP, V. et al. **Productivity in the mining industry: measurement and interpretation**, 2008. Disponível em: <[http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1620243](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1620243)>. Acesso em: 28 jun. 2013.

TURKSEVEN, C. H.; ERTEK, G. Simulation modeling for quality and productivity in steel cord manufacturing. **Proceedings of the 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, n. Figure 2, p. 1225-1229, 2003.

TURNER, R. J. Simulation in the mining industry of South Africa. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v. 13, n. 2, p. 47-56, 1999.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical Resource Document: Extraction and Beneficiation of Ores and Minerals**, Volume 3: Iron. Washington, 1994

United State Geological Survey – USGS. Mineral Commodity Summaries. Disponível em <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/index.html>>. Acesso em: 12 mai. 2012.

VAGENAS, N. Applications of discrete-event simulation in Canadian mining operations in the nineties. **International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment**, v. 13, n. 2, p. 77-78, 1999.

VARGAS, C. F. **Modelo de simulaciondelllenado de una pila de hornogeneizacion. Apuntesdel X Simposium de Ingenieria de Minas (SIMIN, 1997)**, p. 511-528, 1997.

VARSAVSKY, O. **Ciência, política y científicismo**. Buenos Aires: Centro Editor de América Latina Buenos Aires, 1969.

VEN, A. H. VAN DE. Nothing is quite so practical as a good theory. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, p. 486-489, 1989.

VUUREN, D. P. VAN; STRENGERS, B. J.; VRIES, H. J. M. DE. Long-term perspectives on world metal use—a system-dynamics model. **Resources Policy**, v. 25, n. 1999, p. 239-255, 1999.

WEINTRAUB, A.; MIRANDA, J. **Handbook of operations research in natural resources**. New York: Springer, 2007.

WIDMAN, L. E.; LOPARO, K. A. Artificial intelligence, simulation, and modeling. **Interfaces**, v. 1990, n. April 1990, p. 48-66, 1990.

WITHERS, B. D.; PRITSKER, A. A. B.; WITHERS, D. H. A structured definition of the modeling process. 1993 Winter Simulation Conference, p. 1109-1117, 1993.

XING, Y.; DETERT, N. **How the iPhone Widens the United States Trade Deficit with the People's Republic of China.** n. 257, 2010.

YELLISHETTY, M.; MUDD, G. M.; RANJITH, P. G. The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 1, p. 78-90, 2011.

YELLISHETTY, M.; RANJITH, P. G.; THARUMARAJAH, A. Iron ore and steel production trends and material flows in the world: Is this really sustainable? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1084-1094, 2010.

## ANEXO A: Detalhamento do simulador computacional

Este anexo apresenta uma breve descrição dos detalhes do simulador computacional desenvolvido ao longo da pesquisa, denominando de SIMCAPS (Simulador da Cadeia Produtiva da Samarco). O SIMCAPS é um simulador computacional desenvolvido na linguagem de programação *C Sharp* construído para atender os propósitos expostos ao longo da pesquisa. A Figura 38 apresenta a tela inicial do simulador.

Figura 38: Visão da tela inicial do SIMCAPS



Fonte: Elaborado pelo autor

No simulador, o relógio de simulação é parametrizado para avançar em intervalos de dez minutos. Deste modo, a cada avanço de tempo, as variáveis de estado do sistema são atualizadas: disponibilidade dos equipamentos, produção das correias e processos, nível e qualidade das pilhas de minério, transformações de qualidade, etc.

As expressões matemáticas que determinam a produtividade de cada correia/processo, e a forma com que cada etapa processo afeta a qualidade do minério processado são especificadas em um arquivo de dados, editável pelo usuário.

A seguir é detalhado a lógica interna de funcionamento do simulador, seguido pela apresentação dos parâmetros disponíveis para parametrização do modelo computacional no simulador. Na sequência são apresentadas as regras de operação do sistema produtivo da Samarco configuradas no simulador, finalizando com um breve descrição dos dados de entrada do modelo.

### 1. Detalhes da lógica interna de funcionamento do simulador

A lógica interna do SIMCAPS é detalhada a partir de diferentes entidades que executam as operações desejadas sobre o minério. As entidades são elementos ativos da simulação. Cada entidade está associada a um “*script*”, que contém as instruções lógicas a serem executadas por ela ao longo da simulação.

A seguir são descritas as entidades implementadas no SIMCAPS e seus scripts, a saber.

- i) Entidade que atualiza dados das minas;
- ii) Entidades que atualizam os valores das variáveis definidas pelo usuário;
- iii) Entidade que atualiza a alimentação desejada das correias/processos;
- iv) Entidade que aciona as correias/processos;
- v) Entidade que atualiza histogramas de pilhas;
- vi) Entidade que coleta dados parciais de qualidade
- vii) Entidades que atualizam o estado dos equipamentos
- viii) Acionamento das correias/processos
- ix) Entidade de homogeneização das pilhas

#### **i) Entidade que atualiza dados das minas (dados de entrada do simulador)**

O objetivo dessa entidade é, a cada duas horas simuladas, ler informações em uma planilha de dados que contém informações das qualidades do minério, e atualizar as características do minério das pilhas pulmão, e a alimentação desejada das correias que ligam as pilhas pulmão até as entradas dos britadores. O “*script*” básico dessa entidade é o seguinte:

- Passo 1: Lê a primeira linha de dados da planilha de dados (formato MS Excel);
- Passo 2: Atribui os valores de qualidade lidos às pilhas pulmão;
- Passo 3: Atribui os valores de alimentação desejada às correias que alimentam a britagem;
- Passo 4: Espera 2 horas;
- Passo 5: Existe uma próxima linha?
  - Sim: lê a próxima linha, volta ao passo 2;
  - Não: volta ao passo 1.

O SIMCAPS disponibiliza, além da opção descrita anteriormente, outro modo para atribuir a qualidade da matéria-prima. Esta segunda opção consiste em ler as características do minério diretamente dos dados do modelo de blocos<sup>109</sup>. Nesta opção o simulador seta as qualidades do minério extraído da mina em função do bloco físico que é minerado.

#### **ii) Entidades que atualizam os valores das variáveis definidas pelo usuário**

O objetivo dessas entidades é atualizar o valor das variáveis definidas pelo usuário no arquivo de dados XML (seção “*Variables*”). Como o intervalo entre atualizações pode ser variável (o usuário define esse intervalo no arquivo de dados), existe uma entidade para cada tipo de variável prevista (modelo matemático, variável empírica, etc) que são detalhas neste anexo.

<sup>109</sup> Modelo de blocos em mineração compreende um mapa que fragmenta a mina em cubos, com o objetivo de mapear a qualidade do minério disponível na reserva. Geralmente, os blocos apresentam arestas de 12,5 metros. Nos vértices de cada cubo são realizadas amostras do minério e a partir das análises física e química determina-se a qualidade média do minério em cada bloco (COSTA et al., 2008).

O “*script*” básico dessas entidades é:

- Passo 1: Atualiza o valor de cada variável do intervalo correspondente a essa entidade;
- Passo 2: Espera o intervalo correspondente;
- Passo 3: Volta ao passo 1.

**iii) Entidade que atualiza a alimentação desejada das correias/processos (taxa de alimentação)**

O objetivo dessa entidade é, a cada hora simulada, atualizar o parâmetro “alimentação desejada” das correias e processos, com base na seção “*ConveyorInputs*” (detalhada a seguir) do arquivo de dados XML.

O “*script*” básico dessa entidade é o seguinte:

- Passo 1: Para cada item da seção “*ConveyorInputs*”, verifica se a campanha especificada corresponde à campanha que está sendo produzida pela correia/processo.
  - Sim: atribui à alimentação deseja da correia/processo o valor da variável especificada;
  - Não: não atualiza (alimentação desejada permanece como está);
- Passo 2: Espera uma hora;
- Passo 3: Volta ao passo 1.

**iv) Entidade que aciona as correias/processos**

Essa entidade aciona, a cada 10 minutos de simulação, todas as correias e processos do sistema. O “*script*” básico dessa entidade é o seguinte:

- Passo 1: Aplica as regras especiais do sistema (conjunto de regras específicas da cadeia da Samarco, que habilitam/desabilitam correias que simulam desvios de material – essas regras são descritas em detalhes mais adiante);
- Passo 2: Para cada correia/processo:
  - Aciona a correia/processo;
- Passo 3: Para cada pilha:
  - Atualiza estatísticas da pilha (nível médio, máximo, mínimo, desvio-padrão)
- Passo 4: Espera 10 minutos;
- Passo 5: Volta ao passo 1.

**v) Entidade que atualiza histogramas de pilhas (geração de dados de saída do simulador)**

Essa entidade atualiza, a cada 60 minutos de simulação, os histogramas de nível de cada pilha.

O “*script*” básico dessa entidade é o seguinte:

- Passo 1: Para cada pilha:
  - Encontra a faixa do histograma em que se encontra o nível atual da pilha;
  - Atualiza histograma (soma um ao contador da faixa atual);
- Passo 2: Espera 60 minutos;
- Passo 3: Volta ao passo 1.

**vi) Entidade que coleta dados parciais de qualidade (geração de dados de saída do simulador)**

Essa entidade tem a função de coletar determinados itens de qualidade, em determinadas pilhas, ao longo da simulação. Cada coleta é composta de um conjunto de 5 leituras, espaçadas entre si por uma hora de simulação. Os conjuntos, por sua vez, são espaçados por 9 dias.

O “*script*” básico dessa entidade é o seguinte:

- Passo 1: Repete 5 vezes:
  - Coleta características de qualidade
  - Espera 1 hora
- Passo 2: Espera 9 dias;
- Passo 3: Volta ao passo 1.

O Quadro 12 resume as pilhas e características de qualidade coletadas ao longo da simulação.

Quadro 12: Pilhas e características de qualidade coletadas ao longo da simulação

<b>Pilha</b>	<b>Característica de qualidade</b>
Saída Forno 1	Tamboramento
	-6.3
Saída Forno 2	Compressão
	Tamboramento
Saída Forno 3	-6.3
	Compressão
Produção U1 PBF	Teor de ferro
Produção U1 PDR	Teor de ferro
Produção U2 PBF	Teor de ferro
Produção U2 PDR	Teor de ferro
Produção U3 PBF	Teor de ferro
Produção U3 PDR	Teor de ferro

Fonte: Elaborado pelo autor

**vii) Entidades que atualizam o estado dos equipamentos**

Essas entidades tem a função de alternar o estado dos diversos equipamentos listados na seção “*Equipment*” do arquivo XML, entre “disponível” e “em manutenção”. O modelo cria uma entidade para cada equipamento, visto que cada equipamento apresenta um ritmo próprio de alternância de estados.

O “*script*” básico de cada entidade desse tipo é o seguinte:

- Passo 1: Amostra um valor da distribuição de “TBF” (tempo entre falhas) para o equipamento correspondente a essa entidade (em minutos);
- Passo 2: Espera o tempo amostrado em 1;
- Passo 3: Atualiza o estado do equipamento para “em manutenção”;
- Passo 4: Amostra um valor da distribuição de “TTR” (tempo de reparo) para o equipamento correspondente a essa entidade (em minutos);
- Passo 5: Espera o tempo amostrado em 4;

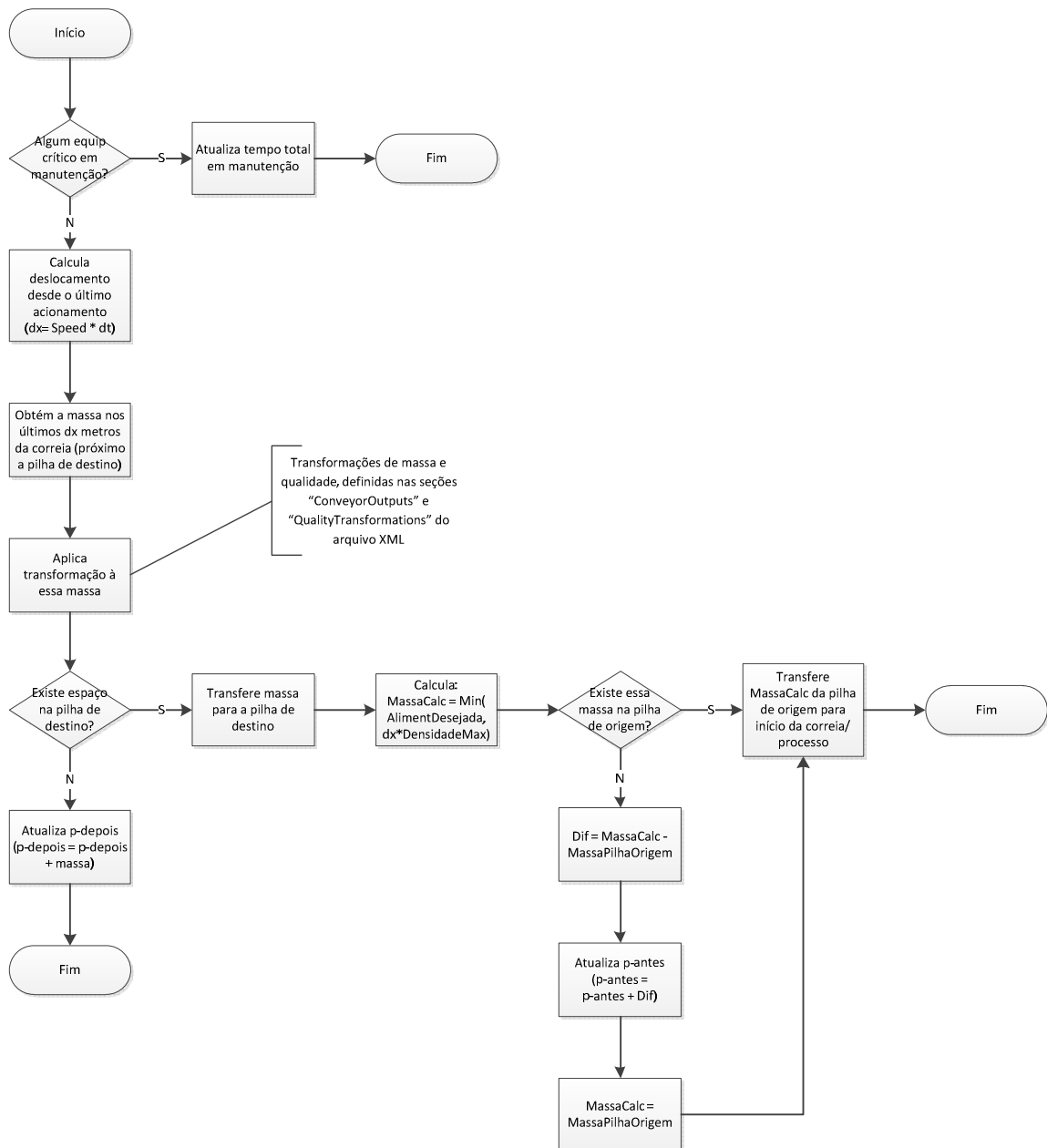


- Passo 6: Atualiza o estado do equipamento para “disponível”;
- Passo 7: Volta ao passo 1.

### viii) Acionamento das correias/processos

Um dos mecanismos principais do simulador é o acionamento das correias/processos. Como descrito anteriormente, o acionamento das correias/processos é realizado por uma entidade, a cada dez minutos de simulação. Ao acionar uma correia/processo, o modelo realiza a sequência lógica apresentada na Figura 39.

Figura 39: Fluxograma da lógica de acionamento de correias/processos no SIMCAPS



Fonte: Elaborado pelo autor

### ix) Entidade de homogeneização das pilhas

Uma operação que ocorre com muita frequência na simulação é a mistura de duas ou mais pilhas de minério. Isso ocorre sempre que uma correia ou processo roda, e deposita uma quantidade de minério na pilha de saída.

Ao misturar duas pilhas de minério, o modelo assume que a qualidade da pilha resultante é dada pela média das qualidades de cada pilha, ponderada pelas respectivas massas.

## 2. Parâmetros do simulador

O modelo apresentado até aqui é um modelo bastante genérico que permite, a partir da configuração dos arquivos de dados, representar sistemas com diversos *layouts* (arranjos de pilhas, correias, processos) e expressões que determinam o comportamento desses processos.

Toda a configuração do sistema produtivo modelado é descrita em um arquivo de dados, no formato XML (texto). Este arquivo XML contempla dez seções distintas, citadas a seguir, onde todos os parâmetros do modelo são configurados:

- i) Geral (*general*);
- ii) Pilhas (*piles*)
- iii) Correias/processos (*conveyors*);
- iv) Entrada das correias/processos (*conveyors Input*);
- v) Saída das correias/processos (*conveyors output*);
- vi) Transformação de qualidade (*quality transformation*).
- vii) Equipamentos (*equipment*)
- viii) Variáveis (*variables*);
- ix) Olhar variáveis (*WatchedVariables*)
- x) “*VariablesDefaultValues*”, “*VariablesRanges*” e “*Factors*”

A seguir, apresenta-se uma breve descrição de cada seção presentes na estrutura de dados, e de seus respectivos atributos.

