

LUIS ALBERTO OSÉS RODRIGUEZ

MODELO DE TOMADA DE DECISÃO INTEGRANDO
TEORIA DAS RESTRIÇÕES, PROGRAMAÇÃO LINEAR
INTEIRA E SIMULAÇÃO: ESTUDO DE CASO NUMA
INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica na área de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins

Guaratinguetá
2009

R696m Rodriguez, Luis Alberto Osés
Modelo de tomada de decisão integrando teoria das restrições, programação linear inteira e simulação: estudo de caso numa Indústria Siderúrgica / Luiz Alberto Osés Rodriguez . – Guaratinguetá : [s.n.], 2009
180 f. : il.
Bibliografia: f. 150-168

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009
Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins
Co-orientadora: Profa. Dra. Marcela Aparecida Guerreiro Machado

1. Pesquisa Operacional 2. Teoria das restrições (Administração) 3. Programação linear I. Título

CDU 65.012.1



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIS ALBERTO OSÉS RODRIGUEZ

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

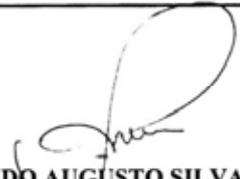
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

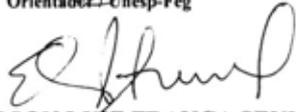


Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
Orientador Unesp-Feg



Prof. Dr. EDSON LUIZ FRANÇA SENNE
Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ ARNALDO BARRA MONTEVECHI
UNIFEI

Agosto de 2009

DADOS CURRICULARES

LUIS ALBERTO OSÉS RODRIGUEZ

NASCIMENTO	27.10.1985 – SÃO BERNARDO DO CAMPO / SP
FILIAÇÃO	Delmiro Rodriguez Alvarez Maria Del Pilar Osés Lassa
2003/2007	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2008/2009	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

in memoriam, ao meu avô Luis Osés Resano, que muito
contribuiu para minha formação.

AGRADECIMENTOS

À empresa Aços Villares S.A., e a todos os funcionários das áreas de planejamento, engenharia e da produção pela valorosa colaboração em ceder os dados utilizados neste trabalho.

À minha família, por todo o apoio, por toda a ajuda, e por toda a contribuição em minha formação.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Modelo de tomada de decisão integrando teoria das restrições, programação linear inteira e simulação: estudo de caso numa indústria siderúrgica**. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

Para enfrentar os problemas do atual mundo globalizado e para se manter em atividade, as empresas vêm sendo obrigadas a empregar, em seu dia-a-dia, novos instrumentos de trabalho. A Teoria das Restrições, a Programação Linear Inteira e a Simulação de Sistemas surgem como potenciais ferramentas no auxílio à identificação e à solução dos problemas enfrentados pelas empresas nos dias de hoje. Este trabalho teve por objetivo principal desenvolver um método de planejamento e gerenciamento da produção, integrando essas três ferramentas. O método foi aplicado na linha de produção da Unidade de Cilindros para Laminação da empresa Aços Villares S/A com o intuito de melhorar o fluxo de produção e o cumprimento do prazo de liberação do produto entre as suas diversas áreas. Ao final do trabalho, concluiu-se que o referido método, além de facilitar e simplificar o processo de modelagem permite realizar análises mais aprofundadas do sistema real, em relação às que seriam conseguidas com a utilização das técnicas citadas, isoladamente.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria das Restrições, Pesquisa Operacional, Programação Linear Inteira, Simulação de Sistemas.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Decision making model integrating Theory of Constraints, Integer Linear Programming and Simulation: Metallurgy Factory Case Study.** 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

In order to face the issues of the current globalized world and in order to keep working, companies have been pushed to put in practice new working tools. The Theory of Constraints, the Integer Linear Programming and the Systems Simulation appear as potential tools to support problem identification and solution which are faced by companies nowadays. This work aims to develop a planning and management method of production integrating these three tools. The method was applied to the production line at Aços Villares S/A Rolling Mill Roll Unit aiming at improving the production flow and the accomplishment of product liberation deadline among its many areas. At the end of this work, it has been concluded that the referred method, besides facilitating and simplifying the modeling process, it allows to achieve deeper analyses of the real system in relation to those which would be reached with the isolated mentioned techniques

KEY WORDS: Theory of Constraints, Operational Research, Integer Linear Programming, Systems Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Ciclos da TOC.....	34
FIGURA 2 - Princípio da simulação-otimização	58
FIGURA 3 – Método proposto por Köchel, Kunze e Nieländer.....	63
FIGURA 4 - Método proposto por Granger, Krishnamurthy e Robinson	65
FIGURA 5 - Método proposto por Vashi, Bienstock e Mentzer.....	66
FIGURA 6 - Método proposto por Morito <i>et al.</i>	68
FIGURA 7 - Método proposto por Bush, Biles e DePuy.....	70
FIGURA 8 - Fluxo de informação do processo iterativo	71
FIGURA 9 - Fluxograma da primeira fase do método de otimização proposto por Pinho.....	74
FIGURA 10 - Fluxograma da segunda fase do método de otimização proposto por Pinho.....	75
FIGURA 11 - Método Proposto	87
FIGURA 12 - Desenvolvimento de um modelo de simulação.....	96
FIGURA 13 - Nível de detalhes a ser Incorporado ao Modelo.....	98
FIGURA 14 - Interação entre a realidade, o modelo de simulação e o usuário.....	101
FIGURA 15 - Interações entre os componentes de um modelo de simulação.....	102
FIGURA 16 - A verificação e validação em um projeto de simulação.....	108
FIGURA 17 - Processo de fabricação de cilindros de encosto	116
FIGURA 18 - Macro fluxo de processo	117
FIGURA 19 - Fluxo de Processo da Forjaria	118
FIGURA 20 - Modelo conceitual das fases fundamentais do processo.....	126
FIGURA 21 - Modelo conceitual completo	127
FIGURA 22 - Quantidade de cargas obtidas pelo modelo de otimização e manualmente .	137

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Tamanho do modelo de otimização	124
TABELA 2 - Dados de entrada do Modelo de Simulação	129
TABELA 3 - Determinação do período de aquecimento	131
TABELA 4 - Histórico da quantidade de cilindros produzidos nos últimos oito meses	132
TABELA 5 - Validação do modelo computacional	134
TABELA 6 - Tempo de execução do modelo de otimização.....	138
TABELA 7 - Solução resultante do modelo de otimização	138
TABELA 8 - Data de envio dos cilindros	139
TABELA 9 – Acerto na data de remessa dos cilindros.....	139
TABELA 10 – Acerto antes e após a implementação do método.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACD	–	<i>Activity Cycle Diagram</i> (Diagrama Ciclo Atividade)
DBR	–	<i>Drum-Buffer-Rope</i> (Tambor-Pulmão-Corda)
ERP	–	<i>Enterprise Resource Planning</i>
OPT	–	<i>Optimize Production Technology</i>
PI	–	Programação Inteira
PIM	–	Programação Inteira Mista
PIT	–	Programação Inteira Total
PL	–	Programação Linear
PLI	–	Programação Linear Inteira
PO	–	Pesquisa Operacional
PPI	–	Problema de Programação Inteira
RCC	–	Recurso Restritivo de Capacidade
TOC	–	<i>Theory of Constraints</i> (Teoria das Restrições)
UTE	–	Setor de Usinagem e Tratamento Térmico de Cilindros de Encosto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTO.....	15
1.2 NATUREZA DO PROBLEMA	17
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	18
1.4 PROPOSIÇÕES E QUESTÕES.....	19
1.5 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	20
1.6 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	21
1.7 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	23
1.8 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2 REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 A TEORIA DAS RESTRIÇÕES.....	25
2.1.1 Histórico da TOC	26
2.1.2 Princípios da TOC e o método tambor-pulmão-corda	29
2.2 A PESQUISA OPERACIONAL.....	39
2.2.1 A tomada de decisão	40
2.2.2 Fases do estudo de Pesquisa Operacional	41
2.2.3 Técnicas Matemáticas Utilizadas em Pesquisa Operacional	41
2.3 A PROGRAMAÇÃO LINEAR	43
2.3.1 Problemas de programação linear	44
2.3.2 A solução	46
2.3.3 A análise de sensibilidade	47
2.4 A PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA	48
2.5 A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS.....	52
2.5.1 Como simular?	56
2.5.2 Causas de insucesso no desenvolvimento de simulações	57
2.6 A SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO.....	58
2.6.1 Características da simulação-otimização	59
2.6.2 Vantagens da simulação-otimização	61
2.6.3 Desvantagens da simulação-otimização	62
2.6.4 Métodos e aplicações da simulação-otimização	63
2.6.4.1 Método proposto por Köchel, Kunze e Nieländer.....	63
2.6.4.2 Método proposto por Granger, Krishnamurthy e Robinson.....	64
2.6.4.3 Método proposto por Vashi, Bienstock e Mentzer e aplicado por Díaz e Pérez	65
2.6.4.4 Método proposto por Vamanan <i>et al.</i>	67
2.6.4.5 Método proposto por Morito <i>et al.</i>	68
2.6.4.6 Método proposto por Bush, Biles e DePuy	69
2.6.4.7 Método proposto por Ceciliano	71
2.6.4.8 Método desenvolvido pela empresa Minerações Brasileiras Reunidas S/A (ARENASFERA, 2006)	72
2.6.4.9 Método proposto por Barboza <i>et al.</i>	73
2.6.4.10 Método proposto por Pinho	74
2.6.4.11 Método proposto por Rodriguez e Fernandes	77

2.7 PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO (<i>SCHEDULING</i>) ...	78
2.7.1 <i>Job shop</i>	78
2.7.2 <i>Flow shop</i>	81
3 MODELO PROPOSTO	85
3.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	85
3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO.....	86
3.2.1 Mapeamento do processo.....	88
3.2.2 Identificação do gargalo.....	90
3.2.3 Elaboração dos modelos de otimização e simulação	90
3.2.3.1 Modelo de otimização	90
3.2.3.1.1 Definição do problema	91
3.2.3.1.2 Construção do modelo	91
3.2.3.1.3 Solução do modelo	93
3.2.3.1.4 Validação do modelo	94
3.2.3.1.5 Implementação da solução	95
3.2.3.2 Modelo de simulação.....	95
3.2.3.2.1 Definição do problema e estabelecimento de objetivos	96
3.2.3.2.2 Formulação e planejamento do modelo.....	97
3.2.3.2.3 Coleta e Tratamento de dados	98
3.2.3.2.4 Desenvolvimento do modelo	100
3.2.3.2.5 Verificação.....	105
3.2.3.2.6 Validação	106
3.2.3.2.7 Experimentação	109
3.2.3.2.8 Análise dos resultados e apresentação.....	112
3.2.3.2.9 Implementação	113
3.2.4 Execução dos modelos de otimização e de simulação.....	113
3.2.5 Determinação da solução final	114
4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	115
4.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO E APRESENTAÇÃO DO SISTEMA.....	115
4.2.1 Identificação do gargalo.....	118
4.2.2 Elaboração dos modelos de otimização e simulação	119
4.2.2.1 Modelo de otimização	122
4.2.2.2 Modelo de simulação.....	126
4.2.2.2.1 Elaboração do modelo conceitual.....	126
4.2.2.2.2 Elaboração do modelo computacional	128
4.2.2.2.3 Determinação do período de aquecimento	130
4.2.2.2.4 Determinação do número de replicações.....	132
4.2.2.2.5 Validação do modelo	133
4.2.3 Execução do modelo de otimização.....	134
4.2.4 Envio da solução corrente para o modelo de simulação	135
4.2.5 Execução do modelo de simulação	135
4.2.6 Determinação da solução final	136
4.2.7 Elevação da restrição do sistema.....	136
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	137
5.1 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO ...	137
5.2 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO MODELO DE SIMULAÇÃO	138

5.3 OUTROS RESULTADOS	142
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	144
6.1 COMENTÁRIOS SOBRE A APLICAÇÃO DO MÉTODO.....	144
6.2 REVISÃO DO CONJUNTO DE PROPOSIÇÕES E QUESTÕES INICIAIS DA PESQUISA	145
6.3 COMENTÁRIOS FINAIS	147
6.4 FUTURAS DIREÇÕES DE PESQUISA	148
REFERÊNCIAS	150
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	169
GLOSSÁRIO	172
ANEXO A – RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO	173
ANEXO B – COMPARAÇÃO ENTRE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICO TRADICIONAL DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA COM UM MODELO DE SIMULAÇÃO- OTIMIZAÇÃO	179

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

No mundo atual, devido ao acirramento da competição entre as empresas, resultante do sistema econômico globalizado, dos avanços tecnológicos e de uma maior exigência por parte dos consumidores, a sobrevivência das organizações vem se tornando mais difícil a cada dia.

Esse cenário acaba provocando intensas transformações nos sistemas produtivos das organizações, levando-as a reexaminar suas estratégias de gerenciamento de materiais, sistemas e métodos de produção.

Segundo Johnson¹ (2001 *apud* MARTINS, 2002, p.17), a capacidade de se adaptar às mudanças é uma condição indispensável para a sobrevivência de pessoas e organizações, e mais ainda para seu sucesso na economia globalizada dos dias atuais.

Até 1960 o mercado mundial era caracterizado pelo aumento quantitativo da produção, onde praticamente tudo o que era produzido podia ser vendido. Naquela época, embora o preço fosse um fator para se aumentar as vendas, a pressão que se exercia não era muito grande (BOLWIJN; KUMPE, 1990).

A partir de então, iniciou-se uma competição por preços fazendo com que muitas empresas fossem reestruturadas, e até mesmo mudassem de região ou país. O preço se tornou um fator importante para o sucesso, uma vez que os clientes podiam selecionar preços comparando produtos feitos em diversos países. Com isso, a gestão dos sistemas produtivos industriais passou a sofrer alterações profundas. Avanços na tecnologia de processamento de informações possibilitaram o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento das operações industriais, inicialmente com o objetivo de se gerenciar o fluxo de materiais e, posteriormente, com o objetivo de se gerenciar também os recursos humanos, máquinas, instalações, etc (BOLWIJN; KUMPE, 1990).

¹ JOHNSON, S. **Quem Mexeu no Meu Queijo?** 20ª ed. Rio de Janeiro: Record, 2001 *apud* MARTINS, F. A. **O processo de raciocínio da teoria das restrições na indústria moveleira de pequeno porte:** um estudo de caso. 2002. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

No final dos anos 60 a competição mudou novamente. Os consumidores passaram a se questionar sobre a qualidade, tempo gasto no conserto, etc. dos produtos adquiridos. Eles começaram a prestar mais atenção na qualidade dos produtos comprados, fazendo com que isto se tornasse um importante fator para o sucesso de uma empresa. Uma nova forma de se gerenciar as operações industriais estava surgindo. Sob a liderança de Taichi Ohno, uma empresa japonesa (*Toyota Motors Company*), buscava uma forma alternativa à produção em massa para gerenciar o sistema de produção. Os princípios da produção em massa não mais se ajustavam à difícil situação econômica e ao mercado incipiente de seu país naquele momento. Surgia então, a “Produção Enxuta”, com princípios diferentes dos da produção em massa, particularmente em relação à gestão dos materiais (matérias-primas, produtos em processo, componentes, conjuntos e produtos acabados) e ao trabalho humano nas fábricas (CLETO, 2002).

Uma nova mudança teve início no final dos anos 70, quando a capacidade das empresas passou, aparentemente, a exceder a demanda, e os consumidores começaram a exercer o poder de escolha. As organizações tiveram que se modernizar, reduzir o intervalo de tempo entre o lançamento de novos produtos para poderem conquistar um público mais exigente em várias partes do mundo.

Dos anos 90 em diante surge um novo fator relevante: a inovação - a habilidade de se renovar rapidamente, e não apenas a de se adaptar.

Nas empresas modernas, a flexibilização na produção torna-se uma necessidade. Esse tipo de organização deve evitar o trabalho improdutivo, assim como a ineficiência decorrente da má qualidade (BORNIA, 2002).

Diante dessa nova realidade, o objetivo da estratégia de operações passa a ser o de garantir que os processos de produção e entrega de valor ao cliente se alinhem com as metas estratégicas da empresa quanto aos resultados financeiros e quanto aos mercados a que pretende servir, adaptando-se ao ambiente no qual ela está inserida (CORRÊA; CORRÊA, 2006).

Oliveira, Duarte e Montevechi (2002) afirmam que a produção tem o desafio de desenvolver novas metodologias ou adotar sistemas de gestão que possibilitem a

sobrevivência da empresa no mercado. Tais sistemas exigem uma reestruturação organizacional que permita alcançar os objetivos propostos.

Dessa forma, operacionalizar a mudança torna-se uma necessidade. Drucker² (1995 apud CORBETT, 1997, p.20) chama isso de “gerência de mudança”. Segundo Senge (2000), a empresa precisa ser uma organização que aprende. Deming³ (1994 apud CORBETT, 1997, p.20) fala do “saber profundo” que se deve introduzir nas organizações para melhor administrá-las.

Enfim, todos esses autores defendem uma visão sistêmica da organização, devendo-se, para atingir os objetivos almejados, encará-la como um todo e não em partes.

Assim, para enfrentar esse ambiente de constantes mudanças e para se manter em atividade, as indústrias precisam de novos instrumentos de trabalho. A Teoria das Restrições (*Theory of Constraints – TOC*), a Programação Linear Inteira (PLI) e a Simulação de Sistemas são ferramentas que podem auxiliar na identificação e na solução dos problemas enfrentados pelas empresas nos dias de hoje.

1.2 NATUREZA DO PROBLEMA

Considerando o caso específico de uma produtora de cilindros de laminação instalada no Brasil, observou-se que os dois principais indicadores de competitividade da empresa são a qualidade do produto (características metalúrgicas) e o atendimento ao prazo acertado com o cliente. Destes, o atendimento ao prazo, em uma determinada linha de produto (cilindros de encosto) não se encontrava dentro dos níveis considerados satisfatórios. Tal fato colocava a empresa numa situação difícil, especialmente ao projetar-se sua participação num mercado cada vez mais competitivo. Tal situação agravava-se na medida em que mais de 80% de sua produção está voltada ao mercado externo, competindo com os principais produtores de cilindros do mundo.

² DRUCKER, P. F. **Administrando em tempos de grandes mudanças**. São Paulo: Pioneira, 1995. *apud* CORBETT, T. **Contabilidade de Ganhos**. São Paulo: Ed. Nobel, 1997.

³ DEMING, W. **The new Economics for industry, government, education**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Center for Advanced Educational Services, 1994 *apud* CORBETT, T. **Contabilidade de Ganhos**. São Paulo: Ed. Nobel, 1997.

Diante desta situação, tornava-se necessário entender os motivos pelos quais os prazos não estavam sendo atendidos para que se pudesse adotar um modelo de gestão mais eficiente que pudesse garantir, não somente o *market-share* atual, mas, também, o seu crescimento em todos os mercados.

Após a realização de uma análise do sistema de produção, constatou-se que as decisões de nível operacional da empresa eram tomadas apenas com base na experiência dos envolvidos com o planejamento da produção. Tal fato evidenciou a necessidade de elaboração de um procedimento estruturado e/ou de ferramentas que auxiliassem a programação da produção (alocação dos cilindros aos recursos produtivos, num dado período de tempo).

Como será visto com maiores detalhes nas seções 3 e 4, o sistema apresentado neste trabalho é constituído de três setores distintos: o setor de Lingotamento, a Forjaria, e o setor de Usinagem e Tratamento Térmico. Para melhorar o cumprimento do prazo de liberação dos cilindros, seria necessário melhorar o fluxo de produção do sistema, o que poderia ser conseguido através de sua subordinação à área/equipamento gargalo.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver um método de planejamento e gerenciamento da produção para uma indústria siderúrgica de forma a melhorar o fluxo de produção, o cumprimento do prazo de liberação do produto entre as áreas da empresa, e o atendimento ao prazo acertado com cliente.

A pesquisa foi norteada pelos seguintes objetivos específicos:

- a) Mapear o fluxo de produção de uma empresa do setor siderúrgico;
- b) Aplicar os conceitos da Teoria das Restrições para identificar os gargalos existentes na linha de produção da referida empresa;

- c) Desenvolver e validar um ou mais modelos de Programação Linear Inteira para otimizar o processo de fabricação de cilindros de encosto;
- d) Desenvolver e validar modelo (s) de Simulação para a linha de cilindros de encosto da empresa;
- e) Propor uma integração da TOC com os modelos de PLI e Simulação para realizar o planejamento e o gerenciamento da produção desses cilindros;
- f) Validar o modelo integrado;
- g) Apresentar um estudo de caso onde se aplicou o modelo integrado proposto.

1.4 PROPOSIÇÕES E QUESTÕES

Para um melhor direcionamento e delineamento da pesquisa foram adotadas algumas proposições a serem verificadas nesta pesquisa:

- P1: Existe ao menos uma forma de integrar TOC, PLI e Simulação;
- P2: É possível utilizar a Simulação como processo de simplificação da PLI;
- P3: A gestão do gargalo melhora o desempenho do processo produtivo, e, por consequência, melhora a assertividade do prazo.

Para que estas proposições pudessem ser verificadas, procurou-se responder às seguintes questões:

- Q1: Qual(is) é (são) o(s) gargalo(s) que dificulta(m) a relação operacional entre Manufatura e atendimento ao cliente?;

- Q2: Quais são os problemas existentes nesta linha no nível operacional e quais são suas respectivas causas?;
- Q3: Quais são as alternativas que poderiam minimizar os efeitos causados por esses problemas?

1.5 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Nas últimas décadas, a ênfase dada na satisfação do cliente tem sido um conceito fundamental nas estratégias de marketing e de negócios. Portanto, na construção de um programa de satisfação do cliente, a primeira questão que deve ser respondida é: “O que significa dizer que o cliente está satisfeito?” O método mais simples e de maior aceitação para se verificar a satisfação do cliente é conhecido por conformidade de expectativa. Isto quer dizer que, se as expectativas de um cliente em relação ao desempenho de um fornecedor são satisfeitas ou excedidas, o cliente estará satisfeito; entretanto, se o desempenho percebido for inferior ao esperado, haverá insatisfação.

Quando realizam uma transação de negócios com um fornecedor, os clientes possuem numerosas expectativas, muitas das quais referentes à disponibilidade, ao desempenho operacional e à confiabilidade de serviço.

Estudos realizados por Parasuraman, Zeithaml e Berry (1984) identificaram o seguinte conjunto de categorias de expectativas de clientes:

Confiabilidade - É um dos aspectos da plataforma de serviço básico de uma empresa, referindo-se ao desempenho de todas as atividades conforme prometido pelo fornecedor. Se o fornecedor atende ao prazo estabelecido, é confiável, se não cumprir, o desempenho é considerado como não-confiável;

Capacidade de resposta - A capacidade de resposta diz respeito às expectativas dos clientes em relação à capacidade e à disposição do pessoal do fornecedor em oferecer o serviço imediatamente. Isto vai além da mera entrega, incluindo questões relacionadas ao tempo de resposta aos questionamentos e resoluções de problemas apresentados pela clientela;

Acesso - O acesso envolve as expectativas dos clientes por contato fácil e possibilidade de aproximação com o fornecedor;

Comunicação - A comunicação significa manter os clientes pró - ativamente informados;

Credibilidade - A credibilidade se refere às expectativas dos clientes, quanto aos riscos ou dúvidas, ao fazer negócios com um fornecedor. Os clientes fazem planos baseados em suas expectativas quanto ao desempenho do fornecedor;

Cortesia - A cortesia envolve relações de polidez, amizade e respeito do pessoal de contato;

Conhecimento do cliente - Enquanto os fornecedores podem pensar em grupos de clientes segmentados de mercado, os clientes se vêem como únicos. Têm expectativas de que os fornecedores entendam sua singularidade e de que estejam aptos a se adaptarem às suas necessidades particulares.

À medida que os mercados se globalizam, surge a necessidade de aprimorar as técnicas, métodos e equipamentos das empresas, de modo a torná-las mais eficientes e eficazes.

Diante dessa situação, a manufatura passa a ser uma arma de competitividade das empresas, tendo um papel essencial na obtenção de novos mercados, uma vez que ela conecta as forças e os recursos da companhia às oportunidades do mercado (CORREA; GIANESI, 1996).

1.6 MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

De acordo com Cruz e Ribeiro (2004), Método em pesquisa científica pode ser definido como o conjunto de etapas e processos a serem realizados em uma seqüência pré-estabelecida para investigação de fatos.

Miguel (2007) afirma que a metodologia de pesquisa científica pode ter os seguintes macroobjetivos: familiarizar com um fenômeno ou conseguir uma nova compreensão sobre ele; apresentar informações sobre uma dada situação, grupo ou entidade; verificar a freqüência com que algo ocorre ou como se liga a outros

fenômenos; verificar uma hipótese de relação casual entre variáveis. Geralmente, as pesquisas apresentam características dos quatro tipos anteriores.

A elaboração de um projeto de pesquisa e o desenvolvimento da própria pesquisa seja ela uma dissertação ou tese, necessitam, para que seus resultados sejam satisfatórios, estar baseados num planejamento cuidadoso, em reflexões conceituais sólidas e alicerçados em conhecimentos já existentes.

Para Gil (1999), a pesquisa tem um caráter pragmático, sendo um processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico, que tem por objetivo fundamental descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos.

De acordo com Gil (1996), do ponto de vista da sua natureza este trabalho pode ser classificado como uma Pesquisa Aplicada, a qual objetiva gerar conhecimentos para aplicações práticas dirigidos à solução de problemas específicos envolvendo verdades e interesses locais.

Quanto à abordagem do problema, este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa qualitativa. Lüdke e André (1986) explicam que a pesquisa qualitativa busca uma compreensão particular daquilo que estuda, não se preocupando com generalizações, princípios e leis. O foco da sua atenção está no específico, no peculiar, visando mais à compreensão do que à explicação dos fenômenos estudados.

Para Miles e Huberman (1994) a utilização da pesquisa qualitativa, além de oferecer descrições ricas sobre uma realidade específica, ajuda o pesquisador a superar concepções iniciais e a gerar ou revisar as estruturas teóricas adotadas anteriormente, oferecendo base para descrições e explicações muito ricas de contextos específicos.

Foi utilizada uma abordagem qualitativa que se justifica na medida em que se quer construir um modelo de planejamento e, portanto, é necessário um profundo conhecimento das relações e dos elementos envolvidos. Outro aspecto que reforça a utilização de uma abordagem qualitativa é o fato de se trabalhar aspectos relacionados com valores, crenças e representações.

Do ponto de vista de seus objetivos, de acordo com Santos (1999), este trabalho teve um caráter exploratório, uma vez que teve por meta aproximar o pesquisador do fato ou fenômeno, familiarizando-o em relação a este. Normalmente este tipo de

pesquisa é realizado através de levantamento bibliográfico, entrevistas com profissionais que atuam na área, *sites* e outros recursos que possibilitem informar ao pesquisador a real importância do tema ou problema em estudo.

Do ponto de vista dos métodos, o trabalho foi realizado através da pesquisa-ação, utilizando modelagem e simulação.

A pesquisa-ação é um tipo de pesquisa com base empírica que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo, na qual os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo (THIOLLENT, 1997; MELLO; TURRIONI, 2007). As dez características principais da pesquisa-ação são: o pesquisador toma ação (não é mero observador); envolve dois objetivos: solucionar um problema e contribuir para a ciência; é interativa (cooperação e interatividade entre os envolvidos); objetiva desenvolver um entendimento holístico; é fundamentalmente relacionada à mudança; requer um entendimento da estrutura ética (valores e normas); pode incluir todos os tipos de métodos de coleta de dados (técnicas quantitativas e qualitativas); requer um vasto pré-entendimento (do ambiente organizacional, condições, estrutura e dinâmica das operações); deve ser conduzida em tempo real (um estudo de caso “vivo”); requer critérios próprios de qualidade para sua avaliação (COGHLAN; COUGHLAN, 2003).

O método de Modelagem e Simulação compreende o uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo; e é empregado quando se deseja experimentar, através de um modelo, um sistema real, de forma a determinar como este sistema responderá a modificações que lhe são propostas (BERTO; NAKANO, 2000; MELLO; TURRIONI, 2007).

1.7 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente trabalho limitou-se à proposição de um método e à verificação prática através de sua implantação numa dada indústria de produção não seriada. O ambiente industrial onde o método foi implantado possui características peculiares ao seu

segmento específico: o de fabricação de cilindros de laminação destinada às indústrias siderúrgicas. Por este motivo, os resultados obtidos devem ter sua análise restrita ao ambiente industrial estudado.

Considerados os aspectos da contribuição, da singularidade do ambiente industrial explorado neste trabalho, do leque de possibilidades que se apresentam no tocante às indústrias não seriadas nos mais variados segmentos da manufatura, entende-se que a metodologia apresentada neste trabalho deve estar contida no campo de uma proposta a ser mais amplamente aferida através da ampliação do universo de aplicação.

1.8 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho.

O Capítulo 2 contempla a revisão da literatura, onde são apresentadas a Teoria das Restrições (TOC), e algumas ferramentas da Pesquisa Operacional (PO), tais como: a Programação Linear, a Programação Linear inteira (PLI) e a Simulação de Sistemas. Este capítulo aborda também conceitos e aplicações referentes à Simulação-Otimização; sendo finalizado com a apresentação dos problemas de programação da produção.

O Capítulo 3 aborda a metodologia utilizada neste trabalho, integrando TOC, PLI e Simulação.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação do método na linha de produção de cilindros de encosto da empresa Aços Villares S.A.

Finalmente, nos Capítulos 5 e 6, são apresentados os resultados, as conclusões do trabalho, e sugestões para futuras pesquisas, seguidos da bibliografia consultada.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A TEORIA DAS RESTRIÇÕES

A Teoria das Restrições (do inglês *Theory of Constraints* ou simplesmente TOC) é uma metodologia científica, composta por três diferentes áreas inter-relacionadas (logística, indicadores de desempenho e pensamento lógico), caracterizada como um novo procedimento para gerenciar fatores, processos de fabricação, decisões organizacionais e situações nas quais existam restrições, que permite focar as soluções aos problemas críticos de uma empresa, de maneira a assegurar seu processo de melhoria contínua (COX III; SPENCER, 2002; POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008). A TOC visa otimizar continuamente a produção por meio da identificação das restrições (gargalos) do sistema, com o objetivo de tentar minimizá-las ou eliminá-las; e, em seguida, com base nos preços vigentes no mercado, identificar os melhores produtos em termos de ganho (*throughput*) pelo fator limitativo da produção (SANTOS *et al.*, 2006).

A TOC se apresenta como uma teoria que busca apresentar soluções para os problemas enfrentados pelos sistemas tradicionais de gestão da produção quando confrontados com situações de grande diversidade de produtos e de fortes incertezas quanto à demanda real, características marcantes de grande parte dos mercados atuais (AGUIAR *et al.*, 2004).

O principal diferencial da Teoria das Restrições em relação às demais teorias existentes está no fato de que as ações de gestão devem ser concentradas no gerenciamento do recurso de menor capacidade, isto é, na restrição do sistema. A atuação sobre os demais recursos do sistema somente deve ocorrer quando necessário ao bom desempenho da restrição (AGUIAR *et al.*, 2004).

A TOC propõe, assim, uma seqüência coerente de passos que deveriam ser seguidos por qualquer organização que pretenda adentrar num processo focalizado de aprimoramento contínuo. Tal processo, descrito por Goldratt⁴ (1994 *apud* COGAN,

⁴ GOLDRATT, E. M. **Mais que Sorte...um processo de raciocínio**. São Paulo: Educator, 1994 *apud* COGAN, S. **Teoria das Restrições**. In: Seminários da Controladoria Geral, 2005, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www7.rio.rj.gov.br/cgm/comunicacao/publicacoes/cadernos/?2005/02/1>> Acesso em 21jul. 2007.

2005), foi desenvolvido com o intuito de capacitar as empresas a reconhecerem sistematicamente os principais elementos do sistema que devem ser aprimorados (as restrições) a fim de se melhorar o desempenho da organização como um todo.

Csillag (1995) afirma que “a Teoria das Restrições (TOC) nasceu como uma abordagem sistêmica cujo ponto de partida é o fato de que todo sistema possui um objetivo”. Para os defensores da TOC, esta é uma abordagem que pode ser aplicada para solucionar de forma virtual qualquer problema em qualquer parte da empresa.

Para Corbett (1997, p.39) “a TOC é baseada no princípio de que existe uma causa comum para muitos efeitos, de que os fenômenos que vemos são consequência de causas mais profundas. Esse princípio nos leva a uma visão sistêmica da empresa”.

2.1.1 Histórico da TOC

As organizações produtivas iniciaram a década de 70 enfrentando muitas dificuldades na tomada de decisão gerencial (ALVES; SANTOS, 2008).

Inconformado com as deficiências gerenciais na tomada de decisão, motivadas pelos paradigmas existentes até a citada década, o físico israelense Eliyahu M. Goldratt desenvolveu, mesmo sem conhecimentos de administração, um novo sistema de gestão, denominado “Teoria das Restrições” (TOC – *Theory of Constraints*), quando se envolveu com problemas de logística de produção em uma fábrica de gaiolas, em Israel. Goldratt utilizou os métodos de solução de problemas que aprendeu na Física para tentar resolver os problemas de uma linha de produção (CORBETT, 1997; ALVES; SANTOS, 2008; GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Goldratt era um dos proprietários de uma empresa de informática nos Estados Unidos e desenvolveu um *software* chamado OPT (*Optimize Production Technology*), que procurava otimizar a produção e já incluía as idéias da Teoria das Restrições. Assim, a Teoria das Restrições foi, inicialmente, fundamentada em programas de computação com o objetivo de desenvolver e implementar um sistema de programação de produção com capacidade finita, para resolver problemas de chão de fábrica.

Entretanto, ficou constatado na prática que o simples uso de um *software* não garantia à empresa um processo auto-sustentado de melhoria contínua. Para tal, era necessário, antes de tudo, que fossem quebrados certos paradigmas que regem as organizações, mudando a forma de agir e pensar das pessoas. Tornou-se evidente, portanto que era realmente preciso desenvolver um método em que se permitisse criar, comunicar e implementar uma boa solução para a produção.

A primeira experiência bem sucedida de abordar o que foi depois chamado de “O Processo de Raciocínio da Teoria das Restrições” se deu através da publicação, na primeira metade da década de 80 de “A Meta”, um livro técnico escrito na forma de romance por Goldratt, juntamente com Jeff Cox. Esta obra demonstra a dificuldade de um gerente de fábrica em administrar sua empresa. No desenrolar da história, descrevendo sua experiência, Goldratt (GOLDRATT; COX, 1994) - personificado pelo personagem Jonah - auxilia o gerente a conseguir recuperar a competitividade de sua empresa. No livro, o autor critica os métodos de administração tradicionais, incluindo a contabilidade de custos.

“A Meta”, além de ter sido a base na qual foi sedimentada a Teoria das Restrições, foi também muito útil em aplicações industriais por meio da implementação dos conceitos de programação da produção delineados na obra, tornando-se um sucesso em vendas e sendo incluído no currículo de diversas escolas de administração e engenharia (ALVES; SANTOS, 2008). A partir desta publicação a abordagem se expandiu para outras áreas da empresa, inclusive pela adição de novos instrumentais à Contabilidade Gerencial (MARTINS, 2002).

Um outro livro de Goldratt, lançado em 1989, é “A síndrome do Palheiro”. Este livro marca uma outra fase da Teoria das Restrições. Nele, Goldratt diz que a determinação de custos é o inimigo número um da produtividade das empresas. Ele e todos os defensores da Teoria das Restrições combatem aqueles que acreditam que o custo pode ser calculado. Alegam que há dificuldades no rateio, que há o problema dos custos indiretos, etc. Goldratt parte do princípio de que o custo é difícil de ser calculado, se não for impossível, e que a empresa não precisa calcular o custo. Para ele, o custo é determinado pelo mercado, embora na sua teoria defenda a redução dos desperdícios. Estudando o assunto, é possível notar que um dos efeitos da

determinação dos custos, no caso das empresas com fins lucrativos, é definir os produtos mais lucrativos e os menos lucrativos (COGAN, 2005).

A administração da empresa procura focar os produtos mais lucrativos para aumentar os ganhos. Goldratt defende que os gerentes estão habituados a pensar no mundo dos custos, quando deveriam pensar no mundo dos ganhos. Por isso propõe tomar a decisão de maximizar os resultados da empresa, sem necessidade de calcular os custos; faz uma proposta por meio dos ganhos da empresa. Ganho, para ele, corresponde à receita menos os custos variáveis, o que é conhecido na contabilidade tradicional como margem de contribuição; mas nele é feita uma abordagem muito peculiar porque considera que o único custo variável é o material direto (COGAN, 2005; CORBETT, 2003).

O ganho identificado por Goldratt seria o preço de venda menos o material direto. No livro “A síndrome do Palheiro”, o pesquisador propõe uma tomada de decisão para que a empresa otimize os resultados, sem precisar levar em conta os custos, somente os ganhos (receita menos material direto). Embora não considere a contabilidade de custos algo importante, a comunidade dessa área passou a chamar essa tomada de decisão de contabilidade de ganhos ou contabilidade de custos da Teoria das Restrições (COGAN, 2005, CORBETT, 2003).

Um outro ramo da Teoria das Restrições surgiu em meados dos anos 90, com o livro “Mais que sorte... um processo de raciocínio”. A história desta obra foi elaborada em torno dos problemas mais estratégicos das empresas (CORBETT, 1997). Nesse volume, o mesmo Goldratt apresenta o que identifica como “Processo de Raciocínio”: uma sistemática de determinação da causa dos problemas. Ele diz que há uma restrição embutida numa empresa que a impede de obter melhores resultados, além de causar-lhe problemas indesejáveis. Esse processo de raciocínio é um conjunto de cinco ferramentas (Árvore da Realidade Atual, Diagrama de Dispersão de Nuvem, Árvore da Realidade Futura, Árvore de Pré-Requisitos, Árvore de Transição) que usa a técnica de causa e efeito; procura determinar a causa dos problemas; busca soluções para essa causa; e implanta uma nova solução (MARTINS, 2002; CORBETT, 2003; COGAN, 2005).

Com isso, pode-se dizer que a Teoria das Restrições está dividida hoje em três grandes grupos de atuação (NUMA, 2007):

Primeiro, o Método Tambor-Pulmão-Corda, primeira aplicação da Teoria das Restrições, utilizado em logística de produção e na resolução de problemas de gargalos, programação da produção e redução de estoques (POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008).

O segundo é a Contabilidade de Ganhos, isto é, é o uso das definições ganho, estoque e despesa operacional como norteadores para as tomadas de decisões sem levar em conta os custos. Este método aborda de forma simples o caminho para se obter uma boa contabilidade gerencial, quebrando os paradigmas existentes na formação de preço de produtos e análise de sua rentabilidade (ALVES; SANTOS, 2008).

E o terceiro, utilizado para identificar os fatores limitantes de uma organização, desenvolver soluções para seus problemas, e alcançar suas metas, é o Processo de Raciocínio, com suas cinco ferramentas fundamentais: árvore da realidade atual, diagrama de dispersão de nuvem, árvore da realidade futura, árvore de pré-requisitos e árvore de transição (MARTINS, 2002; POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008).

Dessa maneira, a Teoria das Restrições rompe as barreiras do sistema produtivo e generaliza, para a empresa como um todo, o pensamento da otimização, contemplando, assim, o conjunto de restrições globais (financeiras, mercadológicas, produtivas etc.) a que a empresa está submetida (GUERREIRO, 1996).

Segundo Goldratt (1998, p.90), “a TOC é, na verdade, uma nova filosofia gerencial que pode ser justificada apenas por uma grande mudança na base”.

2.1.2 Princípios da TOC e o método tambor-pulmão-corda

A Teoria das Restrições é fundamentalmente um processo de melhoramento contínuo (ALVES; SANTOS, 2008) e está relacionada à restrição ou ao gargalo de um sistema. Todo sistema tangível, como um empreendimento com fins lucrativos, deve ter pelo menos uma restrição. Tal idéia, segundo Corbett (1997, p.40) “é explicada

pelo fato de que se não houvesse algo que limitasse o desempenho do sistema, este seria infinito”. “Se uma empresa não possuísse uma restrição, seu lucro seria infinito”. Conforme Noreen, Smith e Mackey, (1996, p.XXVII) “em vista da restrição ser um fator que impede o sistema de conseguir mais do que almeja, o gerente interessado em obter mais lucros deve então gerenciar melhor as restrições”.

Restrição (*Constraint*) é qualquer coisa que limita um melhor desempenho do sistema em direção à sua meta, ou seja, é o fator que restringe a atuação do sistema como um todo, podendo ser uma limitação interna na capacidade de produção, ou externa, como uma falta de pedidos de clientes, por exemplo. Fazendo uma analogia com uma corrente, a restrição de um sistema corresponde ao elo mais fraco da mesma. É possível afirmar, devido às flutuações estatísticas presentes, que todos os sistemas possuem pelo menos uma restrição ou que todas as correntes possuem sempre um elo mais fraco (MARTINS, 2002; NUMA, 2007; HOLMEN, 1995).

Basicamente, existem dois tipos de restrições: a primeira é uma restrição física, ou seja, restrição de recursos que engloba mercado, fornecedor, máquinas (baixa capacidade produtiva, por exemplo), materiais, pedidos, projetos e pessoas (despreparo, baixo número de empregados, etc) – sendo um gargalo um caso particular de restrição que possui capacidade insuficiente, isto é, um recurso gargalo é aquele cuja capacidade é inferior à demanda colocada nele. Ao contrário, um recurso não-gargalo é aquele cuja capacidade é maior que a demanda colocada nele, não restringindo, portanto, a atuação do sistema. Há ainda o recurso com capacidade restrita, que é um recurso que não é gargalo até o presente momento, mas que poderá se tornar um gargalo se não for gerenciado convenientemente. Qualquer tentativa de melhoria em pontos que não sejam as restrições (ou gargalos), geralmente não trará benefícios para o sistema como um todo (MARTINS, 2002; COGAN, 2005; NUMA, 2007; COGAN; CORREIA; BUENO, 2008). Entretanto, a preocupação com o gerenciamento dos recursos com capacidade restrita deve ser tão importante quanto a preocupação com o gargalo (AGUIAR *et al.*, 2004).

A segunda restrição é a restrição política, a qual é formada por normas, procedimentos, políticas e práticas usuais do passado, e que restringe a empresa de aumentar seus lucros. As políticas são, no geral, respostas a uma problemática ocorrida

há muito tempo e são quase sempre aceitas e seguidas sem pensar. As restrições resultantes de políticas podem ser de difícil identificação e, se identificadas, não são fáceis de serem solucionadas. Além disso, vale observar, como bem salienta Goldratt, que as restrições físicas podem ser consideradas, na maioria das vezes, como reflexos das restrições comportamentais ou de procedimentos da organização (NUMA, 2007; MARTINS, 2002).

Segundo Goldratt⁵ (1992 *apud* COGAN, 2005), o que determina a resistência de uma corrente (um processo fabril, por exemplo), é o seu elo mais fraco. Somente existe um elo fraco numa corrente. Este elo mais fraco é o que impede um melhor desempenho de toda a corrente (de todo o processo). Essa restrição (ou gargalo) é a que deve ser trabalhada imediatamente. Eliminada a primeira restrição, outras restrições (ou elos da corrente), irão aparecer, e assim sucessivamente, promovendo um contínuo aperfeiçoamento e fortalecimento do processo produtivo e empresarial.

Goldratt⁵ (1992 *apud* COGAN, 2005), com o intuito de capacitar as empresas a reconhecerem sistematicamente os principais elementos do sistema que devem ser aprimorados, a fim de conduzir os esforços em direção à meta de qualquer sistema, e com a finalidade de melhorar o desempenho da organização como um todo, recomenda que as restrições físicas sejam gerenciadas por meio de um procedimento, simples e intuitivo, constituído por cinco passos, denominado de Processo Decisório da Teoria das Restrições, que são:

1. Identificar a(s) Restrição(ões) do sistema, uma vez que o resultado global da empresa depende da utilização do recurso restrição.

O processo decisório tem início com a identificação da restrição do sistema para que seja possível determinar o fator que limita seu desempenho. Conhecidos os elementos de restrição do sistema é preciso explorar ao máximo os recursos disponíveis para, só então, dar seqüência ao processo (GOLDRATT, 1998; MARTINS, 2002).

⁵ GOLDRATT, E. M. **A Síndrome do Palheiro**: Garimpando Informações num Oceano de Dados. São Paulo: Editora Educator, 1992 *apud* COGAN, S. Teoria das Restrições. In: Seminários da Controladoria Geral, 2005, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www7.rio.rj.gov.br/cgm/comunicacao/publicacoes/cadernos/?2005/02/1>> Acesso em 21jul. 2007.

O gargalo de um sistema pode ser encontrado através da análise da entrada e da saída de cada um dos setores produtivos. Se a quantidade de trabalho que chega a um setor (ou equipamento) é superior à capacidade diária daquele setor, este setor ou equipamento será o gargalo do sistema (COGAN, 2005).

Caso o mercado seja a restrição, a empresa deve analisar as possíveis causas para a falta de demanda. Por exemplo, a entrega de produtos não conformes gera insatisfações e perdas de pedidos potenciais; a oferta de pouca variedade de produtos pode limitar as vendas totais nos casos em que os clientes concentrem suas compras em fornecedores capazes de fornecer um portfólio mais completo de produtos (AGUIAR *et al.*, 2004).

A identificação das restrições é uma oportunidade para a melhoria contínua, pois permite que o enfoque seja dado ao fator limitante, e que os esforços sejam empreendidos no sentido de explorá-lo (HENRIQUES; GONÇALVES, 2008). Ao identificar as restrições do sistema, é necessário priorizá-las de acordo com seu impacto no objetivo a ser alcançado (BOSCHETTO *et al.*, 2007). Vale ressaltar, entretanto, que a identificação da restrição deve ser baseada em estudos efetivos, e não em premissas pré-concebidas de capacidades produtivas, uma vez que a capacidade real de um dado recurso pode ser muito distinta da sua capacidade nominal (AGUIAR *et al.*, 2004).

2. Decidir como explorar a(s) restrição(ões) do sistema;

Se a restrição for física, o objetivo é fazê-la tão eficaz quanto possível, uma vez que cada minuto perdido em um equipamento gargalo é um minuto de perda para o sistema como um todo. O termo explorar a restrição é, na analogia com a corrente, “reforçar o elo mais fraco”. Há duas maneiras distintas de reforçar o elo mais fraco da corrente (o gargalo). A primeira maneira consiste em adicionar capacidade, aumentando os recursos humanos ou adquirindo mais recursos de capital. A segunda maneira de explorar a restrição é melhorar o aproveitamento da capacidade do recurso.

As duas medidas tem como objetivo maximizar a utilização das restrições do sistema e, com isso, o resultado global da empresa (NUMA, 2007; MARTINS, 2002).

Já a restrição política deve ser eliminada e substituída por uma outra que viabilize o processo (BOSCHETTO *et al.*, 2007).

3. Subordinar qualquer outra coisa à decisão anterior;

Após a definição de como as restrições serão exploradas, os recursos não limitadores (não-restrição) deverão ser subordinados às restrições do sistema, ou seja, as necessidades das restrições é que determinarão o programa de produção das não-restrições. Estas, por sua vez, deverão fornecer tudo aquilo que as restrições precisarem na medida exata, evitando a perda de recursos (COGAN, 2005).

É necessário subordinar todas as ações à decisão anterior, pois é o elo mais fraco da corrente que determina a sua resistência. Ou seja, não adianta melhorar as condições de outros elos se não se tratar da restrição. Os recursos que não são restrição devem ter seu nível de utilização subordinado ao nível de utilização do recurso restrição, de maneira a não comprometer a máxima utilização deste recurso, e a obter o lucro máximo (NUMA, 2007; MARTINS, 2002).

4. Elevar a(s) Restrição(ões) do Sistema;

Elevar a restrição é o mesmo que reforçar o elo mais fraco da corrente. Ou seja, deve-se buscar alternativas para aumentar a capacidade do recurso restritivo, ainda que isso signifique comprar mais máquinas ou contratar mais pessoas, uma vez que a elevação da restrição corresponde à melhoria do sistema. Entretanto, vale observar que Goldratt costuma dizer que, algumas vezes, o problema para elevar a restrição do gargalo não se restringe à compra de outro equipamento. Às vezes existem problemas internos de políticas e procedimentos da empresa que a impedem de alcançar melhores resultados (MARTINS, 2002; COGAN, 2005; BOSCHETTO *et al.*, 2007). Goldratt (1992, p.56) assinala que “... em muitas empresas que analisei, não encontrei restrições físicas. Encontrei restrições políticas. Nunca vi uma empresa com restrição de mercado. Vi muitas comercializando restrições políticas”.

Em geral, ao se elevar à capacidade do recurso, aparecerão outras restrições, uma vez que sem restrições o lucro é infinito.

5. Se, nos passos anteriores, uma restrição for quebrada, voltar ao Passo 1.

Ao reforçar o elo mais fraco, a corrente se torna mais forte. Se, ao repetir o processo, nada acontecer, ou seja, se não houver um fortalecimento da corrente, é sinal que o elo reforçado deixou de ser o mais fraco. Isto significa que a restrição foi quebrada. Portanto, é necessário reiniciar todo o processo, voltando ao passo um, ou seja, identificando qual o recurso que passou a restringir o sistema (MARTINS, 2002).

Além disso, segundo Goldratt⁵ (1992 *apud* COGAN, 2005), quando se tem política como restrição, o quinto passo deve ser expandido para:

5. Se nos passos anteriores uma restrição for quebrada, volte ao Passo 1, mas não deixe que a inércia se torne uma restrição do sistema.

Dessa forma, pode-se afirmar que a TOC é composta por ciclos, conforme apresentado na Figura 1 (AGUIAR *et al.*, 2004), uma vez que, ao se elevar à capacidade de um recurso gargalo, aparecerão outras restrições.

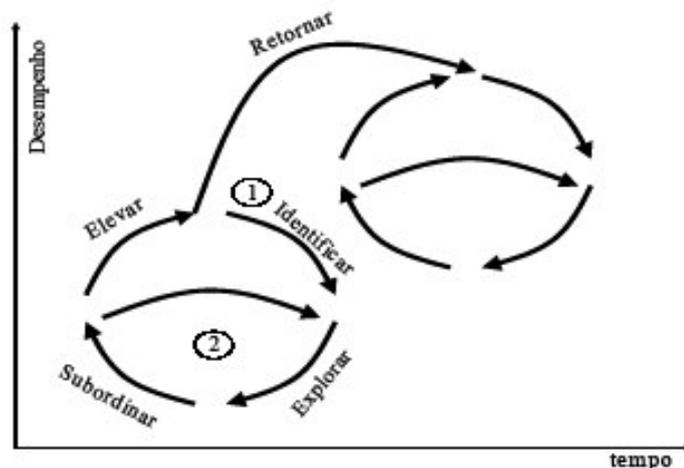


Figura 1 – Ciclos da TOC (Fonte: AGUIAR *et al.*, 2004)

O primeiro ciclo representa o ciclo de intervenção e melhoria, englobando todos os cinco passos do Processo Decisório, devendo ser realizado de forma completa e em intervalos de tempo maiores, pois envolve alterações cognitivas (como a identificação de uma nova restrição) e investimentos (relacionados com a elevação da capacidade).

⁵ GOLDRATT, E. M. **A Síndrome do Palheiro**: Garimpando Informações num Oceano de Dados. São Paulo: Editora Educator, 1992 *apud* COGAN, S. **Teoria das Restrições**. In: Seminários da Controladoria Geral, 2005, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www7.rio.rj.gov.br/cgm/comunicacao/publicacoes/cadernos/?2005/02/1>> Acesso em 21jul. 2007.

Os ciclos seguintes devem passar a ocorrer diariamente ao longo do sistema de programação e controle de produção, ou seja, devem ser realizados em intervalos de tempo determinados para verificar o desempenho do processo em relação às restrições (AGUIAR *et al.*, 2004; GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Uma das formas de se realizar os Passos 2 e 3 do Processo Decisório da Teoria das Restrições é através de uma abordagem em nível operacional, empregando o método DBR.

DBR - *Drum-Buffer-Rope* (Tambor-Pulmão-Corda em português) - é uma técnica genérica utilizada com a finalidade de gerenciar os recursos do processo produtivo para que se possa maximizar o ganho (COX III; SPENCER, 2002). Esta técnica é baseada nos cinco passos descritos anteriormente, e permite sincronizar a produção através do balanceamento do fluxo produtivo, e não da capacidade individual de cada recurso (AGUIAR *et al.*, 2004; COGAN; CORREIA; BUENO, 2008). A técnica possui esse nome dado por causa dos mecanismos usados para programar a produção de forma a melhorar a utilização dos recursos gargalos, a seguir descritos:

1. Tambor (*Drum*) - é a programação de atividades do recurso crítico, ou seja, a lista de tarefas que deverá ser executada no recurso gargalo de acordo com o total de demanda de trabalho a ser nele processado, com o intuito de atingir o maior fluxo possível no processo (AGUIAR *et al.*, 2004); e é assim chamado, pois é ele quem determina o ritmo de toda a produção. Assim, não é possível produzir em um ritmo superior ao do gargalo. Como o gargalo limita a produção, é importante que ele não pare de produzir. Para evitar que o recurso pare por falta do que produzir é necessário que haja um estoque imediatamente antes do gargalo (COGAN, 2005; SEED, 2007; GUIMARÃES *et al.*, 2008);

2. Pulmão (*Buffer*) - é o estoque que antecede a operação dos gargalos e que os protege de incertezas e flutuações do fluxo de produção. Seu tamanho deve ser gerenciado, de maneira a não ser pequeno ou excessivo. Se for pequeno, é provável que o recurso pare em algum momento. Se for elevado, uma boa parte desse estoque não será necessária para evitar uma parada. Será somente um estoque excessivo que contribuirá

apenas para aumentar o estoque em processo (*work in process* - WIP) (COGAN, 2005; SEED, 2007; FIGUEIREDO, 2008).

Segundo Souza *et al.* (2004), existem três tipos de pulmão que podem ser utilizados: Pulmão de Restrição, que procura proteger a restrição de eventuais problemas no processo anterior a ela; Pulmão de Mercado/Expedição, que visa proteger o desempenho na entrega dos produtos evitando atrasos aos clientes; Pulmão de Montagem, que procura garantir que as peças que não passam pelos recursos restritivos cheguem de forma sincronizada aos setores onde ocorrerá o processo de montagem final dos produtos;

3. Corda (*Rope*) - é a sincronização ou ligação dos recursos para repor as quantidades do fluxo; é o mecanismo que permite a liberação do material para o interior do sistema no ritmo do gargalo. Ele “amarra” a liberação à cadência do gargalo, evitando, assim, excesso de estoque nos processos anteriores ao mesmo (SANTOS, 2006; SEED, 2007; FIGUEIREDO, 2008).

Em resumo, para a TOC, os recursos não restritivos devem estar sincronizados aos demais recursos restritivos (COGAN; CORREIA; BUENO, 2008). Assim, a idéia da técnica tambor-pulmão-corda, é que o Tambor deve ditar o ritmo da produção; a Corda deve controlar a produção, subordinando a liberação de matéria-prima ao Tambor; e o Pulmão deve evitar que o recurso gargalo pare por falta do que produzir, o que poderia interferir no ganho da empresa (COGAN, 2005).

A Teoria das Restrições, por meio do método tambor-pulmão-corda, mostra que não se deve produzir além da quantidade permitida pelo gargalo (salvo a produção destinada a formar o pulmão), uma vez que os gargalos definem tanto o fluxo da produção, como também os seus estoques (FIGUEIREDO, 2008). O que esta teoria defende é que se nas etapas anteriores ao recurso gargalo a produção for superior à capacidade do mesmo, haverá um aumento no desperdício (COGAN, 2005).

Dentro da filosofia da TOC, um estoque é mantido deliberadamente apenas para impedir que os pontos de restrições ou gargalos impeçam o desenvolvimento contínuo

do fluxo de produção. Exceto nesses casos, a TOC mantém a filosofia *just-in-time* (JIT) de meta de estoque inexistente (MARTINS, 2002; COGAN, 2005).

Segundo Martins (2002), a fim de otimizar a produção, eliminar o excesso de estoques de material em processo e da mesma forma visando uma melhoria nos processos, objetivando a minimização do estoque de segurança contra problemas inesperados, a TOC estabelece nove princípios básicos a serem seguidos, os quais são apresentados a seguir (GOLDRATT e COX, 1994):

O primeiro princípio consiste em balancear o fluxo e não a capacidade do processo - a ênfase deve ser dada ao fluxo de materiais e não à capacidade instalada dos recursos. Deve ficar claro que, para uma organização aumentar seu desempenho, melhorar sua produtividade e, assim aumentar seu lucro, é necessário que, no nível de chão de fábrica, o fluxo produtivo seja dinâmico e ampliado, acelerando a transformação de matérias-prima em produtos acabados. (POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008; GUIMARÃES *et al.*, 2008). Dessa forma, é necessário identificar o recurso gargalo e, a seguir, orientar a produção em função da restrição do processo, pois ela é o fator que determina o desempenho de todo o sistema (FIGUEIREDO, 2008).

O segundo princípio diz que a utilização de um recurso não-gargalo não é determinada por seu próprio potencial, mas sim pela capacidade da restrição do sistema. Um recurso não-gargalo produzindo com toda a sua capacidade irá apenas gerar estoques intermediários e despesas (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

O terceiro princípio afirma que, a utilização de um recurso, e a sua ativação, não são a mesma coisa. A utilização do recurso não-gargalo corresponde ao seu uso em função da capacidade do recurso gargalo. Já a ativação de um recurso não-gargalo corresponde ao seu uso num volume superior ao requerido pelo recurso gargalo. Assim, um recurso deverá ficar inativo sempre que produzir a capacidade limitada pelos gargalos do processo (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Um quarto princípio diz que uma perda no gargalo é uma perda para todo o sistema. Dessa forma, o tempo de preparação dos instrumentos do recurso restritivo, ou a produção de unidades defeituosas, de produtos não demandados, será a diminuição do tempo total disponível para atender ao volume de vendas e ao ganho.

Por outro lado qualquer tempo ganho irá refletir num aumento da capacidade do fluxo produtivo (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

O quinto princípio defende a idéia de que não haverá nenhum benefício para o sistema com a redução do tempo de operação de um recurso que não é restrição. O “ganho de tempo” de um recurso não-gargalo aumentará apenas seus níveis de ociosidade.

O sexto princípio afirma que os gargalos governam o ganho, uma vez que o recurso restritivo determina o fluxo de um sistema. Da mesma forma, estes recursos determinam os níveis de estoques com a finalidade de tornar os gargalos independentes das flutuações estatísticas provocadas pelos recursos não-gargalos. Dessa forma, como já foi mencionado anteriormente, é necessário introduzir estoques de segurança antes dos recursos gargalos. A capacidade de um pulmão de gargalo, segundo Goldratt (1994, p.47), “é determinada por dois fatores: o consumo estimado e o seu período de reposição”.

Um sétimo princípio defende a idéia de que um lote de transferência não pode, e muitas vezes não deve, ser igual ao lote de processamento. O lote de processamento se refere à quantidade que deve ser produzida, entretanto, este lote pode ser dividido em lotes menores de transferência, com o fim de reduzir o tempo de passagem dos produtos através da fábrica, de atividade para atividade.

O oitavo princípio afirma que um lote de processo deve ser variável e não fixo. As operações não devem ter, necessariamente, o mesmo tamanho de lote, uma vez que as características das operações individuais, por serem diferentes, podem conduzir a cálculos de lotes diferentes. Portanto, seria difícil determinar o tamanho do lote a ser adotado de forma fixa.

E para finalizar, o nono princípio diz que os programas devem ser estabelecidos, considerando todas as restrições simultaneamente e não seqüencialmente. É preciso levar em consideração o conjunto de restrições existentes quando é realizada a programação da produção, ao responder às questões do tipo o que, quanto e quando produzir. A resultante da programação é o ciclo de produção (*lead times*).

Estes nove princípios podem ser sintetizados numa única regra: “a soma dos ótimos locais não é igual ao ótimo total”, isto é, altas eficiências locais podem levar a uma baixa eficiência do sistema como um todo, mostrando que, em relação ao fluxo de produção, as soluções devem ser pensadas de forma global e que soluções ótimas para cada recurso geralmente não levam ao ótimo global (GUIMARÃES *et al.*, 2008). A TOC considera toda empresa como um sistema, isto é, um conjunto de elementos entre os quais há alguma relação de interdependência. Corbett (1997; p 39) menciona que “cada elemento depende um do outro de alguma forma, e o desempenho global do sistema depende dos esforços conjuntos de todos os seus elementos”.

A TOC tem sido aplicada em várias empresas de vários segmentos em todo o mundo, desde empresas industriais até empresas prestadoras de serviços, com aplicações nas áreas de contabilidade, produção, suprimento, qualidade, administração e educação (FREITAS; HENRIQUES; MANSUR, 2003). Estas organizações, ao implementarem a logística de produção de Goldratt, melhoraram significativamente sua produção e seu desempenho (MARTINS, 2002).

Segundo Dettmer (2000) grandes organizações de manufatura como a Lucent Technologies, a General Motors, a Ford Motors e a Intel Corporation estão aplicando ou pretendem aplicar a TOC em seus negócios.

2.2 A PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais que objetiva fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomada de decisões. A PO visa também introduzir elementos de objetividade e racionalidade nesses processos, sem se descuidar, no entanto, dos elementos subjetivos e de enquadramento organizacional que caracterizam os problemas (LISBOA, 2002; INDG, 2007; ARAÚJO; BARROS JR; KAMPKE, 2007).

Tendo como foco a tomada de decisões, a PO aplica conceitos e métodos de outras áreas científicas para concepção, planejamento ou operação de sistemas para

atingir seus objetivos. De uma maneira geral, a PO se apóia em quatro ciências fundamentais: Economia, Matemática, Estatística e Informática; sendo constituída por um conjunto de disciplinas isoladas, tais como Programação Linear, Teoria das Filas, Simulação, Programação Dinâmica, etc (INDG, 2007; ARAÚJO; BARROS JR; KAMPKE, 2007).

Diante de seu caráter multidisciplinar, a Pesquisa Operacional é uma disciplina científica de características horizontais, com contribuições em praticamente todos os domínios da atividade humana, desde a Engenharia até a Medicina, passando pela Economia e pela Gestão Empresarial, permitindo simular e avaliar linhas de ação alternativas e encontrar as soluções que melhor servem aos objetivos dos indivíduos ou organizações (LISBOA, 2002; MORAES, 2005; FERREIRA, 2006).

2.2.1 A tomada de decisão

Problemas de tomada de decisão são freqüentes no dia-a-dia. Para solucioná-los, é preciso selecionar uma alternativa dentre várias outras possíveis de maneira a satisfazer um ou mais objetivos (FERREIRA, 2006).

O processo decisório envolve relações entre elementos de natureza objetiva (características das ações potenciais) e subjetiva (sistema de valores dos tomadores de decisão). Dessa forma, a tomada de decisão pode ser entendida como o processo de identificar um problema (quando o estado atual de uma situação é diferente do estado desejado) ou uma oportunidade (quando as circunstâncias oferecem a chance de o indivíduo/organização ultrapassar seus objetivos e/ou metas) e selecionar uma linha de ação para resolvê-lo (LACHTERMACHER, 2004; MADEIRA JR, 2007).

De uma maneira geral, o processo de tomada de decisão tem início com a identificação do cenário decisório e com a definição dos objetivos; seguido da identificação das alternativas e da modelagem do problema; tendo prosseguimento com a escolha da melhor alternativa; e finalizando com a avaliação e, implementação da alternativa escolhida (MADEIRA JR, 2007).

Vários fatores afetam a tomada de decisões, e, dentre eles, merecem destaque: o tempo disponível para a tomada de decisão, a importância da decisão, o conflito de interesses, o risco da decisão, etc (LACHTERMACHER, 2004).

2.2.2 Fases do estudo de Pesquisa Operacional

Em qualquer situação que exija uma decisão, o passo fundamental para compreender a natureza do problema é identificar todos os fatores envolvidos, e que forneçam os elementos necessários para a análise e conclusão (FERNANDES, 2008).

Para se chegar a uma decisão, o analista deve, inicialmente, tomar contato com o problema; a seguir, o analista deve procurar focalizá-lo bem em termos de escopo, importância, valor, conseqüências da ação ou da inação; criar alternativas para a solução; estabelecer um critério para seleção de uma alternativa; avaliar as alternativas e, finalmente, chegar a uma conclusão final (FERNANDES, 2008).

Dessa forma, o processo de resolução de um problema apresenta cinco etapas que podem ser repetidas, dependendo da situação: definição do problema; construção do modelo; solução do modelo; validação do modelo; e implementação da solução (LACHTERMACHER, 2004).

Apesar dessa seqüência não ser rígida, ela indica as principais etapas a serem vencidas. No Capítulo 3, será apresentado um resumo da cada uma dessas fases.

2.2.3 Técnicas Matemáticas Utilizadas em Pesquisa Operacional

A formulação de um modelo depende diretamente do sistema a ser representado. A função-objetivo e as funções que descrevem as restrições podem ser lineares (quando assumem a forma $a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$) ou não-lineares. As variáveis de decisão podem ser contínuas ou discretas (por exemplo, inteiras) e os parâmetros podem ser determinísticos ou probabilísticos (LISBOA, 2002; FERREIRA, 2006).

O resultado dessa grande variedade de representações de sistemas é o desenvolvimento de diversas técnicas de otimização, de modo a resolver cada tipo de modelo existente (LISBOA, 2002).

De acordo com Nakashima (2007), a Otimização é a área da Matemática Aplicada que se dedica a calcular valores ótimos para variáveis de decisão de acordo com algum critério de avaliação, satisfazendo as restrições de um modelo matemático. Dentre as diversas técnicas de otimização, merecem destaque:

- a) A Programação Linear (PL) - utilizada para analisar modelos onde as restrições e a função objetivo são lineares;
- b) A Programação Inteira (PI) - aplicada a modelos que possuem variáveis inteiras (ou discretas);
- c) A Programação Dinâmica - utilizada em modelos onde o problema completo apresenta subestrutura ótima, podendo ser decomposto em subproblemas menores;
- d) A Programação Estocástica - aplicada a uma classe especial de modelos onde os parâmetros são descritos por funções de probabilidade; e
- e) A Programação Não-Linear - utilizada em modelos contendo restrições e/ou funções não-lineares.