### i) Seção “General”

Essa seção contém os dados gerais da simulação. O atributo “*qualityNames*” contém uma lista dos nomes das características de qualidade que caracterizam o minério na simulação, separados por ‘;’. O atributo “*seeds*” contém as sementes aleatórias usadas em cada replicação, separadas por ‘;’. As sementes são números quaisquer, inteiros, positivos, de 1 a 1 bilhão. O modelo realizará tantas replicações quantas forem as sementes listadas nesse atributo. O atributo “*timeEnd*” especifica a duração de cada replicação, em minutos. O atributo “*excelFileName*” contém o nome do arquivo Excel com os dados de entrada complementares, da mina.

### ii) Seção “Piles”

Essa seção contém a lista com todas as pilhas de minério no sistema. O atributo “*name*” identifica cada pilha (cada pilha deve ter um nome único). O atributo “*mass*” especifica a massa da pilha no instante zero da simulação, em toneladas. O atributo “*capacity*” especifica a capacidade da pilha em toneladas. O atributo “*quality*” especifica os valores das características de qualidade da pilha no instante zero. Os valores são separados por “;”, e devem ser tantos quantos as características definidas na seção “General”.

### iii) Seção “Conveyors”

A seção *conveyors* contém a relação das correias e dos processos representados na modelagem conceitual. Esta seção dispõe do atributo “*name*” o qual identifica o nome da cada correia ou do processo. Os atributos “*from*” e “*to*” especificam os nomes do estoque (pilha ou tanque) de origem e destino da correia ou do processo, respectivamente. O atributo “*length*” especifica o comprimento da correia ou processo, em metros, e juntamente com o atributo “*speed*”, em metros por minuto, determina o tempo de processamento do minério pela correia ou processo. Por fim, o atributo “*maxDensity*” especifica a densidade máxima de minério que a correia/processo suporta, em toneladas/metro. Esse atributo serve como um limitante para a quantidade de minério que a correia/processo pode carregar.

Essa seção contém a lista de todas as correias e processos representados na simulação. O atributo “*name*” identifica o nome de cada correia ou processo, e deve ser único na lista. Os atributos “*from*” e “*to*” especificam os nomes das pilhas de origem e destino da correia ou processo, respectivamente. Toda correia ou processo devem iniciar e terminar em uma pilha. O atributo “*length*” especifica o comprimento da correia ou processo, em metros, e juntamente com o atributo “*speed*”, em metros/minuto, determina o tempo de processamento do minério pela correia ou processo. O atributo “*maxDensity*” especifica a densidade máxima de minério que a correia/processo suportam, em toneladas/metro. Esse atributo serve como um limitante para a quantidade de minério que a correia/processo pode puxar da sua pilha de alimentação. O valor da alimentação desejada da correia/processo é definido em outra seção do arquivo de dados (“*ConveyorInputs*”), descrita mais adiante. Caso o processo seja do tipo que provoca uma modificação na massa e/ou qualidade do minério processado, os valores dessas transformações são especificados nas seções “*ConveyorOutputs*” e “*QualityTransformations*”, também descritas mais adiante.

### iv) Seção “ConveyorInputs”

O valor da alimentação desejada da correia/processo é definido na seção “*ConveyorInputs*”. Essa seção contempla a “alimentação desejada” das correias e processos, em toneladas por hora. É importante diferenciar o termo “alimentação desejada” de “alimentação real”, porque a alimentação real está sujeita a disponibilidade de minério na pilha de origem, disponibilidade de espaço na pilha de destino, e do status dos equipamentos críticos associados à correia/processo em questão. A “alimentação real” será sempre menor ou igual à “alimentação desejada”. Nessa seção, o atributo “*name*” identifica o nome da correia ou processo para a qual queremos especificar a alimentação desejada. O atributo “*product*” permite distinguir entre campanhas “CLS” e “CNS” (note que podemos especificar, para uma mesma correia/processo, uma alimentação desejada para CLS, outra para CNS – o modelo utilizará o valor correspondente à campanha que estiver sendo executada no processo no instante atual). O atributo “*val*” identifica o nome da variável que contém o valor a ser usado. Essa variável deve constar da lista de variáveis da seção “*Variables*”.

Essa seção especifica a “alimentação desejada” das correias e processos, em toneladas por hora. É importante diferenciar o termo “alimentação desejada” de “alimentação real”, porque a alimentação real está sujeita a disponibilidade de minério na pilha de origem, disponibilidade de espaço na pilha de destino, e do status dos equipamentos críticos associados à correia/processo em questão. A “alimentação real” será sempre menor ou igual à “alimentação desejada”. Nessa seção, o atributo “*name*” identifica o nome da correia ou processo para a qual queremos especificar a alimentação desejada. O atributo “*product*” permite distinguir entre campanhas “CLS” e “CNS” (note que podemos especificar, para uma mesma correia/processo, uma alimentação desejada para CLS, outra para CNS – o modelo utilizará o valor correspondente à campanha que estiver sendo executada no processo no instante atual). O atributo “*val*” identifica o nome da variável que contém o valor a ser usado. Essa variável deve constar da lista de variáveis da seção “*Variables*”.

As correias/processos que não tiverem sua alimentação desejada especificada nessa seção, o modelo assume uma alimentação desejada infinita, ou seja, a correia/processo recebe todo material que estiver disponível na pilha de origem (desde que não ultrapasse a densidade máxima especificada para a correia/processo).

**v) Seção “*ConveyorOutputs*”**

Por outro lado, a seção “*ConveyorOutputs*” especifica a saída das correias/processos, em toneladas por hora. Essa seção se aplica apenas aos processos em que há perda ou ganho de massa durante o processamento.

Essa seção especifica a saída das correias/processos, em toneladas por hora. Essa seção se aplica apenas àqueles processos em que há perda ou ganho de massa durante o processo. O atributo “*name*” identifica o nome da correia ou processo para a qual queremos especificar a alimentação desejada. O atributo “*product*” permite distinguir entre campanhas “CLS” e “CNS” (note que podemos especificar, para uma mesma correia/processo, uma saída para CLS, outra para CNS). O atributo “*val*” identifica o nome da variável que contém o valor a ser usado.

As correias/processos que não tiverem sua saída especificada nessa seção, o modelo assume que não há transformação de massa durante o processo, ou seja, os lotes de minério saem da correia/processo com a mesma massa com que entraram (após o tempo de processamento).

**vi) Seção “*QualityTransformations*”**

As transformações de qualidade, são então, definidas na seção “*QualityTransformations*”. Esta seção serve para apontar as variáveis que contém a expressão que descreve a transformação de qualidade aplicada aos lotes de minério. O atributo “*name*” identifica o nome da correia ou processo para a qual queremos especificar a transformação de qualidade. O atributo “*quality*” identifica o item de qualidade a ser alterado. O atributo “*val*” identifica o nome da variável que contém o valor a ser usado.

Esta seção serve para especificarmos as transformações de qualidade sofridas pelos lotes de minério ao atravessarem os diversos processos. O atributo “*name*” identifica o nome da correia ou processo para a qual queremos especificar a transformação de qualidade. O atributo “*quality*” identifica o item de qualidade a ser alterado (deve ser um dos itens de qualidade listados na seção “*General*”). O atributo “*product*” permite distinguir entre campanhas “CLS” e “CNS” (note que podemos especificar, para uma mesma

correia/processo, uma transformação para CLS, outra para CNS). O atributo “*val*” identifica o nome da variável que contém o valor a ser usado.

As correias/processos que não tiverem transformações listadas nessa seção, o modelo assume que não há transformação, ou seja, os lotes de minério saem da correia/processo com a mesma qualidade com que entraram (após o tempo de processamento).

#### vii) Seção “*Equipment*”

Essa seção contém a lista dos equipamentos representados na simulação. O atributo “*name*” identifica o nome de cada equipamento, que deve ser único na lista. O atributo “*process*” identifica a correia ou processo a que o equipamento está associado, e deve ser igual ao nome de alguma correia ou processo definido na seção “*Conveyors*”. O atributo “*critical*”, que pode valer “*true*” ou “*false*”, identifica se o equipamento é crítico para seu processo. Se for crítico, quando o equipamento entra em manutenção, o processo a ele associado para. Caso contrário, a entrada em manutenção do equipamento não tem nenhum efeito automático sobre a correia/processo (poderá ter efeito indireto, se especificarmos que a produtividade do processo é uma variável que depende do estado do equipamento, como veremos mais adiante). Os atributos “*ibf*” e “*ttr*” especificam as distribuições probabilísticas dos tempos entre falhas e tempos de reparo dos equipamentos, respectivamente, em minutos.

O Quadro 13 apresenta as opções de distribuição probabilísticas suportadas pelo modelo (os textos em itálico identificam parâmetros numéricos).

Quadro 13: Opções de distribuições probabilísticas disponíveis no SIMCAPS

<b>Especificação</b>	<b>Descrição</b>
Uniform <i>lo hi</i>	Uniforme, entre os valores <i>lo</i> e <i>hi</i> ( $lo < hi$ )
Normal <i>m d</i>	Normal, com média <i>m</i> e desvio padrão <i>d</i>
Exponential <i>l</i>	Exponencial, com média <i>l</i>
Shifexp <i>l m</i>	Exponencial trasladada, com média <i>l</i> , e traslado <i>m</i>
Gamma <i>k m</i>	Gamma, onde <i>k</i> é o número de exponenciais independentes que formam a Gamma, e <i>m</i> é a média da distribuição Gamma
Triangular <i>lo mo hi</i>	Triangular, com mínimo <i>lo</i> , moda <i>mo</i> , e máximo <i>hi</i>
Empirical <i>x1 y1 x2 y2 ... xn yn</i>	Distribuição empírica, onde os pares <i>x<sub>i</sub></i> , <i>y<sub>i</sub></i> indicam o valor da variável e sua probabilidade acumulada de ocorrência, respectivamente

Fonte: Elaborado pelo autor

#### Seção “*Variables*”

A primeira seção de parametrização do simulador desenvolvido, ‘*variables*’, apresenta a lista de variáveis necessárias para representar a cadeia produtiva. As variáveis listadas nesta seção expressam a “alimentação desejada”, a “saída desejada”, as distribuições de probabilidade e as transformações de qualidade do minério de ferro. O simulador computacional contempla distribuições de probabilidade para representar as variáveis estocásticas representadas no modelo, como as paradas dos equipamentos. Em relação às quebras de equipamentos, o simulador computacional possibilita a parametrização de manutenção programadas.

Essa seção contém uma lista de variáveis definidas pelo usuário e suas respectivas expressões. Em geral, essas variáveis são usadas para expressar a “alimentação desejada” de correias ou processos, a “saída desejada” de processos, e as transformações das qualidades do minério na saída de processos. Essas variáveis são agrupadas em subseções “*Calc*”, que permitem especificar a frequência com que as variáveis são atualizadas. O atributo “*interval*” especifica o intervalo de tempo, em minutos, entre atualizações. O atributo “*name*” define o nome da variável, que deverá ser único dentro da seção “*Variables*”. O atributo “*exp*” contém a expressão usada para o cálculo do valor da variável.

#### viii) Seção “*WatchedVariables*”

Essa seção contém a lista das variáveis cujos valores desejamos salvar, de hora em hora, em um arquivo texto de saída, localizado na mesma pasta e com o mesmo nome do arquivo de dados, porém com a extensão txt. O objetivo principal dessa seção é permitir a depuração do modelo e das expressões especificadas na seção “*Variables*”.

#### ix) Seções “*VariablesDefaultValues*”, “*VariablesRanges*” e “*Factors*”

Essas são seções opcionais, criadas para ajudar a controlar os valores das variáveis definidas em “*Variables*”.

Na seção “*VariablesDefaultValues*”, podemos especificar valores padrão para variáveis, no período de tempo especificado, independentemente do valor calculado pela expressão. Após esse período, os valores passam a ser calculados pelas expressões, conforme a seção “*Variables*”. O atributo “*name*” identifica o nome da variável. Os atributos “*start*” e “*end*” indentificam o início e fim do período, em minutos. O atributo “*val*” identifica o valor a ser atribuído à variável.

Na seção “*Factors*”, podemos especificar uma constante que multiplica o valor calculado pela expressão, e uma constante a ser somada ao valor calculado pela expressão, após um tempo inicial especificado. O atributo “*k*” define a constante que multiplica o valor calculado pela expressão. O atributo “*s*” define a parcela a ser somada ao valor da expressão, após a correção pelo fator “*k*”. O atributo “*start*” define o instante, em minutos, a partir do qual as correções são aplicadas.

Na seção “*VariablesRanges*”, podemos especificar valores máximo e mínimos para variáveis, evitando assim extrapolações indesejadas. Os atributos “*max*” e “*min*” determinam os valores máximo e mínimo da variável, respectivamente. Esses limitantes máximos e mínimos são aplicados tanto aos valores padrão como aos valores calculados por expressões.

### 3. Breves considerações sobre os dados de entrada e saída do SIMCAPS

Esta seção descreve o formato dos dados entrada no simulador e os relatórios com dados de saída do modelo gerados pelo simulador.

#### 3.1. Formato dos dados de entrada: qualidade da matéria-prima

O arquivo Excel de dados de entrada determina a quantidade de massa enviada de cada pilha pulmão (Alegria1-6; Alegria 9; Fazendão) para cada Britador (Britador1 e Britador2), bem como o qualidade do minério enviado. A Figura 40 mostra um exemplo da planilha de dados Excel.

É importante observar as seguintes regras com relação à planilha:

- As colunas de A a C da planilha, assim como as linhas de 1 a 4, não são lidas pelo modelo.
- A coluna D determina a campanha da mina.
- A coluna E determina a massa de duas horas a ser enviada da pilha pulmão Alegria 1-6 para o Britador1 (em toneladas).
- A coluna F determina a massa de duas horas a ser enviada da pilha pulmão Alegria 1-6 para o Britador2 (em toneladas).
- As colunas de G a L correspondem as características de qualidade do minério na pilha pulmão Alegria 1-6, durante duas horas.
- As colunas de M a T são análogas as colunas de E a L, mas se aplicam a pilha pulmão de Alegria 9.
- As colunas de U a AB são análogas as colunas de E a L, mas se aplicam a pilha pulmão de Fazendão.
- Cada linha da planilha corresponde a um período de 2 horas.
- Se a quantidade de linhas na planilha não for suficiente para simular o tempo total especificado no arquivo XML, o modelo começa a ler os dados novamente a partir da primeira linha útil de dados (linha 5).

Figura 40: Exemplo da planilha Excel de entrada de dados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1																	
2																	
3																	
4	Data	Horainicial	Arquivo	Campanha	Massa U1	Massa U2	Fe	P	Al2O3	PPC	He	SIO2	Massa U1	Massa U2	Fe	P	Al2O3
5	6/1/2009	1	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	49	0.039	0.26	3.5	22	26.0953	1920	1382.4	40.5	0.038	0.27
6	6/1/2009	3	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	45.94	0.035	0.32	3.57	11	30.3494	1920	1382.4	40.5	0.038	0.27
7	6/1/2009	5	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	45.08	0.037	0.3	2.99	27	32.1743	1920	1382.4	41.35	0.035	0.21
8	6/1/2009	7	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	44.21	0.035	0.3	2.86	35	33.5528	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
9	6/1/2009	9	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	44.75	0.036	0.32	2.98	39	32.6384	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
10	6/1/2009	11	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	44.75	0.036	0.32	2.98	39	32.6384	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
11	6/1/2009	15	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	49.09	0.04	0.4	3.49	32	25.8344	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
12	6/1/2009	17	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	48.6						1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
13	6/1/2009	19	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	48.45						1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
14	6/1/2009	21	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	48.45	0.039	0.41	3.51	29	26.7217	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
15	6/1/2009	23	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	46.41	0.036	0.31	3.54	13	29.7151	1920	1382.4	42.2	0.03	0.15
16	6/2/2009	1	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	46.23	0.036	0.31	3.54	13	29.9725	1920	1382.4	41.35	0.035	0.21
17	6/2/2009	3	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	46.17	0.036	0.31	3.55	13	30.0483	1920	1382.4	40.72	0.037	0.25
18	6/2/2009	5	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	47.82	0.038	0.31	3.53	20	27.7047	1920	1382.4	40.55	0.038	0.27
19	6/2/2009	9	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	50.67	0.042	0.39	3.46	38	23.6109	1920	1382.4	41.5	0.034	0.2
20	6/2/2009	13	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	49.45	0.04	0.29	3.49	26	25.4297	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15
21	6/2/2009	15	c:\Projec	CLS	3180	2194.2	49.5	0.04	0.3	3.49	27	25.3482	1920	1382.4	42.2	0.031	0.15

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.2. Arquivos de saída

O simulador desenvolvido apresenta uma tela para parametrização dos cenários de simulação. O usuário deve especificar o número de rodadas a ser simulado, o tempo de duração de cada rodada e a planilha de entrada a qual especifica o arquivo de dados que contém o plano de lavras das minas. A planilha de entrada especifica as características do minério extraído das minas e que é utilizado para alimentar o sistema de produção.