Neste trabalho são apresentadas as técnicas de Programação Linear e de Programação Inteira.

Uma característica presente em quase todas as técnicas da Programação Matemática é que a solução ótima do problema não pode ser obtida em um único passo, devendo ser obtida iterativamente. Dessa forma, é escolhida, uma solução inicial (que geralmente não é a solução ótima); a seguir, um algoritmo é especificado para determinar, a partir desta, uma nova solução, que geralmente é superior à anterior; finalmente, este passo é repetido até que a solução ótima seja alcançada (desde que ela exista) (LISBOA, 2002).

2.3 A PROGRAMAÇÃO LINEAR

Uma das técnicas mais utilizadas na abordagem de problemas de Pesquisa Operacional é a Programação Linear (PL), técnica matemática de planejamento que pode ser utilizada, sob certas condições, para gerar uma solução ótima para um problema específico. A PL vem se constituindo como uma das mais poderosas em quase todos os ramos da atividade humana, sendo aplicada, nas áreas de administração da produção, análise de investimentos, alocação de recursos limitados, planejamento regional, logística, custo de transporte, localização de redes de distribuição, etc. Seus benefícios são exatamente aqueles procurados por qualquer empresa: diminuição dos custos e aumento dos lucros. Em algumas organizações ela está, inclusive, embutida em suas rotinas informatizadas de planejamento diário dos processos de operação; e, segundo pesquisas efetuadas em empresas que tem utilizado esta ferramenta, a redução de custos se enquadra facilmente na faixa entre 1% e 5%, existindo casos que chegam a até 15% (LACHTERMACHER, 2004; INDG, 2007; COGAN, 2008).

A PL, além de encontrar o lucro máximo ou o custo mínimo em situações reais, tem como objetivos auxiliar o analista no estágio inicial da investigação; na avaliação e interpretação dos resultados do problema; e na aplicação desses resultados com a confiança que é adquirida somente com a compreensão dos problemas e dos resultados envolvidos (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

De acordo com Ceciliano (2007), a PL é especialmente aplicável diante de situações reais que apresentem alguma complexidade, em que a decisão a ser tomada não possa depender apenas do bom senso de um gestor.

Segundo Andrade (1998), a Programação Lin permite responder a diversas questões, tais como:

a) Rotas de Transportes: Qual deve ser o roteiro de transporte de veículos de carga a fim de entregar toda a carga no menor tempo e/ou no menor custo?;

- b) Manufatura: Qual deve ser a composição de produtos a serem fabricados por uma empresa de maneira a atingir o lucro máximo, respeitadas as exigências do mercado e a capacidade de produção da fábrica?;
- c) Mineração: Em que seqüência devem ser lavrados blocos de minérios, dada sua composição, posicionamento e custos de extração?;
- d) Siderurgia: Quais minérios devem ser carregados nos reatores de redução de modo a se produzir uma liga metálica ao menor custo?;
- e) Localização: Onde devem ser localizadas as fábricas e os estoques de um novo empreendimento industrial de maneira a minimizar os custos de entrega?; etc.

A PL torna-se, portanto, uma ferramenta de auxílio ao processo de decisões sobre a utilização de recursos limitados, buscando a maximização de resultados ou a minimização de custos (CECILIANO, 2007).

2.3.1 Problemas de Programação Linear

Problemas de Programação Linear são problemas de otimização nos quais a função-objetivo e as restrições são todas lineares, o que implica proporcionalidade das quantidades envolvidas. Esta característica de linearidade pode ser interessante no que diz respeito à simplificação da estrutura matemática envolvida; mas prejudicial na representação de fenômenos não lineares (por exemplo, funções de custo tipicamente quadráticas).

Com isso, um modelo de Programação Linear apresenta uma estrutura padronizada e repetitiva que pode ser utilizada para resolver os mais variados problemas. Esta característica permitiu o desenvolvimento de eficientes programas de computador, simples de serem utilizados, tornando a Programação Linear uma técnica extremamente útil e com grande número de aplicações. Além disso, a simplicidade do

modelo envolvido e a disponibilidade de uma técnica de solução programável em computador facilitam sua aplicação. (LACHTERMACHER, 2004; EHRlich, 2004; LISBOA, 2002).

Um problema de Programação Linear pode ser definido da seguinte forma (LACHTERMACHER, 2004):

Variáveis de Decisão: x_1, x_2, \dots, x_n

Objetivo: Otimizar $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$\text{Sujeito a: } \left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \cdot \\ \cdot \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq \\ \leq \\ = \\ \geq \\ \leq \end{array} \left. \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \end{array} \right\} \quad (1)$$

Onde: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \dots + a_{in}x_n$, para $i = 1, \dots, m$

n é o número de variáveis

m é o número de restrições do problema

i é o índice de uma determinada restrição ($i = 1, 2, \dots, m$)

j é o índice de uma determinada variável ($j = 1, 2, \dots, n$)

Algebricamente, pode-se representar um problema na forma padrão por:

Maximizar: $Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

Sujeito a: $\cdot \quad \cdot \quad \cdot$ (2)

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

$$b_i \geq 0$$

A complexidade de um problema de Programação Linear vai depender basicamente do seu tamanho, que pode ser medido em termos do número de variáveis e restrições envolvidas (DONATO, 2002).

Segundo Prado (1999), os problemas de otimização podem ser divididos, de acordo com seu tamanho, em três grupos distintos: pequeno, médio e grande porte.

Embora não se possa definir com precisão parâmetros que permitam diferenciar um grupo do outro, devido à diversidade de técnicas existentes para resolução de tais problemas, e também ao avanço da tecnologia computacional atual, pode-se dizer que problemas de pequeno porte são aqueles cuja resolução pode ser facilmente acompanhada passo a passo; problemas de médio porte são aqueles cuja resolução necessita do auxílio de um computador, mas sem a aplicação de qualquer técnica ou equipamento especial; e problemas de grande porte são aqueles que necessitam de uma estrutura matemática particular e de um alto esforço computacional para resolução (NAKAYAMA, 2005).

2.3.2 A solução

A solução de um problema de otimização envolve a escolha de valores para um conjunto de variáveis inter-relacionadas, com o intuito de alcançar um determinado objetivo (NAKAYAMA, 2005).

De acordo com Lachtermacher (2004), uma Solução é qualquer especificação de valores para as variáveis de decisão que esteja dentro do domínio da função-objetivo, independentemente de se tratar de uma escolha desejável ou permissível.

Segundo Ehrlich, (2004), um modelo de Programação Linear pode apresentar uma única solução, soluções múltiplas, solução degenerada, solução não-factível (*Infeasible*), ou solução ilimitada (*Unbounded*).

O principal método de resolução de um problema de Programação Linear é o Método Simplex, considerado como um dos dez algoritmos de maior influência no desenvolvimento e prática da ciência e da engenharia no século vinte (YARMISH, 2002). Entretanto, existem outros métodos para a solução de problemas deste tipo,

como os métodos de pontos interiores ou o algoritmo proposto por Karmakar (SIMONETTO; LÖBLER, 2003; HEIN; LOESCH; FARIA, 2008).

O método *Simplex* é um procedimento ou algoritmo iterativo convergente baseado na álgebra linear, desenvolvido por George Dantzig, em 1947, que resolve qualquer modelo de Programação Linear num número finito de iterações, indicando a ocorrência de múltiplas soluções ótimas, solução ilimitada, ou problema inviável; sendo o mais utilizado pelos programas de computador para a solução de problemas de PL. Os programas, LINDO® e Solver do Excel® (quando a opção problema linear é acionada) utilizam o Simplex (YARMISH, 2002; SIMONETTO; LÖBLER, 2003; FREITAS; HENRIQUES; MANSUR, 2003; HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

Maiores detalhes sobre este método não serão tratados neste trabalho, podendo ser obtidos na bibliografia citada (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

2.3.3 A análise de sensibilidade

Além de listar o valor da função-objetivo e das variáveis de decisão, os programas de computador fornecem, também, um relatório de análise de sensibilidade, o qual permite examinar o comportamento da função-objetivo em função de alterações nos parâmetros do problema. (COGAN, 2008).

A Análise de Sensibilidade é uma análise de pós-otimização que verifica as possíveis variações dos coeficientes e constantes de um modelo sem que a solução ótima seja alterada (LACHTERMACHER, 2004).

Um dos principais objetivos da análise de sensibilidade é o de identificar os parâmetros sensíveis, isto é, parâmetros cujos valores não podem ser alterados sem alterar a solução ótima. Dessa forma, a Análise de Sensibilidade permite identificar os parâmetros que precisarão ser particularmente monitorados à medida que o estudo for implementado. Se for descoberto que o valor verdadeiro de um determinado parâmetro sai de seu intervalo possível, isso indica a necessidade imediata de se mudar de solução (HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

2.4 A PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

Problemas de Programação Inteira são problemas de programação matemática em que uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros. Estes problemas podem ser considerados como uma subclasse da Programação Linear, chamada Programação Linear Inteira (PLI), e podem ser divididos, de acordo com o tipo de variável de decisão, em dois tipos básicos (ANASTÁCIO, 2003; LACHTERMACHER, 2004; ELIAS; CAMARGO JR, 2008):

Programação Inteira Total (PIT): ocorre quando todas as variáveis de decisão do problema admitem somente soluções inteiras.

Programação Inteira Mista (PIM): apenas uma parte das variáveis de decisão é do tipo inteiro, enquanto outras são do tipo real.

De acordo com Hillier e Lieberman (2006); Elias e Camargo Jr. (2008), os Problemas de Programação Linear Inteira também podem ser classificados como:

Problemas Inteiros Gerais: quando as variáveis de decisão podem assumir valores inteiros não-negativos;

Problemas Binários: quando as variáveis de decisão estão restritas a assumir somente os valores 0 ou 1.

Nos Problemas de Programação Linear Inteira (PPI) tanto a função-objetivo como as restrições são lineares; entretanto, neste tipo de problema, uma ou mais variáveis de decisão são representadas apenas por valores inteiros (LACHTERMACHER, 2004).

Os PPIs aparecem em diversas situações práticas de diversas áreas, tais como: energia, transportes, telecomunicações, circuitos eletrônicos, biologia molecular, medicina, criptografia, finanças, etc. Além disso, problemas como layout de sistemas de produção, localização de instalações, distribuição de produtos, seqüenciamento de tarefas, planejamento e programação (*scheduling*) da produção, problemas de corte e

empacotamento, roteamento de veículos, etc, também podem ser formulados como problemas de programação inteira (HILLIER; LIEBERMAN, 2006; ARAÚJO; BARROS JR; KAMPKE, 2007).

Os PPIs são freqüentes porque em muitas situações práticas, as atividades ou recursos (máquinas, locais, pessoas, etc) são indivisíveis. Como exemplo pode-se citar a designação de pessoas para trabalhos. Não é possível designar uma fração de um operário para uma certa tarefa e a outra parte da fração a outra tarefa (GÓES, 2005).

Embora, a rigor, os Problemas de Programação Inteira sejam não-lineares (as restrições x_{ij} inteiro não são restrições lineares), eles podem ser formulados como problemas de Programação Linear com restrições adicionais indicando que algumas (ou todas) variáveis de decisão devem assumir somente valores inteiros (HILLIER; LIEBERMAN, 2006). Assim, pode-se dizer que a diferença entre os problemas de Programação Linear e os problemas de Programação Linear Inteira é a inclusão de pelo menos uma restrição que limita o espectro de variação de uma variável de decisão. De acordo com Lachtermacher (2004), um problema de Programação Linear Inteira pode ser descrito matematicamente como:

$$\begin{array}{l}
 \text{Objetivo: Otimizar } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 \\
 \text{Sujeito a: } \left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \cdot \\ \cdot \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \leq b_1 \\ \leq b_2 \\ = \cdot \\ \geq \cdot \\ \leq b_3 \end{array} \quad (3) \\
 \\
 x_1, x_2, \dots, x_n \text{ são inteiros}
 \end{array}$$

$$\text{Onde: } f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \dots + a_{in}x_n, \text{ para } i = 1, \dots, m$$

n é o número de variáveis

m é o número de restrições do problema

i é o índice de uma determinada restrição ($i = 1, 2, \dots, m$)

j é o índice de uma determinada variável ($j = 1, 2, \dots, n$)

Ao contrário dos problemas de Programação Linear, os problemas de Programação Inteira têm um número finito de soluções. Entretanto, a maioria dos problemas práticos é classificada na literatura como NP-difíceis, isto é, não são conhecidos algoritmos determinísticos que os resolvam em tempo polinomial. Assim, é mais difícil encontrar o ótimo de um problema de PLI do que o ótimo de um problema de PL. (SILVA, 2004; ARAÚJO; BARROS JR; KAMPKE, 2007).

A primeira vista, pode parecer que para encontrar a solução, basta resolver o problema como se fosse um problema de Programação Linear e arredondar os valores ótimos encontrados para cada uma das variáveis de decisão. Este procedimento pode ser aceitável quando os valores das variáveis são grandes, tornando o arredondamento pequeno (GÓES, 2005). Entretanto, esse tipo de procedimento geralmente levará a soluções inaceitáveis, às vezes longe do valor ótimo. Além disso, podem ocorrer diversos problemas pela utilização da técnica de arredondamento da solução (LACHTERMACHER, 2004; HILLIER; LIEBERMAN, 2006):

- Nem todos os pontos inteiros vizinhos ao ponto ótimo são necessariamente viáveis;
- Mesmo que um dos vizinhos seja viável, ele pode não ser necessariamente o ponto ótimo inteiro.

Uma idéia que pode resultar em uma solução para um PPI é o de se enumerar todas as possíveis soluções e avaliar qual delas melhor atende à função-objetivo.

De forma exaustiva, todos os valores possíveis para a função-objetivo seriam calculados e seria escolhido aquele que apresentasse o maior valor, no caso de problemas de maximização, ou o menor valor, no caso de problemas de minimização. O problema de realizar este procedimento está no fato de que ele só consegue ser aplicado a problemas pequenos. O número de combinações possíveis de soluções cresce de forma exponencial. Um problema de programação inteira com 100 variáveis de decisão do tipo binária terá até 2^{100} soluções viáveis, isto é, $1,27 \cdot 10^{30}$ soluções possíveis (LACHTERMACHER, 2004; HILLIER; LIEBERMAN, 2006).

A fim de contornar esse inconveniente, foram desenvolvidos alguns algoritmos para resolver problemas de Programação Linear Inteira.

Uma estratégia comumente utilizada para resolver os problemas de programação linear inteira consiste em resolver uma seqüência de problemas “fáceis” obtidos a partir de relaxações do problema original e, a partir da solução de tais problemas, obter limites para o valor da solução ótima do problema original. Uma relaxação usual dos problemas inteiros é a relaxação de programação linear, que consiste em relaxar as condições de integralidade das variáveis de decisão. Outras relaxações desenvolvidas para problemas de programação inteira incluem as relaxações Lagrangeana, Surrogate e combinadas Lagrangeana-Surrogate (ESPEJO; GALVÃO, 2002).

O algoritmo de *Branch and Bound* é o procedimento mais utilizado atualmente. Existem diversas variantes deste método para tratamento de diversos tipos de problemas específicos. A idéia geral é a de se dividir o conjunto de soluções viáveis em subconjuntos sem intersecções entre si, calculando-se os limites superiores e inferiores para cada subconjunto e eliminar certos subconjuntos de acordo com regras preestabelecidas. Dessa forma, grande parte das soluções possíveis deixa de ser examinada, contribuindo para acelerar a obtenção da solução ótima. Entretanto, essa técnica é afetada pelo tamanho do problema, uma vez que o tempo computacional cresce à medida que o tamanho do problema também aumenta. (LACHTERMACHER, 2004; SOUZA; GUARDIA, 2007).

Um outro método utilizado é o Método dos Planos de Corte. Este método consiste em abordar o problema de programação inteira como um problema de programação linear e, ao encontrar uma solução para este problema, impõem-se as condições de que as variáveis devem ser inteiras. Desta forma, restrições são acrescentadas sucessivamente ao problema original, de forma a eliminar parte do espaço de soluções (inclusive a solução ótima não-inteira), até encontrar a melhor solução inteira para o problema (GÓES, 2005).

Há ainda métodos aproximados de solução, incluindo desde heurísticas convencionais até as chamadas metaheurísticas (ARAÚJO; BARROS JR; KAMPKE, 2007).

Maiores detalhes sobre os métodos de solução não serão tratados neste trabalho, podendo ser conseguidos na bibliografia citada (ESPEJO; GALVÃO, 2002;

LACHTERMACHER, 2004; GÓES, 2005; HILLIER; LIEBERMAN, 2006; ARAÚJO; BARROS JR; KAMPKE, 2007).

Comparativamente ao problema de PL correspondente, o problema de PLI levará muito mais tempo para ser resolvido. Isto se deve ao fato de que uma seqüência de problemas de PL é resolvida para se obter a solução de um problema PLI.

2.5 A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A Simulação de Sistemas é uma das técnicas da Pesquisa Operacional utilizada para avaliar e aprimorar os sistemas dinâmicos de todos os tipos, e, dessa forma, auxiliar o processo de decisão. Ela possibilita estudar o comportamento e reações de um determinado sistema através de modelos, que imitam suas propriedades e comportamentos em uma escala menor, permitindo sua manipulação e estudo detalhado, sem a necessidade de intervenção no sistema real. (BORGES, 2002; GAVIRA, 2003; PAIVA, 2005; KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008; SELLITTO; BORCHARDT; PEREIRA, 2008).

A Simulação de Sistemas contorna os problemas das demais técnicas da Pesquisa Operacional e da pouca flexibilidade de seus modelos, que vão se tornando extremamente complicados e difíceis de serem construídos a medida que são introduzidos aspectos dinâmicos e muitas variáveis, podendo-se chegar ao extremo de não ser possível encontrar uma técnica de solução apropriada, impedindo a resolução do problema (PAIVA, 2005; CHWIF; MEDINA, 2006; CECILIANO, 2007; PARAGON, 2007).

A Simulação é uma ferramenta de decisão capaz de lidar de maneira eficaz com a variabilidade natural dos processos e proporcionar estimativas das influências destas sobre o desempenho do sistema, uma vez que os simuladores estocásticos têm a capacidade de imitar a aleatoriedade de um dado sistema através de distribuições de probabilidades, as quais representam matematicamente as chances de acontecimento de todos os valores possíveis para um determinado processo do sistema. Além disso, os simuladores estocásticos permitem reproduzir o comportamento de um dado

sistema com todas as possibilidades e combinações, e sem limite, dentro do período de tempo estipulado pelo usuário. Assim, a simulação de sistemas fornece uma estrutura de raciocínio e análise que permite resolver problemas mais amplos e mais complexos, devendo ser aplicada, portanto, no estudo de sistemas em que o inter-relacionamento de seus componentes dificulta ou mesmo impossibilita um tratamento analítico.

Neste contexto, embora haja um conjunto de equações matemáticas e relações lógicas para descrever o comportamento de um sistema, elas não são simplesmente resolvidas por métodos analíticos ou numéricos, ou seja, em um modelo de simulação não existe uma expressão analítica fechada ou um conjunto de equações que, após a inclusão dos valores de entrada, forneçam resultados sobre o comportamento do sistema a partir de uma forma analítica direta.

A simulação envolve a computação da mudança de estado de cada componente do sistema, seqüencialmente, refletindo a dinâmica do funcionamento do sistema através do tempo. Cada computação implica num conjunto de cálculos que dependem dos resultados da computação anterior. (LAW;KELTON, 2000; PAIVA, 2005; CHWIF; MEDINA, 2006; PARAGON, 2007).

Outra vantagem do uso da simulação é que ela permite experimentar, num ambiente computacional, algumas alternativas diferentes nas operações atuais de um sistema real (até mesmo experimentar tecnologias completamente novas e inovações radicais), com monitoramento automático e relatórios dos principais indicadores de desempenho, proporcionando uma capacidade de tomada de decisões que é impossível de ser conseguida através de qualquer outra tecnologia, e propiciando uma liberdade ilimitada de rearranjar atividades, redistribuir recursos ou mudar qualquer procedimento sobre a operação atual.

Através da simulação é possível não só descobrir maneiras de aperfeiçoar as operações de um dado sistema, mas também fazer isso sem riscos (não se correm riscos de acidentes ao executar os modelos), sem comprometer nenhum investimento (as simulações têm custos bem menores do que uma experimentação direta), sem perder tempo e sem causar paradas no sistema atual. (HARRELL, GHOSH E BOWDEN, 2000; BATEMAN *et al.*, 2002; LIMA FILHO *et al.*, 2008).

Além disso, a Simulação é uma ferramenta que promove uma melhor compreensão sobre o sistema analisado, servindo de meio de comunicação entre todos os envolvidos, permitindo observar como as variáveis se relacionam nos cenários propostos, e proporcionando ao tomador de decisão uma visão sistemática do efeito que mudanças feitas no processo podem causar no desempenho de todo o sistema (CHWIF; MEDINA, 2006; KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008).

Por meio da Simulação é possível também simular situações sobre as quais se tem pouco conhecimento e experiência, no sentido de adquirir dados e desenvolver teorias sobre eventos futuros; levantar hipóteses sobre o porquê da ocorrência de determinados fenômenos no sistema; identificar gargalos e auxiliar o seu gerenciamento; etc (KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008).

Embora, no passado, a simulação fosse considerada uma técnica de último recurso, que deveria ser utilizada somente quando todas as demais técnicas possíveis falhassem, atualmente, ela é uma das técnicas mais utilizadas pela Pesquisa Operacional (CHWIF; MEDINA, 2006).

Além disso, graças à evolução vertiginosa da Informática nos últimos anos, a simulação deixou de ser uma técnica extremamente complexa (devido à necessidade da modelagem matemática dos sistemas e à implementação de algoritmos em linguagens de programação formais, como o FORTRAN), utilizada somente por poucos especialistas, para se tornar uma das ferramentas mais poderosas para o projeto e análise de sistemas, sendo amplamente utilizada por tomadores de decisões nos diversos níveis das empresas (BATEMAN *et al.*, 2002; PAIVA, 2005).

Em virtude da grande versatilidade e flexibilidade e poder de análise, a simulação por computador é utilizada nos níveis de planejamento, projeto e operação nas mais diversas áreas, tanto nos setores de manufatura, como no de serviços. Na área de serviços, ela vem sendo utilizada em portos e aeroportos, bancos, cadeias de logística, centrais de atendimento, hospitais, parques de diversões, restaurantes, supermercados, etc. Na área de manufatura, a simulação vem sendo aplicada em linhas de montagem, células automatizadas, na análise de estoques, em sistemas de movimentação e armazenagem, entre outras.

A simulação é ainda empregada nas análises de previsão meteorológica, no treinamento de estratégia para militares e pilotagem de veículos ou aviões. Até mesmo o estudo aerodinâmico, antes feito por maquetes, pode ser realizado agora pelo computador (CHWIF; MEDINA, 2006; PEIXOTO, 2006; PARAGON, 2007; LIMA FILHO *et al.*, 2008).

Entretanto, deve-se observar que um bom modelo de Simulação pode levar vários meses para ser desenvolvido. Adicionalmente, se as características do sistema não forem corretamente modeladas e/ou se os dados de entrada não forem precisos, ou se o modelo criado não representar satisfatoriamente o sistema, o computador e o método de simulação não fornecerão resultados válidos. Dessa forma, antes de se desenvolver um modelo de simulação é necessário realizar um treinamento especializado para familiarizar o modelador/analista com esta técnica. Ainda assim, um bom aprendizado e aperfeiçoamento só serão conseguidos com o passar do tempo e através da experiência (PAIVA, 2005; PARAGON, 2007; CECILIANO, 2007; KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008).

Uma outra desvantagem da Simulação reside no fato de que cada modelo é único, não sendo possível, em geral, utilizar um modelo em diferentes situações, prejudicando a possibilidade de ganhos de escala (PAIVA, 2005).

Além disso, devido a sua natureza estocástica, os modelos de simulação devem ser executados diversas vezes para poderem chegar a um resultado satisfatório (CECILIANO, 2007).

Outro ponto importante a ser observado é que a simulação sozinha não apresenta necessariamente uma solução ótima para quem esteja resolvendo o problema; ela apenas testa os cenários propostos, permitindo escolher a melhor opção dentre as alternativas avaliadas (PEIXOTO, 2006). Os resultados da simulação poderão sugerir, entretanto, áreas de investigação e possíveis soluções para avaliação experimental adicional. Ao contrário de proporcionar uma única e melhor solução, a simulação pode guiar o modelador/analista a uma solução ou séries de soluções que consideram a sinergia total do sistema. Contudo, quando se combina simulação com técnicas avançadas de otimização, são descobertas soluções quase ótimas ou até mesmo ótimas (BATEMAN *et al.*, 2002).

2.5.1 Como simular?

Em uma simulação, é construído um modelo lógico-matemático que representa a dinâmica do sistema em estudo. Um modelo nada mais é do que uma abstração da realidade, isto é, uma representação simplificada de um sistema existente ou hipotético que normalmente incorpora valores para tempos, distâncias, recursos disponíveis, etc, e que ajuda a prever o comportamento do sistema real. (PARAGON, 2007).

Nos *softwares* de modelagem, como o ARENA® e o PROMODEL®, a modelagem é feita visualmente com objetos orientados à simulação e com o auxílio do *mouse*, não necessitando serem digitados comandos na lógica (programação).

Ao modelo são anexados dados sobre o sistema. Neste ponto, como já foi mencionado anteriormente, a simulação se diferencia, pois em vez de se utilizarem valores médios para descrever os parâmetros do modelo, podem ser utilizadas distribuições estatísticas obtidas a partir da análise dos parâmetros do sistema real que serão inseridos no modelo, uma vez que a representação fiel de um sistema passa, inevitavelmente, pela aleatoriedade de seus eventos (GAVIRA, 2003; PAIVA, 2005; PARAGON, 2007; LEAL, 2008).

Os simuladores, como o ARENA®, são capacitados a imitar a aleatoriedade de um sistema real através de distribuições probabilísticas, as quais representam matematicamente as chances de ocorrência de todos os valores possíveis para um determinado processo do sistema. Em conjunto com um sistema gerador de números aleatórios, esses simuladores permitem reproduzir o comportamento do sistema com todas as possibilidades, particularidades e combinações, e sem limite no período de tempo desejado pelo usuário. Somando-se os dados e o modelo lógico-matemático, obtém-se uma representação do sistema no computador. Com esse sistema torna-se possível realizar vários testes e coletar dados de resultados que irão mostrar o comportamento do sistema bem próximo do real. (GAVIRA, 2003; PAIVA, 2005; PARAGON, 2007).

Maiores detalhes sobre o desenvolvimento de um modelo de simulação serão apresentados no Capítulo 3.

2.5.2 Causas de insucesso no desenvolvimento de simulações

Robinson (2004) afirma que o sucesso em um estudo de simulação é alcançado quando os resultados do estudo de simulação são aceitos e implementados, atingindo os objetivos desejados pelos tomadores de decisão e trazendo benefícios para o sistema.

Entretanto, nem todos aqueles que utilizaram a Simulação em seus sistemas conseguiram solucionar seus problemas. Paiva (2005) cita as principais causas de insucesso no desenvolvimento de simulações:

- a) Falha em definir claramente os objetivos no início do estudo;
- b) Falha de comunicação entre o analista/modelador e o responsável do sistema a ser simulado;
- c) Modelo com nível de detalhamento inapropriado;
- d) Uso de distribuições de probabilidade que não representam o comportamento real do sistema;
- e) Falha nas etapas de verificação e validação, gerando modelos que não representam a realidade;
- f) Execução da simulação uma única vez, sem replicações, considerando a resposta obtida como verdadeira;
- g) Uso inadequado da animação; entre outras.

Gavira (2003, p.68) afirma que um erro cometido por alguns usuários de simulação “consiste em considerar a simulação apenas como uma simples cópia da

realidade ou como um exercício de programação em computador”. Segundo esse autor, isso tem levado a validações e verificações insuficientes.

A partir dessas causas de insucesso, pode-se concluir que a Simulação é uma poderosa ferramenta para avaliar ações, mas que demanda um grande esforço metodológico e um rigoroso estudo estatístico para levar a conclusões satisfatórias (GAVIRA, 2003).

2.6 A SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

De acordo com Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002), desde a metade do século passado, os analistas da Pesquisa Operacional têm desenvolvido um grande conjunto de técnicas e conhecimentos para solucionar os problemas que aparecem em muitos sistemas complexos.

Entretanto, Köchel, Kunze e Nieländer (2003) afirmam que os sistemas atuais são tão complexos que aproximações analíticas tradicionais isoladas não levam a soluções completamente satisfatórias. Diante dessa realidade e com a disponibilidade de processadores mais velozes e *softwares* mais robustos, provenientes do avanço da informática, esses autores sugerem uma combinação de métodos de Pesquisa Operacional com a Ciência da Computação.

Um dos resultados de tal combinação é a Simulação-Otimização, a qual integra um simulador de um sistema real a ser investigado a métodos de otimização satisfatórios para um determinado problema, associando os objetivos da otimização às vantagens da simulação (CECILIANO, 2007; PINTO JR, 2001). A Figura 2 apresenta de forma esquemática o princípio da simulação-otimização:

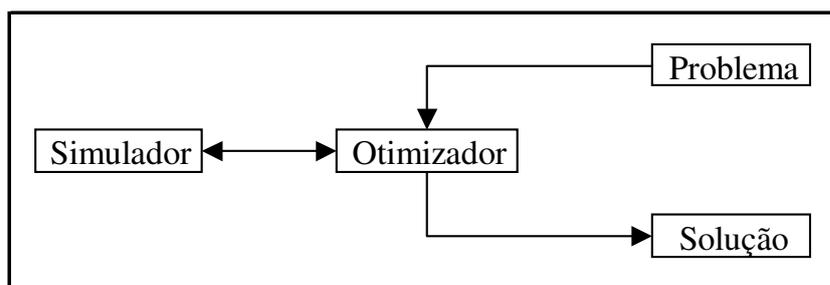


Figura 2 - Princípio da simulação-otimização
(Fonte: KÖCHEL, KUNZE, NIELÄNDER, 2003)

Azadivar (1999) define um problema de simulação-otimização como sendo um problema de otimização em que a função-objetivo e/ou algumas restrições são avaliadas por meio da simulação computacional.

O desenvolvimento de métodos de simulação-otimização é, atualmente, um campo ativo de pesquisa, e a elaboração de modelos que utilizam os conceitos de simulação e otimização simultaneamente tem se tornado cada vez mais freqüente (CECILIANO, 2007; PINTO JR, 2001).

2.6.1 Características da simulação-otimização

Segundo Cardoso, Vinhoza e Neto (2007), a simulação geralmente tem como foco a estimação do desempenho, enquanto a análise matemática sempre envolve o cálculo analítico do desempenho do sistema.

Morito *et al.* (1999) afirmam que a programação matemática é uma ferramenta poderosa de otimização, enquanto a simulação é uma ferramenta apropriada para avaliar o desempenho de um sistema com maior flexibilidade.

Isso quer dizer que, enquanto a Programação Matemática é fraca em alguns pontos, como o desconhecimento da relação de entrada/saída, o dinamismo do sistema, a não-linearidade, a ausência de aleatoriedade e detalhes dos sistemas; a simulação é fraca em sua capacidade de otimização (CECILIANO, 2007).

Seria adequado, portanto, pensar na combinação desses métodos.

Morito *et al.* (1999) afirmam que as forças e fraquezas da programação matemática e da simulação são complementares.

De fato, há muitos problemas de importância que são de natureza de otimização; entretanto, a aplicação da otimização para um grande problema pode conduzir a dificuldades de interpretação dos resultados. A primeira questão é se a solução determinada pela otimização é realmente uma solução possível tanto para o modelo quanto para o sistema real, uma vez que em certas situações não é possível incluir todas as restrições e procedimentos operacionais de um sistema real em um modelo de otimização. Nessas circunstâncias, a simulação pode ser uma ferramenta útil que pode

incorporar todos os procedimentos exigidos e todas as restrições do sistema real (CECILIANO, 2007).

Entretanto, para que a simulação possa ser utilizada na avaliação e na melhoria do desempenho de um processo, é necessário construir cenários, executar a simulação para cada uma deles, e, logo em seguida, analisar os resultados encontrados. Tal processo, apesar de ser capaz de gerar bons resultados, pode se tornar muito cansativo e consumir muito tempo; além de não garantir que as melhores configurações sejam experimentadas (PINHO, 2008).

Assim, o intuito de se associar as técnicas de otimização e simulação é justamente o de resolver tais problemas.

Uma característica comum aos métodos de simulação-otimização é a representação dos parâmetros de decisão do sistema em estudo por meio de funções implícitas que podem ser avaliadas por meio de simulação; e a natureza estocástica da função-objetivo e/ou das restrições do problema. (AZADIVAR, 1999).

Segundo Azadivar (1999), a formulação de sistemas de simulação-otimização é freqüentemente feita por maximização ou minimização de valores esperados da função-objetivo do sistema.

Outra característica comum aos métodos de simulação-otimização convencionais, de acordo com Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002), é a simulação repetitiva do sistema, onde a cada passo de melhoria, o desempenho do sistema é avaliado, pelo menos uma vez, pela simulação.

Esse procedimento permite que um analista simule um sistema específico e então determine o valor ótimo para algum parâmetro dentro do problema, mediante a aplicação de uma técnica de otimização. A seguir, o analista aplica a simulação aos resultados do problema de otimização para conferir a validade dos mesmos, utilizando os resultados do modelo de otimização como *inputs* ao modelo de simulação. Caso a solução não seja considerada satisfatória, a otimização deverá gerar, baseada nos resultados da etapa anterior, uma nova solução, que deverá ser testada novamente pela simulação. Este ciclo é repetido até que algum critério de parada seja satisfeito (FU, 2002; BUSH, BILES, DEPUY, 2003).

O Anexo B traz dois fluxogramas comparando um modelo de otimização determinístico tradicional de uma planilha eletrônica com um modelo de simulação-otimização (PINTO JR, 2001).

2.6.2 Vantagens da simulação-otimização

De acordo com Azadivar (1999), as principais vantagens da simulação-otimização, são:

- a) A complexidade do sistema modelado não afeta significativamente o desempenho do processo de otimização;
- b) Para sistemas estocásticos, a variabilidade da resposta pode ser controlada por meio de várias técnicas de análise de dados de saída;
- c) O modelo de simulação permite a inclusão de detalhes (procedimentos operacionais e restrições complexas) que não podem ser considerados num modelo de otimização convencional (BUSH, BILES E DEPUY 2003);
- d) A presença da simulação fornece uma vantagem que não é freqüentemente possível em procedimentos clássicos de otimização: mediante o emprego de técnicas apropriadas, a função-objetivo e/ou as restrições podem ser modificadas de uma iteração para outra para refletir as possíveis alternativas do sistema em estudo;
- e) Os resultados oriundos do modelo de otimização podem ser validados por um modelo de simulação. Neste caso, como os resultados e parâmetros do modelo de otimização serão usados como entradas do modelo de simulação, será possível comparar os resultados da simulação com soluções consideradas aceitáveis para o sistema real, permitindo ao analista modificar o modelo de otimização, se tais resultados não forem aceitáveis. Dessa forma, a técnica de simulação-otimização

garante que as soluções encontradas sejam viáveis para o sistema real, e não apenas para o modelo de otimização (BUSH, BILES E DEPUY, 2003).

2.6.3 Desvantagens da simulação-otimização

Para Azadivar (1999), o uso da simulação em conjunto à otimização apresenta vários desafios específicos. Alguns desses desafios são abordados na otimização de funções complexas e/ou não-lineares; enquanto outros são relacionados à natureza especial da modelagem por simulação.

Azadivar (1999) relata que as principais desvantagens da simulação-otimização são:

- a) Não há uma expressão analítica da função-objetivo ou das restrições. Isso elimina a possibilidade de diferenciação ou cálculo exato de gradientes locais;
- b) A função-objetivo e as restrições são funções estocásticas de variáveis de decisão determinísticas. Isso representa um grande problema até mesmo na estimação de derivadas locais aproximadas. Além disso, isso causa problemas até mesmo usando enumeração completa, uma vez que, baseada em uma só observação de cada ponto, não se pode determinar o melhor ponto de decisão;
- c) A simulação computacional é muito mais custosa do que a avaliação de funções analíticas. Isso torna crítica a eficiência dos algoritmos de otimização;
- d) As linguagens de simulação são bastante diferentes das linguagens de otimização. Fazer a interface dos modelos de simulação com modelos genéricos de otimização nem é sempre uma tarefa fácil, especialmente quando se trata das modernas linguagens de simulação de alto nível.

2.6.4 Métodos e aplicações da simulação-otimização

2.6.4.1 Método proposto por Köchel, Kunze e Nieländer

Köchel, Kunze e Nieländer (2003) propõem um método de simulação-otimização em que as etapas de otimização e simulação se alternam de tal modo que o simulador coleta as informações sobre o desempenho de cada decisão sugerida pelo otimizador.

Neste modelo, o otimizador é composto de quatro componentes. O primeiro deles gera inicialmente uma solução que alimentará o simulador. A seguir, o simulador é executado. O resultado da simulação retorna ao segundo componente do otimizador, o qual gera uma estimativa para o valor da função-objetivo do problema. Com base nesta estimativa, o terceiro componente do otimizador irá decidir se a solução atual é ótima ou não. Se não for, o quarto componente do otimizador dará a ordem para procurar uma nova solução, reiniciando o ciclo. Uma vez iniciado o processo de busca, ele correrá automaticamente, sem interação com o usuário. Esse ciclo será executado até que um critério de parada seja cumprido.

De acordo com as exigências e a continuidade do processo de otimização, dados e informações adicionais podem ser incluídos durante o processo de busca. A Figura 3 apresenta esquematicamente este método.

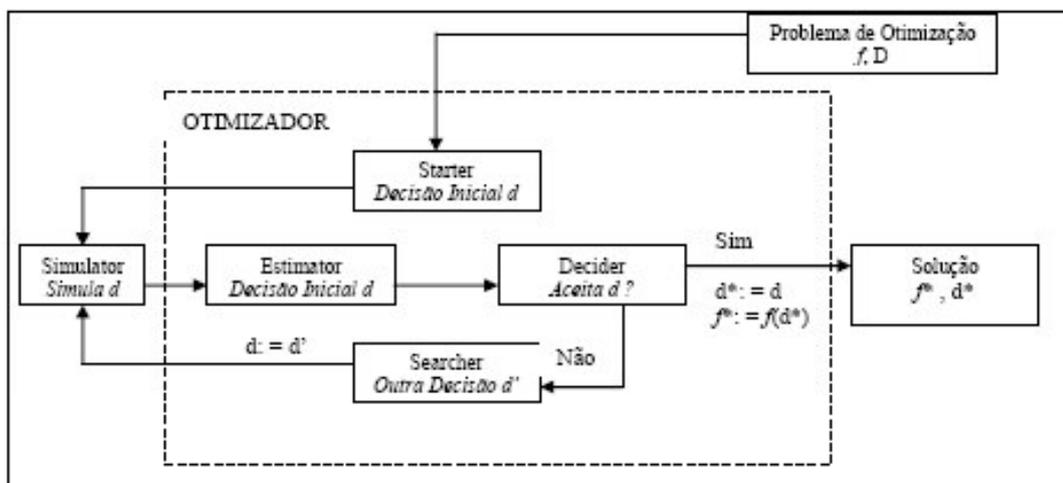


Figura 3 – Método proposto por Köchel, Kunze e Nieländer (2003)

Köchel, Kunze e Nieländer (2003) recomendam este método para avaliar problemas complexos de dimensionamento e de alocação de recursos.

2.6.4.2 Método proposto por Granger, Krishnamurthy e Robinson

Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002) propõem um método que dispensa o procedimento tradicional de simulação-otimização de produção de uma corrida de simulação a cada passo do processo. Em vez disso, eles combinam um método de aproximação estocástica (algoritmo iterativo de aproximação ao zero, ou a um dos zeros de uma função em que a medição da função está sujeita a uma perturbação aleatória, possivelmente não limitada – CRUZ, 2005) com um modelo de simulação.

Em seu trabalho, os autores criaram dois modelos utilizando *softwares* comerciais para balancear uma rede de abastecimento por transporte aéreo.

Para o modelo de simulação, os autores utilizaram o ProModel® - Versão 4.3, um pacote de simulação de eventos discretos comercialmente disponível, usado para simular sistemas industriais.

Além disso, eles construíram um modelo de aproximação estocástica que usa o MPX Versão 3.3, um pacote comercial para modelagem de produção. O pacote MPX modela cadeias industriais como cadeias abertas de filas.

Inicialmente, para balancear a cadeia foi executada uma simulação simples, a fim de se obter uma base de dados e de se identificar o gargalo do sistema.

Depois de identificado o gargalo, o passo seguinte foi aplicar o método de aproximação estocástica para avaliar o efeito de se alocar mais aeronaves ao sistema.

De acordo com os autores, cada avaliação, requer uma única execução do método de aproximação, mas nenhuma simulação.

Este procedimento é repetido até que uma solução satisfatória é alcançada.

Para validar os resultados produzidos pelo método de aproximação estocástica, os autores realizaram uma corrida de simulação adicional.

Este método reduz o tempo necessário para se chegar a uma solução, uma vez que, são necessárias apenas duas rodadas de simulação (uma corrida base no princípio e, então, uma complementar, ao final do processo) e somente uma corrida do método de aproximação estocástica para cada passo intermediário do processo, o qual é substancialmente mais rápido que uma rodada de simulação.

A Figura 4 apresenta o método utilizado:

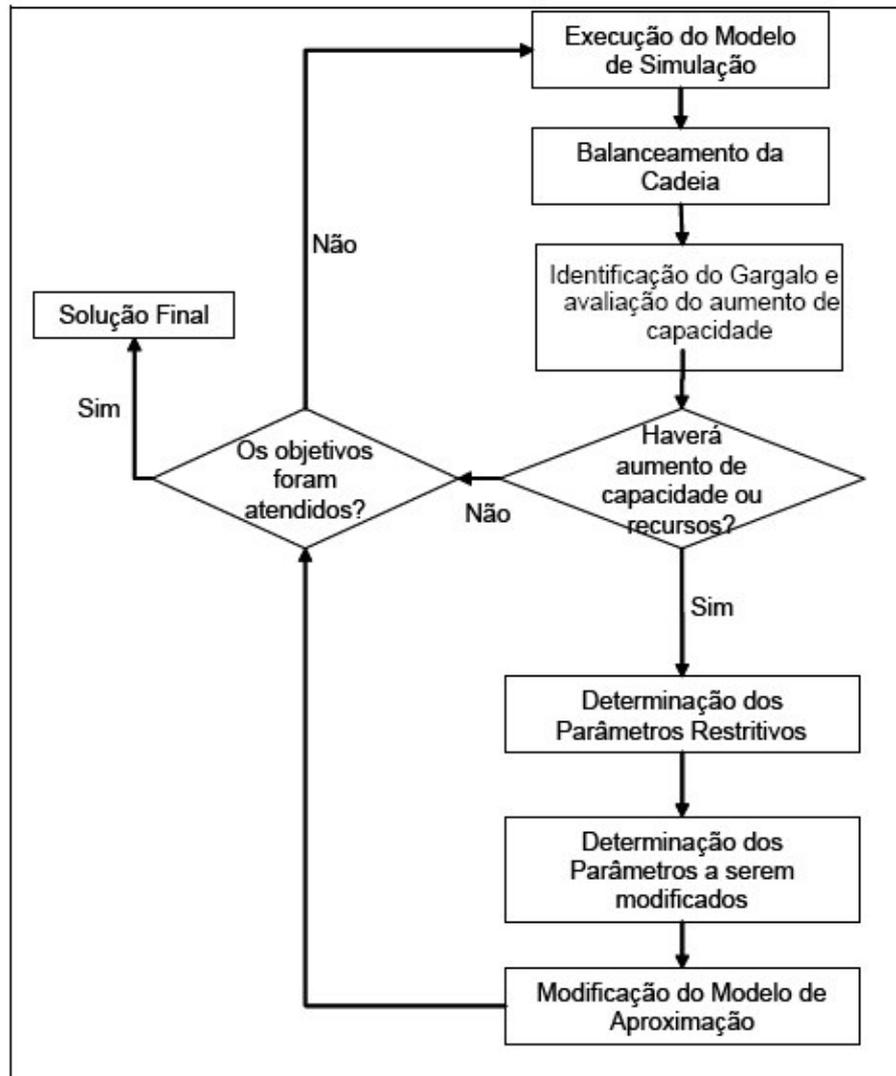


Figura 4 - Método proposto por Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002)

2.6.4.3 Método proposto por Vashi, Bienstock e Mentzer e aplicado por Díaz e Pérez

Díaz e Pérez (2000) aplicaram o método proposto por Vashi, Bienstock e Mentzer (1995) na cadeia produtiva de cana-de-açúcar.

A colheita de cana-de-açúcar é uma operação logística complexa que envolve o corte, o carregamento, o transporte e a descarga da cana nas fábricas.

A fim de poder entender as mudanças na colheita de estação para estação, Díaz e Pérez (2000) afirmavam que deveria haver uma contínua análise sobre a disponibilidade de infra-estrutura e necessidades futuras do sistema. Os autores

possuíam três metas principais: identificar o gargalo do sistema; encontrar soluções para este gargalo; e desenvolver um sistema efetivo de tomada de decisão, para a alocação de recursos.

O objetivo era conseguir um número mínimo de replicações de um modelo de simulação, de maneira que o seu resultado pudesse servir como entrada para um modelo de otimização, o qual determinaria a alocação ótima de recursos.

O processo de simulação-otimização desenvolvido por Vashi, Bienstock e Mentzer (1995) é ilustrado na Figura 5.

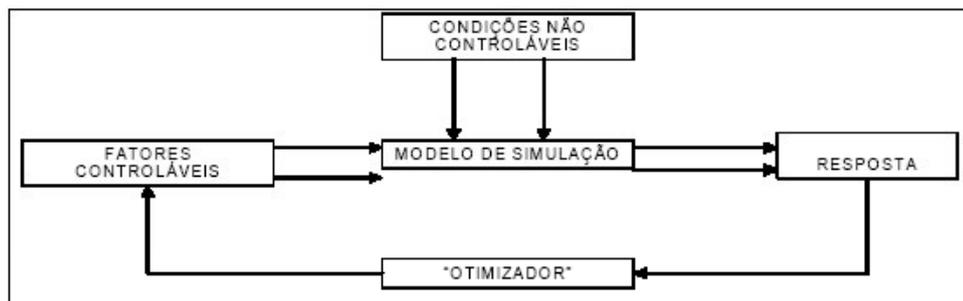


Figura 5 - Método proposto por Vashi, Bienstock e Mentzer (1995)

O procedimento ilustrado na Figura 5 é composto de três fases:

- A primeira envolve a identificação das variáveis de resposta a serem otimizadas e das variáveis independentes que afetam o sistema;
- A segunda fase compreende a construção de um modelo de simulação. Uma vez construído o modelo de simulação representando a operação real do sistema, Díaz e Pérez (2000) executaram corridas de simulação, com várias alternativas de fatores controláveis baseados em diversos experimentos que tornavam possível obter a superfície de resposta requerida. Vale ressaltar que a simulação não provê mecanismo para achar a solução ótima do problema; ela apenas indica a melhor solução dentre aquelas examinadas;
- A terceira fase é o ponto no qual a função de resposta é trazida em uso para achar a solução ótima do problema, utilizando a metodologia de superfície de resposta. O objetivo preliminar do método de superfície de resposta é aproximar a função de uma região pequena, relativa às variáveis independentes, a alguma função simples (VASHI, BIENSTOCK, MENTZER, 1995).

Este trabalho vem servindo como material de suporte para o Ministério da

Indústria de Açúcar de Cuba na tomada de decisões sobre distribuição de recursos para fábricas, de forma a prever gargalo e prover soluções que evitem problemas e riscos futuros (CECILIANO, 2007).

2.6.4.4 Método proposto por Vamanan *et al.*

O propósito do trabalho de Vamanan *et al.* (2000) é demonstrar os mecanismos de integração de dois *softwares* de Pesquisa Operacional, CPLEX® e ARENA®. No trabalho destes autores, foi analisada a aplicação desses mecanismos numa cadeia de suprimentos e de estoques.

O CPLEX® é uma ferramenta desenvolvida para resolver problemas de programação linear inteira, baseada no algoritmo *branch-and-bound* para chegar a uma solução, depois de uma série de relaxamentos de programações lineares (CECILIANO, 2007).

O ARENA® é uma ferramenta de simulação computacional utiliza o SIMAN como a linguagem de simulação (CECILIANO, 2007).

O método proposto por estes autores é similar ao apresentado na seção 2.6.4.3; entretanto, em vez de utilizarem a heurística de superfície de resposta como otimizador, estes autores elaboraram um modelo de programação inteira mista para representar o sistema e utilizaram o algoritmo de *branch-and-bound* para resolvê-lo (CECILIANO, 2007).

Assim, a cada alteração dos parâmetros de entrada do modelo de simulação, é necessário chamar o CPLEX® de dentro do ARENA® para resolver o problema de programação inteira mista.

Os autores concluem que a integração dos dois *softwares* é eficiente em certos casos. Entretanto, alertam que há limitações ao uso dessa integração, pois o tempo de resolução para um problema de programação linear inteira mista que usa o algoritmo *branch-and-bound* (como o CPLEX®) aumenta exponencialmente com o tamanho do problema.

Uma alternativa proposta pelos autores para lidar com tempos de soluções

inaceitáveis para resolver o problema, é terminar a execução do CPLEX® com uma solução que esteja dentro de certo nível aceitável de otimalidade, uma vez que, embora o tempo para encontrar a solução ótima aumente exponencialmente com o tamanho do problema, o tempo para achar a solução próxima do ótimo é razoável, na maioria dos casos (CECILIANO, 2007).

2.6.4.5 Método proposto por Morito *et al.*

Morito *et al.* (1999) apresentam um método de simulação-otimização no qual os resultados da simulação são usados para identificar restrições, as quais são adicionadas ao modelo de otimização para re-otimização.

Morito *et al.* (1999) aplicaram este método nos correios japoneses. Os autores analisaram planos alternativos de distribuição de equipamentos para as agências postais e buscaram um plano “ótimo” de distribuição.

A análise foi executada tendo como base a otimização da alocação de equipamentos (via um problema de PIM) e, também, a simulação para analisar a viabilidade da otimização num ambiente mais dinâmico e realista (Figura 6).

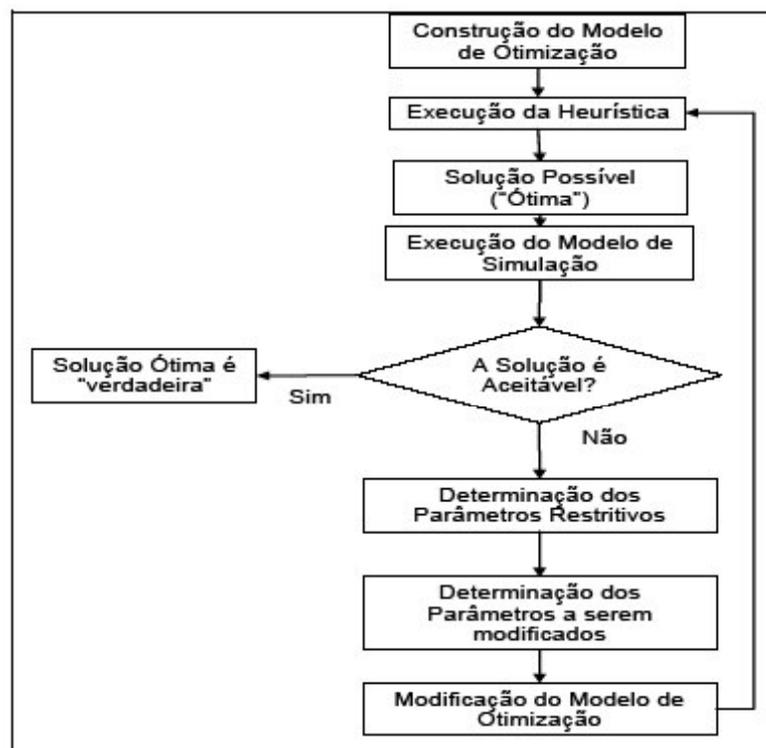


Figura 6 - Método proposto por Morito *et al.* (1999)

O método é composto de quatro etapas:

- a) Construção dos modelos: Nesta etapa, são construídos um modelo básico de otimização que leva em consideração apenas fatores essenciais do problema, e também um modelo de simulação que deve incluir maiores detalhes do sistema;
- b) Otimização: Na segunda etapa, resolve-se o modelo de otimização e obtém-se uma solução “ótima” para o problema;
- c) Simulação: Na terceira fase, realiza-se uma simulação com a solução ótima obtida no passo anterior, e avalia-se seu desempenho a fim de verificar se a solução é aceitável ou não;
- d) Geração das restrições: Se a solução encontrada na etapa anterior for aceitável, a solução ótima encontrada é verdadeira. Caso contrário, as restrições que não foram levadas em consideração na construção do modelo de otimização devem ser identificadas e adicionadas ao programa matemático atual. Finalmente, deve -se retornar ao segundo passo e repetir o procedimento descrito até que a solução obtida pelo modelo matemático seja validada pelo modelo de simulação.

De acordo com os autores, este método parece ser bastante promissor para resolver diversos problemas, especialmente nas áreas de logística e de programação da produção.

2.6.4.6 Método proposto por Bush, Biles e DePuy

Bush, Biles e DePuy (2003) sugerem o desenvolvimento de um modelo de otimização separado do modelo de simulação para permitir que diferentes níveis de detalhamento sejam incluídos em cada um desses modelos, respeitando suas potencialidades.

Esse método foi aplicado para minimizar o custo de movimentação de barcas

na região mais baixa do Rio Mississippi.

O método iterativo proposto é apresentado na Figura 7. Caixas com linhas tracejadas representam etapas que são executadas por um computador; caixas com linhas cheias representam etapas realizadas por um analista qualificado.

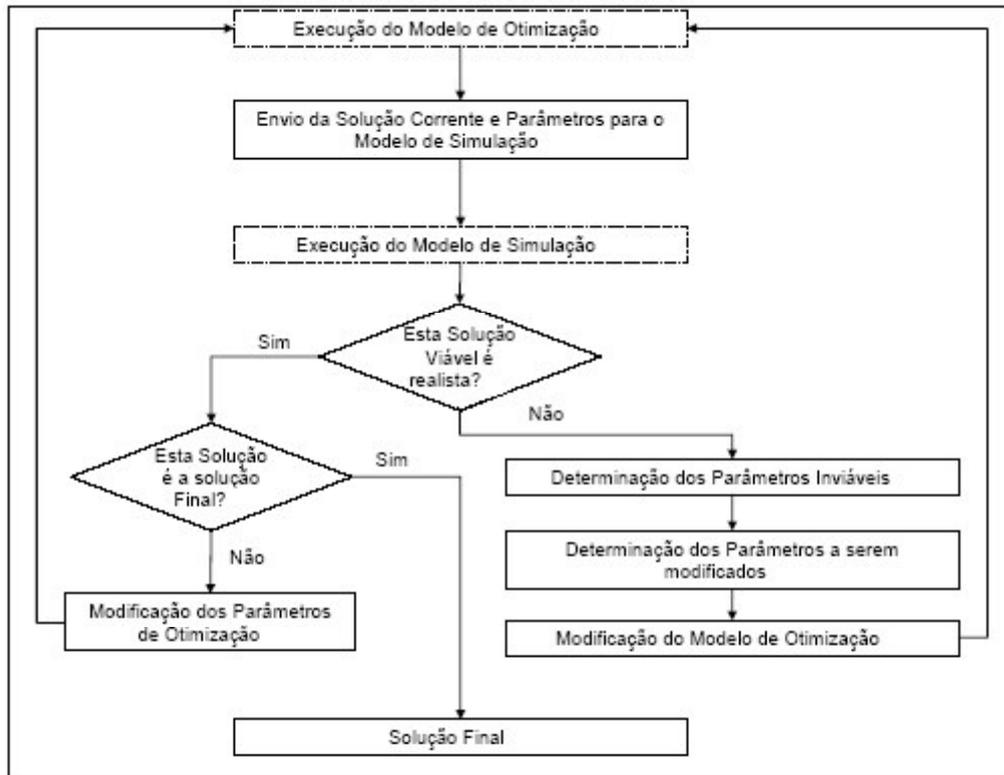


Figura 7 - Método proposto por Bush, Biles e DePuy (2003)

O primeiro passo do processo iterativo proposto consiste em encontrar uma solução por meio do modelo de otimização. Esta etapa é realizada por um computador.

O passo seguinte consiste em enviar os resultados e parâmetros do modelo de otimização para um modelo de simulação. Este passo é executado manualmente. O analista deve determinar quais parâmetros devem ser incluídos no modelo de simulação.

A Seguir, o modelo de simulação é executado. Este é outro passo executado pelo computador nesse processo iterativo.

Em seguida, o analista deve analisar os resultados para verificar se os parâmetros do modelo de otimização conduziram a uma solução viável e realista do modelo de simulação.

Caso a solução encontrada pela simulação não seja considerada aceitável, o analista deverá determinar, manualmente, os parâmetros do modelo de otimização que deverão ser modificados.

Após as modificações do modelo, a otimização é executada novamente para determinar uma nova solução, retornando ao início do processo iterativo.

O processo continua até que uma solução aceitável seja encontrada.

A Figura 8 mostra o fluxo de informação ao longo do processo iterativo.

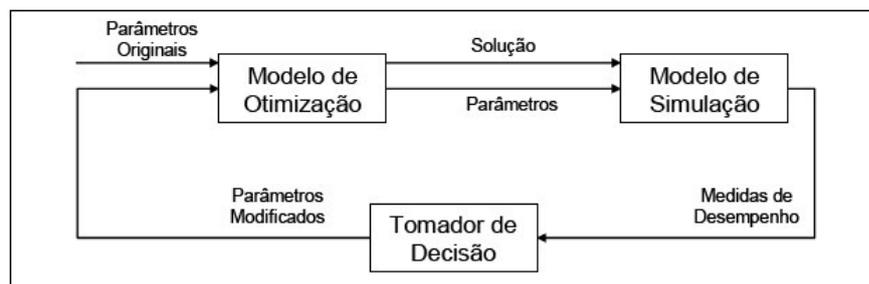


Figura 8 - Fluxo de informação do processo iterativo
(Fonte: BUSH, BILES E DEPUY, 2003)

De acordo com a Figura 8, o modelo de otimização é executado com os parâmetros originalmente estabelecidos. Esses parâmetros e as soluções do modelo de otimização são usados como *input* no modelo de simulação.

A solução do modelo de simulação é a medida de desempenho que é utilizada pelo analista para modificar os parâmetros da otimização e executar novamente o modelo.

O tomador de decisão é o elemento fundamental do processo, uma vez que ele é o responsável por avaliar se a solução obtida pode ser considerada aceitável ou se será necessário modificar os parâmetros do modelo (BUSH, BILES E DEPUY, 2003).

2.6.4.7 Método proposto por Ceciliano

Ceciliano (2007) desenvolveu um método de tomada de decisão que utiliza a simulação-otimização para melhorar o processo de escolha de alternativas/projetos de investimentos em uma cadeia produtiva de minérios de ferro.

A primeira etapa deste método consiste em elaborar um modelo de otimização e

outro de simulação. Para o modelo de programação linear inteira mista criado, o autor utilizou o *software* Lingo® 10.0; já para o modelo de simulação, o autor utilizou o *software* Arena® 8.0.

A etapa seguinte consiste em simular cada um dos projetos de investimento separadamente, com o intuito de se avaliar o efeito individual de cada projeto no sistema produtivo global. Este efeito será utilizado posteriormente para avaliar a viabilidade econômico-financeira do projeto.

Os projetos que forem considerados inviáveis pelo modelo de simulação são descartados, enquanto os demais alimentarão o modelo de otimização para encontrar a melhor opção de alocação dos projetos.

Uma nova simulação é realizada para quantificar o efeito global do resultado da otimização e avaliar sua viabilidade.

Se a nova solução for considerada inaceitável, alguns parâmetros e algumas regras/restrições do modelo de otimização devem ser ajustados.

Após as alterações necessárias, o modelo de otimização deve ser executado novamente, reiniciando o ciclo.

Este ciclo é repetido até que uma solução viável seja alcançada.

2.6.4.8 Método desenvolvido pela empresa Minerações Brasileiras Reunidas S/A (ARENASFERA, 2006)

A Minerações Brasileiras Reunidas S/A desenvolveu um método de tomada de decisão imediata para ser utilizado em situações emergenciais no dia-a-dia de uma mina de ferro.

Inicialmente, utilizando o *software* ISATIS®, foi construído um modelo de simulação geoestatística para determinar a distribuição de teores de minério em uma jazida e criar os seus planos de lavra.

A seguir, foi criado um modelo geológico utilizando o *software* DATAMINE® para definir as frentes de lavra.

Em seguida, criou-se um modelo de programação linear utilizando o *software*

LINGO® para definir a seqüência de extração das frentes e determinar número de caminhões necessários para cada uma delas de maneira a minimizar custos.

Após a execução do modelo de otimização, o passo seguinte consistiu em verificar a exeqüibilidade do plano ótimo, utilizando simulação (*software* ARENA®).

Neste método, caso a solução encontrada não seja satisfatória, deve-se alterar o modelo de otimização e realizar uma nova otimização, cuja solução deverá ser testada novamente no modelo de simulação.

2.6.4.9 Método proposto por Barboza *et al.*

Barboza *et al.* (2003) propõem um método para realizar a elaboração e a designação de jornadas de trabalho em uma central telefônica de atendimento 24 horas.

O trabalho foi desenvolvido em três fases: na primeira delas, determina-se o número de atendentes necessários a cada período do dia por meio de um modelo de simulação da central telefônica, visando um pronto atendimento aos clientes.

Na segunda etapa, é determinado o conjunto de jornadas de trabalho que atendem à demanda, minimizando os gastos da empresa com salários. Para isso, foram utilizados os resultados da primeira etapa e as jornadas disponíveis para, a seguir, construir um modelo de Programação Linear Inteira, o qual foi resolvido com o *software* LINDO®.

Finalmente, na terceira fase, são designados os atendentes aos horários de acordo com suas preferências, utilizando o algoritmo do Matching de peso máximo. Esse algoritmo trata o problema de designação como caso particular de um problema de maximização de pesos para um grafo (BARBOZA *et al.*, 2003).

De acordo com os autores, a metodologia apresentada pode auxiliar de forma significativa na construção e na designação de horários aos atendentes, além de diminuir os custos e aumentar o faturamento de empresas com a obtenção do número ótimo de atendentes, fornecendo um atendimento mais eficaz para o usuário e gerando maior satisfação dos funcionários em relação a seus horários de trabalho.

2.6.4.10 Método proposto por Pinho

Pinho (2008) desenvolveu um método para otimização de modelos de simulação a eventos discretos aplicados a sistemas de manufatura, que utilizam variáveis de decisão do tipo discretas, determinísticas e inteiras. Tal método é capaz de gerar resultados com a mesma qualidade daqueles obtidos por uma ferramenta de otimização comercial, mas com maior eficiência em relação ao tempo de processamento.

Para o desenvolvimento do método proposto, elaborou-se uma ferramenta computacional, com base nos algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975; GOLDBERG, 1989), capaz de permitir a manipulação de seus parâmetros, e de se comunicar com o simulador a eventos discretos.

A primeira fase do método consiste na verificação da possibilidade de aplicação do método para o problema proposto: se as variáveis de decisão forem do tipo discretas, determinísticas e inteiras, o método pode iniciar a fase de otimização do modelo de simulação. Caso contrário, não é possível iniciar a fase de otimização (Figura 9).

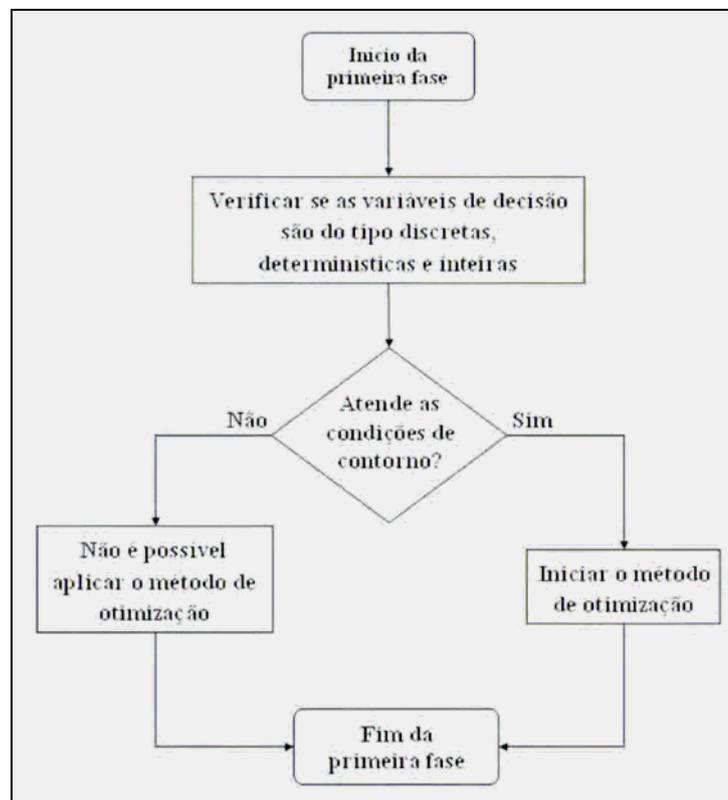


Figura 9 - Fluxograma da primeira fase do método de otimização proposto por Pinho (2008)

A segunda fase do método proposto consiste no processo de otimização propriamente dito (Figura 10).