Ao final de cada replicação, o modelo armazena os resultados das n rodadas de simulação em dois arquivos de saída: um arquivo Excel, contendo os resultados finais, e um arquivo tipo texto, com resultados intermediários, úteis para monitorar o valor de variáveis selecionadas ao longo do tempo. A primeira planilha contém dados relativos às correias e os processos, para cada replicação simulada. Os indicadores dessa planilha são os seguintes: massa na entrada: total de minério que entrou na correia/processo em toneladas; massa na saída: total de minério que saiu da correia/processo em toneladas; disponibilidade total: percentual de tempo em que a correia/processo está disponível para operação; P-Antes: indicador de quanto a correia/processo deixou de produzir por falta de minério na pilha de origem em toneladas; P-Depois: indicador de quanto a correia/processo deixou de produzir por falta de espaço na pilha de destino em toneladas. A segunda planilha, apresenta as informações relativas à ocupação das pilhas.

#### **Arquivo síntese das simulações**

O arquivo Excel resultante das simulações tem o mesmo nome do arquivo de dados XML, porém com a extensão xls. O arquivo apresenta 4 planilhas, como mostra a Figura 41.

A primeira planilha contém dados relativos às correias e processos, para cada replicação simulada. A coluna B mostra o nome da correia/processo. A coluna C mostra o indicador da correia/processo. As demais colunas, de D em diante, mostram o valor do indicador, para cada uma das replicações.

Os indicadores dessa planilha são os seguintes:

- Entrada: total de minério que entrou na correia/processo [toneladas];
- Saída: total de minério que saiu da correia/processo [toneladas];
- EmProcesso: total de minério atualmente na correia/processo (entrou mas ainda não saiu) [toneladas];
- Disp: disponibilidade da correia/processo, em função da manutenção [% do tempo];
- P-Antes: indicador de quanto a correia/processo deixou de produzir por falta de minério na pilha de origem [toneladas]
- P-Depois: indicador de quanto a correia/processo deixou de produzir por falta de espaço na pilha de destino [toneladas]

Para as pilhas, que aparecem mais abaixo na planilha, os indicadores são:

- Entrada: total de minério que entrou na pilha [toneladas];
- Saída: total de minério que saiu da pilha [toneladas];
- Atual: total de minério atualmente na pilha [toneladas];



Figura 41: Planilha Excel, dados de correias e processos

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1
3		CV56	Entrada	2900732	2941256	2908196	2918993	2928478	2924066	2953537	2910844	2903188	2897385	2907783	2925059	2915267	2909178	2925140	294767
4			Saída	2899119	2939610	2906136	2917316	2926755	2922180	2951687	2909224	2901025	2895957	2906312	2923558	2913568	2907378	2923756	294583
5			P-Antes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6			P-Depois	913964	928085	936636	866546	875618	918535	908510	905368	911151	903048	896921	971513	887306	895074	893469	85950
7			Disp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8			EmProce	1613	1647	2060	1676	1724	1886	1850	1620	2163	1428	1472	1501	1699	1800	1385	184
9		CV02	Entrada	7738952	7578954	7598858	7638720	7706557	7729265	7803155	7736988	7544163	7855209	7561403	7589573	7679442	7694705	7776076	763753
10			Saída	7735228	7574936	7594893	7634819	7702890	7724922	7798362	7732973	7540565	7851788	7557372	7585566	7674823	7690495	7771641	763337
11			P-Antes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12			P-Depois	1265085	1453238	1494125	1356322	1428862	1322840	1284971	1233273	1488154	1098973	1423357	1373672	1336658	1314934	1262758	141216
13			Disp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14			EmProce	3724	4018	3965	3901	3667	4343	4793	4014	3598	3421	4032	4007	4619	4210	4435	416
15		CV24	Entrada	3739200	3903748	3834011	3837058	3769687	3718405	3750180	3740579	3834186	3523576	3851900	3862042	3814913	3728382	3697725	388179
16			Saída	3736239	3900825	3831218	3834413	3767312	3715443	3747219	3737704	3831225	3520796	3848938	3859081	3811951	3725420	3694763	387882
17			P-Antes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18			P-Depois	1758278	2041081	2360429	2039057	2079809	1757006	1694885	1690658	2292844	1336686	2269382	2232755	2001652	1841458	1760400	229089
19			Disp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20			EmProce	2962	2923	2793	2645	2375	2962	2962	2876	2962	2780	2962	2962	2962	2962	2962	296
21		CV62	Entrada	6713801	6786276	6734753	6718710	6772359	6750082	6809868	6774960	6695075	6717326	6739121	6730084	6767820	6735900	6739478	678388
22			Saída	6710552	6783070	6731743	6715900	6769054	6746142	6806077	6771430	6692150	6713838	6735436	6725483	6764500	6732058	6736221	677993
23			P-Antes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24			P-Depois	351963	312055	357284	342584	285318	292869	286226	335496	404699	406055	375372	338637	291708	332197	411603	37070
25			Disp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda planilha, apresentada na Figura 42, contém dados relativos à ocupação das pilhas. A coluna B mostra o nome da pilha. A coluna C mostra os intervalos de capacidade, de 10 em 10 por cento. As colunas D em diante mostram o percentual do tempo em que a pilha ficou com cada nível de ocupação em cada replicação.

Figura 42: Planilha Excel, dados de ocupação de pilhas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	1
3		Fazenda	10%	5%	5%	6%	4%	3%	4%	2%	6%	2%	6%	6%	5%	7%	3%	5%	2%
4			20%	5%	3%	4%	5%	5%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	3%	4%	5%	4%
5			30%	3%	3%	2%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	2%	3%	2%	4%	3%	3%
6			40%	1%	2%	1%	1%	3%	3%	3%	1%	3%	1%	2%	3%	1%	2%	2%	4%
7			50%	1%	1%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	2%	2%
8			60%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%
9			70%	1%	2%	2%	3%	3%	3%	1%	2%	2%	3%	5%	2%	3%	2%	2%	2%
10			80%	4%	4%	4%	4%	6%	4%	4%	6%	5%	4%	5%	4%	5%	5%	3%	3%
11			90%	5%	7%	5%	6%	4%	5%	6%	5%	6%	6%	5%	5%	5%	6%	6%	6%
12			100%	75%	73%	72%	72%	71%	71%	74%	72%	73%	71%	69%	74%	71%	72%	73%	72%
13		Alegria1	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
14			20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
15			30%	1%	2%	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%
16			40%	2%	1%	0%	1%	1%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	0%	0%
17			50%	1%	1%	3%	2%	3%	2%	3%	2%	2%	3%	2%	2%	1%	2%	1%	3%
18			60%	1%	1%	2%	2%	1%	2%	2%	1%	1%	1%	2%	2%	1%	2%	1%	1%
19			70%	1%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%
20			80%	3%	1%	0%	1%	1%	1%	2%	0%	1%	1%	1%	1%	3%	1%	0%	0%
21			90%	3%	1%	0%	2%	2%	5%	4%	3%	1%	3%	1%	0%	2%	4%	2%	0%
22			100%	88%	91%	94%	92%	91%	88%	88%	87%	93%	90%	93%	92%	91%	87%	91%	94%
23		Alegria9	10%	8%	0%	4%	6%	2%	0%	2%	1%	0%	1%	3%	5%	3%	3%	6%	2%
24			20%	1%	0%	4%	2%	2%	1%	2%	2%	3%	3%	1%	1%	1%	1%	2%	3%
25			30%	4%	3%	1%	1%	2%	4%	2%	3%	1%	3%	5%	2%	3%	4%	3%	2%

Fonte: Elaborado pelo autor

A terceira planilha, apresentada na Figura 43, contém dados relativos às medições intermediárias de qualidade do minério nas pilhas. A coluna A mostra o nome do item de qualidade. A coluna B mostra o nome da pilha. A coluna C mostra o instante em que a medição foi realizada. As demais colunas, de D em diante, mostram o valor da medição, para cada uma das replicações.

Figura 43: Planilha Excel, dados de qualidade

Qualidade	Pilha	Tempo	Concatenado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.3	SaídaForno1_Virt	0	-6.3SaídaForno1_Virt 0	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
6.3	SaídaForno1_Virt	60	-6.3SaídaForno1_Virt 60	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
6.3	SaídaForno1_Virt	120	-6.3SaídaForno1_Virt 120	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
6.3	SaídaForno1_Virt	180	-6.3SaídaForno1_Virt 180	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
6.3	SaídaForno1_Virt	240	-6.3SaídaForno1_Virt 240	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108	1.108
6.3	SaídaForno1_Virt	13260	-6.3SaídaForno1_Virt 13260	1.788	0.683	0.967	1.146	0.845	0.603	0.441	0.409	1.015	1.039
6.3	SaídaForno1_Virt	13320	-6.3SaídaForno1_Virt 13320	0.824	0.878	0.609	0.657	0.951	1.214	1.386	0.615	0.867	0.807
6.3	SaídaForno1_Virt	13380	-6.3SaídaForno1_Virt 13380	1.030	1.221	0.736	0.983	0.823	0.960	2.043	1.236	0.982	0.345
6.3	SaídaForno1_Virt	13440	-6.3SaídaForno1_Virt 13440	1.120	0.726	1.201	1.163	1.127	1.926	0.835	1.601	1.131	1.878
6.3	SaídaForno1_Virt	13500	-6.3SaídaForno1_Virt 13500	1.159	0.843	0.909	1.411	1.073	1.091	1.632	0.819	1.638	1.262
6.3	SaídaForno1_Virt	26520	-6.3SaídaForno1_Virt 26520	1.048	1.152	1.092	1.573	1.992	1.128	1.127	1.379	0.772	1.231
6.3	SaídaForno1_Virt	26580	-6.3SaídaForno1_Virt 26580	1.555	1.233	0.716	1.556	1.909	1.435	1.546	0.970	1.029	0.994
6.3	SaídaForno1_Virt	26640	-6.3SaídaForno1_Virt 26640	0.880	1.318	1.254	1.380	1.719	1.346	0.975	1.061	0.860	1.007
6.3	SaídaForno1_Virt	26700	-6.3SaídaForno1_Virt 26700	1.594	1.669	1.027	1.785	1.745	2.143	1.495	1.024	0.694	1.923
6.3	SaídaForno1_Virt	26760	-6.3SaídaForno1_Virt 26760	0.937	1.506	1.091	1.883	1.744	1.202	1.083	1.205	0.938	0.982
6.3	SaídaForno1_Virt	39780	-6.3SaídaForno1_Virt 39780	0.732	1.224	1.280	1.024	1.095	1.315	0.523	1.742	1.191	1.093
6.3	SaídaForno1_Virt	39840	-6.3SaídaForno1_Virt 39840	0.423	1.140	1.361	1.339	1.182	1.070	0.666	1.288	1.486	1.836
6.3	SaídaForno1_Virt	39900	-6.3SaídaForno1_Virt 39900	0.941	1.042	1.609	1.003	1.317	1.365	0.878	1.280	1.059	1.048
6.3	SaídaForno1_Virt	39960	-6.3SaídaForno1_Virt 39960	0.704	1.428	1.849	0.968	1.129	1.648	0.471	1.632	1.506	1.066
6.3	SaídaForno1_Virt	40020	-6.3SaídaForno1_Virt 40020	0.701	1.160	1.207	1.089	1.153	1.419	0.689	0.483	1.400	0.969
6.3	SaídaForno1_Virt	53040	-6.3SaídaForno1_Virt 53040	1.122	2.212	0.695	1.602	1.019	0.691	1.048	0.998	1.164	1.043
6.3	SaídaForno1_Virt	53100	-6.3SaídaForno1_Virt 53100	0.980	1.373	0.504	1.480	0.652	1.071	1.798	1.085	1.377	0.929
6.3	SaídaForno1_Virt	53160	-6.3SaídaForno1_Virt 53160	1.669	1.397	0.678	1.633	1.128	1.018	2.148	0.883	1.293	1.192

Fonte: Elaborado pelo autor

A quarta e última planilha, apresentada na Figura 44, contém os valores finais das variáveis observadas, definidas no arquivo XML (seção “WatchedVariables”). A coluna B mostra o nome da variável, e as demais colunas mostram o valor final da variável, para cada uma das replicações.

Figura 44: Planilha Excel, valores finais das variáveis observadas

Variável	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
PDepsos_Conc2	556933	574628	563022	588869	700864	616789	620912	571172	615068	605382	658587	705217	652692
ProdTotal_Conc2	4205363	4219184	4190423	4178567	4150938	4201279	4193447	4215366	4209076	4226119	4201648	4175723	4187134
PAntes_Conc1	39300	35487	43708	53697	43123	39401	22520	66367	40276	57387	34888	64004	34520
PDepsos_Conc1	99267	167298	87724	51933	180906	82259	101525	125577	40895	36880	58243	26251	68201
ProdTotal_Conc1	7148631	7224239	7142400	7268215	7203697	7269251	7224433	7264773	7011361	7216558	7049247	7049221	7219090
PAntes_CV1	9385	3072	9278	5742	3622	2679	0	6673	709	5299	7451	2147	7166
PAntes_CV2	16944	5388	17268	8163	5440	7813	52	9644	1118	8717	9837	2491	16916
OccupMediaFaz	50720	50767	50051	50257	50350	50086	51332	50269	51041	50071	49770	50696	50030
PAntes_Palotiz1	244229	247306	239048	228887	241989	236160	308611	216883	330131	219111	281719	283006	267287
PAntes_Palotiz2	335819	513882	381085	309167	455835	291991	397021	383870	412037	368042	340859	411936	266081
ProdTotal_Forno1	3307628	3138342	3274705	3235521	3236857	3321864	3359811	3260384	3366754	3329878	3289152	3324967	3329526
ProdTotal_Forno2	3459371	3506606	3446111	3471542	3471049	3405005	3433956	3383581	3476432	3468792	3480722	3492104	3470243
var_Mi_41	414	414	846	505	310	207	767	414	613	321	310	374	496
var_Mi_21	1427	2182	2319	1377	1840	2274	2385	2000	1377	1608	2369	1623	1972
var_Mi_13	987	0	1481	632	894	740	1234	408	1481	1377	1481	1234	987
var_Mi_33	1708	1727	1629	1082	1638	1814	1741	1948	1693	1560	1816	1741	1503
var_C1H_197	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
var_C2H_197	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
var_C1H_17	3252	3266	3318	3255	3269	3573	3183	3152	3171	2547	3275	3316	3411
var_C1H_11	13	14	14	15	14	13	13	14	16	10	15	14	17
var_C1H_25	94	93	94	94	94	94	93	93	94	96	94	93	94
var_C2H_17	1526	1825	1780	1656	1823	1769	1748	1749	1853	1650	1813	1767	1770
var_C2H_11	8	10	13	9	11	10	8	10	12	12	8	10	8

Fonte: Elaborado pelo autor



## Dados detalhados

O arquivo de resultados detalhados é um arquivo tipo texto, com o mesmo nome do arquivo de dados XML, acrescido do número da replicação e com extensão txt. A partir deste arquivo é possível observar as informações de qualidade em qualquer ponto da cadeia produtiva (mina, concentrado, *pellet feed*, pelota, etc).

Esse arquivo contém, hora à hora, os valores das variáveis listadas na seção “*WatchedVariables*” do arquivo de dados XML. Esse arquivo é particularmente útil para depurar o modelo, pois permite monitorar os valores das diversas variáveis do sistema (por exemplo, verificar a produção horária de um determinado processo, o nível de uma pilha, a qualidade do minério em uma pilha, etc.).

A Figura 45 mostra um exemplo de um arquivo gerado pelo modelo. A primeira coluna mostra o tempo, e as demais colunas mostram os valores das variáveis monitoradas.

Figura 45: Arquivo trace (de resultados intermediários)

Time	ProdTotal_Forno1	ProdTotal_Forno2	ProdTotal_Forno3	var_Mi_41	var_Mi_21	var_Mi_13
0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	441.652759054598	1298.87491140431	570
120	0	0	0	517	1186.42321061132	684
180	0	0	0	517	1182.47892214021	684
240	0	0	0	614.229177375266	1167	684
300	0	0	0	517	1167	684
360	0	0	0	647.219063380046	1256.98034238794	795.969801412153
420	0	0	0	611.790650185796	1167	1181.5915356881
480	0	0	0	517	1167	684
540	200	256.755301568517	0	549.920855164802	1350.8839899038	684
600	674.096031683933	699.046151089099	302.52788971378	887.463462479721	1167	684
660	1136.62464004373	1269.79917233445	842.77230397821	874.795305775613	1541.78251800533	684
720	1629.41725702245	1803.25478813435	1408.44888229467	517	1167	684
780	2114.66241184005	2353.65177462348	1915.58363486168	544.721502421651	1297.3125050383	783.080585757101
840	2592.68527977232	2890.53358952688	2455.36499748615	909.137442710147	1167	684
900	3078.76619048916	3475.58243679856	3063.85339609479	517	1167	684
960	3580.34731258448	4075.51437813462	3685.83372157272	735.321508270296	1671.66744225864	684
1,020	3998.09244874302	4647.07380966158	4273.89058026828	686.073376655495	1314.57397468905	684
1,080	4460.29517931836	5236.30100802785	4854.11580732175	529.859974095696	1167	1187.0934594633
1,140	4962.30774170711	5823.2329885675	5518.2185615311	647.803431062264	1167	704.78240620321
1,200	5489.61838517408	6416.93311803396	6177.72734624851	517	2052.3422640176	684
1,260	6016.70950628717	7030.73205385863	6789.88975446602	672.821638322568	1272.80530622493	684
1,320	6516.72687160661	7511.75039123628	7360.39845730327	517	1911.69686393938	1189.51294867736
1,380	6963.19311644509	8107.75558576515	8045.13257109397	573.504621786239	1441.07346529743	792.234257303325
1,440	7442.00511727266	8681.86214883094	8625.5698207742	975.515473850677	1180.65544718033	991.931581296697
1,500	7935.47336515505	9250.19905843752	9213.97090507346	782.722984010759	1636.9292219614	684
1,560	8418.5367289459	9831.8013957999	9852.97666148193	518.419567226249	1167	684
1,620	8874.04537242273	10423.7972381408	10471.4844459256	710.548007648014	1827.55054403555	684
1,680	9365.79625562027	11005.5516925459	11140.3867022984	813.805506446118	1167	684
1,740	9861.77710422966	11559.3819954946	11828.0059669076	619.082393847029	1453.5061773041	793.367318353929
1,800	10294.915634215	12050.1134101491	12452.7377879887	974.625796953165	1167	984.822561698038

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4. Regras do sistema produtivo da Samarco

Na cadeia produtiva da Samarco, existem algumas regras que controlam o fluxo do material em situações especiais, e portanto, não contempladas nas entidades genéricas descritas no item 1 do anexo. Essas regras, por não serem facilmente generalizáveis (a ponto de serem especificadas no arquivo de dados), foram implementadas diretamente no código do modelo. Uma eventual alteração dessas regras requer, portanto, alteração no código e recompilação do modelo.

As regras do sistema modelado no SIMCAPS, são:

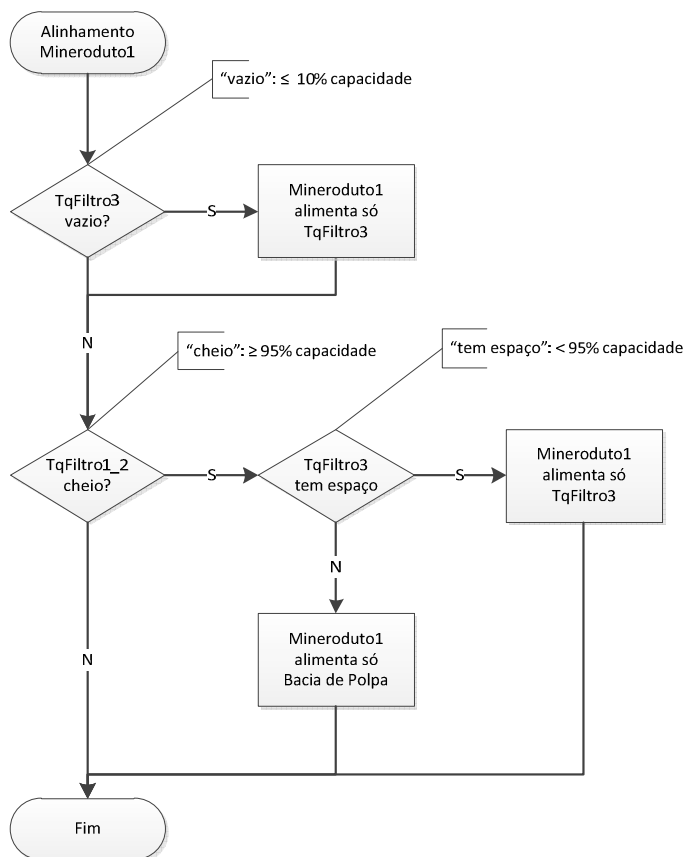
- i) Alinhamento mineroduto 1;
- ii) Alinhamento mineroduto 2;
- iii) Retorno de material da Bacia de Polpa
- iv) Distribuição do material que sai do Filtro1
- v) Interrupção dos Filtros e Prensas

- vi) Retorno de material dos pátios de *Pellet feed*
- vii) Propagação das mudanças de campanha ao longo da cadeia

### i) Alinhamento do Mineroduto 1

O Mineroduto 1 é uma estrutura que pode alimentar o Tanque da Filtragem das Usinas 1 e 2, o Tanque da Filtragem da Usina 3, ou a Bacia de Polpa. No modelo de layout da cadeia, as três alternativas estão representadas por “correias” que ligam a saída do mineroduto a cada destino. A função da regra de alinhamento do Mineroduto 1 é habilitar ou desabilitar essas correias de acordo com as condições vigentes, de forma a replicar o que ocorre no sistema real. A Figura 46 mostra a lógica do alinhamento do mineroduto 1.

Figura 46: Regra de alinhamento do Mineroduto 1

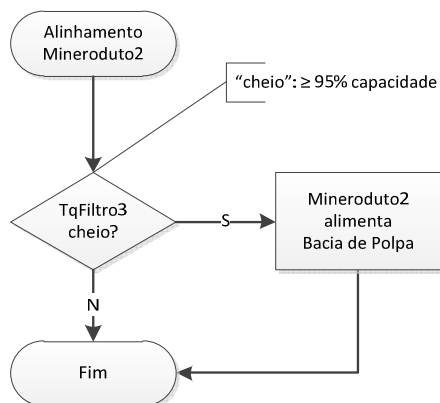


Fonte: Elaborado pelo autor

### ii) Alinhamento do Mineroduto 2

Semelhante ao caso anterior, o Mineroduto 2 pode alimentar o Tanque da Filtragem da Usina 3 ou a Bacia de Polpa. O modelo de layout da cadeia contempla ambas as alternativas. A função dessa regra é habilitar ou desabilitar as alternativas, de acordo com as condições atuais. A Figura 47 mostra a lógica de alinhamento do Mineroduto 2.

Figura 47: Regra de alinhamento do Mineroduto 2

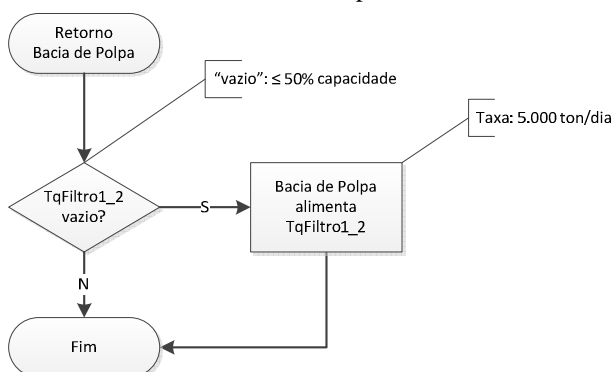


Fonte: Elaborado pelo autor

### iii) Retorno de material da Bacia de Polpa

A Bacia de Polpa é uma pilha de capacidade infinita (alimentada pelos minerodutos), e que pode alimentar o Tanque da Filtragem das Usinas 1 e 2 em determinadas condições. A Figura 48 mostra como se dá essa alimentação.

Figura 48: Regra de retorno de material da Bacia de Polpa

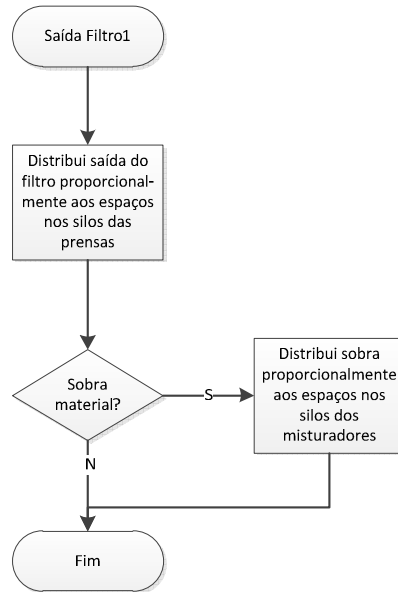


Fonte: Elaborado pelo autor

### iv) Distribuição do material que sai do Filtro1

O Filtro 1 é um processo que pode alimentar os silos das prensas, os silos dos misturadores, e pátio de *Pellet feed*. Todas as alternativas estão representadas no layout do modelo (e arquivo de dados). A função dessa regra é habilitar ou desabilitar os fluxos de acordo com as condições do momento. A Figura 49 mostra a lógica dessa regra.

Figura 49: Distribuição de material que sai do Filtro 1

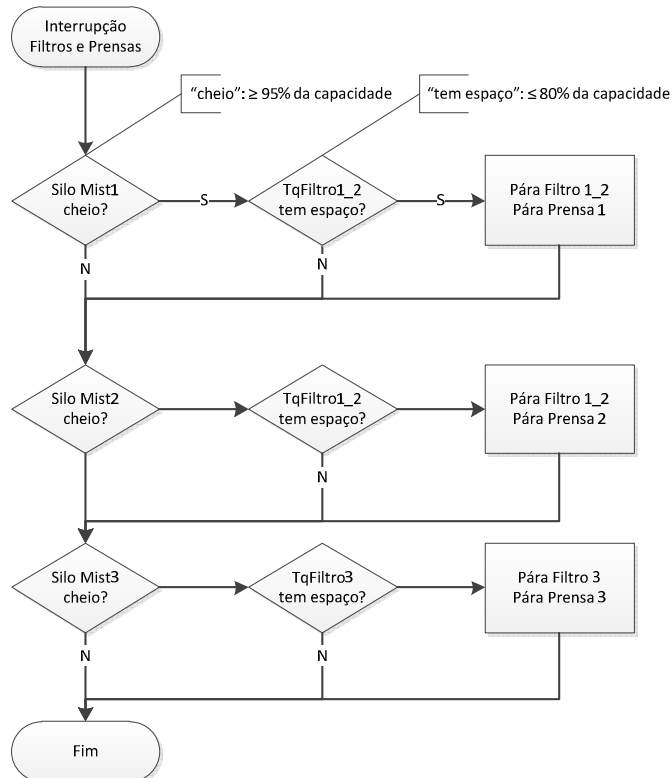


Fonte: Elaborado pelo autor

#### v) Interrupção dos Filtros e Prensas

A função dessa regra é interromper a produção dos Filtros e Prensas em determinadas condições especiais. A Figura 50 mostra a lógica dessa regra.

Figura 50: Interrupção dos Filtros e Prensas

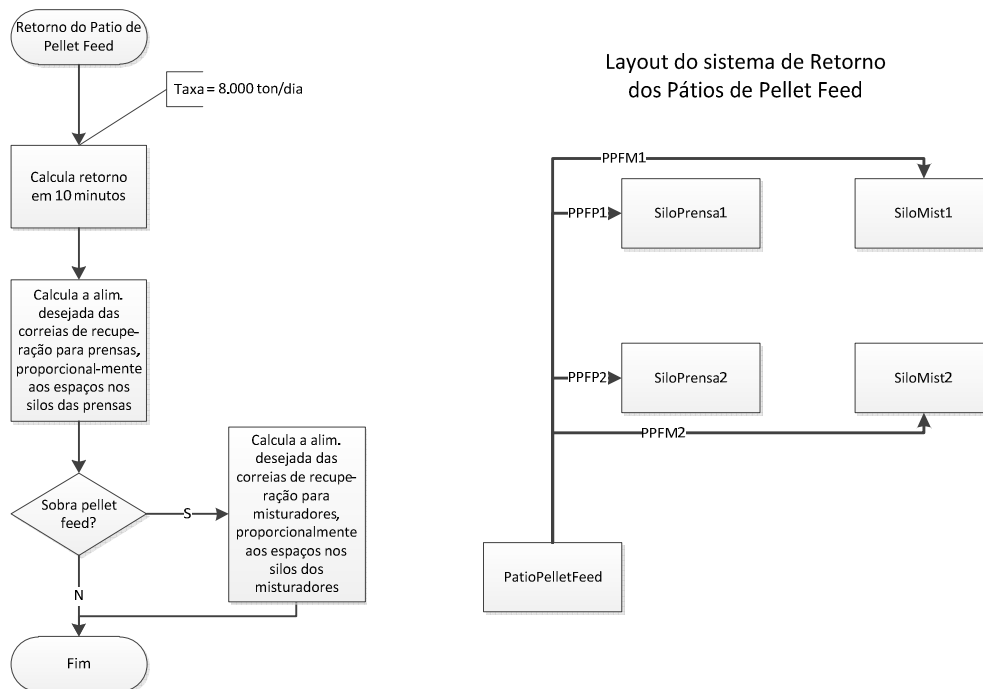


Fonte: Elaborado pelo autor

### vi) Retorno de material dos pátios de *Pellet feed*

Os pátios de *Pellet feed* (um de material CLS e outro de material CNS) são modelados como pilhas de capacidade infinita que podem, em determinadas situações, alimentar os silos das Prensas ou os silos dos Misturadores. A Figura 51 mostra as condições em que se dá essa alimentação.

Figura 51: Retorno de material dos pátios de *Pellet feed*



Fonte: Elaborado pelo autor

### vii) Propagação das mudanças de campanha ao longo da cadeia

Uma das características de qualidade do minério é “CLS”. Essa característica é setada para 1.0 nas pilhas pulmão (que alimentam os britadores) quando a campanha atual é de CLS, e para 0.0 quando a campanha atual é de CNS. A partir daí, o valor dessa característica nas pilhas mais a jusante do sistema é calculado da forma usual (a característica da pilha após mistura é a média ponderada das características antes da mistura pelas suas massas).

A campanha em um determinado processo da cadeia é determinada da seguinte forma:

- Se  $CLS \geq 50\%$ : Campanha = CLS
- Se  $CLS < 50\%$ : Campanha = CNS





## **ANEXO C: Mapeamento das variáveis do modelo conceitual no caso da Samarco e detalhamento dos modelos de regressão**

Este anexo apresenta as variáveis mapeadas na estrutura sistêmica e que foram utilizadas para representar o sistema produtivo da Samarco. Além disso, o anexo detalha as variáveis compreendidas em cada um dos modelos de regressão, sumarizados na Tabela 1, utilizados no modelo computacional desenvolvido no caso da Samarco. Por fim, apresenta-se o detalhamento dos resultados dos modelos de regressão que representam a taxa de tamboramento da pelota observado na saída das usinas de pelotização (uma das qualidades do produto).

Para auxiliar na compreensão dos diferentes tipos variáveis necessárias para a representação do modelo conceitual, as mesmas foram classificadas em função da categoria e do tipo. As categorias representam a forma de representação da variável no modelo computacional. Desta forma, as categorias propostas são:

- Variável de entrada: contempla as variáveis de entrada do sistema produtivo que basicamente são a taxas de produção das minas e a qualidade da matéria-prima;
- Variável aleatória: representam as variáveis aleatórias necessárias para representar a dinâmica do sistema;
- Variável condicionada intermediária: as variáveis condicionadas são aquelas que são representadas a partir de expressões matemática. Aquelas variáveis que não medem o desempenho global do sistema são classificadas como intermediária. Estas variáveis são estimadas a partir da técnica de regressão linear
- Variável condicionada final: variáveis semelhantes as descritas anteriormente, no entanto, referem-se as variáveis de resposta do sistema;
- Variável observada: compreende as variáveis que medem alguma característica de qualidade ou operacional ao longo da cadeia produtiva. Por exemplo, o teor de sílica do concentrado recebido na unidade de Ubu.

Quanto ao tipo, as variáveis são classificadas em:

- Taxa de produção/alimentação: este tipo compreende as variáveis que retratam de taxas de produção, taxa de alimentação ou ainda perda/ganho de massa;
- Qualidade do produto: representa as variáveis que indicam as características da pelota de ferro;
- Qualidade da matéria-prima: contempla as variáveis que apontam um atributo de qualidade da matéria-prima;
- Qualidade intermediária: compreende as variáveis que apontam um atributo de qualidade observado ao longo da cadeia produtiva. Todo atributo de qualidade que não é da matéria-prima ou do produto são classificados neste tipo;
- Indisponibilidade de equipamentos: inclui as variáveis relacionadas a parada dos equipamentos;
- Parâmetro do processo: compreende as variáveis que representam alguma característica do processo que não aquelas referente a qualidade, taxas de produção ou disponibilidade de equipamentos.

Os

Quadro 14, 15, 16 e 17 apresentam as variáveis representadas na estrutura sistêmica e no modelo conceitual, classificadas em função das categorias e tipos descritos anteriormente, além de destacar uma breve descrição da variável. Os

Quadro 14, 15, 16 e 17 sintetizam as variáveis por operação, ou seja, extração, concentração, mineroduto e pelletização, respectivamente.