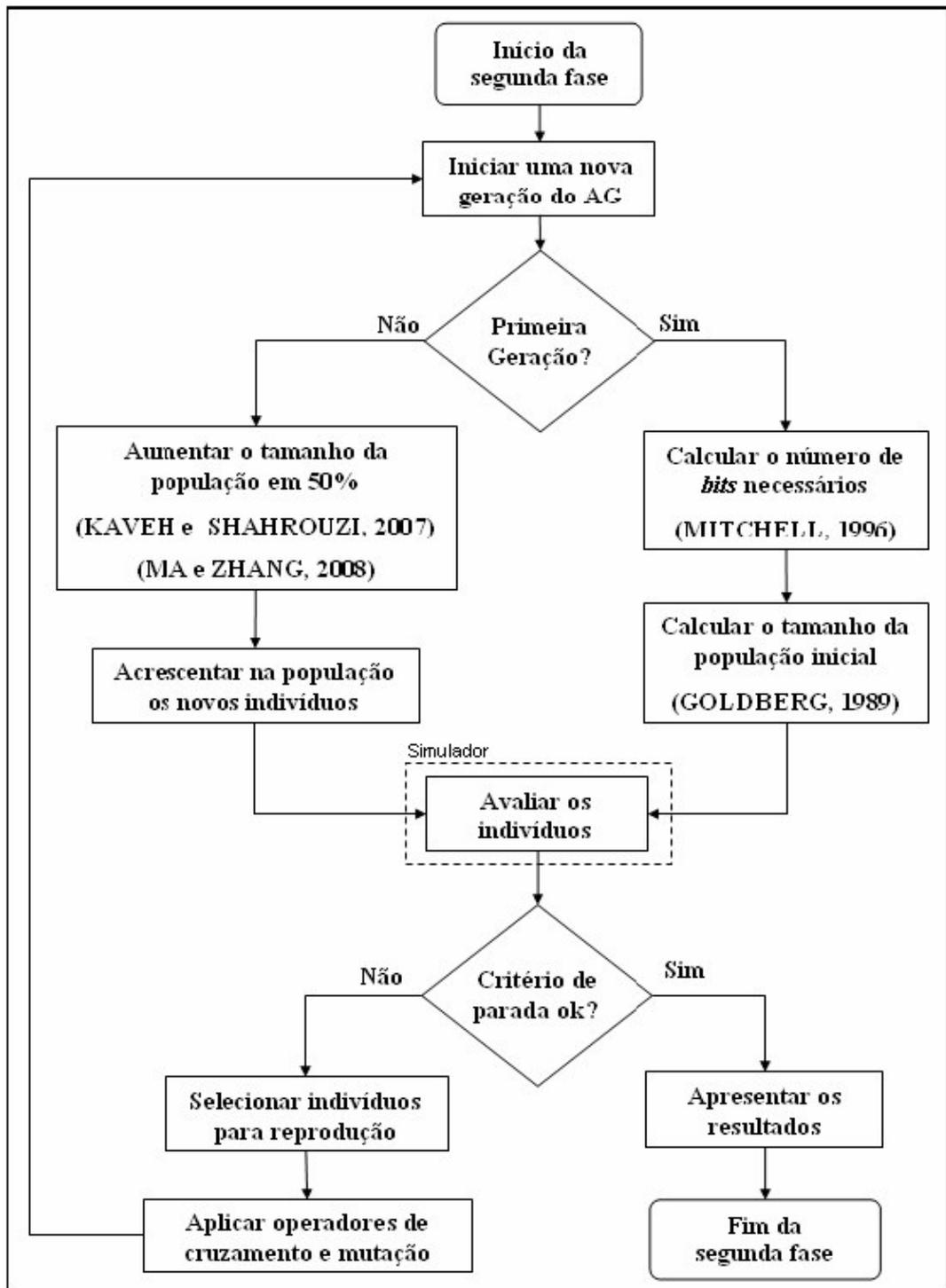


Figura 10 - Fluxograma da segunda fase do método de otimização proposto por Pinho (2008)

O processo tem início com o cálculo do número de bits necessários para cada indivíduo da população do algoritmo genético. A seguir, deve-se calcular o tamanho

da população inicial, e gerar a população inicial do algoritmo genético.

Em seguida, cada indivíduo da população é enviado para o simulador. Esses indivíduos representam as variáveis de entrada do modelo de simulação, tais como: quantidade de operadores, quantidade de máquinas, etc. Após a execução da simulação, os resultados desta (produtividade, taxa de produção, eficiência do sistema produtivo, etc) serão utilizados na avaliação de cada indivíduo existente do algoritmo genético.

Após a avaliação de todos os indivíduos da população, verifica-se se há melhorias na resposta da geração atual em relação à geração anterior. Se não ocorrerem melhorias significativas, considera-se que a condição de parada do método foi satisfeita. Apresentam-se, então, os resultados da otimização do modelo de simulação e encerra-se o método.

Caso a condição de parada não seja satisfatória, selecionam-se os indivíduos para reprodução, e aplicam-se os operadores de cruzamento e mutação nos indivíduos selecionados. Após a aplicação destes operadores, uma nova geração pode ser formada, iniciando-se todo o processo novamente.

Quatro objetos de estudo foram utilizados na aplicação do método de otimização proposto: uma linha de produção de uma empresa do setor automobilístico produtora de componentes eletrônicos; uma célula de manufatura de uma empresa do setor de autopeças; e duas áreas de manufatura de uma empresa de alta tecnologia, focada na fabricação e desenvolvimento de equipamentos para a comunicação óptica.

Os resultados encontrados pelo método proposto foram comparados com uma ferramenta de otimização disponível comercialmente, conhecida como SimRunner®. Em relação à qualidade dos resultados, o método de otimização proposto mostrou-se tão eficaz quanto o SimRunner®.

Com relação ao tempo de processamento para chegar à solução, constatou-se que, para uma variável de decisão, o método de otimização proposto apresentou-se menos eficiente. Já para duas variáveis de decisão analisadas simultaneamente, o método apresentou melhor ou igual eficiência. E, finalmente, para três ou mais variáveis de decisão analisadas simultaneamente, o método de otimização proposto foi sempre mais eficiente.

2.6.4.11 Método proposto por Rodriguez e Fernandes

Rodriguez (2007) e Fernandes (2008) desenvolveram um modelo de simulação-otimização para obter um melhor gerenciamento da linha de produção de cilindros de laminação de tiras a frio da empresa Aços Villares S/A.

Em seu trabalho, os autores elaboraram um modelo matemático de Programação Linear Inteira, baseado nas restrições do sistema produtivo, com o objetivo de formar lotes de produção. Este modelo foi implementado no *software* Excel®, onde se utilizou a ferramenta Solver para resolvê-lo.

Além disso, para simplificar o modelo matemático e reduzir o tempo necessário para encontrar uma solução, foi desenvolvido um modelo de simulação no *software* Arena®.

Dessa forma, para encontrar uma solução, deve-se inicialmente executar o modelo de PLI e, a seguir, enviar os resultados obtidos para o modelo de simulação. Finalmente, deve-se executar este modelo e analisar seus resultados.

O modelo de otimização criado tem a função de gerar lotes de produção que não excedam a capacidade do equipamento gargalo, evitando, assim, a formação de filas excessivas ao longo da linha de produção.

O modelo de simulação, por sua vez, tem a função de identificar as interferências que podem ocorrer durante o processo de fabricação, direcionar a produção ao longo da linha e prever a data em que os cilindros ficarão prontos para serem enviados ao cliente.

Após a implementação do modelo na empresa citada, obteve-se um melhor fluxo do sistema produtivo, uma melhor previsibilidade dos prazos de entrega, uma redução do número de reprogramações de embarque e, conseqüentemente, um melhor atendimento ao cliente.

2.7 PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO (*SCHEDULING*)

O planejamento da produção em ambientes de manufatura é uma tarefa complexa que compreende, dentre outras atividades, o seqüenciamento (*scheduling*) da produção (DOMINGOS *et al.*, 2008).

Os problemas de *scheduling* referem-se aos procedimentos de alocação, num determinado período de tempo de recursos e equipamentos para executar o processamento de tarefas.

O *scheduling* possui três elementos fundamentais: a designação dos recursos, que envolve a seleção de um conjunto de recursos apropriados para uma atividade conhecida; o seqüenciamento de atividades, que define a ordem de execução das atividades designadas para os recursos; e a determinação do tempo de utilização dos recursos pelas respectivas atividades, ou seja, a determinação dos tempos de início e término de cada atividade.

Problemas de *scheduling* da produção são requeridos quando existe competição entre atividades por recursos limitados dentro de um horizonte de tempo definido; e, muitos deles podem ser modelados como problemas de Programação Linear Inteira Mista (STEBEL *et al.*, 2003).

2.7.1 *Job shop*

De acordo com Cheung e Zhou (2001), um *job shop* é um ambiente de produção com n tarefas e m máquinas, em que cada tarefa é processada nas m máquinas, de acordo com um roteiro preestabelecido.

Admitindo que o objetivo seja minimizar o tempo de fluxo total das tarefas, que as n tarefas estejam disponíveis para processamento no instante zero e que a interrupção do processamento de qualquer tarefa não seja permitida, pode-se formular o problema da seguinte forma:

- r_{i1}, \dots, r_{im} : roteiro de processamento da tarefa i nas m máquinas, ou seja, a seqüência de máquinas em que a tarefa é processada;
- P_{ik} : tempo de processamento da tarefa i na máquina k ;
- C_{ik} : instante de término do processamento da tarefa i na máquina k ;
- $X_{ijk} = 1$, se a tarefa i precede a tarefa j na máquina k (caso contrário, $X_{ijk} = 0$);
- M : um número grande.

$$\min \sum_{i=1}^n C_{im}$$

$$C_{ir_{i1}} \geq p_{ir_{i1}} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$C_{ir_{i,k+1}} \geq C_{ir_{ik}} + p_{ir_{i,k+1}} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m-1 \quad (5)$$

$$C_{jk} \geq C_{ik} + p_{jk} - M(1 - x_{ijk}) \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$C_{ik} \geq C_{jk} + p_{ik} - Mx_{ijk} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$C \in R_+^{nm}, \quad x \in B^{nm}$$

De uma forma geral, as restrições presentes nas definições de seqüenciamento em *job shop* são as seguintes:

- As restrições (4) garantem que a primeira operação de cada tarefa é completada após o respectivo tempo de processamento;
- A precedência das operações de cada tarefa deve ser respeitada: as restrições (5) impõem que a operação $k+1$ da tarefa i é concluída depois do término da operação k e do tempo de processamento da operação $k+1$;
- Cada máquina pode realizar uma única tarefa de cada vez. As restrições 6 e 7 são disjuntivas: na máquina k , ou a tarefa i precede a tarefa j , ou a tarefa j precede a tarefa i .

Segundo Cheung e Zhou (2001), encontrar a solução ótima para um problema de *job shop* é, normalmente, uma tarefa difícil, uma vez que existem $(n!)^m$ soluções possíveis. Dessa forma, pode-se encontrar a solução ótima num intervalo de tempo reduzido somente para problemas envolvendo um pequeno número de máquinas e tarefas.

Além disso, em muitas situações práticas, não se exige a obtenção de uma solução ótima, sendo suficiente uma solução sub-ótima.

Por essas razões, têm sido desenvolvidos, com bons resultados, diversos métodos heurísticos.

Nesses métodos, o procedimento utilizado consiste em especificar uma regra de prioridade para selecionar uma operação entre as diversas operações candidatas a serem realizadas em uma mesma máquina.

De acordo com Domingos *et al.* (2008), as principais regras de prioridade utilizadas são: menor tempo de processamento (*shortest processing time* - SPT), em que há a seleção do trabalho com o menor tempo de processamento no processo em análise; maior tempo de processamento (*longest processing time* - LPT), em que ocorre a seleção do trabalho com o maior tempo de processamento no processo em análise; maior tempo de processamento restante (*most work remaining* - MWKR), onde é priorizada a peça que possui o maior tempo de trabalho acumulado nos processos seguintes; menor tempo de processamento restante (*least work remaining* - LWKR), onde é priorizada a peça que possui o menor tempo de trabalho acumulado nos processos seguintes; data de entrega mais próxima (*earliest delivery date* - EDD), onde é selecionado o trabalho com a data mais próxima para entrega; primeiro a chegar, primeiro a ser executado (*first-come, first-served* - FCFS), em que se realiza o trabalho que está a mais tempo na fila; folga por operação restante (*slack per remaining operation* - SRO), em que se seleciona o trabalho com menor folga por operações restantes; etc.

Montevichi *et al.* (2002) ressaltam que a escolha da regra de prioridade depende de qual critério deseja-se melhorar, uma vez que não existe uma regra única que englobe simultaneamente critérios como, por exemplo, mínimo tempo de ciclo, mínimo número de peças em atraso e mínima ociosidade dos equipamentos.

Outras alternativas que vêm sendo utilizadas para solucionar os problemas de *job shop* são a simulação computacional (DOMINGOS *et al.*, 2008), e os algoritmos genéticos (Cheung; Zhou, 2001).

2.7.2 Flow shop

O ambiente de produção *flow shop* é um caso particular do ambiente *job shop*, em que as n tarefas têm o mesmo roteiro nas m máquinas. Assim, a formulação do *job shop* pode ser adaptada para o *flow shop*.

Quando a ordem de processamento em todas as máquinas for a mesma, tem-se o ambiente de produção *flow shop* permutacional. Comumente, a solução do problema consiste em determinar uma seqüência das tarefas dentre as $(n!)$ seqüências possíveis, que é mantida para todas as máquinas e que procura otimizar uma determinada medida de desempenho da programação. Nos modelos para solução do problema, as medidas usuais referem-se à minimização da duração total da programação (*makespan*), associada à utilização eficiente dos recursos produtivos, e à minimização do tempo médio de fluxo (*mean flow time*), associado à redução do estoque em processamento (BUZZO, MOCCELLIN, 2000; STAFFORD JR; TSENG, 2001; NAGANO, MOCCELLIN, LORENA, 2005).

As hipóteses usuais do problema de programação de tarefas *flow shop* são:

- a) Cada máquina está disponível continuamente, sem interrupções;
- b) Cada máquina pode processar apenas uma tarefa de cada vez;
- c) Cada tarefa pode ser processada por uma máquina de cada vez;
- d) Os tempos de processamento das tarefas nas diversas máquinas são determinísticos e fixos;

- e) As tarefas têm a mesma data de liberação, a partir da qual, qualquer uma pode ser programada e executada;
- f) Os tempos de preparação das operações nas diversas máquinas são incluídos nos tempos de processamento e independem da seqüência de operações em cada máquina;
- g) As operações nas diversas máquinas, uma vez iniciadas não devem ser interrompidas.

Uma formulação específica para o *flow shop* é apresentada a seguir.

Admitindo que o objetivo seja minimizar o tempo total para processar todas as tarefas (*makespan*), sendo j o índice que indica a posição na seqüência de tarefas e sendo as variáveis:

- s_{kj} : instante de início de processamento da tarefa de posição j na máquina k ;
- $z_{ij} = 1$, se a tarefa i é designada para a posição j ($z_{ij} = 0$, caso contrário);
- P_{ik} : tempo de processamento da tarefa i na máquina k ;

$$\min C_{\max} = s_{mn} + \sum_{i=1}^n p_{in} z_{in}$$

$$\sum_{j=1}^n z_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n z_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$s_{11} = 0 \quad (10)$$

$$s_{1j} + \sum_{i=1}^n p_{i1} z_{ij} = s_{1,j+1} \quad j = 1, \dots, n-1 \quad (11)$$

$$s_{k1} + \sum_{i=1}^n p_{ik} z_{i1} = s_{k+1,1} \quad k = 1, \dots, m-1 \quad (12)$$

$$s_{kj} + \sum_{i=1}^n p_{ik} z_{ij} \leq s_{k+1,j} \quad j = 2, \dots, n \quad k = 1, \dots, m-1 \quad (13)$$

$$s_{kj} + \sum_{i=1}^n p_{ik} z_{ij} \leq s_{k,j+1} \quad j = 1, \dots, n-1 \quad k = 2, \dots, m \quad (14)$$

$$s \in R_+^{mn}, \quad z \in B^{mn}$$

As restrições 8 e 9 indicam que cada tarefa está associada a uma única posição e cada posição está associada a uma única tarefa.

A restrição 10 mostra que a tarefa na posição 1 começa seu processamento na máquina 1 no instante zero; as restrições 11, que as demais tarefas só começam na máquina 1 após a tarefa predecessora ter sido processada nesta máquina.

As restrições 12 e 13 indicam que a tarefa i começa seu processamento na máquina $k+1$ somente após o término do processamento desta tarefa na máquina k (para $i = 1$, exatamente após).

Finalmente, as restrições 14 indicam que a tarefa na posição $j+1$ começa seu processamento na máquina k somente após o processamento da tarefa na posição j nesta máquina ter sido completado.

Assim como os problemas de *job shop*, os problemas de *flow shop* são classificados como NP-difíceis, podendo ser resolvidos eficientemente de maneira ótima, somente em casos de pequeno porte.

Nas últimas quatro décadas, um amplo esforço de pesquisa tem sido dedicado à resolução destes problemas. Técnicas de Programação Matemática, tais como a Programação Linear Inteira (SELEN; HOTT, 1986) e técnicas de enumeração do tipo *branch-and-bound* (IGNALL; SCHRAGE, 1965), têm sido empregadas para a solução ótima dos problemas. Entretanto, tais técnicas não são eficientes, em termos computacionais, em problemas de médio e grande porte. Dessa forma, muitos métodos heurísticos têm sido propostos, dentre os quais merecem destaque: os métodos construtivos e os métodos de melhoria (BUZZO; MOCCELLIN, 2000).

Os métodos heurísticos construtivos geram uma única seqüência de tarefas, a qual é adotada como solução final do problema (PALMER; 1965; NAWAZ; ENSCORE; HAM, 1983).

Nos métodos heurísticos de melhoria, obtém-se uma solução inicial e, posteriormente, por meio de algum procedimento iterativo (geralmente envolvendo trocas de posições na seqüência das tarefas), busca-se obter uma seqüência de tarefas melhor que a atual quanto à medida de desempenho adotada (BUZZO; MOCCELLIN, 2000). Nesta categoria, destacam-se os procedimentos de busca em vizinhança

(Dannenbring, 1977). Recentemente, foram desenvolvidos métodos de busca em vizinhança de maior complexidade (Busca Tabu e *Simulated Annealing*), os quais têm sido alvos de grande interesse na comunidade científica em função de aplicações bem sucedidas reportadas na literatura (MOCCELLIN, 1995; ISHIBUCHI, MISAKI; TANAKA, 1995; ZEGORDI, ITOH; ENKAWA; 1995; NOWICKI; SMUTNICKI, 1996; PARK; KIM, 1998; MOCCELLIN; NAGANO, 1998).

Os algoritmos genéticos, também têm despertado interesse pela sua capacidade de solução destes problemas. Reeves (1995) utilizou um algoritmo genético para minimizar o *makespan* em um *flow shop* permutacional.

Uma outra idéia que também tem recebido cada vez mais atenção refere-se ao desenvolvimento de métodos metaheurísticos híbridos utilizando Busca Tabu, *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético. Assim, o objetivo destes métodos é combinar as três técnicas, preservando suas características de ação “inteligente”, de tal forma que o procedimento resultante seja mais eficaz do que qualquer um dos seus componentes isoladamente (BUZZO; MOCCELLIN, 2000).

Buzzo e Moccellin (2000) citam diversos trabalhos, em seu artigo, que seguem esta linha de raciocínio: Murata, Ishibuchi e Tanaka (1996), examinaram duas hibridizações do Algoritmo Genético com outros algoritmos de busca; Díaz (1996) utilizou o *Simulated Annealing* para obter uma solução a ser melhorada pela Busca Tabu; Moccellin e Santos (2000) desenvolveram métodos híbridos combinando Busca Tabu e *Simulated Annealing*; e Souza e Moccellin (2000), desenvolveram métodos híbridos combinando um Algoritmo Genético com Busca Tabu.

3 MODELO PROPOSTO

Este capítulo está dividido em duas seções. Na Seção 3.1 é feita uma breve apresentação do problema abordado; na Seção 3.2 é apresentado o procedimento utilizado para realizar este trabalho.

3.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A organização objeto deste estudo é a empresa siderúrgica Aços Villares S/A, localizada na cidade de Pindamonhangaba, em São Paulo. Esta empresa é a principal produtora de aços especiais para construção mecânica da América Latina e a terceira maior produtora mundial de cilindros forjados e fundidos para laminação.

Nos últimos anos, devido ao crescimento da produção no mercado externo, o atendimento ao prazo tornou-se um dos fatores preponderantes para o sucesso da empresa, já que em termos de qualidade ela é reconhecida mundialmente como um dos melhores produtores de cilindros.

Com o aumento das exportações, a empresa passou a enfrentar dificuldades para cumprir o prazo interno de liberação do produto na data acordada com o cliente. A importância do acerto da data de liberação do cilindro é de crucial importância para o atendimento ao mesmo, pois o agendamento do embarque é estabelecido em função dessa data. Se houver algum atraso, haverá uma grande possibilidade de perder-se o embarque, o que gerará atrasos na entrega do produto ao comprador.

Para melhorar o cumprimento do prazo de liberação dos cilindros, é necessário melhorar o fluxo de produção do sistema. Para isso, é necessário analisar a linha do processo de produção de modo a subordinar o fluxo da produção à área/equipamento gargalo.

Papadopoulos, Heavey e Browne (1993) comentam que uma empresa de manufatura costuma lidar no dia-a-dia com problemas de tomada de decisão no âmbito estratégico, tático e operacional. No nível estratégico, estão as decisões relacionadas à missão da empresa e a seus objetivos de longo prazo, tais como a localização de

plantas industriais, a aquisição de novos recursos e a introdução de novas tecnologias e produtos.

As decisões de nível tático situam-se em um horizonte de planejamento mais estreito, que varia de semanas a meses, e servem, geralmente, de base para as decisões de longo prazo. Elas dizem respeito ao tipo de sistema de fabricação (produção em massa ou em lotes), ao modelo de produto a ser fabricado e ao volume a ser produzido.

Finalmente, as decisões de nível operacional, tomadas no ambiente do chão de fábrica, são aquelas de curto prazo, podendo variar de horas até dias, e geralmente, estão relacionadas à alocação dos recursos recuperáveis (máquinas) para a transformação dos recursos irrecuperáveis (matérias-primas e componentes) em produtos acabados. Os problemas de alocação de recursos envolvem as atividades de seqüenciamento de lotes de produção – *scheduling* - que competem por recursos escassos, também chamados, corriqueiramente, de recursos com capacidade finita.

Como as decisões de nível operacional da empresa eram tomadas apenas com base na experiência dos envolvidos com o planejamento da produção, constatou-se que a empresa necessitava de um procedimento estruturado e/ou ferramentas que auxiliassem a programação da produção.

O propósito do presente trabalho foi desenvolver um método de planejamento/gerenciamento da produção levando-se em consideração as restrições do sistema, aplicando-se as técnicas da Teoria das Restrições, da Programação Linear Inteira e da Simulação de Sistemas, para que fosse possível avaliar as interferências que pudessem ocorrer durante o processo de fabricação de um cilindro de encosto, além de instituir uma melhor gestão do equipamento gargalo, de forma a transformar o processo num fluxo contínuo, sem desabastecimento das linhas. Além disso, o modelo de simulação-otimização, gerado a partir da união dos dois modelos, foi elaborado com o intuito de auxiliar na previsão da data de liberação dos cilindros.

3.2 DESCRIÇÃO DO MODELO

O método apresentado neste trabalho é baseado no Processo Decisório da Teoria das Restrições, proposto por Goldratt (Seção 2.1.2) e nos métodos apresentados na

Seção 2.6.4, especialmente naqueles sugeridos por Morito *et al.* (1999); Granger, Krishnamurthy e Robinson (2002), e Bush, Biles e DePuy (2003).

A Figura 11 exhibe o fluxograma com o método utilizado para desenvolver este trabalho.

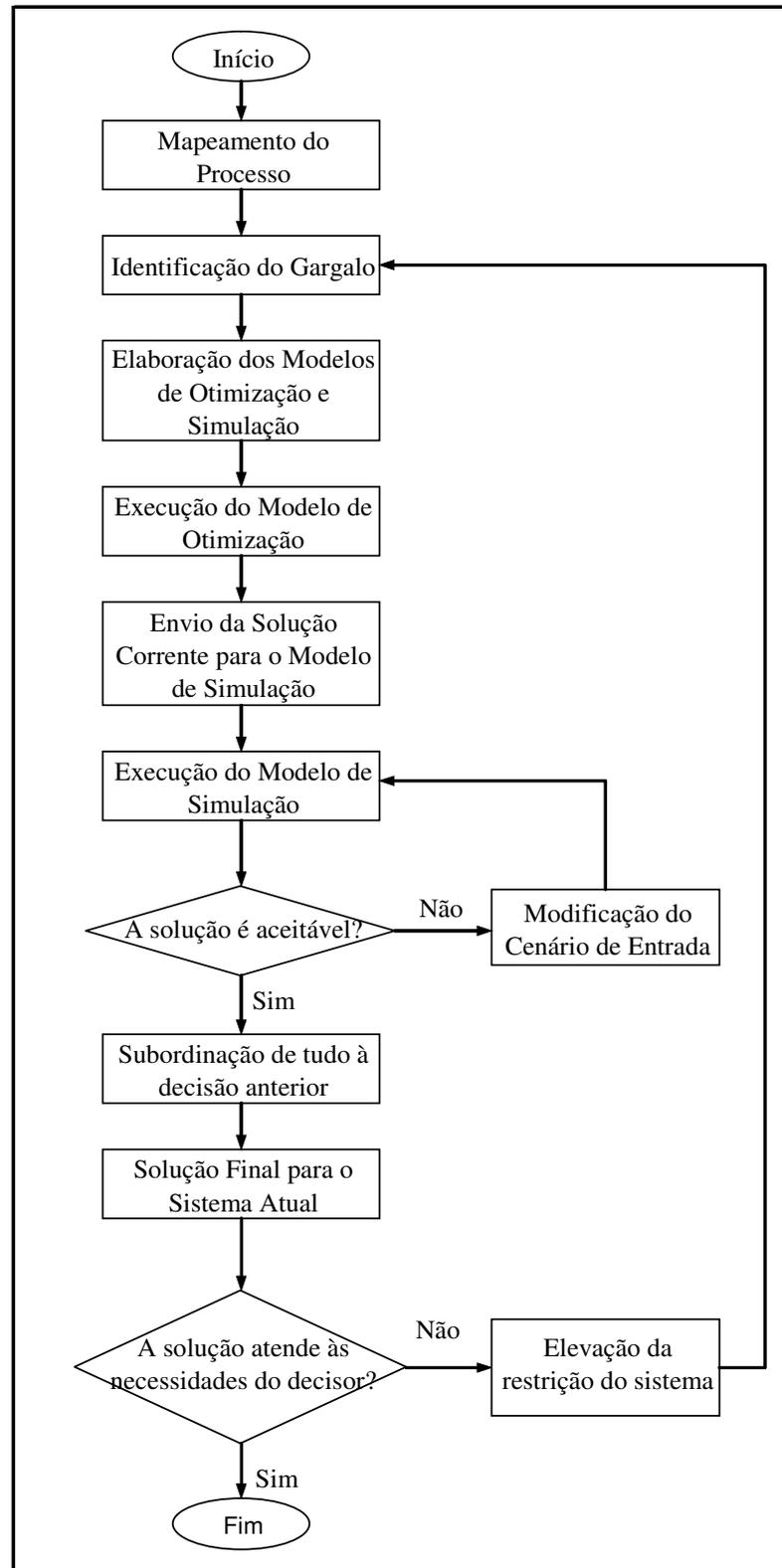


Figura 11 – Método Proposto

3.2.1 Mapeamento do processo

A fim de visualizar-se e de compreender-se tanto as atividades executadas no processo, quanto suas inter-relações, decidiu-se que a primeira etapa do método proposto neste trabalho seria realizar-se o mapeamento do processo.

O mapeamento de processos é uma ferramenta gerencial analítica e de comunicação usada para detalhar processos (tendo como foco os elementos importantes que influenciam seu comportamento) e que têm o objetivo de auxiliar a melhorar os processos existentes ou de implantar uma nova estrutura voltada para processos (CORREIA; ALMEIDA, 2002; LEAL; PINHO; CORREIA, 2005).

De acordo com Correia; Leal; Almeida (2002), esta técnica é extremamente reconhecida pelo importante papel que pode desempenhar ao ajudar a entender as dimensões estruturais de um fluxo de trabalho, e/ou ao dar as direções para um programa de re-projeto das atividades.

Por meio do mapeamento de processos, é possível: identificar as fases do processo que realmente agregam valor ao produto, pontos desconexos ou ilógicos nos processos e as fontes de desperdício; melhorar o entendimento dos processos atuais; eliminar ou simplificar processos que necessitam de mudanças; reduzir a movimentação de materiais e estoques intermediários; reduzir custos no desenvolvimento de produtos e serviços; reduzir falhas de integração entre sistemas; melhorar o desempenho da organização, etc (CORREIA; ALMEIDA; 2002; CORREIA; LEAL; ALMEIDA, 2002; LEAL; PINHO; CORREIA, 2005; PINHO et. al., 2007).

A literatura apresenta diversas técnicas de mapeamento: fluxograma, mapa de processo, mapofluxograma, blueprint, IDEF3, UML, DFD, diagrama de atividades múltiplas (diagrama homem-máquina), etc (MARTIN, 1999; PINHO et. al., 2007). Entretanto, qualquer que seja a técnica adotada, o mapeamento de processos segue, normalmente, as mesmas etapas básicas.

Em primeiro lugar, é necessário entender e levantar os passos do processo, definir suas fronteiras, seus clientes, seus pontos de início e fim, seus principais *inputs* e *outputs*, e os envolvidos no fluxo de trabalho. Geralmente, este levantamento é feito

por meio de entrevistas e reuniões com os responsáveis pelas várias atividades dentro do processo, e por meio de estudos dos documentos disponíveis.

De acordo com Peinado e Graeml (2007), o papel do entrevistador é importante para obter a clareza, o conteúdo e a fidelidade necessários à elaboração do mapeamento do processo, uma vez que os entrevistados, via de regra, terão dificuldades para descrever os passos de seus trabalhos com a clareza e o conteúdo necessários. Assim, o entrevistador deve traduzir o que o executante está dizendo em um diagrama de fluxo e, ao mesmo tempo, solicitar esclarecimentos sobre pontos e fases que o executante possa ter se esquecido de mencionar, não deixando nenhuma parte do processo de fora.

Esta abordagem permite desenvolver um entendimento compartilhado da situação, além de controlar a complexidade da descrição do processo e manter a fidelidade às informações fornecidas pelos participantes do processo.

Após a realização das entrevistas, torna-se necessário transformar os dados e as informações coletadas numa representação visual para identificar gargalos, desperdícios, demoras, duplicação de esforços, etc. A partir de então, deve-se realizar uma análise crítica do processo, identificando se existe alguma deficiência ou algum ponto do mesmo que possa ser melhorado.

A partir daí, deve-se seguir com o desenvolvimento de soluções, avaliação de alternativas e aprovação de propostas.

Para o desenvolvimento deste trabalho, decidiu-se utilizar o fluxograma de processo. Um fluxograma traça o fluxo de informação, pessoas, equipamentos, ou materiais através das várias partes do processo. Fluxogramas são traçados com caixas contendo uma breve descrição de cada uma das etapas do processo e com linhas e setas que mostram a seqüência de atividades.

Esta técnica facilita a visualização e/ou a identificação dos produtos produzidos, das funções, das responsabilidades, dos pontos críticos, dos clientes e dos fornecedores de um processo, e permite identificar oportunidades de melhorar a eficiência dos processos.

Maiores detalhes serão apresentados na Seção 4.2.1.

3.2.2 Identificação do gargalo

A fim de direcionar e de concentrar os esforços nos pontos cruciais do sistema analisado, e com a finalidade de melhorar o seu desempenho, decidiu-se que a segunda etapa do método proposto neste trabalho seria aplicar o primeiro passo do Processo Decisório da Teoria das Restrições (Seção 2.1.2), que consiste em identificar a restrição do sistema.

No Capítulo 4, primeiramente identificou-se a área gargalo do sistema; e, a partir dela, buscou-se os equipamentos que limitavam o seu desempenho.

3.2.3 Elaboração dos modelos de otimização e simulação

A segunda etapa do Processo Decisório da TOC afirma que, uma vez determinados os elementos que restringem o sistema, é necessário decidir como explorá-los, já que o resultado global da empresa está atrelado à utilização das restrições do sistema.

A maneira encontrada neste trabalho para melhorar o aproveitamento da capacidade do gargalo foi a de utilizar-se um modelo de Programação Linear Inteira em conjunto com um modelo de Simulação, uma vez que a complexidade do sistema dificultava a utilização de uma única técnica isoladamente (Seção 4.2.2).

Como será visto na Seção 4.2.2, o modelo de otimização levará em consideração apenas fatores essenciais do problema, enquanto os detalhes serão incluídos no modelo de simulação.

3.2.3.1 Modelo de otimização

Para abordar o problema utilizando a Programação Linear Inteira, este trabalho seguiu a metodologia sugerida por Lachtermacher (2004).

3.2.3.1.1 Definição do problema

Esta é a primeira etapa e consiste em definir o problema da forma mais precisa possível. Quanto mais precisa a definição, mais facilitadas serão as outras etapas (GAVIRA, 2003).

A definição do problema pode, a primeira vista, parecer a mais simples de todas as etapas. Entretanto, uma má definição do problema não resultará em nada além de perda de tempo e de esforço.