Quadro 14: Resumo das variáveis operação de extração

(Continua)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Taxa de produção mina Alegria 126	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Produção diária de ROM no sistema de mineração Alegria 126 (mina Alegria 126)
Taxa de produção mina Alegria 345	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Produção diária de ROM no sistema de mineração Alegria 345 (mina Alegria 345)
Taxa de produção mina Alegria 9	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Produção diária de ROM no sistema de mineração Alegria 9 (mina Alegria 9)
Taxa de produção mina Fazendão	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Taxa diária de recebimento de ROM da mina de Fazendão (pilha pulmão Fazendão)
Teor de ferro do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de ferro do ROM (alimentação da concentração - moagem primária)
Teor de sílica do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de sílica do ROM (alimentação da concentração - moagem primária)
Teor de alumina do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de alumina do ROM (alimentação da concentração - moagem primária)
PPC do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Perda por calcinação (PPC) do ROM (alimentação da concentração - moagem primária)
Teor de hematita especular do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de hematita especular do ROM (alimentação da concentração - moagem primária)
Disponibilidade equipamentos mina Alegria 126	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade dos equipamentos disponíveis na mina 126
Utilização equipamentos mina Alegria 126	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Percentual de utilização dos equipamentos disponíveis na mina 126
Disponibilidade equipamentos mina Alegria 345	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade dos equipamentos disponíveis na mina 345
Utilização equipamentos mina Alegria 345	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Percentual de utilização dos equipamentos disponíveis na mina 345
Disponibilidade equipamentos mina Alegria 9	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade dos equipamentos disponíveis na mina 9
Utilização equipamentos mina Alegria 9	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Percentual de utilização dos equipamentos disponíveis na mina 9
Disponibilidade equipamentos mina Fazendão	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade dos equipamentos disponíveis na mina Fazendão
Utilização equipamentos mina Fazendão	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Percentual de utilização dos equipamentos disponíveis na mina Fazendão
Disponibilidade correia (CV01)	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade da correia CV01
Disponibilidade correia (CV002)	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade da correia CV002

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Disponibilidade equipamento <i>Lokotrack</i> (LK01)	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Disponibilidade do equipamento de extração <i>Lokotrack</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

(Conclusão)

Quadro 15: Resumo das variáveis operação de concentração

(Continua)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Superfície específica Blaine (BSA)	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Medida de superfície específica (pós concentração)
Taxa de recebimento concentrado Vale	Variável aleatória	Taxa de produção/alimentação	Taxa diária de recebimento de concentrado Vale (processo de deslamagem/flotação)
Consumo total de amido	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Consumo diário de amido (processo de deslamagem/flotação)
Consumo total de amina	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Consumo diário de amina (processo de deslamagem/flotação)
Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 100 <i>mesh</i> do ROM (pós moagem primária)
Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 100 <i>mesh</i> do concentrado Vale (processo de deslamagem/flotação)
Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 200 <i>mesh</i> do concentrado (pós concentração)
Granulometria -325 <i>mesh</i> do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de partículas menor que 325 <i>mesh</i> do concentrado (pós concentração)
Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Percentual de partículas menor que 325 <i>mesh</i> do concentrado Vale (processo de deslamagem/flotação)
Granulometria do ROM percentual de 12,5mm	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 12,5mm do ROM (pós britagem)
Grau de liberação de sílica	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de liberação de sílica após a pré-moagem/moagem primária (pós moagem primária)
Grau de moabilidade (constante cinético)	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Constante cinética do minério (pós concentração)
Número de Alimentadores dos pré moinhos operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de Alimentadores dos pré moinhos operando (processo pré moagem/moagem primária)
Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando (processo pré moagem/moagem primária)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Número de Bombas na Alimentação dos <i>Tank cell</i> operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de Bombas na Alimentação dos <i>Tank cell</i> operando (processo de deslamagem/flotação)
Número de britadores primários (1 fase) operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de britadores primários (1 fase) operando (processo pré moagem/moagem primária)
Número de britadores secundários (2 fase) operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de britadores secundários (2 fase) operando (processo pré moagem/moagem primária)
Número de espessadores de concentrado operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de espessadores de concentrado operando (processo de deslamagem/flotação)
Número de moinhos primários operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de moinhos primários operando (processo pré moagem/moagem primária)
Número de moinhos secundários operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de moinhos secundários operando (processo de deslamagem/flotação)
Número de peneiras operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de peneiras operando (processo pré moagem/moagem primária)
Número de pré moinhos operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de pré moinhos operando (processo pré moagem/moagem primária)
Número de pré moinhos e moinhos operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de pré moinhos e moinhos operando (processo pré moagem/moagem primária)
Fósforo do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Fósforo do concentrado (pós concentração)
Perdas por calcinação (PPC) do concentrado Vale	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Perdas por calcinação (PPC) do concentrado Vale (processo de deslamagem/flotação)
Percentual de sólido do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de sólidos do concentrado (pós concentração)
pH espessador de concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	pH espessador de concentrado (pós concentração)
pH do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	pH do concentrado (pós concentração)
pH do ROM	Variável aleatória	Qualidade da matéria-prima	pH do ROM (pós moagem primária)
Potência total aplicada aos moinhos secundários	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Potência elétrica total aplicada aos moinhos secundários (processo de deslamagem/flotação)
Potência total aplicada aos moinhos primários	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Potência elétrica total aplicada aos moinhos primários (processo pré moagem/moagem primária)
Potência total aplicada aos pré-moinhos	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Potência elétrica total aplicada aos pré-moinhos (processo pré moagem/moagem primária)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Pressão média aplicada na alimentação dos ciclones primários	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Pressão média aplicada na alimentação dos ciclones primários (processo pré moagem/moagem primária)
Recuperação mássica do concentrador	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Recuperação de massa obtida no final do processo de concentração
Superfície específica do concentrado	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Superfície específica do concentrado (pós concentração)
Taxa de alimentação britagem	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Taxa de alimentação horária da britagem (processo de britagem)
Taxa de alimentação Pré-moagem & Moagem primária (Taxa de alimentação concentrador)	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Taxa de alimentação horária da Pré-moagem & Moagem primária
Teor Alumina do concentrado Vale	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Teor Alumina do concentrado Vale
Teor de ferro do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Teor de ferro do concentrado (pós concentração)
Teor de Sílica do concentrado Vale	Variável aleatória	Qualidade intermediária	Teor de Sílica do concentrado Vale
Teor de sílica do concentrado	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Teor de sílica do concentrado (pós concentração)
Teor de umidade do ROM	Variável aleatória	Qualidade da matéria-prima	Teor de umidade do ROM (pós moagem primária)
Perdas por calcinação (PPC) do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Perdas por calcinação (PPC) do ROM (pós moagem primária)
Taxa de produção de <i>oversize</i> na britagem (granulometria maior que 12,5mm)	Variável aleatória	Taxa de produção/alimentação	Taxa de produção de <i>oversize</i> (partículas maior que 12,5mm) na britagem
Teor de alumina do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de alumina do ROM (pós moagem primária)
Teor de hematita especular do concentrado	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de hematita especular do concentrado (pós concentração)
Teor de Sílica do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de Sílica do ROM (pós moagem primária)
Teor Ferro do ROM	Variável de entrada	Qualidade da matéria-prima	Teor de Sílica do ROM (pós moagem primária)

Fonte: Elaborado pelo autor

(Conclusão)



Quadro 16: Resumo das variáveis operação de mineroduto

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição
Taxa de alimentação mineroduto	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Taxa de alimentação horária do mineroduto
Velocidade média das bombas EB2/EB5	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Velocidade média das bombas nas estações de bombeamento intermediárias (EB) 2 ou 5
Velocidade média das bombas EB1/EB4	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Velocidade média das bombas nas estações de bombeamento (EB) 1 ou 4
Nível dos tanques EB2/EB5	Variável observada	Parâmetro do processo	Nível percentual de ocupação dos tanque intermediários
Dosagem cal	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Dosagem diária de cal ao concentrado bombeado
Densidade de sólidos do concentrado	Variável observada	Qualidade intermediária	Densidade de sólidos do concentrado
Densidade de polpa do concentrado	Variável observada	Qualidade intermediária	Densidade de polpa do concentrado
Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado	Variável observada	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 200 <i>mesh</i> do concentrado
Número de bombas operando EB1/EB4	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de bombas operando nas estações de bombeamento intermediárias (EB) 1 ou 4
Número de bombas operando EB2/EB5	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de bombas operando nas estações de bombeamento intermediárias (EB) 2 ou 5
Percentual de sólido do concentrado	Variável observada	Qualidade intermediária	Percentual de sólido do concentrado

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 17: Resumo das variáveis operação de aglomeração

(Continua)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Taxa de alimentação filtragem	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Taxa de alimentação horária do filtragem (processo de filtragem)
Taxa de alimentação mistura	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Taxa de alimentação horária do mistura (processo de mistura)
Taxa de alimentação pelotização	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Taxa de alimentação horária do pelotização (processo de pelotização)
Perda de massa do forno	Variável condicionada intermediária	Taxa de produção/alimentação	Percentual de perda de massa da pelota crua durante a queima no forno (processo de queima)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Superfície específica do <i>pellet feed</i> (Pós prensa)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (Pós prensa)
Granulometria pelota crua (16-8mm)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de pelotas cruas cujo diametro varie entre 16-8mm (pós pelotização)
Granulometria pelota crua diâmetro médio	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Diâmetro médio da pelota crua (pós pelotização)
Tamboramento pelota	Variável condicionada intermediária	Qualidade produto	Taxa de tamboramento da pelota de ferro (pós queima)
Taxa de compressão	Variável condicionada intermediária	Qualidade produto	Taxa de compressão da pelota de ferro (pós queima)
Percentual de -6.3 (pós queima)	Variável condicionada intermediária	Qualidade produto	Percentual de finos menor que 6,3mm (pós queima) (pós queima)
Nível do estoque de <i>pellet feed</i> prensado (silo da mistura)	Variável observada	Parâmetro do processo	Percentual de ocupação do estoque de <i>pellet feed</i> prensado (silo da mistura) (pré mistura)
Nível do estoque de polpa concentrado nos tanques da filtragem	Variável observada	Parâmetro do processo	Percentual de ocupação do estoque de polpa concentrado nos tanques da filtragem (pré filtragem)
Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Variável observada	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de partículas maior que 200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)
Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Variável observada	Qualidade intermediária	Percentual de partículas menor que 325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de partículas menor que 325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)
Nível médio dos silos da pelotização	Variável observada	Parâmetro do processo	Percentual de ocupação média dos silos da pelotização (pré pelotização)
Número de discos operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de discos operando (processo de pelotização)
Número de filtros operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de filtros operando (processo de filtragem)
Número de misturadores operando	Variável aleatória	Indisponibilidade de equipamentos	Número de misturadores operando (processo de mistura)
Perdas por calcinação do <i>pellet</i>	Variável observada	Qualidade intermediária	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)

Variável	Classe	Tipo	Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)
<i>feed</i> (PPC) (pós filtragem)			
Percentual de sólido do concentrado recebido em Ubu	Variável observada	Qualidade intermediária	Percentual de sólido do concentrado recebido em Ubu (pré de filtragem)
Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Variável observada	Qualidade intermediária	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de umidade da pelota crua na saída da pelotização (pós pelotização)
Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa)
pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)	Variável observada	Qualidade intermediária	pH do concentrado recebido em Ubu (pré filtragem)
pH na saída do misturador (Mistura)	Variável condicionada intermediária	Qualidade intermediária	pH na saída do misturador (pós mistura)
Pressão do rolo	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Pressão do rolo (processo de prensagem)
Rotação média dos discos pelotização	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Rotação média dos discos pelotização (processo de pelotização)
<i>Setpoint</i> consumo específico de bentonita	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Valor de referência de utilização de bentonita (processo de mistura)
<i>Setpoint</i> consumo específico de calcário	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Valor de referência de utilização de calcário (processo de mistura)
<i>Setpoint</i> consumo específico de carvão	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Valor de referência de utilização de carvão (processo de mistura)
Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Variável observada	Qualidade intermediária	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (processo de queima)
Temperatura na Secagem Descendente	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Temperatura na Secagem Descendente (processo de queima)
Temperatura na última zona de queima	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Temperatura na última zona de queima (processo de queima)
Teor de hematita especular do concentrado	Variável observada	Qualidade intermediária	Teor de hematita especular do concentrado (pré filtragem)
Teor de sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Variável observada	Qualidade intermediária	Teor de sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Variável observada	Qualidade intermediária	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu (pré filtragem)

<b>Variável</b>	<b>Classe</b>	<b>Tipo</b>	<b>Breve Descrição (processo relacionado e/ou local da medição)</b>
Velocidade do rolo	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Velocidade do rolo (processo de prensa)
Nível do estoque de mistura (silo pelletização)	Variável observada	Parâmetro do processo	Percentual de ocupação do estoque de <i>pellet feed</i> prensado (silo da mistura) (pré mistura)
Taxa alimentação grelha do forno	Variável observada	Taxa de produção/alimentação	Taxa de alimentação horária da grelha do forno (processo de queima)
Taxa de uso de energia térmica	Variável aleatória	Parâmetro do processo	Taxa de utilização de energia térmica (processo de queima)
Taxa de produção forno	Variável observada	Taxa de produção/alimentação	Taxa de produção horária do forno/produção de pelota (processo de queima)

Fonte: Elaborado pelo autor

(Conclusão)

Cada modelo de regressão compreende um conjunto de variáveis dependentes que podem influenciar a variável de interesse (variável dependente). Este conjunto de variáveis, conforme já destacado, foi obtido a partir da estrutura sistêmica (Anexo B) e validado pelo Grupo de Trabalho. Estas informações podem ser observadas nos Quadro 18, 19, 20 e 21, na primeira coluna. Além disso, os Quadro 18, 19, 20 e 21 também apresentam as variáveis mantidas em cada um dos modelos estimados após a realização das estratégias utilizadas para elevar o poder de explicação dos modelos ( $R^2$ ), os ajustes sugeridos pelos especialistas da Samarco e a realização do algoritmo de *stepwise*.

Quadro 18: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão da etapa de extração

<b>Modelo (variável dependente)</b>	<b>Variáveis extraídas da estrutura sistêmica</b>	<b>Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6</b>
Taxa de produção mina Alegria 126	Taxa de produção mina Alegria 126	Taxa de produção mina Alegria 126
	Disponibilidade equipamentos mina Alegria 126	Disponibilidade equipamentos mina Alegria 126
	Utilização equipamentos mina Alegria 126	Utilização equipamentos mina Alegria 126
	Disponibilidade correia (CV01)	Disponibilidade correia (CV01)
Taxa de produção mina Alegria 345	Taxa de produção mina Alegria 345	Taxa de produção mina Alegria 345
	Disponibilidade equipamentos mina Alegria 345	Disponibilidade equipamentos mina Alegria 345
	Utilização equipamentos mina Alegria 345	Utilização equipamentos mina Alegria 345
Taxa de produção mina Alegria 9	Taxa de produção mina Alegria 9	Taxa de produção mina Alegria 9
	Disponibilidade equipamentos mina Alegria 9	Disponibilidade equipamentos mina Alegria 9
	Utilização equipamentos mina Alegria 9	Utilização equipamentos mina Alegria 9
	Disponibilidade correia (CV002)	Disponibilidade correia (CV002)
Taxa de produção mina Fazendão	Taxa de produção mina Fazendão	Taxa de produção mina Fazendão
	Disponibilidade equipamentos mina Fazendão	Disponibilidade equipamentos mina Fazendão
	Utilização equipamentos mina Fazendão	Utilização equipamentos mina Fazendão
	Disponibilidade equipamento <i>Lokotrack</i> (LK01)	Disponibilidade equipamento <i>Lokotrack</i> (LK01)

<sup>(1)</sup> Os ajustes realizados compreende o *stepwise* e a eliminação das variáveis apontadas pelos especialistas.

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 19: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão da etapa de concentração

(Continua)

<b>Modelo (variável dependente)</b>	<b>Variáveis extraídas da estrutura sistêmica</b>	<b>Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6</b>
Taxa de alimentação britagem	Número de britadores primários (1 fase) operando	Número de britadores primários (1 fase) operando
	Número de britadores secundários (2 fase) operando	Número de britadores secundários (2 fase) operando <sup>(b), (c), (e)</sup>
	Número de peneiras operando	Número de peneiras operando <sup>(c)</sup>
	Perdas por calcinação do ROM (PPC)	Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(b), (e)</sup>
	Percentual de Umidade do ROM	Percentual de Umidade do ROM <sup>(d)</sup>
	Taxa de Taxa de produção da britagem	Taxa de Taxa de produção da britagem

Modelo (variável dependente)	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Taxa de produção de <i>oversize</i> na britagem (granulometria maior que 12,5mm) Teor Alumina do ROM Teor de Hematita Especular do concentrado Teor de Sílica do ROM Teor Ferro do ROM	Taxa de produção de <i>oversize</i> na britagem (granulometria maior que 12,5mm) Teor Alumina do ROM <sup>(b), (c), (d)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(b), (d), (e)</sup> Teor de Sílica do ROM <sup>(b), (c), (d)</sup> Teor Ferro do ROM
Taxa de alimentação Pré-moagem/Moagem primária	Taxa de alimentação concentrador Percentual de Umidade do ROM Taxa de produção da britagem Granulometria do ROM percentual de 12,5mm Pressão alimentação média dos ciclones primários Teor de Sílica do ROM Teor Alumina do ROM Perdas por calcinação do ROM (PPC) Teor de Hematita Especular do concentrado Potência total aplicada aos pré-moinhos/moinhos primários Teor Ferro do ROM Número de Alimentadores dos pré moinhos operando <sup>(a)</sup> Número de pré moinhos operando Número de moinhos primários operando	Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Percentual de Umidade do ROM <sup>(b), (c), (d)</sup> Taxa de produção da britagem <sup>(b), (d)</sup> Granulometria do ROM percentual de 12,5mm <sup>(b), (c), (d)</sup> Pressão alimentação média dos ciclones primários <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor de Sílica do ROM <sup>(d), (e)</sup> Teor Alumina do ROM <sup>(c), (e)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(e)</sup> Potência total aplicada aos pré-moinhos/moinhos primários <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor Ferro do ROM <sup>(b), (c), (e)</sup> Número de Alimentadores dos pré moinhos operando <sup>(a)</sup> Número de pré moinhos operando <sup>(b), (c)</sup> Número de moinhos primários operando <sup>(b)</sup>
Recuperação mássica do concentrador	Recuperação mássica do concentrador do concentrador pH do ROM pH espessador de concentrado Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM Taxa de alimentação concentrador Teor de Sílica do ROM Teor Alumina do ROM Perdas por calcinação do ROM (PPC) Grau de liberação de sílica Consumo total de amido	Recuperação mássica do concentrador do concentrador <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM <sup>(b), (d)</sup> pH espessador de concentrado Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM <sup>(e)</sup> Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor de Sílica do ROM <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor Alumina do ROM <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(c)</sup> Grau de liberação de sílica <sup>(b), (c)</sup> Consumo total de amido <sup>(e)</sup>

Modelo (variável dependente)	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Consumo total de amina Teor de Hematita Especular do concentrado Potência total aplicada aos moinhos secundários Teor Ferro do ROM Número de pré moinhos operando Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando Número de Bombas na Alimentação dos <i>Tank cell</i> operando Número de moinhos secundários operando Número de espessadores de concentrado operando <sup>(a)</sup>	Consumo total de amina <sup>(d)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado Potência total aplicada aos moinhos secundários <sup>(b), (c)</sup> Teor Ferro do ROM <sup>(b)</sup> Número de pré moinhos operando Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando Número de Bombas na Alimentação dos <i>Tank cell</i> operando Número de moinhos secundários operando <sup>(b), (c), (e)</sup> Número de espessadores de concentrado operando <sup>(a)</sup>
Granulometria percentual de 12,5mm do minério na saída da britagem	Granulometria do ROM percentual de 12,5mm Taxa de alimentação concentrador Percentual de Umidade do ROM Taxa de produção de <i>oversize</i> na britagem (granulometria maior que 12,5mm) Taxa de produção da britagem Número de peneiras operando Número de britadores primários (1 fase) operando Número de britadores secundários (2 fase) operando	Granulometria do ROM percentual de 12,5mm <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (c), (e)</sup> Percentual de Umidade do ROM <sup>(c), (d)</sup> Taxa de produção de <i>oversize</i> na britagem (granulometria maior que 12,5mm) Taxa de produção da britagem Número de peneiras operando <sup>(c), (e)</sup> Número de britadores primários (1 fase) operando <sup>(d)</sup> Número de britadores secundários (2 fase) operando <sup>(b)</sup>
Granulometria +100# na saída da moagem primária	Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM pH do ROM pH espessador de concentrado Taxa de alimentação concentrador Potência total aplicada aos moinhos primários <sup>(a)</sup> Taxa de produção da britagem Pressão alimentação média dos ciclones primários Teor de Sílica do ROM Potência total aplicada aos pré-moinhos/moinhos primários Teor Ferro do ROM Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando Número de Bombas na Alimentação dos <i>Tank cell</i> operando	Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM pH espessador de concentrado <sup>(b), (c), (d)</sup> Taxa de alimentação concentrador <sup>(d), (e)</sup> Potência total aplicada aos moinhos primários <sup>(a)</sup> Taxa de produção da britagem <sup>(b), (c)</sup> Pressão alimentação média dos ciclones primários <sup>(b), (c), (d)</sup> Teor de Sílica do ROM <sup>(c), (e)</sup> Potência total aplicada aos pré-moinhos/moinhos primários Teor Ferro do ROM <sup>(c), (d), (e)</sup> Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando <sup>(b), (c)</sup> Número de Bombas na Alimentação dos <i>Tank cell</i> operando



Modelo (variável dependente)	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
Grau de liberação de sílica na saída da moagem primária	Número de moinhos secundários operando	Número de moinhos secundários operando <sup>(b), (d), (e)</sup>
	Grau de liberação de sílica	Grau de liberação de sílica
	pH do ROM	pH do ROM
	pH espessador de concentrado	pH espessador de concentrado
	Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM	Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM
	Taxa de produção da britagem	Taxa de produção da britagem
	Taxa de alimentação concentrador	Taxa de alimentação concentrador
	Pressão alimentação média dos ciclones primários	Pressão alimentação média dos ciclones primários
	Potência total aplicada aos pré-moinhos/moinhos primários	Potência total aplicada aos pré-moinhos/moinhos primários
	Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando	Número de Bombas na Alimentação dos Ciclones operando
Granulometria percentual -325# do concentrado	Número de moinhos secundários operando	Número de moinhos secundários operando
	Granulometria - 325 <i>mesh</i> do concentrado	Granulometria - 325 <i>mesh</i> do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>
	pH do ROM	pH do ROM <sup>(c), (d), (e)</sup>
	pH espessador de concentrado	pH espessador de concentrado <sup>(d)</sup>
	Granulometria - 100 <i>mesh</i> do ROM	Granulometria -100 <i>mesh</i> do ROM <sup>(b), (d), (e)</sup>
	Taxa de alimentação concentrador	Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (d), (e)</sup>
	Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(a)</sup>	Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(a), (b), (c)</sup>
	Granulometria + 100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Granulometria + 100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a), (b), (c)</sup>
	Granulometria - 325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Granulometria - 325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a), (c)</sup>
	Perdas por calcinação do ROM (PPC)	Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>
Superfície específica do concentrado	Teor de Hematita Especular do concentrado	Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(d)</sup>
	Potência total aplicada aos moinhos secundários	Potência total aplicada aos moinhos secundários <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>
	Grau de moabilidade (constante cinético)	Grau de moabilidade (constante cinético) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>
	Número de moinhos secundários operando	Número de moinhos secundários operando <sup>(d)</sup>
	Superfície específica do concentrado	Superfície específica do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>
	pH do ROM	pH do ROM <sup>(b), (d), (e)</sup>
Superfície específica do concentrado	pH espessador de concentrado	pH espessador de concentrado <sup>(b), (d)</sup>
	Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM	Granulometria + 100 <i>mesh</i> do ROM <sup>(d), (e)</sup>
	Taxa de alimentação concentrador	Taxa de alimentação concentrador <sup>(c), (d), (e)</sup>
	Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(a)</sup>	Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(a), (b)</sup>

Modelo (variável dependente)	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Teor Alumina concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria + 100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria - 325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Teor Alumina do ROM Perdas por calcinação do ROM (PPC) Teor de Hematita Especular do concentrado Potência total aplicada aos moinhos secundários Superfície específica Blaine (BSA)	Teor Alumina concentrado Vale <sup>(a) (b), (c)</sup> Granulometria + 100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a), (c)</sup> Granulometria - 325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a), (c)</sup> Teor Alumina do ROM <sup>(b), (c)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(b), (c)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Potência total aplicada aos moinhos secundários <sup>(d), (e)</sup> Superfície específica Blaine (BSA)
Teor de sílica do concentrado	Teor de Sílica (Concentrado) pH do ROM pH espessador de concentrado Taxa de recebimento concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM Taxa de alimentação concentrador Teor de Sílica concentrado Vale <sup>(a)</sup> Teor Alumina concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Teor de Sílica do ROM Teor Alumina do ROM Perdas por calcinação do ROM (PPC) Grau de liberação de sílica Consumo total de amido Consumo total de amina	Teor de Sílica (Concentrado) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM <sup>(e)</sup> pH espessador de concentrado <sup>(c)</sup> Taxa de recebimento concentrado Vale Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM <sup>(d)</sup> Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (c)</sup> Teor de Sílica concentrado Vale Teor Alumina concentrado Vale <sup>(c)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale Teor de Sílica do ROM <sup>(b), (e)</sup> Teor Alumina do ROM <sup>(d), (e)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(d), (e)</sup> Grau de liberação de sílica <sup>(c), (e)</sup> Consumo total de amido <sup>(b), (d), (e)</sup> Consumo total de amina <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>
Teor de ferro do concentrado	Teor Ferro (Concentrado) pH do ROM pH espessador de concentrado Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM Taxa de alimentação concentrador Teor de Sílica concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Teor Ferro (Concentrado) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM <sup>(e)</sup> pH espessador de concentrado <sup>(c), (e)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (d), (e)</sup> Teor de Sílica concentrado Vale <sup>(b)</sup>

Modelo (variável dependente)	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Teor Alumina concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Teor de Sílica do ROM Teor Alumina do ROM Perdas por calcinação do ROM (PPC) Grau de liberação de sílica Consumo total de amido Consumo total de amina Teor de Hematita Especular do concentrado Teor Ferro do ROM Taxa de recebimento concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Teor Alumina concentrado Vale <sup>(b)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(c)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale Teor de Sílica do ROM <sup>(c)</sup> Teor Alumina do ROM <sup>(e)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Grau de liberação de sílica Consumo total de amido <sup>(b), (d)</sup> Consumo total de amina Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(b), (c), (e)</sup> Teor Ferro do ROM <sup>(e)</sup> Taxa de recebimento concentrado Vale
Perdas por calcinação do concentrado	Perdas por calcinação (PPC Concentrado) pH do ROM pH espessador de concentrado Perdas por calcinação do ROM (PPC) Teor de Hematita Especular do concentrado Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(a)</sup> Taxa de recebimento concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Perdas por calcinação (PPC Concentrado) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM <sup>(d), (e)</sup> pH espessador de concentrado <sup>(c), (d), (e)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) Taxa de recebimento concentrado Vale
Percentual de sólido do concentrado	Percentual de sólido do concentrado pH do ROM pH espessador de concentrado Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(a)</sup> Taxa de alimentação concentrador Teor Alumina concentrado Vale <sup>(a)</sup> Recuperação mássica do concentrador do concentrador Teor Alumina do ROM Perdas por calcinação do ROM (PPC) Taxa de recebimento concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Percentual de sólido do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM <sup>(b), (d), (e)</sup> pH espessador de concentrado Perdas por calcinação concentrado Vale (PPC) <sup>(b), (c)</sup> Taxa de alimentação concentrador <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Teor Alumina concentrado Vale Recuperação mássica do concentrador do concentrador <sup>(b), (d), (e)</sup> Teor Alumina do ROM <sup>(b)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) Taxa de recebimento concentrado Vale <sup>(b)</sup>
pH do concentrado	pH do ROM	pH do ROM <sup>(b), (c), (d), (e)</sup>

<b>Modelo (variável dependente)</b>	<b>Variáveis extraídas da estrutura sistêmica</b>	<b>Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6</b>
	pH espessador de concentrado Consumo total de amido Consumo total de amina	pH espessador de concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Consumo total de amido Consumo total de amina
Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado	Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado pH do ROM pH espessador de concentrado Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM Taxa de alimentação concentrador Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale <sup>(a)</sup> Perdas por calcinação do ROM (PPC) Granulometria -325 <i>mesh</i> do concentrado Taxa de recebimento concentrado Vale <sup>(a)</sup>	Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH do ROM <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> pH espessador de concentrado <sup>(c)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> do ROM <sup>(c), (d), (e)</sup> Taxa de alimentação concentrador <sup>(b)</sup> Granulometria +100 <i>mesh</i> concentrado Vale Granulometria -325 <i>mesh</i> concentrado Vale Perdas por calcinação do ROM (PPC) Granulometria -325 <i>mesh</i> do concentrado <sup>(b), (c), (d), (e)</sup> Taxa de recebimento concentrado Vale

<sup>(1)</sup> Os ajustes realizados compreende o *stepwise* e a eliminação das variáveis apontadas pelos especialistas.

(Conclusão)

<sup>(a)</sup> Variáveis não existentes no Concentrador 2

<sup>(b)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão do Concentrador 1 – campanha CNS (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(c)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão do Concentrador 1 – campanha CLS (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(d)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão do Concentrador 2 – campanha CLS (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(e)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão do Concentrador 2 – campanha CNS (modelos utilizados no modelo computacional)

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 20: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão do processo mineroduto

(Continua)

<b>Modelo</b>	<b>Variáveis extraídas da estrutura sistêmica</b>	<b>Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6</b>
Taxa de alimentação mineroduto	Taxa de alimentação mineroduto Velocidade média das bombas EB2/EB5/EB5 Velocidade média das bombas EB1/EB4/EB4 Nível dos tanques EB2/EB5 Dosagem cal Densidade de sólidos do concentrado Densidade de Polpa do concentrado	Taxa de alimentação mineroduto Velocidade média das bombas EB2/EB5/EB5 Velocidade média das bombas EB1/EB4/EB4 Nível dos tanques EB2/EB5 Dosagem cal Densidade de sólidos do concentrado Densidade de Polpa do concentrado

<b>Modelo</b>	<b>Variáveis extraídas da estrutura sistêmica</b>	<b>Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6</b>
	Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado	Granulometria +200 <i>mesh</i> do concentrado
	Número de bombas operando EB1/EB4	Número de bombas operando EB1/EB4
	Número de bombas operando EB2/EB5	Número de bombas operando EB2/EB5
	Percentual de sólido do concentrado	Percentual de sólido do concentrado

<sup>(1)</sup> Os ajustes realizados compreende o *stepwise* e a eliminação das variáveis apontadas pelos especialistas.

(Concluído)

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 21: Relação das variáveis compreendidas nos modelos de regressão da etapa de pelotização

(Continua)

<b>Modelo</b>	<b>Variáveis extraídas da estrutura sistêmica</b>	<b>Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6</b>
Taxa de alimentação filtragem	Taxa de alimentação filtragem	Taxa de alimentação filtragem
	Número de filtros operando	Número de filtros operando
	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu
	Teor de Hematita Especular do concentrado	Teor de Hematita Especular do concentrado
	pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)	pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)
	Percentual de sólido do concentrado recebido em Ubu	Percentual de sólido do concentrado recebido em Ubu
	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Taxa de alimentação mistura	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)
	Taxa de alimentação mistura	Taxa de alimentação mistura
	Taxa de alimentação filtragem	Taxa de alimentação filtragem
	Nível do estoque de mistura (silo pelotização)	Nível do estoque de mistura (silo pelotização)
	Nível do estoque de <i>pellet feed</i> prensado (silo da mistura)	Nível do estoque de <i>pellet feed</i> prensado (silo da mistura)
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa)
	Número de misturadores operando	Número de misturadores operando
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
Taxa de alimentação pelotização	Taxa alimentação grelha do forno	Taxa alimentação grelha do forno <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	PH na saída do misturador (Mistura)	PH na saída do misturador (Mistura) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>

Modelo	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Taxa de alimentação mistura	Taxa de alimentação mistura <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(g), (h), (i), (j)</sup>
	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa)
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(g), (h), (i)</sup>
	Número de discos operando	Número de discos operando <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Rotação média dos discos pelotização	Rotação média dos discos pelotização <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup>
	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu
	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) (j)
	Tamboramento pelota	Tamboramento pelota <sup>(j), (k)</sup>
	Taxa de compressão	Taxa de compressão <sup>(f), (g), (h), (i)</sup>
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário	<i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup>
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita	<i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão	<i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Temperatura na Secagem Descendente	Temperatura na Secagem Descendente <sup>(f), (g), (h), (i), (j)</sup>
	Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3)	Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) <sup>(f), (g), (h), (i)</sup>
	Temperatura na última zona de queima	Temperatura na última zona de queima <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Taxa de uso de Energia térmica	Taxa de uso de Energia térmica <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup>
Percentual de umidade do <i>pellet feed</i>	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)	pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)
	Número de filtros operando	Número de filtros operando <sup>(g), (h), (i)</sup>
	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu <sup>(f), (h), (i)</sup>
	Teor de Hematita Especular do concentrado	Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)	pH do concentrado recebido em Ubu (entrada filtragem)
	Percentual de sólido do concentrado recebido em Ubu	Percentual de sólido do concentrado recebido em Ubu (j)
	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (h), (i)</sup>

Modelo	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(j), (k)</sup>
	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Taxa de alimentação prensas	Taxa de alimentação prensas <sup>(f), (h), (i)</sup>
	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
Superfície específica na saída prensa	Pressão do rolo	Pressão do rolo <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Velocidade do rolo	Velocidade do rolo <sup>(f), (h), (i), (j)</sup>
	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(g), (j), (k)</sup>
	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de Hematita Especular do concentrado	Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(g), (j), (k)</sup>
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)
	Granulometria pelota crua (16-8mm)	Granulometria pelota crua (16-8mm) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	PH na saída do misturador (Mistura)	PH na saída do misturador (Mistura)
	Taxa de alimentação mistura	Taxa de alimentação mistura <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(f), (g), (h), (i), (j)</sup>
	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(g), (k)</sup>
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
Granulometria pelota crua 16-8mm	Número de discos operando	Número de discos operando <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Rotação média dos discos pelotização	Rotação média dos discos pelotização <sup>(g), (j), (k)</sup>
	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (h), (i), (k)</sup>
	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Tamboramento pelota	Tamboramento pelota <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Taxa de compressão	Taxa de compressão <sup>(f), (h), (i), (k)</sup>
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário	<i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita	<i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>