A definição de um problema é baseada em três aspectos principais: definição e descrição apropriada dos objetivos do estudo, identificando e explicitando as questões que devem ser respondidas pelo analista; identificação das alternativas de decisão existentes; e reconhecimento das limitações, relações, restrições e exigências do sistema (HILLIER; LIEBERMAN, 2006; LISBOA, 2002; FERNANDES, 2008).

A descrição dos objetivos é uma das atividades mais importantes em todo o processo do estudo, pois será a partir dela que o modelo será elaborado. Da mesma maneira, é essencial que as alternativas de decisão e que as limitações existentes sejam todas identificadas e explicitadas, para que as soluções obtidas ao final do processo sejam válidas e aceitáveis (LISBOA, 2002; MADEIRA JR, 2007).

O modelo de otimização elaborado neste trabalho objetivou responder apenas a uma parte das questões; quanto as demais, foram respondidas pelo modelo de simulação.

Maiores detalhes serão apresentados no Capítulo 4.

3.2.3.1.2 Construção do modelo

Uma característica importante da Pesquisa Operacional que facilita o processo de análise de decisão é a utilização de modelos. Isto permite a experimentação, o que possibilita que uma decisão possa ser melhor avaliada e testada antes de ser efetivamente implementada. A economia de recursos e a experiência adquirida por

meio da experimentação justificam, por si só, a utilização de técnicas de Pesquisa Operacional como instrumentos de administração de empresas (MORAES, 2005).

Dessa forma, ao resolver um problema de Pesquisa Operacional, é necessário modelar o sistema a ser estudado para que seja possível analisar as variáveis internas e externas que o influenciam, assim como o seu inter-relacionamento (MADEIRA JR, 2007).

Um modelo é uma representação de um sistema real que pode ser utilizado para auxiliar a tomada de decisão ou simplesmente para permitir um melhor entendimento de uma determinada situação; e que pode já existir ou ser um projeto aguardando execução. No primeiro caso, o modelo pretende reproduzir o funcionamento de um sistema, de modo a aumentar sua produtividade. No segundo caso, o modelo é utilizado para definir sua estrutura ideal (LACHTERMACHER, 2004; MADEIRA JR, 2007).

A escolha apropriada de um modelo é fundamental para a qualidade da solução fornecida. Se o modelo elaborado tiver a forma de um modelo conhecido, sua solução poderá ser obtida através de métodos matemáticos convencionais. Por outro lado, se as relações matemáticas forem muito complexas, talvez seja necessário utilizar uma combinação de metodologias. Um problema simples pode ser representado por modelos também simples e de fácil solução. Já problemas mais complexos requerem modelos mais elaborados, cuja solução pode se tornar bastante complicada (LISBOA, 2002; FERREIRA, 2006).

Neste trabalho, optou-se por representar o sistema em estudo por meio de um modelo de PLI, pois os recursos e as variáveis de decisão são indivisíveis e porque tanto a função-objetivo como as restrições do problema podem ser representadas por equações/inequações lineares.

Fernandes (2008) afirma que a construção de um modelo matemático, no caso um modelo linear, é a parte mais complicada de ser conseguida, uma vez que não há regras rígidas para realizar esse trabalho. Entretanto, ele sugere um roteiro que auxilia na elaboração de tal modelo:

- a) Definir as Variáveis de Decisão - A primeira fase da elaboração do modelo de Programação Linear consiste em explicitar as decisões que devem ser tomadas e representar as possíveis decisões através das variáveis de decisão;
- b) Definir o Objetivo - Nesta segunda etapa, deve-se identificar claramente qual é o objetivo da tomada de decisão e definir a função-objetivo a ser maximizada ou minimizada;
- c) Definir as Restrições - Finalmente, na terceira fase, cada restrição imposta na descrição do sistema deve ser expressa como uma relação linear, utilizando as variáveis de decisão.

Devido à complexidade do sistema analisado neste trabalho, o modelo de otimização não abrangeu todas as suas etapas. Em vez disso, foram incluídos apenas os detalhes necessários para maximizar a utilização do recurso gargalo. Entretanto para não simplificar demais a modelagem e para não comprometer a qualidade da solução, incorporou-se o restante do sistema num modelo de simulação (Maiores detalhes são apresentados na seção 4.2.2).

Após a elaboração do modelo de Programação Linear Inteira, o passo seguinte foi implementá-lo no *software* XPRESS®, o qual é capaz de resolver de problemas de programação linear, inteira, não-linear e estocástica.

3.2.3.1.3 Solução do modelo

O objetivo desta fase é encontrar uma solução para o modelo proposto. A escolha de uma determinada solução como a melhor de todas depende do objetivo que se deseja atingir e, esse objetivo determina a qualidade dessa escolha (DONATO, 2002).

Ao contrário das outras fases, que não possuem regras rígidas, a solução do modelo é baseada geralmente em técnicas matemáticas existentes. A escolha do método de resolução deve ser feita de acordo com o tipo de modelo matemático criado

e de acordo com as análises e questões para as quais o modelo deve fornecer subsídios. (LISBOA, 2002; FERNANDES, 2008).

No caso de um modelo matemático, a solução é obtida pelo algoritmo mais adequado, em termos de rapidez de processamento e precisão da resposta. Isto exige um conhecimento profundo das principais técnicas existentes (LISBOA, 2002).

Além disso, para obter resultados significativos a partir de modelos, uma boa capacidade de análise é fundamental. Habilidade e capacidade de análise podem ser adquiridas por meio da experiência prática e do entendimento da teoria por trás dos modelos matemáticos. A experiência acumulada por um tomador de decisão é importante para guiá-lo na escolha e na utilização de métodos quantitativos; enquanto que a análise das decisões decorrentes do emprego desses métodos ajuda-o a aumentar sua intuição e seu conhecimento sobre o problema, realimentando o processo de tomada de decisão (FERREIRA, 2006).

3.2.3.1.4 Validação do modelo

Esta etapa do processo consiste em verificar se o modelo adotado e a solução obtida por meio dele são compatíveis com a realidade do problema (FERREIRA, 2006).

Um modelo é considerado válido se ele for capaz de fornecer uma previsão aceitável do comportamento do sistema, levando-se em conta sua inexatidão em representar o mesmo (LISBOA, 2002).

Um método comumente utilizado para testar a validade de um sistema é analisar seu desempenho com dados passados, e verificar se ele consegue reproduzir o mesmo comportamento que o sistema apresentou. Se todas as características relevantes do problema tiverem sido levadas em conta na modelagem, a solução obtida será implementável (LISBOA, 2002; FERREIRA, 2006).

É importante observar que este processo de validação não se aplica a sistemas inexistentes, ou seja, em projeto. Nesse caso, a validação deve ser realizada pela verificação da correspondência entre os resultados obtidos e algum comportamento

esperado do novo sistema (LISBOA, 2002).

A validação do modelo matemático deste trabalho foi realizada através da avaliação dos resultados por especialistas do sistema, e através da comparação dos resultados do modelo com os resultados obtidos na realidade.

3.2.3.1.5 Implementação da solução

De acordo com Ferreira (2006, p.7), “a implementação de uma solução validada envolve transformar a solução, obtida a partir do modelo, em um conjunto de instruções na linguagem operacional usada pelos administradores do sistema”.

Por ser uma atividade que altera uma situação existente, a implementação do modelo é uma das etapas críticas do estudo. É conveniente que ela seja controlada pela equipe responsável, pois, eventualmente, os valores da nova solução, quando levados à prática, podem demonstrar a necessidade de correções nas relações funcionais do modelo, exigindo a reformulação do mesmo em algumas de suas partes (LISBOA, 2002).

A partir do momento que o modelo de Programação Linear Inteira foi validado, este passou a ser utilizado pelos funcionários do departamento de Planejamento e Controle da Produção da empresa para melhorar o planejamento e o gerenciamento da produção.

3.2.3.2 Modelo de simulação

Para abordar o problema utilizando a Simulação de Sistemas, este trabalho seguiu as metodologias sugeridas por Bateman *et al.* (2002), Chwif e Medina (2006) e Fernandes (2008), como pode ser visto na Figura 12.

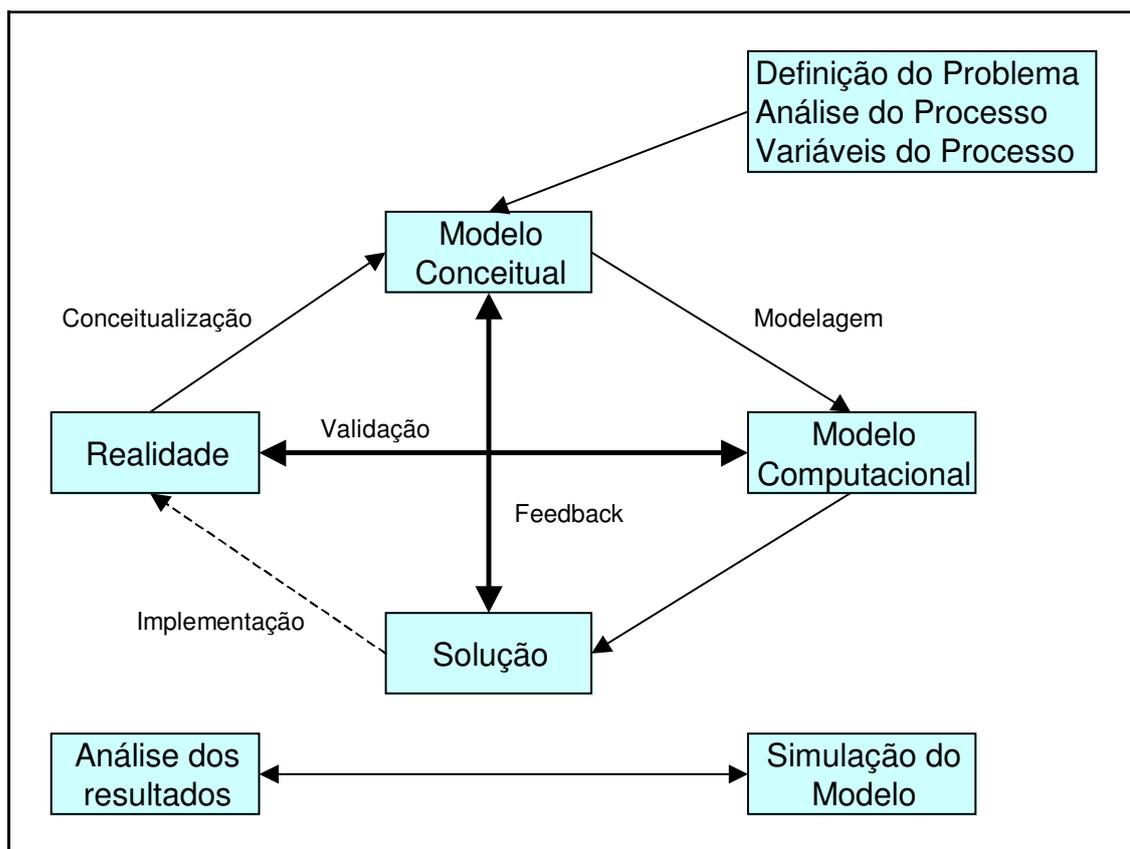


Figura 12 – Desenvolvimento de um modelo de simulação
(Fonte: Adaptado de FERNANDES, 2008)

3.2.3.2.1 Definição do problema e estabelecimento de objetivos

Segundo Chwif e Medina (2006), um sistema sempre pressupõe uma interação de causa-efeito entre os elementos que o compõe. Para que tais elementos e para que as interações entre eles possam ser identificadas, o objetivo do sistema deve ser estabelecido com clareza.

Obter uma definição precisa e sucinta do problema a ser estudado pode ser mais difícil do que parece. De acordo com Chwif e Medina (2006), para iniciar o processo de simulação, o analista deve entender claramente o sistema a ser simulado, assim como seus objetivos. Uma das formas utilizadas para conseguir isso é através da discussão do problema com especialistas.

Uma vez entendido o processo, é necessário definir claramente qual é o problema a ser analisado, quais são as perguntas a serem respondidas, quais são as hipóteses a serem testadas e quais são os efeitos a serem estimados, garantindo que o problema

esteja completamente entendido e que exista uma solução técnica para resolvê-lo. Ainda assim, reformulações do problema podem ser requeridas ao longo do projeto a medida que se for conhecendo mais a respeito do sistema. (BATEMAN *et al.*, 2002; PEIXOTO, 2006).

Deve-se ter sempre em mente que os objetivos de um estudo de simulação fluirão naturalmente a partir da definição do problema, uma vez que o propósito de se executar mais tarde uma experimentação com o modelo será sempre o de resolver esse problema (BATEMAN *et al.*, 2002).

Como visto anteriormente no item 3.2.2.1.1 não será possível responder a todas as perguntas do problema por meio do modelo de PLI; com isto, para complementar o resultado do modelo de otimização, torna-se necessária a elaboração do modelo de simulação.

3.2.3.2.2 Formulação e planejamento do modelo

Uma vez que o problema a ser estudado e os objetivos da simulação tenham sido determinados, deve-se definir quais cenários alternativos serão considerados, como cada cenário deverá ser avaliado e quais dados serão necessários. Deve-se também especificar a abrangência do modelo, os recursos que serão necessários (orçamento, equipamentos, etc.) e o cronograma de atividades (PEIXOTO, 2006). Além disso, o modelador/analista poderá desenvolver, nesta etapa, uma estrutura conceitual para o modelo, a qual deverá incluir, via de regra, eventos e elementos fundamentais (BATEMAN *et al.*, 2002).

Uma pergunta fundamental deve ser respondida nesta etapa: Que nível de detalhes deve ser considerado?

A resposta a esta questão se apóia no entendimento sobre o que não é simulação. A simulação não é uma ferramenta com a qual o modelador/analista se esforça em criar uma replica exata do sistema. O tempo e o custo requeridos para construir um modelo com todos os detalhes que afetam cada elemento do sistema em estudo não justificariam os resultados. Assim, é necessário identificar e incluir apenas aqueles fatores que apresentem impacto significativo no comportamento do modelo, que

devem estar em conformidade com o propósito da simulação (BATEMAN *et al.*, 2002). A Figura 13 apresenta um diagrama esquemático que indica quando os parâmetros do modelo devem ser refinados ou simplificados (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

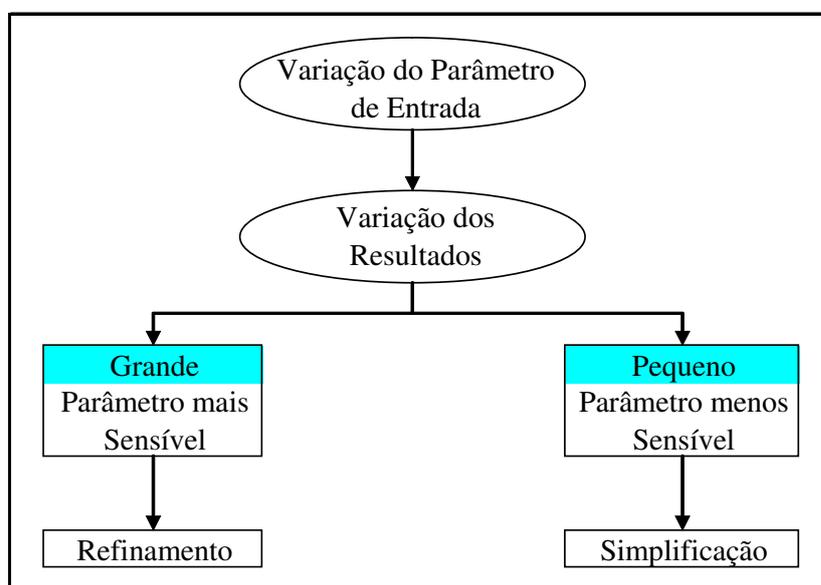


Figura 13 – Nível de detalhes a ser Incorporado ao Modelo
(Fonte: OLIVEIRA *et al.*, 2007)

3.2.3.2.3 Coleta e Tratamento de dados

De acordo com Gavira (2003), a coleta se refere a dados quantitativos e qualitativos sobre as entradas e saídas do sistema, assim como informações sobre seus componentes e suas relações.

Dessa forma, a etapa de coleta de dados tem início com a escolha adequada das variáveis de entrada do sistema a ser simulado, cabendo ao modelador/analista decidir quais dados serão necessários (GAVIRA, 2003; CHWIF; MEDINA, 2006).

Algumas organizações possuem informações muito detalhadas sobre alguns aspectos da sua operação, tais como, frequência de parada de máquinas ou tempo de serviço em um determinado posto de trabalho e, ainda, informações muito superficiais de outras áreas (BATEMAN *et al.*, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

Se os dados estiverem disponíveis, e se não estiver prevista nenhuma grande alteração no comportamento do sistema num futuro próximo, o analista poderá utilizar tais informações para alimentar seu modelo (CHWIF; MEDINA, 2006).

Entretanto, se apenas dados insuficientes ou incompletos estiverem disponíveis, o modelador/analista deverá conseguir assistência adicional daqueles mais familiarizados com o sistema, reunir informações por si próprio, realizar a coleta e o tratamento estatístico dos dados, ou estar determinado a acreditar e se apoiar em alguns pressupostos na construção do modelo, devendo realizar uma análise de sensibilidade posterior neste último caso (BATEMAN *et al.*, 2002).

A ênfase inicial deve ser dada na coleta de fatos fundamentais, informações e estatísticas que algumas vezes se referem a dados de âmbito global. Isso vai permitir ao modelador/analista solicitar informações mais detalhadas de outros participantes, que devem começar reunindo dados que serão necessários em estágios posteriores do projeto (BATEMAN *et al.*, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

A coleta de dados é um processo contínuo. A medida em que o estudo de simulação progride, os dados globais estarão sendo incorporados ao modelo e a coleta de dados mais específicos receberá atenção crescente (BATEMAN *et al.*, 2002).

Após a coleta de dados, é necessário tratá-los. O tratamento consiste em utilizar técnicas para descrever os dados levantados, identificar as possíveis falhas nos valores amostrados e aumentar o conhecimento a respeito do fenômeno, com o intuito de obter modelos probabilísticos que permitam inferir as propriedades de um dado fenômeno aleatório e que possam ser incorporados ao modelo de simulação. Nesta fase é comum emprego de pacotes comerciais (*best fitting*), tais como o *ExpertFit*, o *Arena Input Processor*, *Stat::Fit e BestFit* (LEAL, 2008).

Esta etapa merece especial atenção do modelador/analista, pois a utilização de dados de entrada equivocados ou pouco trabalhados durante a simulação levarão a resultados também equivocados (LEAL, 2008).

Os dados utilizados neste trabalho estavam disponíveis no sistema da empresa – ERP (*Enterprise Resource Planning*) – onde são mantidos atualizados pelas engenharias (Processo e Produto).

3.2.3.2.4 Desenvolvimento do modelo

Todos os modelos de simulação são desenvolvidos para representar algum tipo de sistema. Basicamente, os componentes de um sistema são as entidades dinâmicas, os recursos e as filas (PAIVA, 2005; PEIXOTO, 2006):

Entidades dinâmicas são os objetos que se movem através do sistema e que necessitam dos serviços e/ou processamento de alguns dos recursos do sistema. Entidades têm atributos que descrevem suas características; e passam por eventos, que são ocorrências instantâneas que podem alterar o estado do sistema ou de seus atributos. Uma entidade pode ser classificada como temporária, quando entra no sistema, percorre seu ciclo de vida e abandona o sistema; ou permanente, quando executa sua função sem deixar o sistema.

Recursos são as entidades estáticas que promovem o serviço ou processam uma entidade, podendo ser máquinas, pessoas, correias transportadoras, etc. Os recursos estão relacionados a atividades que demandam um período de tempo especificado.

As filas constituem locais de espera onde as entidades dinâmicas aguardam a sua vez de seguir através do sistema.

De acordo com Cardoso, Vinhoza e Neto (2007), um modelo de simulação nada mais é do que um diagrama em blocos que descreve a interconexão dos vários subsistemas componentes; sendo que cada bloco é constituído por uma expressão matemática, ou conjunto de equações, que definem o relacionamento entre entrada e saída. Além disso, em geral, os modelos de simulação computacional são baseados em distribuições estatísticas que introduzem variações randômicas dentro do modelo, criando estatísticas que validam o experimento (KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008).

Dessa forma, alguns autores, como Banks *et al.* (2001), afirmam que a construção do modelo é mais uma arte do que uma ciência.

Um modelo normalmente iniciará como uma grande abstração do sistema. A medida em que se procede ao seu desenvolvimento, crescentes níveis de detalhes irão sendo adicionados (BATEMAN *et al.*, 2002). Segundo Chwif e Medina (2006), “abstrair significa identificar o que realmente é importante no sistema e trazer para o

modelo”. Contudo, a complexidade do modelo não deve exceder a necessidade de abstração requisitada pelos objetivos de estudo, uma vez que a inclusão desnecessária de detalhes irrelevantes resultará em altos custos de modelagem, tempos de resposta mais longos e maior esforço computacional (GAVIRA, 2003).

Dessa forma, um modelo simples é sempre preferível a um modelo complexo, uma vez que ele pode ser compreendido, modificado, implementado e analisado mais facilmente, tanto para quem o criou, quanto para o seu usuário final (CHWIF; MEDINA, 2006).

Entretanto, o analista deve ter o cuidado de não simplificar o modelo demasiadamente, pois, apesar dos resultados válidos, um modelo reduzido acaba perdendo a sua flexibilidade, podendo ser usado somente em casos muito específicos. Além disso, um modelo excessivamente simples pode se tornar inválido (CHWIF; MEDINA, 2006).

Dessa forma, a modelagem deve ser capaz de compreender a realidade dos sistemas em estudo, baseando-se em fenômenos conhecidos, permitindo a simulação e a realização de experimentos que possibilitem prever o comportamento do sistema (GUIMARÃES *et al.*, 2008), mas de tal forma que o modelo seja “simples o suficiente para ser manuseável e preciso o suficiente para ser útil” (SELLITTO; BORCHARDT; PEREIRA, 2008, p.5).

A Figura 14 mostra a interação entre a realidade, o modelo de simulação computacional e o usuário (LEAL; ALMEIDA, 2004).

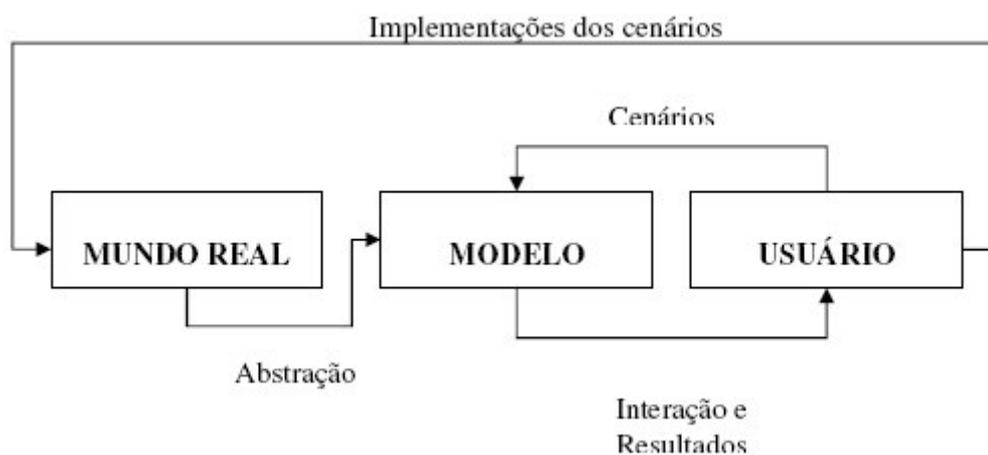


Figura 14 - Interação entre a realidade, o modelo de simulação e o usuário.
(Fonte: LEAL; ALMEIDA, 2004)

De acordo com Bateman *et al.* (2002, p.39), o modelador/analista “deve ser capaz de pensar abstratamente em conceitos correlatos de sistemas do mundo real para que haja congruência entre a estrutura do modelo e a ferramenta de modelagem em uso”. A construção do modelo pode acontecer conjuntamente com a coleta de dados.

A importância de intercâmbio regular com usuários finais do modelo durante o processo de desenvolvimento não pode ser subestimada (BATEMAN *et al.*, 2002).

A etapa de modelagem pode ser dividida em duas etapas: a elaboração do modelo formal ou conceitual e a elaboração do modelo computacional.

Segundo Law (1991), a etapa de elaboração do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação, embora muitos não dêem a devida atenção a ela.

Para Balci (1997), o modelo conceitual pode ser utilizado como uma ferramenta de controle do processo de modelagem e simulação; podendo auxiliar na avaliação de conceitos, eficácia e erros, além de servir como base para o projeto de modelagem e simulação, e de auxiliar no processo de verificação e validação do modelo computacional.

Criar um modelo formal ou conceitual nada mais é do que representar um sistema real num diagrama de fluxo lógico. O diagrama representará o problema através de associações feitas entre as entidades e as atividades (Figura 15). Um diagrama bastante utilizado para esse fim é o Diagrama Ciclo Atividade (*Activity Cycle Diagram - ACD*). Esse diagrama é constituído por filas e atividades, cujos relacionamentos estabelecem o ciclo de vida de cada entidade participante do sistema (COSTA, 2002).

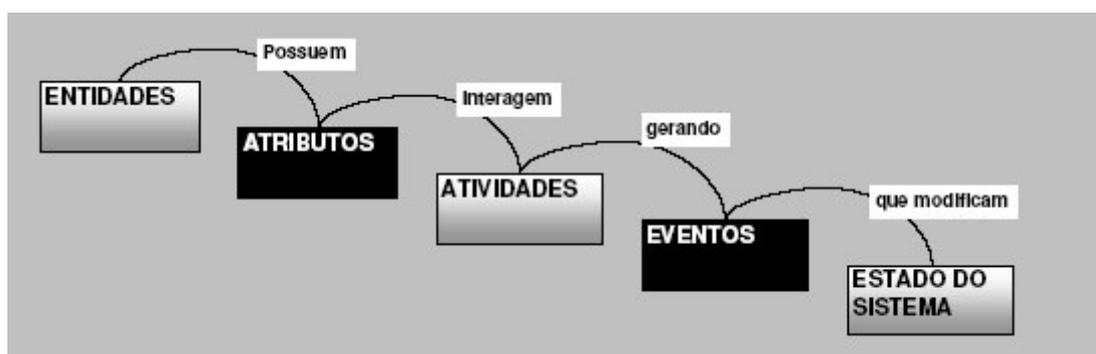


Figura 15 – Interações entre os componentes de um modelo de simulação (Fonte: HENRIQUES; GONÇALVES, 2008)

No ACD, uma entidade é qualquer elemento do sistema que possa reter sua identidade ao longo do tempo. As entidades, em cada instante da simulação podem estar aguardando em filas ou participando de alguma atividade (COSTA, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

De uma maneira geral, a representação dos diagramas ACD é feita através de círculos e retângulos, simbolizando respectivamente filas e atividades. Os retângulos representam as atividades (estados ativos), que envolvem, normalmente, a cooperação de diferentes entidades. As durações destas atividades normalmente são baseadas em funções, probabilísticas ou não. Os círculos representam filas (estados passivos). As filas não envolvem cooperação entre diferentes entidades e são compostas de entidades que aguardam alguma mudança no sistema. Essas mudanças são provocadas pela ocorrência de um evento, que liberará outras entidades que poderão ser utilizadas na realização de uma atividade comum. O tempo que uma entidade ficará aguardando numa fila não pode ser determinado a priori, pois ele depende da atividade imediatamente anterior e da atividade imediatamente posterior à fila (COSTA, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

O ciclo de vida das filas e das atividades é definido para cada entidade. No ACD, as filas e as atividades devem estar sempre dispostas alternadamente, em qualquer ciclo de vida, não podendo ocorrer atividades ou filas em seqüência. No caso em que uma entidade não tenha que esperar para realizar uma atividade é criada no ACD uma fila fantasma, onde a entidade esperará zero unidades de tempo. Um ACD completo consiste da combinação de todos os ciclos de vida individuais de cada uma das entidades do sistema (COSTA, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

De acordo com Chwif e Medina (2006), a utilização do ACD apresenta algumas vantagens e algumas desvantagens. Dentre as vantagens, vale ressaltar a habilidade de mostrar, explicitamente, as interações entre os elementos do sistema e seus fluxos; a facilidade de entendimento e utilização; e a sua simplicidade, uma vez que é possível desenvolver um modelo conceitual de simulação utilizando apenas dois símbolos. Além disso, o ACD pode ser utilizado para realizar uma simulação manual (para verificar erros de lógica) e para servir de estrutura básica para alguns simuladores.

Dentre as desvantagens, deve-se destacar que os diagramas vão se tornando ininteligíveis a medida que a complexidade do modelo aumenta. Além disso, torna-se difícil capturar toda a lógica do modelo no formato ACD, especialmente em se tratando de um modelo de lógica complexa. Por exemplo, o ACD não mostra claramente disciplinas de fila (CHWIF; MEDINA, 2006).

Uma vez elaborado o modelo conceitual, torna-se possível implementar o modelo em alguma linguagem de simulação ou simulador, criando, assim, o chamado modelo computacional (CHWIF; MEDINA, 2006). Este modelo é o que será utilizado como instrumento para produzir resultados e conclusões, que poderão ser implementadas após a validação no mundo real. Este modelo poderá funcionar, também, como um meio de comunicação entre os envolvidos no processo de tomada de decisão (ANACLETO; ACHÃO FILHO; OLIVEIRA, 2008).

O ideal é que, ao final, o modelo seja simples de ser entendido, controlado e manipulado pelo usuário; robusto; isto é, não deve dar respostas incoerentes; completo em questões importantes; e adaptativo, isto é, deve ter um procedimento simples para modificação e atualização (GAVIRA, 2003).

Atualmente, com o desenvolvimento dos computadores e com a criação de *softwares* de simulação, a confecção dos modelos computacionais não é uma tarefa das mais árduas. A maioria dos simuladores possui uma interface gráfica interativa, bastando definir o modelo através dos construtores básicos que eles oferecem e interligá-los segundo o fluxo lógico construído no modelo conceitual. Finalmente, basta definir o tempo de simulação e executar o modelo (CHWIF; MEDINA, 2006).

É aconselhável implementar o modelo computacional em pequenas partes, testando cada uma dessas partes separadamente, a medida que forem sendo concluídas, para somente então, executar o modelo maior. Isso permite encontrar erros de sintaxe e até mesmo de lógica, além de facilitar o processo de construção do modelo (CHWIF; MEDINA, 2006).

Outra questão importante que deve ser ressaltada é que o fator mais importante e crítico para o sucesso de um estudo de simulação não é nem o *software*, nem o *hardware* utilizados, mas sim o analista que está realizando o estudo. Entretanto, não é possível negar que a seleção adequada do *software* e do *hardware* tem influência,

principalmente, sobre o tempo total de estudo de simulação. As linguagens de simulação, tais como GPSS/H, SIMAN V, SIMSCRIPT 11.5, SLAM II, são mais genéricas e flexíveis; no entanto, são mais complexas e exigem maiores habilidades e recursos dos programadores. Já os simuladores, como AutoMod, Factor/AIM, ProModel, Taylor II, Arena, são *softwares* criados para simular processos previamente definidos para um tipo específico de aplicação. Eles procuram facilitar o projeto de simulação de processos genéricos tornando mais rápidas as fases de modelagem e teste de experimentos. Entretanto, embora haja uma simplificação no trabalho de programação, a flexibilidade e a eficiência computacional são, em parte, sacrificadas. Além disso, a manutenção tende a ser custosa, principalmente pela escassez de pessoal familiarizado com esses programas (PAIVA, 2005; CHWIF; MEDINA, 2006; PEIXOTO, 2006).

De acordo com Paiva (2005), as características desejáveis nos *softwares* de simulação são: flexibilidade de modelagem, facilidade para o desenvolvimento e rastreabilidade do modelo, execução rápida, capacidade de animação, capacidades estatísticas e relatórios dos resultados.

Informações sobre os softwares de simulação disponíveis podem ser encontrados na revista eletrônica *OR/MS Today* (<http://lionhrtpub.com/orms/>), mantida pelo *Institute for Operations Research and the Management Sciences – INFORMS*; e no *site* da ARGESIM (<http://www.argesim.org/comparisons/index.html>). O ARGESIM é um grupo europeu de pesquisa e divulgação em simulação (CHWIF; MEDINA, 2006).

Neste trabalho, o modelo computacional foi implementado no *software* Arena® Versão 10.0, da empresa ROCKWELL SOFTWARE, como será apresentado no Capítulo 4, juntamente com o modelo conceitual.

3.2.3.2.5 Verificação

A etapa de verificação está relacionada ao modo como o modelo está sendo implementado, e consiste na eliminação dos erros do modelo computacional (CHWIF; MEDINA, 2006).

Um modelo estará pronto para ser verificado quando este funcionar da maneira como o modelador/analista pretendia. A verificação do modelo pode ser efetuada executando-se a simulação e monitorando-se de perto a sua operação e seus principais componentes (BATEMAN *et al.*, 2002; PEIXOTO, 2006).

Várias ferramentas podem ser utilizadas para verificar um modelo. A animação pode ser efetuada em velocidade adequada para analisar o movimento das entidades no sistema. Variáveis e contadores podem ser apresentados na tela da animação ou monitorados por meio de plotagem para assegurar que as variáveis estejam respondendo ao modelador/analista. As saídas do modelo de simulação podem ser também comparadas com as previsões de outros modelos analíticos, se disponíveis.