Modelo	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão Temperatura na Secagem Descendente  Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) Temperatura na última zona de queima Taxa de uso de Energia térmica	<i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão <sup>(j), (k)</sup> Temperatura na Secagem Descendente <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup> Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) <sup>(g), (i), (k)</sup> Temperatura na última zona de queima <sup>(k)</sup> Taxa de uso de Energia térmica <sup>(f), (h), (i), (k)</sup>
	Granulometria pelota crua diâmetro médio PH na saída do misturador (Mistura) Taxa de alimentação mistura Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Número de discos operando Rotação média dos discos pelotização Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Tamboramento pelota Taxa de compressão <i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão Temperatura na Secagem Descendente Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) Temperatura na última zona de queima Taxa de uso de Energia térmica	Granulometria pelota crua diâmetro médio <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> PH na saída do misturador (Mistura) <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup> Taxa de alimentação mistura Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup> Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (h), (i), (k)</sup> Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h), (i), (j)</sup> Percentual de umidade do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Número de discos operando <sup>(g), (j)</sup> Rotação média dos discos pelotização <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup> Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu <sup>(j), (k)</sup> Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(j)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (h), (i), (k)</sup> Tamboramento pelota <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Taxa de compressão <sup>(f), (g), (h), (i), (j)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <sup>(f), (g), (h), (i), (j)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <sup>(g), (j)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão <sup>(g), (j), (k)</sup> Temperatura na Secagem Descendente <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) <sup>(j), (k)</sup> Temperatura na última zona de queima <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup> Taxa de uso de Energia térmica <sup>(k)</sup>
Taxa de tamboramento da pelota	Tamboramento pelota Granulometria pelota crua (16-8mm) Granulometria pelota crua diâmetro médio	Tamboramento pelota <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Granulometria pelota crua (16-8mm) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Granulometria pelota crua diâmetro médio <sup>(f), (g), (h), (i), (k)</sup>



Modelo	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
	Taxa de produção forno Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão  Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) Temperatura na Secagem Descendente Temperatura na última zona de queima Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Teor de Hematita Especular do concentrado PH na saída do misturador (Mistura) Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)	Taxa de produção forno <sup>(k)</sup> Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(g), (h), (i)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(j), (k)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <sup>(g), (h), (i), (k)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <sup>(f), (g), (h), (j), (k)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão <sup>(g), (h), (k)</sup> Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) <sup>(f), (h), (i)</sup> Temperatura na Secagem Descendente <sup>(f), (g), (h), (i)</sup> Temperatura na última zona de queima <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h)</sup> Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(h), (i), (k)</sup> Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(j)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(g), (h), (i), (k)</sup> PH na saída do misturador (Mistura) <sup>(f), (h), (i), (j)</sup> Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua) <sup>(f), (g), (h), (j)</sup>
Percentual de -6,3 (pós queima)	Percentual de -6.3 (pós queima) Granulometria pelota crua (16-8mm) Granulometria pelota crua diâmetro médio Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão Temperatura na Secagem Descendente Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) Teor de Hematita Especular do concentrado	Percentual de -6.3 (pós queima) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Granulometria pelota crua (16-8mm) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Granulometria pelota crua diâmetro médio <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup> Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(g), (k)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <sup>(g), (j), (k)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <sup>(g), (j)</sup> <i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup> Temperatura na Secagem Descendente <sup>(f), (g), (h), (i), (j)</sup> Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3) Granulometria +200 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(j)</sup> Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu <sup>(j)</sup> Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(k)</sup> Granulometria -325 <i>mesh</i> do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (h), (i), (j)</sup> Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(g), (j), (k)</sup>

Modelo	Variáveis extraídas da estrutura sistêmica	Variáveis mantidas nos modelos de regressão após os ajustes <sup>(1)</sup> descritos no Capítulo 6
Taxa de compressão pelota	PH na saída do misturador (Mistura)	PH na saída do misturador (Mistura) <sup>(g), (j)</sup>
	Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)	Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua) <sup>(f), (h), (i), (k)</sup>
	Taxa de compressão	Taxa de Taxa de compressão <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Granulometria pelota crua (16-8mm)	Granulometria pelota crua (16-8mm) <sup>(g), (h), (i), (k)</sup>
	Granulometria pelota crua diâmetro médio	Granulometria pelota crua diâmetro médio <sup>(f), (g), (j)</sup>
	Granulometria -325 mesh do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Granulometria -325 mesh do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Taxa de produção forno	Taxa de produção forno <sup>(f), (g), (j)</sup>
	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem) <sup>(g), (h), (i), (k)</sup>
	Temperatura na Secagem Descendente	Temperatura na Secagem Descendente <sup>(f), (h), (i), (k)</sup>
	Temperatura na última zona de queima	Temperatura na última zona de queima <sup>(g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Granulometria +200 mesh do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Granulometria +200 mesh do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu	Teor de ferro do concentrado recebido em Ubu <sup>(h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	Teor de Sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem) <sup>(f), (g)</sup>
	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	Superfície específica do <i>pellet feed</i> (pós prensa) <sup>(f), (h), (i), (j), (k)</sup>
	Teor de Hematita Especular do concentrado	Teor de Hematita Especular do concentrado <sup>(g), (h), (i), (j), (k)</sup>
	PH na saída do misturador (Mistura)	PH na saída do misturador (Mistura) <sup>(g), (h), (i), (k)</sup>
	Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)	Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)
	<i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário	<i>Setpoint</i> - consumo específico de calcário <sup>(f), (g), (h), (i), (j), (k)</sup>
<i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita	<i>Setpoint</i> - consumo específico de bentonita <sup>(g), (j)</sup>	
<i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão	<i>Setpoint</i> - consumo específico de carvão <sup>(g), (h), (i), (j), (k)</sup>	

<sup>(1)</sup> Os ajustes realizados compreende o *stepwise* e a eliminação das variáveis apontadas pelos especialistas.

(Conclusão)

<sup>(f)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão da Usina de pelotização 1 - campanha PBF (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(g)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão da Usina de pelotização 1 - campanha PDR (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(h)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão da Usina de pelotização 2 - campanha PBF (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(i)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão da Usina de pelotização 2 - campanha PDR (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(j)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão da Usina de pelotização 3 - campanha PBF (modelos utilizados no modelo computacional)

<sup>(k)</sup> Variáveis observadas nos modelos de regressão da Usina de pelotização 3 - campanha PDR (modelos utilizados no modelo computacional)

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir são detalhados os modelos de regressão de uma variável compreendida no modelo computacional desenvolvido no caso da Samarco, a qualidade da pelota denominada de taxa de tamboramento da pelota. Existem dois modelos para cada usina de pelletização, um para a campanha PBF e outro para a campanha PDR.

Tabela 6: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 1 – campanha PBF

Variável	Estimativa	Erro		
		padrão	t value	p_valor
(Intercepto)	22.1391	1.5167	14.5967	0.0000
Granulometria pelota crua (16-8mm)	0.0401	0.0053	7.6055	0.0000
Granulometria pelota crua diâmetro médio	-0.0625	0.0319	-1.9625	0.0498
Setpoint consumo específico de bentonita	18.2304	10.2537	1.7779	0.0756
pH na saída do misturador (Mistura)	-0.1015	0.0344	-2.9515	0.0032
Taxa de tamboramento (Pelota)	0.7297	0.0140	52.0995	0.0000
Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima (caixa 3)	0.0020	0.0011	1.7756	0.0759
Temperatura na Secagem Descendente	0.0018	0.0010	1.7915	0.0734
Temperatura na última zona de queima	0.0005	0.0002	2.4934	0.0127
Granulometria +200 mesh do pellet feed (pós prensa)	-0.0578	0.0213	-2.7130	0.0067
Percentual de umidade na saída da pelletização (Pelota Crua)	0.0688	0.0212	3.2473	0.0012

<sup>(1)</sup> R<sup>2</sup> ajustado = 0.628

<sup>(2)</sup> Estatística F (P-valor) = < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 1 – campanha PDR

Variável	Estimativa	Erro		
		padrão	t value	p_valor
(Intercepto)	23.8598	1.2331	19.3492	0.0000
Granulometria pelota crua (16-8mm)	0.0219	0.0036	6.1395	0.0000
Granulometria pelota crua diâmetro médio	-0.1020	0.0220	-4.6448	0.0000
Partes por calcinação na entrada da prensa (PF)	-0.0577	0.0349	-1.6534	0.0983
Setpoint consumo específico de calcário	2.7115	1.6411	1.6522	0.0986
Setpoint consumo específico de bentonita	5.2949	3.2555	1.6265	0.1040
Taxa de Tamboramento pelota	0.7228	0.0119	60.9878	0.0000
Temperatura na Secagem Descendente	0.0044	0.0006	6.9098	0.0000
Temperatura na última zona de queima	0.0010	0.0002	4.9413	0.0000
Granulometria +200 mesh na saída da prensa (PF)	-0.0463	0.0163	-2.8512	0.0044
Teor de hematita especular do concentrado	0.0045	0.0017	2.5836	0.0098
Percentual de umidade na saída da pelletização (Pelota Crua)	0.0519	0.0192	2.7097	0.0068
Setpoint consumo específico de carvão	-16.6076	5.1189	-3.2444	0.0012

<sup>(1)</sup> R<sup>2</sup> ajustado = 0.657

<sup>(2)</sup> Estatística F (P-valor) = < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 2 – campanha PBF

Variável	Erro			
	Estimativa	padrão	t value	p_valor
(Intercepto)	25.7497	1.5176	16.9674	0.0000
Taxa de tamboramento pelota	0.7014	0.0147	47.6114	0.0000
Granulometria pelota crua (16-8mm)	0.0268	0.0047	5.6893	0.0000
Granulometria pelota crua diâmetro médio	-0.1412	0.0348	-4.0542	0.0001
Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	-0.1033	0.0504	-2.0491	0.0406
Setpoint consumo específico de calcário	-3.2173	1.1751	-2.7380	0.0062
Setpoint consumo específico de bentonita	23.9640	10.1388	2.3636	0.0182
Setpoint consumo específico de carvão	10.6721	7.1544	1.4917	0.1359
Teor de Hematita Especular (Batch em UBU)	-0.0038	0.0022	-1.7293	0.0839
Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)	0.0396	0.0203	1.9489	0.0514
Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima	0.0034	0.0013	2.5739	0.0101
Temperatura na Secagem Descendente	0.0046	0.0009	4.9095	0.0000
Temperatura média na última zona de queima	0.0004	0.0002	1.6644	0.0962
Teor de sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	0.0768	0.0381	2.0126	0.0443

<sup>(1)</sup> R<sup>2</sup> ajustado = 0.671

<sup>(2)</sup> Estatística F (P-valor) = < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 2 – campanha PDR

Variável	Erro			
	Estimativa	padrão	t value	p_valor
(Intercepto)	20.4246	2.3803	8.5807	0.0000
Granulometria pelota crua (16-8mm)	0.0253	0.0057	4.4519	0.0000
Perdas por calcinação do <i>pellet feed</i> (PPC) (pós filtragem)	0.1205	0.0695	1.7348	0.0833
Setpoint consumo específico de calcário	12.5929	3.9905	3.1558	0.0017
Taxa de tamboramento pelota	0.7311	0.0265	27.5456	0.0000
Temperatura na primeira caixa de vento na zona de queima	0.0046	0.0019	2.4479	0.0146
Temperatura na Secagem Descendente	0.0033	0.0015	2.2481	0.0249
Temperatura média na última zona de queima	0.0007	0.0004	1.8636	0.0628
Superfície específica do <i>pellet feed</i> (Pós prensa)	-0.0002	0.0001	-1.6384	0.1018
Teor de sílica do <i>pellet feed</i> (pós filtragem)	-0.2890	0.1405	-2.0566	0.0401
pH na saída do misturador (Mistura)	0.1392	0.0530	2.6272	0.0088

<sup>(1)</sup> R<sup>2</sup> ajustado = 0.674

<sup>(2)</sup> Estatística F (P-valor) = < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10: Parâmetros do modelo de regressão da taxa de tamboramento da pelota da Usina 3 – campanha PBF

Variável	Erro			
	Estimativa	padrão	t value	p_valor
(Intercepto)	21.5393	1.9554	11.0153	0.0000
Taxa de tamboramento pelota	0.6964	0.0165	42.3198	0.0000
Granulometria pelota crua (16-8mm)	0.0568	0.0091	6.2199	0.0000
Granulometria pelota crua diâmetro médio	-0.1244	0.0456	-2.7299	0.0064
Granulometria -325 mesh do <i>pellet feed</i> (pós prensa)	0.0189	0.0105	1.7980	0.0724
Setpoint consumo específico de bentonita	29.5762	8.2810	3.5716	0.0004
Temperatura na última zona de queima	0.0053	0.0007	7.3410	0.0000
Superfície específica do <i>pellet feed</i> (Pós prensa)	-0.0001	0.0001	-1.4545	0.1460
Teor de hematita especular do concentrado	-0.0050	0.0023	-2.1203	0.0341

Variável	Erro			
	Estimativa	padrão	t value	p_valor
pH na saída do misturador (Mistura)	-0.0762	0.0400	-1.9041	0.0571
Percentual de umidade na saída da pelotização (Pelota Crua)	-0.0689	0.0313	-2.2034	0.0277

<sup>(1)</sup> R<sup>2</sup> ajustado = 0.682

<sup>(2)</sup> Estatística F (P-valor) = < 2.2e-16

(Concluído)

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 11: Parâmetros modelo de regressão taxa de tamboramento da pelota da Usina 3 – campanha PDR

Variável	Erro			
	Estimativa	padrão	t value	p_valor
(Intercepto)	25.8719	1.6678	15.5126	0.0000
Taxa de tamboramento pelota	0.6825	0.0141	48.2937	0.0000
Granulometria pelota crua (16-8mm)	0.0234	0.0061	3.8377	0.0001
Granulometria pelota crua diâmetro médio	-0.2421	0.0302	-8.0235	0.0000
Taxa de produção do forno	-0.0008	0.0002	-4.9531	0.0000
Granulometria -325 mesh do pellet feed (pós prensa)	0.0144	0.0090	1.5949	0.0670
Setpoint consumo específico de calcário	5.3493	3.2216	1.6604	0.0617
Setpoint consumo específico de bentonita	19.9151	6.8865	2.8919	0.0058
Setpoint consumo específico de carvão	11.4842	6.4283	1.7865	0.0638
Temperatura na última zona de queima	0.0056	0.0006	10.0829	0.0000
Teor de sílica do pellet feed (pós filtragem)	0.1392	0.0948	1.4679	0.0888
Teor de hematita especular do concentrado	0.0037	0.0017	2.1798	0.0280

<sup>(1)</sup> R<sup>2</sup> ajustado = 0.681

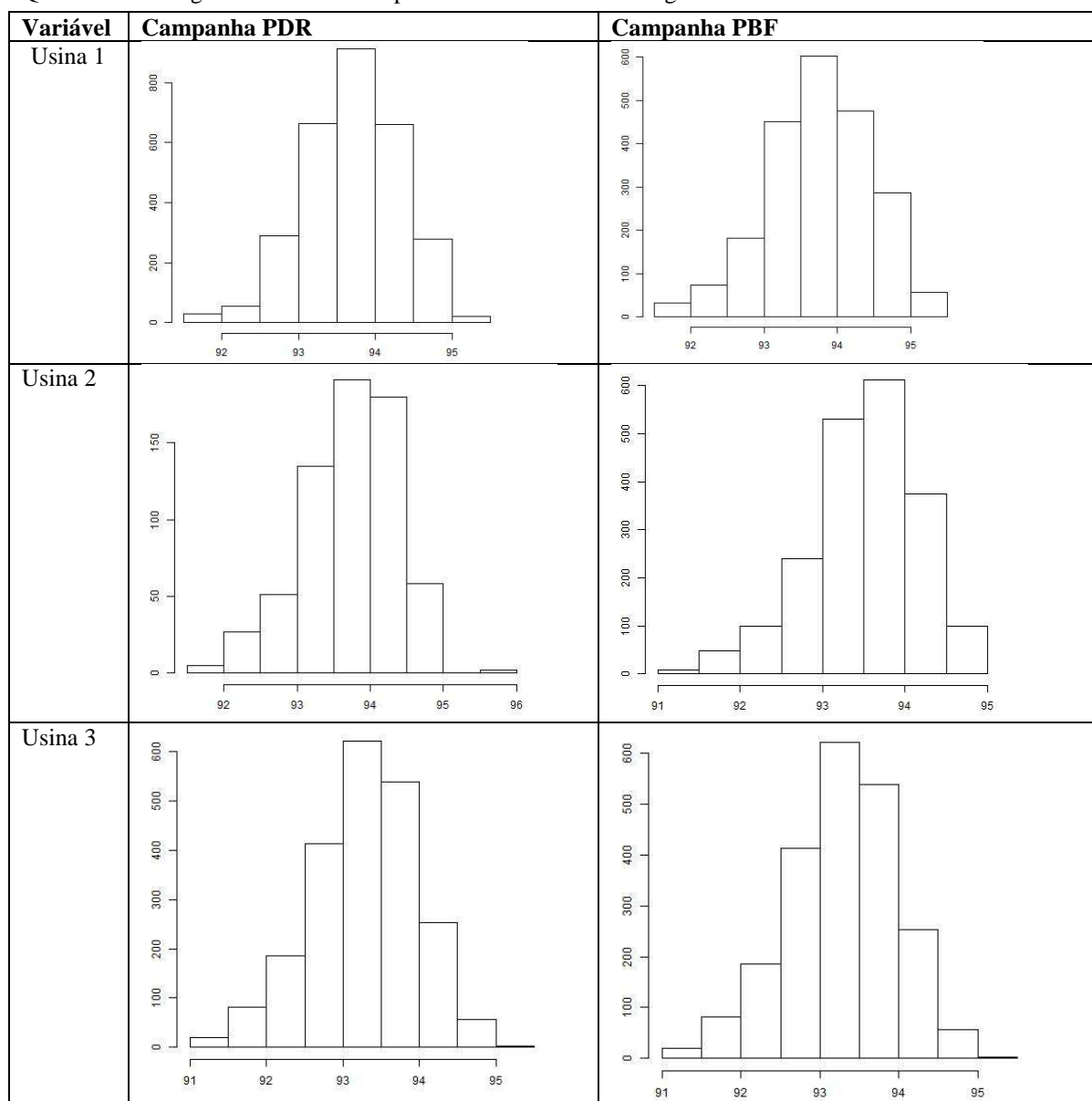
<sup>(2)</sup> Estatística F (P-valor) = < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, o Quadro 22 e a Tabela 12 descrevem os testes para avaliar os pressupostos da regressão linear, a saber, análise de normalidade das variáveis e análise de homocedasticidade dos resíduos, respectivamente. A normalidade das variáveis foi realizada a partir da análise gráfica<sup>110</sup>, visto que, para amostras grandes (maiores que 50) o teste de Shapiro e Wilk's não é adequado. (ROYSTON, 1982). O segundo pressuposto refere-se a homocedasticidade dos resíduos. Para isso, foi conduzido o teste de Goldfeld-Quandt (detalhes do teste podem ser obtidas em Gujarati (2006)).