Esta ação é facilitada com o uso de valores constantes, ou simplificados para as variáveis de entrada. Outra forma utilizada para verificar um modelo é utilizar o depurador que acompanha o *software* de simulação. Através dele torna-se possível fazer com que a simulação “ande passo a passo”, permitindo visualizar os eventos que estão ocorrendo, assim como os valores das variáveis do modelo. Finalmente, pode-se implementar o modelo e deixar que outra pessoa verifique onde o modelo não está funcionando adequadamente (BATEMAN *et al.*, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

Chwif e Medina (2006) afirmam que a confecção do modelo em partes facilita a identificação de erros, pois permite uma verificação focada em cada parte construída. Esta técnica de verificação complementa a idéia de que o modelo não deve ser construído na sua forma final logo na primeira vez, mas incrementado à medida que o modelador realiza a verificação da versão anterior.

A verificação do modelo desenvolvido neste trabalho foi efetuada executando-se a simulação e monitorando-se de perto a sua operação e seus principais componentes. Para isso, foram utilizados as animações, os contadores, e o depurador que acompanham o software onde o modelo foi implementado.

3.2.3.2.6 Validação

A validação está ligada ao modelo conceitual, estando relacionada com aquilo que foi modelado (CHWIF; MEDINA, 2006). A validação é o processo de se

assegurar que o modelo criado reflete com fidelidade a operação do sistema real em estudo (respeitando-se um intervalo de aceitação para as variáveis analisadas), de tal forma que dê encaminhamento ao problema definido (CHWIF; MEDINA, 2006; MONTEVECHI *et al.*, 2007). Um erro na etapa de validação pode conduzir a interpretações equivocadas e, conseqüentemente, em algumas situações, levar a uma conclusão errada (KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008). Dessa forma, testar a validação deve ser um esforço cooperativo em equipe entre o modelador/analista, potenciais usuários e outras pessoas familiarizadas com a operação real do sistema (BATEMAN *et al.*, 2002).

Uma técnica para validar um modelo de simulação consiste em escolher uma pessoa que entenda bem do sistema (especialista) que foi simulado e apresentar a ela dois conjuntos de dados de saída, um proveniente do sistema real e outro do modelo de simulação. Se o especialista não conseguir distinguir se os resultados são oriundos do sistema real ou do modelo de simulação, então o modelo poderia, ser considerado “válido” (LEAL, 2008).

Um outro método de se testar um modelo consiste em realizar alterações nos dados de entrada e verificar se o mesmo responde às mudanças da mesma forma que o sistema real. Alterando o valor de um parâmetro de entrada e comparando o impacto com as respostas conhecidas do sistema, é possível estabelecer a credibilidade de um modelo. Os resultados deste tipo de teste servirão também como uma análise de sensibilidade para identificar os tipos de informação que merecem esforço adicional de junção de dados. Uma outra forma de validação estabelece o uso de dados de entrada históricos para alimentar o modelo. As saídas do modelo devem ser então comparadas com as saídas históricas para se determinar se o modelo consegue reproduzir satisfatoriamente o comportamento do sistema real (BATEMAN *et al.*, 2002; CHWIF; MEDINA, 2006).

É possível ainda utilizar modelos anteriormente criados para buscar indícios de validade do modelo atual. Em muitos casos, o modelo que está sendo desenvolvido pode partir de um modelo já validado, o que facilitaria este processo. Finalmente, pode-se optar por desenvolver dois modelos separadamente. Desta forma, se as duas equipes (cada uma com um modelo próprio) desenvolverem modelos similares, isto

seria um bom indicador de validade do modelo. O problema desta técnica é que ela é muito onerosa, devendo ser utilizada somente em situações críticas, como sistemas em que haja perigo de perdas de vidas humanas (CHWIF; MEDINA, 2006).

De acordo com Leal (2008), a validação realizada através da comparação dos resultados fornecidos pelo modelo e dos resultados obtidos no sistema real deve ocorrer através de testes estatísticos, tais como o teste F , o teste t , etc, apresentados em seu trabalho.

Embora a validação e a verificação do modelo tenham sido apresentadas neste trabalho após a construção do modelo computacional, na realidade estas etapas devem acompanhar todas as etapas do projeto, sendo, portanto, um processo contínuo (Figura 16).

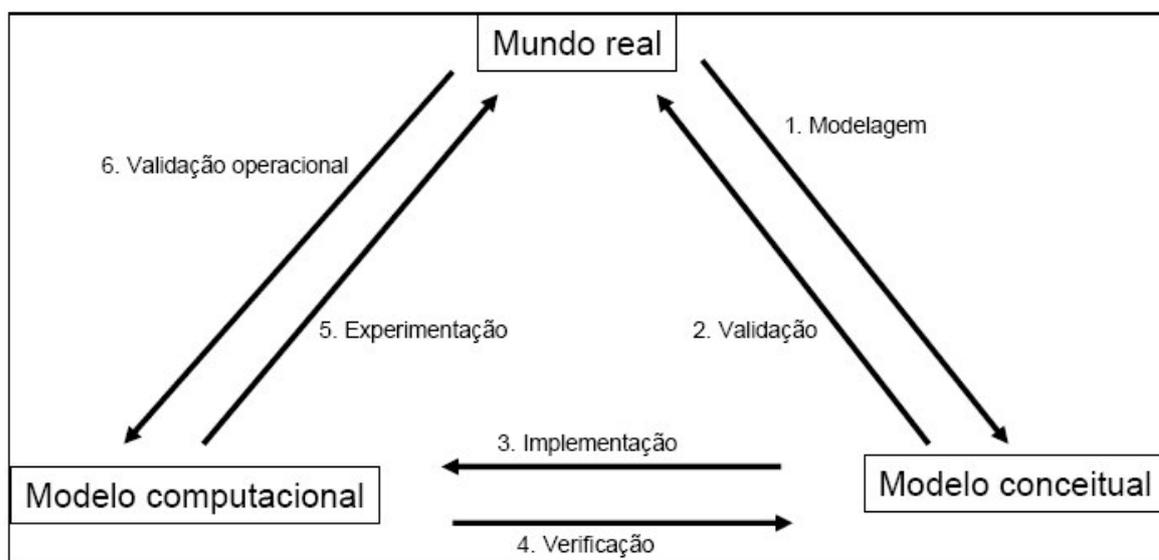


Figura 16 - A verificação e validação em um projeto de simulação.
(Fonte: Chwif e Medina, 2006)

É importante ressaltar que os conceitos de validação e verificação são diferentes. É possível existir um modelo que foi verificado (não apresentando problemas), mas que é completamente inválido, uma vez que não consegue representar adequadamente o sistema real (CHWIF; MEDINA, 2006).

O modelo criado neste trabalho foi validado por meio da utilização de dados históricos e da comparação das saídas do modelo com os resultados reais.

A validação do modelo será apresentada com maiores detalhes no Capítulo 4.

3.2.3.2.7 Experimentação

Depois de concluir as etapas de verificação e validação, o modelo de simulação está pronto para ser utilizado.

A experimentação consiste no desenvolvimento de procedimentos e testes para analisar e comparar alternativas, maximizando a utilidade da informação produzida pela execução da simulação, minimizando o esforço (BATEMAN *et al.*, 2002).

O ideal é que o modelador/analista e demais envolvidos no projeto, tenham pelo menos algumas idéias preliminares sobre as alternativas de soluções a serem avaliadas. Antes de avaliar cada uma delas com o modelo, o especialista em simulação deverá determinar o tempo para simulação e o período de aquecimento (*warm-up*), se necessário, visando obter resultados aceitáveis (BATEMAN *et al.*, 2002).

O modelador/analista irá então considerar a variação dos resultados de saída e determinar o número de replicações necessárias para obter uma amostragem estatística confiável (BATEMAN *et al.*, 2002).

Uma das preocupações para o analista nesta etapa do processo é determinar o momento em que o modelo passa a atuar em regime permanente. Durante o regime transitório, o desempenho do sistema está fortemente relacionado com as suas condições iniciais. Dessa forma, o regime transitório, além de ser mais complexo e pouco conclusivo, pode afetar perigosamente os resultados de uma simulação, uma vez que as condições iniciais do sistema nem sempre são as mesmas. (CHWIF; MEDINA, 2006).

A partir de um certo momento, o sistema passa a se comportar do modo esperado pelo analista, não sendo mais afetado por suas condições iniciais. A partir desse momento, o modelo passa a atuar em regime permanente, podendo ser utilizado satisfatoriamente (CHWIF; MEDINA, 2006).

Para eliminar os problemas causados pelo regime transitório, Chwif e Medina (2006) indicam três alternativas: simular por um período longo de tempo, de maneira que o número de amostras em regime transitório seja desprezível em relação ao número de amostras em regime permanente; eliminar o período de transição utilizando

alguma técnica apropriada; ou iniciar a simulação com o sistema dentro do regime permanente.

Deve-se notar que, na prática, essa última alternativa dificilmente pode ser aplicada em modelos de sistemas que ainda não existem na realidade, pois não se conhece como é o estado exato do sistema em regime permanente.

A alternativa que será utilizada neste trabalho é a segunda. Assim, todos os valores dos dados de saída gerados durante o período de aquecimento serão eliminados.

Nesta técnica, o período inicial da simulação ocorre normalmente; entretanto, não será coletada nenhuma informação durante o mesmo. De acordo com Chwif e Medina (2006), “seria como se a simulação estivesse em um período de aquecimento para que pudesse ser utilizada logo em seguida”.

Segundo Chwif; Medina (2006) e Fernandes (2008), uma forma de se determinar o período de *warm-up* é através da observação. Nesta técnica, o analista determina os parâmetros de análise e realiza diversas simulações, variando o período de *warm-up* e anotando os resultados. A seguir, de posse desses resultados, tenta-se determinar a partir de que momento o parâmetro que está sendo analisado parece não mais estar sendo influenciado pelas condições iniciais do sistema. Finalmente, acrescentando um fator de segurança de 20% a 30% sobre o valor em que tem início a estabilização da variável resposta, obtém-se o período de aquecimento do sistema. Como regra prática, devem ser realizadas cinco replicações para cada valor de *warm-up*, pois a saída do modelo tende a ser muito caótica, dificultando a análise a partir de apenas uma única replicação.

Outro fator importante a ser considerado pelo analista antes de utilizar o modelo é determinar se será utilizada a simulação terminal ou a simulação não-terminal (CHWIF; MEDINA, 2006).

Finalmente, antes de utilizar o modelo, o analista deve determinar o número de replicações que deve ser realizado durante a simulação, uma vez que os modelos de simulação lidam com números aleatórios (CHWIF; MEDINA, 2006).

O intervalo de confiança para a média da variável do sistema que está sendo analisada é dado pela Equação 15 (COSTA NETO, 2002):

$$P\left[\bar{X}\left(1-\frac{r}{100}\right) \leq \mu \leq \bar{X}\left(1+\frac{r}{100}\right)\right] = 1-\alpha \quad (15)$$

onde: \bar{X} : Valor inicialmente estimado para a média amostral \bar{X} ;
 r: Precisão desejada (em %);

Considerando: σ : Desvio padrão conhecido;

n: tamanho da amostra de resultados da variável de interesse;

α : nível de confiança;

Z: Normal (0,1),

Pode-se escrever:
$$P\left[\bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right] = 1-\alpha \quad (16)$$

Logo:
$$\frac{Z_{\alpha/2}}{\bar{X}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{r}{100} \quad (17)$$

Portanto:
$$n = \left(\frac{100 \cdot Z_{\alpha/2} \cdot \sigma}{r \cdot \bar{X}}\right)^2 \quad (18)$$

No caso de desvio padrão desconhecido, deve-se utilizar o desvio padrão amostral (s) e substituir a distribuição Normal pela distribuição *t-Student*. Assim:

$$n = \left(\frac{100 \cdot t_{n-1, \alpha/2} \cdot s}{r \cdot \bar{X}}\right)^2 \quad (19)$$

Para determinar o número de replicações, deve-se utilizar a Equação 19. Para isso, é necessário estimar, inicialmente, um valor para a média amostral e definir quais são a precisão e a confiança estatística desejadas, obtendo-se, assim, um primeiro valor para “n”. A seguir, realiza-se uma simulação com o número de replicações encontrado, calcula-se o valor médio da variável resposta fornecido pelo modelo computacional e compara-se este valor com o valor estimado anteriormente. Se o valor encontrado com a simulação for maior ou igual ao que foi admitido anteriormente, o valor de “n” obtido pela Equação 19 será o número de replicações a ser utilizado no modelo

computacional. Caso contrário, deve-se recalcular o valor de “n”, utilizando a média da variável resposta obtida com a simulação como estimativa para o novo valor da média amostral, e repetir o processo (COSTA NETO, 2002; FERNANDES, 2008).

3.2.3.2.8 Análise dos resultados e apresentação

Realizadas todas as etapas anteriores, obtém-se um modelo de simulação que já pode ser utilizado para testar diversas alternativas para o sistema real antes de implementá-las na prática, tornando-se, assim, uma poderosa ferramenta para a tomada de decisão (CHWIF; MEDINA, 2006).

Vale ressaltar, porém, que a Simulação não é uma ferramenta mágica que substitui o trabalho de interpretação, mas sim uma importante ferramenta capaz de fornecer resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica de um sistema, permitindo uma interpretação mais profunda e abrangente, auxiliando na explicação, compreensão e melhoria do mesmo. (DUARTE, 2003).

Para decidir qual das alternativas testadas apresenta o melhor desempenho, o analista deve realizar uma análise estatística dos resultados, como a comparação entre duas médias e/ou a análise de variância, utilizando, por exemplo, testes clássicos como o teste t, o teste qui-quadrado, o teste Kolmogorov-Smirnov, etc. Deve-se ressaltar, entretanto, que as análises feitas via simulação, podem ser muito demoradas e/ou caras e que a eficiência de uma análise pode ser prejudicada por causa da escassez de tempo ou recursos disponíveis (GAVIRA, 2003; KLEN; GUIMARÃES; PEREIRA, 2008).

Seja como for, cada configuração do modelo e seus respectivos resultados de saída devem ser bem documentados. Segundo Gavira (2003), há dois tipos de documentação: a documentação do programa, e a documentação referente às simulações. Além de facilitar relatos eventuais, o armazenamento dos registros poderá auxiliar o modelador/analista a determinar não apenas a alternativa que atinge o melhor resultado, mas também permitirá a ele observar tendências que possam sugerir alternativas adicionais a serem consideradas (BATEMAN *et al.*, 2002). Além disso, uma documentação adequada poderá facilitar futuras modificações no modelo (GAVIRA, 2003).

Embora os pacotes computacionais gerem uma grande quantidade de estatísticas em formato de tabelas, a construção de gráficos a partir destas tabelas permitirá exibir os resultados do sistema de maneira mais ágil; devendo-se, portanto, dar preferência a eles em apresentações (BATEMAN *et al.*, 2002).

3.2.3.2.9 Implementação

A implementação começa na verdade com o início do projeto de simulação, terminando com os ajustes finais do modelo, com a preparação e formação do pessoal que irá utilizá-lo no dia-a-dia, e com a garantia da validade dos resultados (PAIVA, 2005).

O sucesso desta etapa depende do bom desenvolvimento de todas as fases anteriores. Se todos aqueles que forem abrangidos pelo processo se mantiverem informados e envolvidos em todas as etapas, eles estarão muito mais dispostos a auxiliar na implementação da solução selecionada (BATEMAN *et al.*, 2002).

É importante salientar que, apesar das etapas apresentadas nesta seção para a construção de um modelo de simulação serem seqüenciais, muitas vezes é necessário retornar a passos anteriores antes de avançar para a etapa seguinte (GAVIRA, 2003).

3.2.4 Execução dos modelos de otimização e de simulação

Esta etapa tem início com a execução do modelo de otimização, que gerará uma solução preliminar para o problema.

Entretanto, como o modelo de PLI leva em consideração apenas fatores essenciais do sistema, ele não é capaz por si só de avaliar as interferências que podem ocorrer durante o processo produtivo. Assim, a etapa seguinte do método proposto consiste em enviar os resultados obtidos no modelo de otimização para o modelo de simulação, uma vez que este último contempla maiores detalhes do sistema analisado.

Para isso, o analista deve determinar quais cenários deverão ser avaliados, para, a seguir, executar o modelo de simulação (com as devidas replicações) e complementar

a solução obtida pelo modelo de otimização.

Após a execução do modelo, o analista deve avaliar os resultados e decidir se a solução obtida é aceitável ou não.

Caso a solução não seja considerada aceitável, o analista deve escolher outro cenário e realizar uma nova simulação. Esta etapa tem seqüência até que uma solução satisfatória seja encontrada.

3.2.5 Determinação da solução final

Seguindo o terceiro passo do Processo Decisório da Teoria das Restrições (Seção 2.1.2), as necessidades das restrições é que determinarão o programa de produção das não-restrições. Assim, depois de definir como explorar as restrições do sistema, os recursos não limitadores (não-restrição) devem ser subordinados às restrições do sistema.

Após a execução desse passo, chega-se à solução final para o atual sistema, a qual deve ser implementada na linha de produção.

Entretanto, com base no quarto passo do Processo Decisório da TOC, caso se deseje uma solução ainda melhor, torna-se necessário buscar alternativas para aumentar a capacidade do recurso restritivo, ainda que isso signifique comprar mais máquinas ou contratar mais pessoas.

Ao fazer isso, a restrição atual será quebrada, e será necessário reiniciar todo o processo, voltando ao passo um, ou seja, identificando qual o recurso que passou a restringir o sistema.

4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O modelo proposto de integração entre TOC, PLI e Simulação foi aplicado numa planta industrial fabricante de cilindros de laminação destinados às siderúrgicas como ferramentas de conformação no processo de laminação.

O presente capítulo faz uma apresentação do sistema onde o método foi aplicado, e da aplicação do modelo de planejamento/gerenciamento da produção desenvolvido com base nas restrições do sistema produtivo.

De uma forma sucinta, inicialmente, foi desenvolvido um modelo de Programação Linear Inteira com o intuito de minimizar o número de enforamentos dos cilindros na área gargalo. Este modelo foi desenvolvido e implementado através do programa computacional XPRESS®. Finalmente, foi desenvolvido um modelo de simulação no *software* Arena®, o qual foi alimentado com os resultados do modelo de PLI, para avaliar as possíveis interferências que possam ocorrer durante o processo de fabricação dos cilindros, instituir uma melhor gestão do equipamento gargalo e auxiliar na previsão da data de liberação dos cilindros.

4.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO E APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

Como foi visto na seção 3.2.1, a primeira etapa do modelo proposto consiste na realização do mapeamento do processo e no levantamento de dados sobre o sistema de produção.

Para isso, foram realizadas entrevistas e reuniões com os responsáveis pelas várias atividades do processo, e consultas aos documentos da Engenharia de Processos disponíveis.

Inicialmente, para que todos pudessem dar seu ponto de vista livremente, os supervisores das áreas, os programadores do departamento de planejamento e controle de produção, os técnicos de processo, e os operadores dos equipamentos foram entrevistados separadamente. A seguir, todos os entrevistados foram colocados numa

mesma sala de reunião para discutir sobre as divergências que apareceram com os depoimentos individuais, e para validar as informações coletadas.

Para facilitar o entendimento e para manter a fidelidade às informações fornecidas pelos participantes do processo, todas as entrevistas e discussões foram realizadas com o auxílio de fluxogramas.

Basicamente, o sistema de produção de cilindros de encosto pode ser dividido em três setores: Lingotamento, Forjaria, e Usinagem & Tratamento Térmico.

De uma forma sucinta, o processo tem início com o lingotamento dos cilindros (vazamento de metal líquido em um molde, chamado de lingoteira) no setor de Lingotamento, dando origem aos lingotes. Após sua solidificação, estes produtos, são estripados (retirados das lingoteiras) e enviados para a Forjaria, onde são conformados por um processo de forjamento, dando origem a produtos semi-acabados, chamados *blanks*. A seguir, os *blanks* recebem um tratamento térmico preliminar na própria Forjaria, e são enviados para o setor de Usinagem e Tratamento Térmico, onde são transformados em cilindros de encosto (Figura 17).

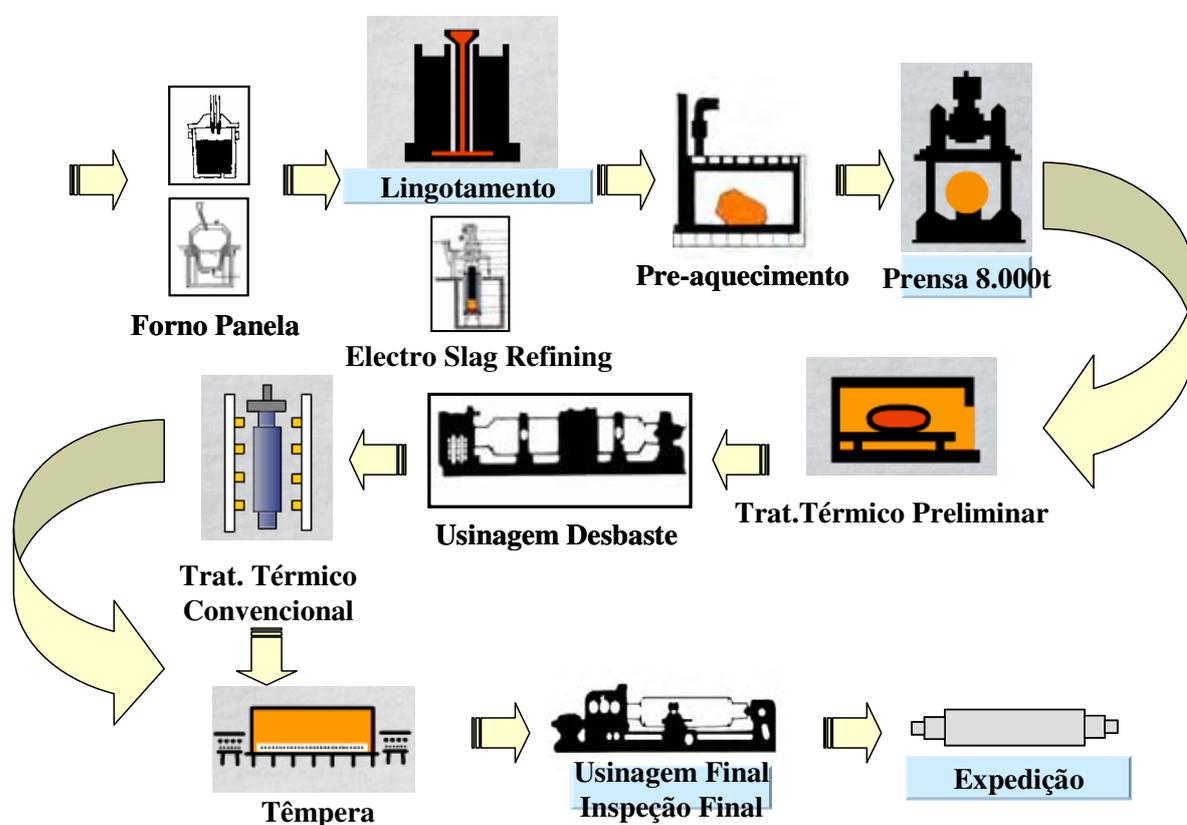


Figura 17 – Processo de fabricação de cilindros de encosto

É importante frisar que os termos lingotes, *blanks* e cilindros são denominações dadas a uma mesma entidade, de acordo com a etapa do processo que está sendo realizada.

O macro fluxo do processo pode ser visto na Figura 18.

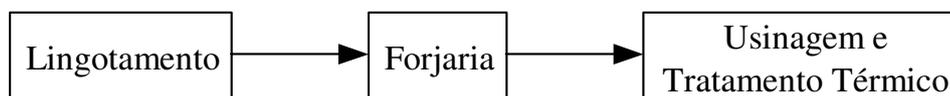


Figura 18 – Macro fluxo de processo

O setor de Lingotamento possui uma capacidade de produção muito maior do que os outros dois setores, sendo utilizada para complementar a produção de outras áreas da usina. Dessa forma, este setor não constitui a área gargalo do sistema. (Por questões de sigilo, as capacidades das áreas não poderão ser apresentadas neste trabalho).

O setor de Usinagem e Tratamento Térmico, embora possua uma capacidade de produção inferior ao setor de Lingotamento, também não é a área gargalo do sistema, uma vez que ele consegue processar tudo aquilo que é enviado pela Forjaria.

A partir de tudo o que foi mencionado até o momento, pode-se concluir que a área gargalo do sistema é a Forjaria. As operações que ocorrem nesta área serão apresentadas a seguir.

Como foi dito anteriormente, após sua solidificação, os lingotes são encaminhados para a Forjaria. Ao chegarem lá, são colocados em fornos para realizar a etapa de pré-aquecimento. Cada um destes fornos pode receber mais de um cilindro. Uma boa ocupação destes recursos é fundamental para um melhor aproveitamento dos recursos seguintes.

Após realizarem o pré-aquecimento, os cilindros devem passar, um a um, pela prensa para sofrerem a conformação mecânica. O forjamento não é realizado todo de uma vez, mas por etapas (calores). Ao final de cada calor, os cilindros devem retornar aos fornos e realizar um novo ciclo de pré-aquecimento, reiniciando o ciclo.

Depois do processo de forjamento, os cilindros realizam a etapa de oxicorte, sendo, a seguir, enviados para fornos de tratamento térmico. Nesta etapa, também é possível agrupar cilindros num mesmo forno. Caso a produção seja superior à

capacidade dos fornos de tratamento térmico presentes na Forjaria, é possível utilizar os fornos de tratamento térmico de outras áreas da empresa, tais como os fornos do setor de Usinagem e Tratamento Térmico, e os fornos destinados originalmente para receberem cilindros fundidos.

Uma vez realizado o tratamento térmico, os cilindros passam por um processo de resfriamento antes de serem enviados para o setor de Usinagem e Tratamento Térmico, chamado de UTE.

O fluxo de processo da Forjaria está representado na Figura 19.

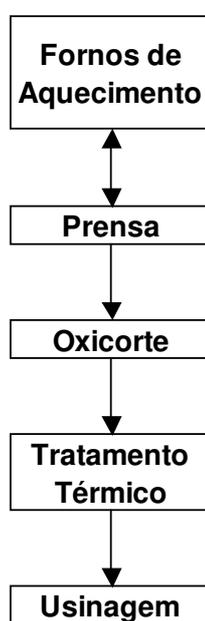


Figura 19 – Fluxo de Processo da Forjaria

4.2.1 Identificação do gargalo

A etapa seguinte deste método consiste em identificar o gargalo do sistema. Como foi visto na Seção 4.1, a área gargalo do sistema é a Forjaria. Assim, o enfoque deste trabalho será dado neste setor.

Na Forjaria, os recursos que limitam a quantidade de cilindros a serem produzidos são os fornos de pré-aquecimento. Como a etapa de forjamento deve ocorrer a quente, não é possível utilizar fornos de outras áreas para elevar a capacidade de produção desta etapa. Dessa forma, uma baixa ocupação destes fornos resultará

numa baixa ocupação dos fornos de tratamento térmico, o que implicará num pequeno número de cilindros a serem entregues para a usinagem. Por outro lado, uma boa ocupação dos fornos destinados ao pré-aquecimento gerará uma boa ocupação dos fornos de tratamento térmico, proporcionando a chegada de um maior número de cilindros na usinagem. Além disso, mesmo que a capacidade dos fornos de tratamento térmico da Forjaria seja ultrapassada, é possível enfornar os cilindros em outras áreas.

Portanto, os fornos de pré-aquecimento constituem o gargalo do sistema.

4.2.2 Elaboração dos modelos de otimização e simulação

A aplicação do método aqui apresentado tem por objetivos transformar o processo em estudo num fluxo contínuo, sem desabastecimento das linhas, e auxiliar na previsão da data de liberação dos cilindros para o setor de usinagem.

A solução do problema deste sistema consiste, basicamente, em fazer a alocação dos cilindros aos recursos, num dado período de tempo (problema de *scheduling* da produção - STEBEL *et al.*, 2003), ou seja, decidir a seqüência nas quais os cilindros devem ser processados e em que momento eles devem ser realizados no período de planejamento.

Este problema poderia ser solucionado por meio de um modelo de PLI (STEBEL *et al.*, 2003). Entretanto, devido às características deste sistema (apresentadas a seguir), a modelagem seria dificultada e o modelo final se tornaria bastante complexo, o que provavelmente exigiria um grande tempo computacional para a geração de uma solução ótima.

A primeira característica do sistema que dificulta a modelagem do sistema é o regime de trabalho dos equipamentos: enquanto os fornos de pré-aquecimento e de tratamento térmico operam sete dias por semana, ininterruptamente (salvo paradas para manutenção), a prensa trabalha apenas de segunda-feira a sábado.

Além disso, devido ao regime de trabalho da prensa, uma operação de forjamento pode ser interrompida antes de seu término; devendo ser retomada somente quando a prensa reiniciar suas atividades. Quando isso acontece, tanto o cilindro que teve sua

etapa de forjamento interrompida quanto os demais cilindros que compõem sua carga de enformamento devem aguardar no interior do forno de pré-aquecimento.

Existem situações, também, em que um cilindro, com maior prioridade, torna-se disponível para forjamento no instante em que um outro cilindro está sendo forjado. Neste caso, o cilindro menos importante pode ter seu processamento interrompido para que o outro seja priorizado.

Nos modelos clássicos de *job shop* e *flow shop*, as tarefas que aguardam serem processadas em uma máquina, situam-se, em geral, num *buffer* (ARENALES et al., 2007). No caso deste sistema, como os cilindros devem ser trabalhados a quente, não existem *buffers* entre os fornos de pré-aquecimento e a prensa. Assim, o término de um ciclo de aquecimento num forno bloqueia este forno até que a prensa fique disponível para processamento. Mais do que isso, o forno em questão só estará disponível quando o último cilindro em seu interior for encaminhado para a prensa.

O sistema tampouco permite a espera do cilindro por um forno quando ele deixa a prensa. Assim, após o forjamento, é necessário que haja um forno disponível para receber o cilindro que estava sendo conformado.

Este sistema apresenta, ainda, restrições de precedência, isto é, uma tarefa só pode iniciar seu processamento após o término do processamento de outras tarefas. Dessa forma, cada cilindro deve passar por cada uma de suas operações numa seqüência preestabelecida, não sendo possível realizá-las de forma aleatória. Além disso, as operações realizadas em fornos somente terão início quando todos os cilindros de uma mesma carga estiverem em seu interior.

Uma outra característica presente neste sistema é a passagem dos cilindros pelos fornos de pré-aquecimento e pela prensa diversas vezes; devendo-se ressaltar que o número de passagens por esses recursos não é necessariamente o mesmo para todos os cilindros.

O sistema está, ainda, sujeito a interferências, que afetam o seu funcionamento normal.

Durante o forjamento, podem surgir defeitos (trincas, por exemplo) ao longo da superfície do cilindro, que devem ser removidos antes do retorno do cilindro ao forno. Esses defeitos são removidos por meio de um processo, denominado escarfagem, o

qual retarda a volta do cilindro para o forno e impede que um outro cilindro seja levado para a prensa.

Outra interferência comum é a presença de cilindros de grande peso. Esses cilindros exigem a utilização da ponte-rolante durante todo o período de forjamento, o que impede que uma nova carga de cilindros, proveniente do lingotamento, entre nos fornos de pré-aquecimento, nesse momento.

Assim, devido às dificuldades apresentadas acima, decidiu-se buscar uma forma alternativa para modelar o sistema.

Na Seção 2.6.1, foi visto que a Programação Matemática é uma ferramenta poderosa de otimização, mas que depende da estimação e da fixação dos valores dos parâmetros de entrada do modelo, tais como os coeficientes de custo na função objetivo, os valores associados ao lado direito das restrições, entre outros. Além disso, embora algumas áreas da Programação Matemática, tais como a Programação Linear, permitam a aplicação de técnicas de análise de sensibilidade e de análise paramétrica, que possibilitam discussões acerca da influência de variações nos parâmetros na solução obtida inicialmente, elas têm dificuldades para incorporar variações aleatórias nos parâmetros de seus modelos.

Foi visto, também, que a Simulação é uma ferramenta apropriada para modelar e avaliar o desempenho de um sistema que possua parâmetros que variem segundo algum tipo de distribuição de probabilidade, e que oferece uma grande flexibilidade ao analista. Entretanto, esta técnica não garante a obtenção da solução ótima, uma vez que ela encontrará a melhor solução somente entre os cenários analisados, que dependem da escolha do analista.

Seria apropriado, portanto, pensar na combinação desses métodos para encontrar uma solução para o problema.

Usualmente, tem-se utilizado a simulação seguida por algum procedimento de otimização (Seção 2.6.4). Entretanto, devido às características do sistema analisado, esta dissertação propõe a inversão desta seqüência, utilizando a Programação Linear Inteira para selecionar os cenários que serão simulados posteriormente.

Analisando o processo com atenção, pode-se perceber que os equipamentos que limitam a produção estão no início da área gargalo do sistema, podendo ser

alimentados apropriadamente pelo setor de Lingotamento, de acordo com suas necessidades.