<sup>110</sup> Como o objetivo central da tese não é exaurir os modelos de regressão estimados para representar a cadeia produtiva da Samarco, não há uma elevada preocupação em detalhar e exaurir os testes de pressupostos da análise de regressão. Ao longo da pesquisa discute-se a necessidade de modelos físico-químicos para representar as relações observadas na estrutura sistêmica, afim de, elevar a robustez do modelo de simulação.

Quadro 22: Histograma da variável dependente dos modelos de regressão da variável taxa de tamboramento



Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se dos histogramas apresentados no Quadro 23 que as variáveis dependentes apresentam um comportamento similar a uma distribuição normal.

Tabela 12: Resultados do teste de Goldfeld-Quandt para os modelos que explicam a taxa de tamboramento

<b>Modelo</b>	<b>P-valor</b>
Tamboramento U1 (PBF)	0.998
Tamboramento U1 (PDR)	0.632
Tamboramento U2 (PBF)	0.103
Tamboramento U2 (PDR)	0.090
Tamboramento U3 (PBF)	0.950
Tamboramento U3 (PDR)	0.016

Fonte: Elaborado pelo autor

Os p-valores apresentados na Tabela 12 apontam que a hipótese de que os resíduos são homodadásticos é aceita para cinco dos seis modelos. Considerando o caráter prático do uso do modelo de regressão para a pesquisa, o modelo seis foi utilizado mesmo com a violação do pressuposto de homocedasticidade. Vale ressaltar que ao longo da construção da pesquisa destaca-se que o uso de modelos fundamentais em detrimento a modelos estocásticos (empíricos) é mais indicada. Porém, na falta deles optou-se pela estimação dos modelos de regressão.

## ANEXO D: Código em R para tratamentos estatísticos dos dados do caso estudado

O Anexo D expõe a rotina computacional desenvolvida no *software* R para estimação dos modelos de regressão. O código apresentado refere-se a rotina utilizada para estimar os modelos do Concentrador 1. A estrutura do código é a mesma para as demais operações do sistema produtivo.

```
#####
##
## Modelagem Cadeia Produtiva Samarco
## Operação: Concentrador 1
## Versão: 2.0
## Data: 18/08/2012
## Autor: Luís Felipe Camargo
##
#####

rm(list=ls())
library(tseries)
library(QuantPsyc)
library(car)

#####
## PARÂMETROS INICIAIS
#####

#### Identificação
DATE = 03092012
PROCESS = "C1"

#### Folders & Files
PATH_DATAFILES = "C:/Users/Camargo/Desktop/Modelos de regressão/C1"
PATH_SAVE = "C:/Users/Camargo/Desktop/Modelos de regressão/C1/output"

#### Parâmetros da Simulação
OTIMIZATION = TRUE # Usar TRUE caso deseja-se utilizar método de otimização do modelo de regressão
if(OTIMIZATION) {OTIMO = "Otimo" } else {OTIMO = "Entrada"}

RODADA = "Rodada_Final" # i) Diario_Nivel; ii) Diario_Trend; iii) Horario_Nivel; iv) Horario_Trend;
Rodada_Final

NAME = paste(PROCESS,"_",RODADA,"_",OTIMO,"_Date_",DATE, sep="")

#### Setar os modelos que serão estimados por dados diários (MÉDIA (TRUE))
DIARIO = c( 0, # Modelo 1: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 2: setar 1 para diário; 0 para horário
            1, # Modelo 3: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 4: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 5: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 6: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 7: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 8: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 9: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 10: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 11: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 12: setar 1 para diário; 0 para horário
            0, # Modelo 13: setar 1 para diário; 0 para horário
            0) # Modelo 14: setar 1 para diário; 0 para horário
```



```

#### Setar os modelos que serão estimados pela tendência (TREND (TRUE))
TREND = c(1, # Modelo 1: setar 1 para trend; 0 para nivel
1, # Modelo 2: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 3: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 4: setar 1 para trend; 0 para nivel
1, # Modelo 5: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 6: setar 1 para trend; 0 para nivel
1, # Modelo 7: setar 1 para trend; 0 para nivel
1, # Modelo 8: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 9: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 10: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 11: setar 1 para trend; 0 para nivel
0, # Modelo 12: setar 1 para trend; 0 para nivel
1, # Modelo 13: setar 1 para trend; 0 para nivel
0) # Modelo 14: setar 1 para trend; 0 para nivel

#### Declarar os modelos que serão estimados
MODELS = c("Modelo1_", #1
"Modelo2_", #2
"Modelo3B_", #3
"Modelo4_", #4
"Modelo5_", #5
"Modelo6_", #6
"Modelo7_", #7
"Modelo8_", #8
"Modelo9_", #9
"Modelo10_", #10
"Modelo11_", #11
"Modelo12_", #12
"Modelo13_", #13
"Modelo14_") #14

NUM_MODELS = length(MODELS)

MODELS_NAMES = c(paste("Input_Britagem1 (var_",PROCESS,"_16)", sep=""),
paste("Input_MoagemPrimaria1 (var_",PROCESS,"_17)", sep=""),
paste("Recuperao_Massical (var_",PROCESS,"_1818)", sep=""),
paste("Qlty_Britagem1_GR_125 (var_",PROCESS,"_197)", sep=""),
paste("Qlty_MoagemPrimaria1(var_",PROCESS,"_11)", sep=""),
paste("Qlty_MoagemPrimaria1_Lib_SIO2 (var_",PROCESS,"_25)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_GR_325# (var_",PROCESS,"_44)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_SupEsp (var_",PROCESS,"_48)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_SIO2 (var_",PROCESS,"_5)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_Fe (var_",PROCESS,"_4)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_PPC (var_",PROCESS,"_50)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_Solidos (var_",PROCESS,"_43)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_PH (var_",PROCESS,"_377)", sep=""),
paste("Qlty_Deslamagem1_GR_200# (var_",PROCESS,"_104)", sep=""))

#### Criacao de variáveis auxiliares
r_square = matrix(-99.99, nrow = NUM_MODELS, ncol = 12) # Criar matriz com os R^2, R^2 Ajustado,
Diario/Horario, Trend/Nivel
colnames(r_square) <- c("CNS_R.Square", "CNS_Adj.R.Square", "CNS_GRANUL", "CNS_TREND", "CNS_F",
"CNS_Pvalue_F", "CLS_R.Square", "CLS_Adj.R.Square", "CLS_GRANUL", "CLS_TREND", "CLS_F",
"CLS_Pvalue_F")
rownames(r_square) <- MODELS_NAMES

coeff = rep(0, 6)

for (model in 1:NUM_MODELS){ # Este loop realiza os testes, e estima todos os modelos de regressão para as
campanhas CLS e CNS.

coeff_acum = coeff

```

```

#####
## LEITURA E TRATAMENTO INICIAL DOS DADOS
#####

if(DIARIO[model] == 1){tag_dataset = "d"; tag_granulometria = "Diario"} else {tag_dataset = "h";
tag_granulometria = "Horario"}
if(TREND[model] == 1){tag_trend = "Trend"} else {tag_trend = "Nivel"}

setwd(PATH_DATAFILES)

#### Carregar os dados diários (um arquivo csv por modelo)
dataset = read.csv2(file=paste(MODELS[model],tag_dataset,".csv", sep=""),header=TRUE,sep =
",",quote="",dec=".",fill=TRUE)

#### Leitura dos sinais esperados dos modelos
sinal_modelo = as.matrix(read.csv2(file=paste("Sinais_Modelo", model, ".csv", sep=""),header=FALSE,sep =
",",dec="."))

#### Remove a coluna que contem data/Hora
dataset$DataHora=NULL

#### Salva o numero de LINHAS de cada banco de dados
LENGTH = length(dataset[,1])

#### Salva o numero de COLUNAS de cada banco de dados
COMP = length(dataset[1,])

#### Remove variáveis (colunas) que apresentam valores constantes (sem desvio padrão)
sd_data = sd(dataset)
sd_data_lg = length(sd_data[sd_data == 0])
for(i in 1:(COMP-sd_data_lg)){if (sd(dataset[,i])==0) {dataset[,i]=NULL}}

#####
## TRATAMENTO DA TENDÊNCIA DA SÉRIE
#####

#### Modelo 1
if (DIARIO[model] == 0) {Numvar = length(dataset[1,])/5; COMPRIM = length(dataset[1,]);FLAG=4} #
Trabalhando com base horária
if (DIARIO[model] == 1) {Numvar = length(dataset[1,]); COMPRIM = length(dataset[1,]); FLAG=0} #
Trabalhando com base diaria

#### Aplica tendencia na variavel dependente, quando F1=TRUE
if (TREND[model] == 1) {

var_dep=dataset[25:(COMPRIM-25),1] #### Guarda variável dependente

for (h in 0:FLAG) {
trend = ts(dataset[,1+h*Numvar], frequency =24); trend = decompose(trend); dataset[,1+h*Numvar] =
trend$trend
colnames(dataset)[1+h*Numvar] <- paste("Trend_",colnames(dataset[1+h*Numvar]),sep="")
}
dataset=dataset[25:(COMPRIM-25) ,] # Aplica sub matriz para eliminar NAs

var_trend = dataset[,1] #### Guarda variável em tendencia

trend_name= colnames(dataset[1]) ### Guarda nome da veríável

erro = var_dep - var_trend #### Guarda variável em tendencia

setwd(PATH_SAVE)

write.csv(erro,paste("Erro_",trend_name,".csv", sep="")) #### Grava arquivos de erros

} # end if trend

```

```

#### Modifica nome da campanha t0 -> ""
if (colnames(dataset)[Numvar]=="var_Campanha_C_t0") {colnames(dataset)[Numvar] <- "var_Campanha_C"}

setwd(PATH_SAVE)

#####
## TRATAMENTO DOS DADOS & ANÁLISE DA CORRELAÇÃO
#####

#### Limpa colunas desnecessárias da base auxiliar para os testes de correlacao
datasetc= dataset
datasetc$var_Campanha_C=NULL
datasetc$var_Campanha_C_t1=NULL
datasetc$var_Campanha_C_t2=NULL
datasetc$var_Campanha_C_t3=NULL
datasetc$var_Campanha_C_t4=NULL

#### Gera a correlacao na base auxiliar e salva matriz de correlacao
correlation_matrix = cor(datasetc)
write.csv(correlation_matrix,paste("correlation_matrix_", model, "_", NAME, ".csv", sep=""))

#### A correlacao da variavel dependente com ela mesma deve ser setada como 0 para funcionamento da logica de
correlacao
correlation_matrix[1,1]=0

##### Analise de correlação: Analisa qual o t utilizar e compara com os sinais esperados das variaveis
if (DIARIO[model] == 1){ # Modelo diário
  COMPMX = length(correlation_matrix[1,])
  Numvar=COMPMX
  Modelo = paste(colnames(correlation_matrix)[1], "~")
  variavel=""
  for(i in 2:Numvar){
    Modelo=paste(Modelo,variavel)
    if(correlation_matrix[i] == 0){correlation_signal = 0}
    if(correlation_matrix[i] > 0){correlation_signal = 100}
    if(correlation_matrix[i] < 0){correlation_signal = -100}
    if(sinal_modelo[i] == correlation_signal || sinal_modelo[i] == 0){
      variavel=paste(colnames(correlation_matrix)[i], "+")
      v= colnames(correlation_matrix)[i]
    }
  }
} # End if modelo diário

if (DIARIO[model] == 0){ # Modelo horário
  COMPMX = length(correlation_matrix[1,]) # Numero de variáveis * defasagens (5)
  Numvar= ((COMPMX)/5)
  Modelo = paste(colnames(correlation_matrix)[1], "~")
  variavel="" # declaração da variável
  for(i in 1:Numvar){
    Core=0
    Modelo=paste(Modelo,variavel)
    for(j in 0:4){
      if(correlation_matrix[1,i+j*Numvar] == 0){correlation_signal = 0}
      if(correlation_matrix[1,i+j*Numvar] > 0){correlation_signal = 100}
      if(correlation_matrix[1,i+j*Numvar] < 0){correlation_signal = -100}
      if (abs(correlation_matrix[1,i+j*Numvar])>=Core && (sinal_modelo[i] == correlation_signal || sinal_modelo[i]
== 0)) {
        Core = abs(correlation_matrix[1,i+j*Numvar])
        variavel=paste(colnames(correlation_matrix)[i+j*Numvar], "+")
        v = colnames(correlation_matrix)[i+j*Numvar]
      }
    }
  }
} # End if modelo horario

```

```

funcao = as.formula(paste(Modelo,v))

#####
##  MODELO DE REGRESSAO
#####
Modelo_CNS = lm(funcao, subset = (var_Campanha_C == "0"), dataset)
if(OTIMIZATION) {Modelo_ajust_CNS = step(Modelo_CNS, direction = c("both"), trace = 1, keep = NULL, steps
= 1000, k = 2)} else
  {Modelo_ajust_CNS = Modelo_CNS} # Estima o modelo (otimizado ou não)
beta_CNS = lm.beta(Modelo_ajust_CNS) # Salva os betas
vif_CNS = vif(Modelo_ajust_CNS) # Teste de multicolinearidade
summary(Modelo_ajust_CNS)

Modelo_CLS = lm(funcao, subset = (var_Campanha_C == "1"), dataset)
if(OTIMIZATION) {Modelo_ajust_CLS = step(Modelo_CLS, direction = c("both"), trace = 1, keep = NULL, steps
= 1000, k = 2)} else
  {Modelo_ajust_CLS = Modelo_CLS}
beta_CLS = lm.beta(Modelo_ajust_CLS)
vif_CLS = vif(Modelo_ajust_CLS)
summary(Modelo_ajust_CLS)

#####
##  COMPILACAO DOS RESULTADOS
#####

#### Compilação dos Resultados
summary_model_CNS = summary(Modelo_ajust_CNS); r_square[model,1] = summary_model_CNS$r.squared
summary_model_CNS = summary(Modelo_ajust_CNS); r_square[model,2] = summary_model_CNS$adj.r.squared
r_square[model,3] = tag_granulometria
r_square[model,4] = tag_trend
r_square[model,5] = summary_model_CNS$fstatistic[1]
r_square[model,6] = pf(summary_model_CNS$fstatistic[1L], summary_model_CNS$fstatistic[2L],
summary_model_CNS$fstatistic[3L],lower.tail = FALSE) # p_value teste F

summary_model_CLS = summary(Modelo_ajust_CLS); r_square[model,7] = summary_model_CLS$r.squared
summary_model_CLS = summary(Modelo_ajust_CLS); r_square[model,8] = summary_model_CLS$adj.r.squared
r_square[model,9] = tag_granulometria
r_square[model,10] = tag_trend
r_square[model,11] = summary_model_CLS$fstatistic[1]
r_square[model,12] = pf(summary_model_CLS$fstatistic[1L], summary_model_CLS$fstatistic[2L],
summary_model_CLS$fstatistic[3L],lower.tail = FALSE) # p_value teste F

#### Coeficientes
m_CNS = summary_model_CNS$coefficients
m_CLS = summary_model_CLS$coefficients

mm_CNS = cbind(m_CNS, append(0, beta_CNS), paste(MODELS_NAMES[model], "- CNS", sep=""))
mm_CLS = cbind(m_CLS, append(0, beta_CLS), paste(MODELS_NAMES[model], "- CLS", sep=""))

coeff = rbind(coeff_acum, mm_CNS, mm_CLS)

} # End for all models

#####
##  SAVE FILES
#####
setwd(PATH_SAVE)
write.csv(coeff, paste("Output_coef_", NAME, ".csv", sep=""))
write.csv(r_square,paste("Output_rsquared_", NAME, ".csv", sep=""))
save.image(paste("Rdata_regressao", NAME, ".rdata"))

```