Além disso, é possível observar que, a partir do que foi apresentado na Seção 4.2.1, uma boa ocupação do gargalo (fornos de pré-aquecimento) resultará num bom abastecimento dos demais equipamentos do sistema.

Assim, se os fornos de pré-aquecimento tiverem sua ocupação otimizada, o problema do desabastecimento das linhas de produção terá sido resolvido. Para isso, será criado um modelo de PLI que buscará formar o menor número possível de cargas a serem enfiadas.

O restante do problema poderá ser abordado por meio de um modelo de simulação, uma vez que esta técnica, além de ser capaz de proporcionar estimativas da influência da variabilidade natural dos processos sobre o desempenho do sistema, permite incluir procedimentos operacionais e restrições complexas que não poderiam ser consideradas num modelo de otimização com facilidade.

Dessa forma, o problema original foi dividido em duas partes; sendo que uma parte dele foi solucionada por meio de um modelo de Programação Linear Inteira mais simples; enquanto a outra parte será solucionada por meio de um modelo de simulação.

4.2.2.1 Modelo de otimização

O modelo de otimização elaborado neste trabalho nada mais é do que uma variação do problema da mochila, possivelmente reportado pela primeira vez por Dantzig, em 1957.

O problema da mochila é um dos 21 problemas NP-Completo de Richard Karp, exposto em 1972; e constitui hoje uma das classes de problemas mais estudados em otimização combinatória em virtude de suas diversas aplicações práticas e também por seu interesse teórico (ROSA; SOUZA FILHO, 2008).

O problema da mochila envolve a escolha de itens (de diversos valores e pesos) a serem colocados em uma ou mais mochilas (de determinadas capacidades) de forma a maximizar uma função de utilidade (MARTELLO; TOTH, 1990).

Na variação do problema da mochila utilizada neste trabalho, e conhecida como problema de empacotamento em mochilas (*bin packing*), deseja-se determinar o número mínimo de mochilas de mesma capacidade, que empacotem um determinado número de itens de peso P_j (MARTELLO; TOTH, 1990; ROSA; SOUZA FILHO, 2008).

A seguir, é apresentado o modelo de PLI proposto, e são definidas as variáveis de decisão, a função-objetivo e as restrições do sistema.

As variáveis de decisão adotadas são variáveis binárias $C_{i,j}$ e Y_j , onde i se refere ao número do cilindro a ser agrupado e j ao número da carga a ser enfiada a que pertence esse cilindro.

Assim, quando $C_{i,j} = 1$, o cilindro i pertencerá a carga j . Quando um cilindro não pertencer a uma determinada carga, a variável $C_{i,j}$ assumirá o valor zero.

$Y_j = 1$, indica que a carga j foi formada; enquanto que $Y_j = 0$ indica que a carga j não foi formada. Assim, o somatório das variáveis Y_j indicará o número de cargas necessárias para enfiar todos os cilindros disponíveis.

A Função Objetivo é minimizar o número de cargas para os fornos de pré-aquecimento, maximizando, assim, a sua ocupação:

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^n Y_j \quad \text{onde: } n: \text{ número de cargas máximo}$$

As restrições adotadas são:

- Cada cilindro deve pertencer a uma única carga a ser enfiada:

$$\sum_{j=1}^n C_{i,j} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{onde: } m: \text{ número de cilindros disponíveis}$$

- A capacidade do forno de pré-aquecimento não pode ser ultrapassada:

$$\sum_{i=1}^m P_i \cdot C_{i,j} \leq \text{Cap} \cdot Y_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad \text{onde: } P_i: \text{ é o peso do Cilindro } i$$

Cap: é a capacidade do forno

O tamanho deste modelo vai depender do número de cilindros a serem agrupados durante o período de planejamento. A Tabela 1 apresenta o número de restrições e o número de variáveis de decisão geradas durante a programação da produção dos meses de janeiro a agosto de 2008.

Tabela 1 - Tamanho do modelo de otimização

Mês	Restrições	Variáveis
Janeiro	26	176
Fevereiro	41	341
Março	49	400
Abril	42	352
Maio	46	370
Junho	45	385
Julho	45	385
Agosto	42	352

Uma vez elaborado o modelo de Programação Linear Inteira, o passo seguinte foi implementá-lo no *software* XPRESS®.

O XPRESS® é um pacote de ferramentas de modelagem matemática e otimização, desenvolvido pela empresa Dash Optimization, utilizado para resolver problemas de programação linear, inteira, não-linear e estocástica.

O *software* permite formular, resolver um problema, e analisar sua solução, utilizando uma linguagem de programação própria (Mosel), completamente funcional e especificamente concebida para esse fim.

No caso de problemas de programação inteira, o XPRESS® utiliza um algoritmo de *branch and bound* para encontrar sua solução.

A seguir, é apresentada a formulação do problema na linguagem Mosel:

```

model Fornos_de_Aquecimento
uses "mmxprs"; !gain access to the Xpress-Optimizer solver
declarations
Cilindros=1..n
Cargas=1..m
C:array(Cilindros,Cargas)of mpvar
Y:array(Cargas)of mpvar

```

```

Peso:array(Cilindros)of real
end-declarations

writeln("Begin running model")

!Inserir Pesos dos Cilindros
Peso:=[Peso dos Cilindros]

!Cada Cilindro/corrida deve pertencer a um unico enformamento
forall(i in Cilindros)do
    sum(j in Cargas)C(i,j)=1
end-do

!A capacidade do forno não pode ser ultrapassada
forall(j in Cargas)do
    sum(i in Cilindros)Peso(i)*C(i,j)<=Cap*Y(j)
end-do

!Variaveis Binarias
forall(j in Cargas)Y(j) is_binary
forall(i in Cilindros, j in Cargas)C(i,j)is_binary

!Funcao Objetivo
minimize(sum(j in Cargas)Y(j))

!Solucao
writeln("Solution:\n Objective: ", getobjval)
forall(j in Cargas, i in Cilindros)do
    if C(i,j).sol=1
        then writeln(" C(", i,",", j,")")
    end-if
end-do

writeln("End running model")
end-model

```

Após a elaboração do modelo de Programação Linear Inteira e de sua implementação no computador, obtêm-se as cargas que maximizam a ocupação dos fornos de pré-aquecimento.

Entretanto, o modelo de PLI proposto não é capaz, por si só, de observar se haverá alguma interferência durante o processo de fabricação, nem é capaz de prever as datas em que os cilindros estarão prontos para serem transportados para o setor de Usinagem e Tratamento Térmico. Tais informações serão obtidas através do uso de um modelo de simulação no *software* Arena®.

4.2.2.2 Modelo de simulação

O modelo de simulação tem o objetivo de complementar a solução obtida pelo modelo de otimização, respondendo às questões que não foram possíveis de serem tratadas pelo modelo de PLI.

Utilizando como entrada o resultado da etapa anterior, o modelo de simulação permite: avaliar as interferências que podem ocorrer durante o processo de fabricação; instituir uma melhor gestão do equipamento gargalo, de forma a transformar o processo num fluxo contínuo, sem desabastecimento das linhas; e auxiliar na previsão da data de liberação dos cilindros.

A seguir, serão apresentados os modelos conceitual e computacional.

4.2.2.2.1 Elaboração do modelo conceitual

O modelo conceitual foi elaborado com base na descrição do sistema feita anteriormente (Seção 4.1); e é apresentado, inicialmente, na Figura 20, sem muitos detalhes.

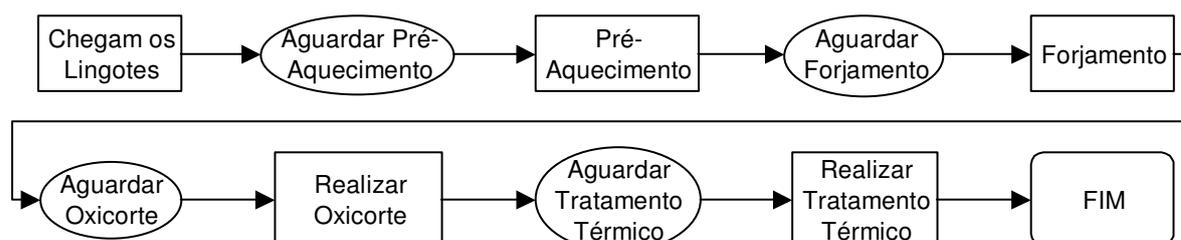


Figura 20 – Modelo conceitual das fases fundamentais do processo

Nesta representação, os retângulos representam atividades, enquanto que os “círculos” indicam que as entidades estão em filas.

A seguir, na Figura 21, é apresentado o modelo conceitual completo.

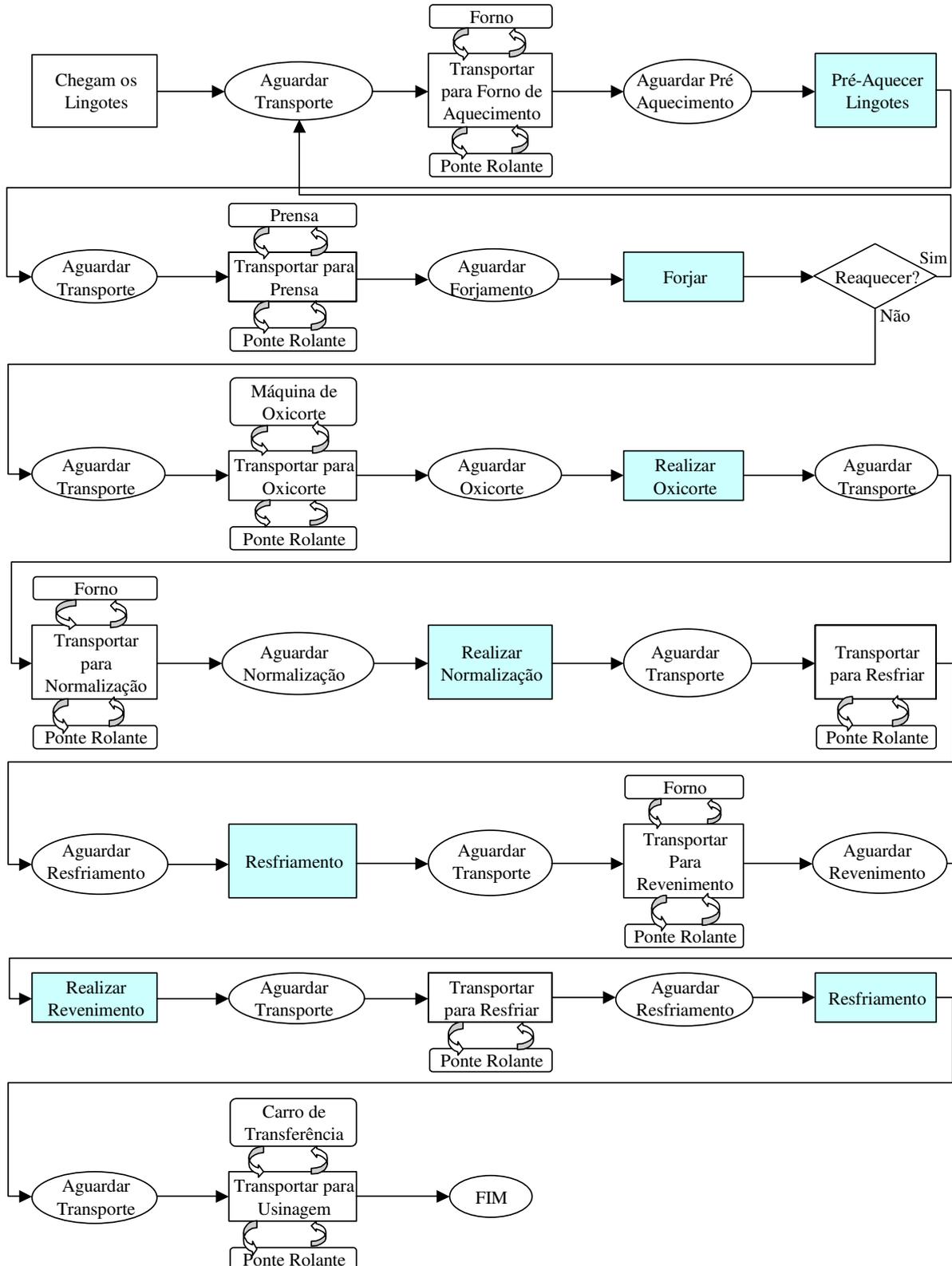


Figura 21 – Modelo conceitual completo

Para elaborar o modelo conceitual, é importante definir as entidades e os recursos do sistema. As Entidades correspondem aos cilindros; os Recursos correspondem aos fornos de pré-aquecimento, à prensa e seus acessórios, à máquina de oxicorte, aos fornos de tratamento térmico, e às pontes-rolantes.

Para efeitos de simplificação, foi realizada a modelagem apenas do setor da Forjaria, admitindo que o setor de Lingotamento garantirá o abastecimento da linha. A partir de tudo o que foi explicado na Seção 4.1, esta simplificação é perfeitamente plausível.

4.2.2.2.2 Elaboração do modelo computacional

Após a elaboração do modelo conceitual, pode-se passar para a etapa de criação do modelo computacional.

Neste trabalho, o modelo computacional foi implementado no *software* Arena® Versão 10.0, da empresa ROCKWELL SOFTWARE. De acordo com seu fabricante, o Arena® é o um ambiente de simulação compatível com o ambiente Windows 95/ 98/ NT, que engloba lógica e animação com ferramentas de análise estatística. O Arena® é ao mesmo tempo uma linguagem de simulação e um ambiente de trabalho e experimentação, que pode ser utilizado para testar o modelo e fazer a apresentação de seus resultados, através de avançados recursos de animação.

No caso que está sendo analisado neste trabalho, os cilindros passam através da prensa e dos fornos ao longo da linha de produção. Esta situação pode ser simulada dentro do Arena®, que irá fornecer como resultados, estatísticas detalhadas de qualquer aspecto sobre o sistema que for desejado pelo analista.

No Arena®, a modelagem do sistema é feita visualmente com objetos orientados à simulação e com o auxílio do *mouse*, não necessitando serem digitados comandos na lógica (programação). Sua interface segue os padrões do MS Office, com comandos e botões semelhantes e menus que agregam funções semelhantes às encontradas em outros *softwares* Windows.

De uma maneira geral, estes foram os passos seguidos neste trabalho para realizar a elaboração do modelo computacional:

1. Depois de realizar um estudo sobre o comportamento do sistema a ser simulado, e após a elaboração o modelo conceitual, foram coletadas no sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa as informações necessárias para alimentar o modelo de simulação. Essas informações correspondem aos tempos de pré-aquecimento, forjamento, oxicorte e de tratamento térmico e às temperaturas de enformamento dos cilindros, e foram colocadas numa planilha de Excel® para abastecer o modelo computacional, conforme a Tabela 2. (informações sobre os tempos e as temperaturas estão representadas por letras, pois são consideradas *know-how* e não foram autorizadas pela empresa para serem divulgadas).

Tabela 2 – Dados de entrada do Modelo de Simulação

Cilindro	Ordem de Venda	Temp. Norm. (°C)	Temp. Rev. (°C)	Pré-Aquecimento (h)	1° Calor (h)	2° Calor (h)	...	Tempo Oxicorte (h)	Tempo Resfriamento (h)
48213	411127	X	I	W	C	E	...	A	F
59218	412503	Y	J	L	C	D	...	B	F
59219	412503	Y	J	L	D	C	...	C	F
63227	413129	X	Y	Y	D	C	...	A	G
59220	414500	Z	J	J	D	D	...	C	G
59221	414503	Z	K	K	C	D	...	A	F
.
.
.

Como os dados utilizados neste trabalho são mantidos atualizados pelas Engenharias de Processo e Produto da empresa, não foi necessário realizar nenhuma coleta de campo, e conseqüentemente, nenhum tratamento estatístico dos dados.

2. A seguir, o modelo computacional foi implementado no Arena®. O processo de implementação nada mais é do que o ato de “explicar” ao Arena® como funciona o sistema. Essa “explicação” é feita, no caso do Arena®, através de uma linguagem de

fácil entendimento, semelhante a um fluxograma.

A construção do modelo computacional foi baseada no modelo conceitual.

Seguindo a orientação de Chwif; Medina (2006), o modelo foi implementado o em pequenas partes, gerando diversos submodelos.

Além de facilitar o processo de construção do modelo, a implementação por partes permite testar cada uma dessas partes separadamente, a medida que vão sendo concluídas, o que permite encontrar erros de sintaxe e até mesmo de lógica com maior facilidade.

Depois da elaboração do modelo computacional, ele foi alimentado com os dados apresentados na Tabela 2 e com as cargas de enformamento obtidas pelo modelo de Programação Linear Inteira.

3. O Arena® foi, então, acionado para executar o modelo e gerar resultados sobre o seu comportamento;

4. Estes resultados foram, então, analisados e comparados com os valores esperados. A partir desses resultados, novas mudanças na lógica e na estrutura do modelo foram feitas para aperfeiçoar o processo e aproximá-lo do sistema real;

5. Neste ponto, foi necessário retornar para a etapa 3, gerando novos resultados. Este ciclo foi repetido até que o modelo passou a reproduzir de maneira satisfatória o comportamento do sistema real (O processo de validação do modelo será explicado com maiores detalhes na seção 4.2.2.2.5).

4.2.2.2.3 Determinação do período de aquecimento

A etapa seguinte do trabalho consistiu em determinar o período de aquecimento (*Warm-up*) do modelo computacional, conforme Costa Neto (2002); Chwif; Medina (2006); Fernandes (2008), Seção 2.5.1.7.

Para determinar o período de aquecimento, foram realizadas diversas simulações compostas de cinco replicações cada para valores diferentes de *Warm-up*. O comportamento da variável de resposta (número de cilindros produzidos num período de 30 dias) foi monitorado ao longo das simulações. Quando o valor dessa variável se estabilizou em torno de um determinado valor, o período de aquecimento foi obtido com o acréscimo de um fator de segurança de 25% do valor em que teve início a estabilização da variável resposta. A Tabela 3 exibe a variação da variável resposta em função do período de aquecimento:

Tabela 3 – Determinação do período de aquecimento

<i>Warm-up</i> (dias)	Quantidade de Cilindros
0	22
1	23
2	24
3	24
4	24
5	28
6	29
7	30
8	31
9	31
10	31
11	30
12	30
13	31

Através da Tabela 3, é possível observar que, a partir de um *Warm-up* de 8 dias, o valor da variável resposta passa a oscilar em torno do valor de 31 cilindros por mês. Assim, o *Warm-up* utilizado para o modelo foi:

$$\text{Warm-up} = 1,25 \cdot 8 \Rightarrow \text{Warm-up} = 10 \text{ dias}$$

4.2.2.2.4 Determinação do número de replicações

Uma vez determinado o período de aquecimento, foi possível determinar o número de replicações a ser utilizado em cada simulação.

Para determinar o número de replicações, deve-se utilizar a Equação 19 (Seção 2.5.1.7). Para isso, é necessário estimar um valor para a média amostral e definir qual é a precisão desejada.

No caso que está sendo analisado, analisou-se o histórico do sistema real para estimar a média e o desvio padrão do número de cilindros produzidos no período de um mês. Os dados apresentados na Tabela 4 representam a quantidade de cilindros produzidos nos últimos oito meses antes da implementação do método:

Tabela 4 – Histórico da quantidade de cilindros produzidos nos últimos oito meses

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8
Produção	20	20	21	34	29	28	30	26

Com os dados da Tabela 4, obtém-se uma média de 26 e um desvio padrão de 5,21 cilindros por mês.

Além disso, adotou-se uma precisão de 10% e um nível de confiança de 95%. De posse dessas informações, e utilizando a Equação 5, pode-se determinar o número de replicações a ser realizado:

$$\begin{aligned} \bar{X} &= 26 & r &= 10\% & t_{7; 2,5\%} &= 2,365 \\ s &= 5,21 & \alpha &= 5\% & & \end{aligned}$$

$$n = \left(\frac{100 \cdot t_{n-1, \alpha/2} \cdot s}{r \cdot \bar{X}} \right)^2 = \left(\frac{100 \cdot 2,365 \cdot 5,21}{10 \cdot 26} \right)^2 = 23$$

Executando-se o modelo computacional e realizando-se as 23 replicações, encontrou-se uma média de 31 cilindros por mês, que é maior que o valor estimado anteriormente. Assim, o número de replicações a ser realizado em cada simulação do modelo computacional é de 23 replicações.

4.2.2.2.5 Validação do modelo

Definido o número de replicações, o passo seguinte foi validar o modelo computacional.

Para validar o modelo computacional, foram realizadas simulações com os dados históricos da empresa. A seguir, os resultados das simulações foram comparados com os valores da produção real, mês a mês.

Para fazer tal comparação, foi utilizado o teste de hipóteses. Nesse teste, H_0 corresponde à hipótese a ser testada, enquanto H_1 , à hipótese alternativa. O teste irá levar à aceitação ou rejeição da hipótese H_0 , o que corresponde, portanto, respectivamente, à negação ou afirmação de H_1 . (COSTA NETO, 2002).

De acordo com Costa Neto (2002), se se dispõe apenas de uma amostra de n elementos extraídos de uma população, com base na qual será realizado o teste, deve-se utilizar essa mesma amostra para estimar o desvio padrão da população. Assim, para o teste de uma média com o desvio-padrão desconhecido, foi utilizada uma distribuição *t-Student* com $n-1$ graus de liberdade (Equação 20).

$$t_{n-1} = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (20)$$

No primeiro mês da Tabela 4 foram produzidos 20 cilindros. Após uma simulação com 23 replicações, foi obtida uma média de 21 cilindros, com um desvio padrão de 3,177.

A partir dessas informações, tem-se o seguinte teste de hipóteses:

$$\text{Teste de Hipóteses: } \begin{cases} H_0 : \mu_{\text{mod elo}} = 20 \\ H_1 : \mu_{\text{mod elo}} \neq 20 \end{cases}$$

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} = \frac{21 - 20}{\frac{3,177}{\sqrt{23}}} \Rightarrow t_{\text{calculado}} = 1,51 \Rightarrow p\text{-value} = 14,5\%$$

Para um nível de significância de até 14,5%, a hipótese H_0 não deve ser rejeitada. Portanto, não há evidência estatística de que a média do número de cilindros produzidos no primeiro mês, obtida através do modelo computacional, seja diferente da quantidade produzida pelo sistema real.

Repetindo-se o procedimento para os demais meses, obtém-se a Tabela 5:

Tabela 5 – Validação do modelo computacional

Mês	Produção Real	Produção Simulada	Desvio-Padrão	$t_{\text{calculado}}$	p-value
1	20	21	3,177	1,51	0,145
2	20	20	2,892	0	1
3	21	22	3	1,60	0,124
4	34	35	3,896	1,23	0,231
5	29	28	2,985	1,61	0,122
6	28	28	3,104	0	1
7	30	29	3,58	1,34	0,194
8	26	27	3,261	1,47	0,156

Todos os valores de *p-value* encontrados são maiores que os valores usuais utilizados nos testes de hipóteses ($\alpha = 1\%$; $2,5\%$ e 5%). Assim, pode-se dizer que o modelo criado reproduz de maneira satisfatória o comportamento do sistema real. O modelo foi, portanto, validado.

Uma vez que o modelo foi validado, torna-se possível utilizá-lo.

Como foi dito anteriormente, o modelo de simulação permite avaliar as interferências que podem ocorrer durante o processo de fabricação, instituir uma melhor gestão do equipamento gargalo, de forma a transformar o processo num fluxo contínuo, sem desabastecimento das linhas, e auxiliar na previsão da data de liberação dos cilindros.

4.2.3 Execução do modelo de otimização

Uma vez que os modelos de otimização e simulação foram elaborados, verificados e validados, pode-se dar prosseguimento à aplicação do método proposto.

Esta etapa consiste na execução do modelo de otimização para obter lotes que maximizem a ocupação dos fornos de pré-aquecimento (recurso gargalo), gerando, assim, uma solução preliminar que foi utilizada para alimentar o modelo de simulação.

4.2.4 Envio da solução corrente para o modelo de simulação

A etapa seguinte consiste em enviar os resultados obtidos no modelo de otimização (as cargas que serão enfiadas) para o modelo de simulação, uma vez que este último contempla maiores detalhes do sistema analisado.

Os resultados do modelo de PLI foram transferidos para uma planilha de Excel®, em conjunto com os demais dados necessários para realizar a simulação (tempos e distribuições de probabilidades de cada uma das etapas do processo). Esta planilha é, então, lida pelo modelo de simulação.

4.2.5 Execução do modelo de simulação

Esta etapa permite testar, analisar e comparar diferentes alternativas para o sistema. Para isso, inicialmente, o analista deve determinar quais cenários deverão ser avaliados pelo modelo de simulação.

A seguir, deve-se escolher um destes cenários, e executar uma simulação (com as devidas replicações), a fim de complementar a solução obtida no item 4.2.3.

Após a execução do modelo, o analista deve avaliar os resultados e decidir se a solução obtida é aceitável ou não.

Caso a solução não seja considerada aceitável, o analista deve escolher outro cenário e realizar uma nova simulação, comparando o novo resultado com os anteriores. Esta etapa tem seqüência até que uma solução satisfatória seja encontrada.

Nesta etapa, o analista tem a oportunidade de avaliar o comportamento do sistema quando a seqüência das cargas de enfiamento é alterada e/ou quando algum cilindro deve ser priorizado. É possível, também, avaliar o impacto de uma quebra de

equipamento no sistema; além de se determinar o melhor momento para realizarem as paradas para manutenção.

4.2.6 Determinação da solução final

Esta etapa consiste em aplicar o terceiro passo do Processo Decisório da Teoria das Restrições (Seção 2.1.2). Assim, uma vez definida a forma pela qual as restrições do sistema serão exploradas, os recursos não limitadores (não-restrição) devem ser subordinados às restrições do sistema.

Neste sistema, isso significa que a programação do setor de Lingotamento deve ser feita de acordo com as necessidades dos fornos de pré-aquecimento. Além disso, a prensa, os fornos de tratamento térmico e o setor de Usinagem e Tratamento Térmico terão sua produção atrelada à produção dos fornos de pré-aquecimento.

Após a execução de todas as etapas anteriores, chega-se à solução final para o atual sistema, a qual deverá ser implementada na linha de produção.

4.2.7 Elevação da restrição do sistema

Com base no quarto passo do Processo Decisório da TOC, para conseguir uma melhoria do sistema ainda maior, é necessário buscar alternativas para aumentar a capacidade do recurso restritivo. No caso do sistema analisado, isso significa construir novos fornos de pré-aquecimento ou desenvolver novos procedimentos para reduzir os tempos de processo no recurso gargalo.

Ao fazer isso, a restrição atual será quebrada, e será necessário reiniciar todo o processo, e retornar ao passo um, ou seja, identificar o recurso que passou a restringir o sistema.

Como essas ações envolvem grandes investimentos, grandes tempos de análise, desenvolvimento e implementação, e como a solução atual atende às necessidades dos tomadores de decisão da empresa em estudo, a restrição do sistema não foi elevada.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados deste trabalho podem ser divididos basicamente em duas partes. A primeira parte se refere aos resultados conseguidos com o modelo de otimização; a segunda, aos resultados conseguidos com o modelo de simulação. Cada uma delas será apresentada a seguir.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

Através do modelo de otimização, foi possível atingir dois resultados principais.

O primeiro deles foi conseguir uma redução no número de cargas de enformamento, o que melhorou a ocupação dos fornos de pré-aquecimento. A Figura 22 mostra as quantidades de cargas de enformamento formadas pelo modelo de otimização e aquelas obtidas manualmente entre os meses de janeiro e agosto para os mesmos cilindros.

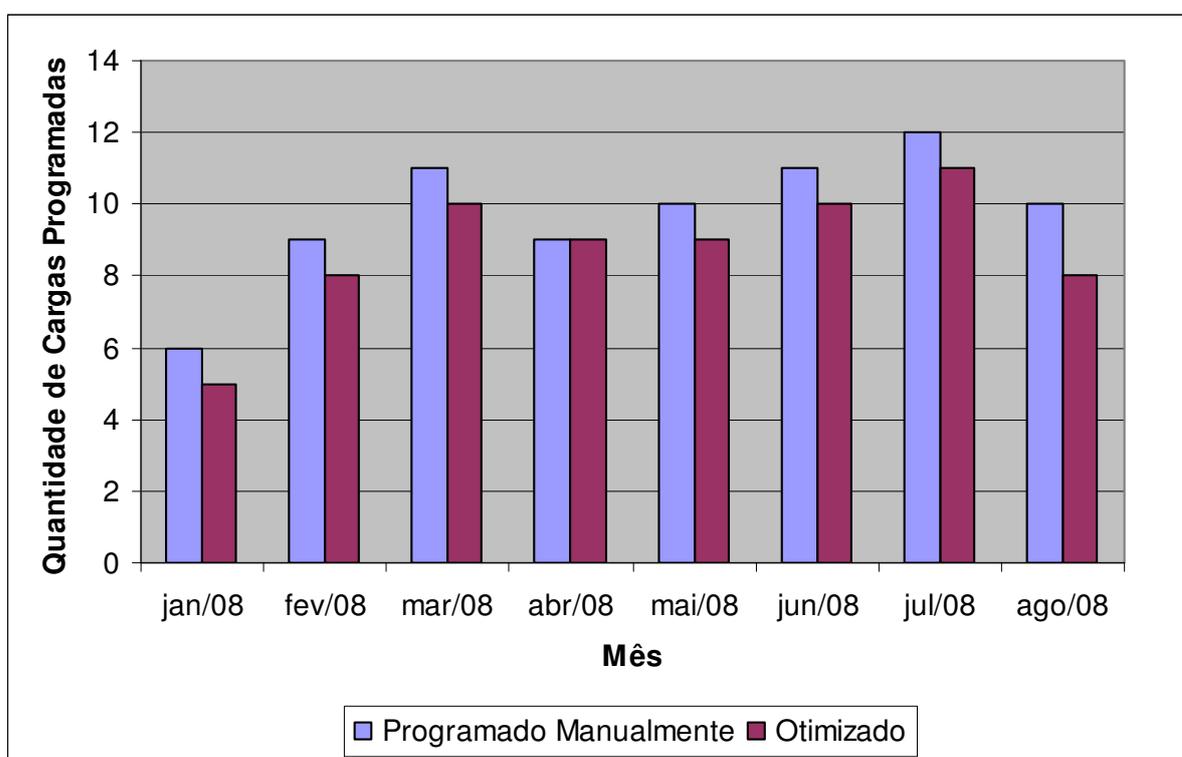


Figura 22 – Quantidade de cargas obtidas pelo modelo de otimização e manualmente

A Tabela 6 apresenta o tempo gasto por um computador com processador Pentium IV 3 GHz, 256 MB RAM para encontrar as soluções ótimas da Figura 22.

Tabela 6 – Tempo de execução do modelo de otimização

Mês	Restrições	Variáveis	Tempo (s)
Janeiro	26	176	0,1
Fevereiro	41	341	0,5
Março	49	400	0,4
Abril	42	352	0,7
Maió	46	370	13,7
Junho	45	385	4,2
Julho	45	385	0,2
Agosto	42	352	1,3

O segundo resultado conseguido com este modelo foi a determinação de quais cilindros deveriam ser enfiados juntos, isto é, numa mesma carga de pré-aquecimento, o que viabiliza e facilita o emprego do modelo de simulação.

A Tabela 7 apresenta parte de uma das soluções conseguidas com o modelo de otimização.

Tabela 7 – Solução resultante do modelo de otimização

Carga 1				Carga 2				
Cilindro	Cliente	Liga	Peso*	Cilindro	Cliente	Liga	Peso*	
58578	LIANZHONG	VCDC	A	57517	ANGANG	VCDC-2	E	
58579	LIANZHONG	VCDC	A	57518	ANGANG	VCDC-2	E	
70800	CBA	VCDC	B	66804	SIDUNOR	VCDC	F	
66079	MINMETAL	VCDC-2	C	56881	BAOTOU	VCDC-2	G	
			Total				Total	H

* Por questões de sigilo, esta informação não pode ser apresentada

5.2 RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O *software* Arena® gera um relatório de resultados quando é realizada uma simulação. Esse relatório exhibe informações como o número de cilindros produzidos, a ocupação média dos equipamentos, o tempo e o tamanho médio das filas, entre outras.

Um dos relatórios obtidos durante o processo de validação do modelo pode ser visto no Anexo A.

Além dos resultados obtidos por esse relatório, foi possível alcançar outros três resultados principais, descritos a seguir.

Através da utilização do modelo computacional, foi possível obter: a designação dos cilindros aos recursos, a seqüência de realização das atividades, e a previsão para a data em que os cilindros poderão ser encaminhados para o Setor de Usinagem e Tratamento Térmico. A Tabela 8 ilustra a saída gerada pelo Arena®.

Tabela 8 – Data de envio dos cilindros

Cilindro	Data de envio dos cilindros para a UTE
59343	1/8/08
59318	1/8/08
59319	1/8/08
57458	1/8/08
56190	5/8/08
56191	5/8/08
45980	5/8/08
51586	7/8/08

O segundo resultado conseguido com o modelo de simulação foi uma melhoria no acerto da data de envio dos cilindros para a UTE.

Fazendo uma análise da produção do último ano, verificou-se que, antes da implementação deste método, 177 dos 222 cilindros planejados foram enviados para o setor de Usinagem e Tratamento Térmico até a data prevista. Após a implementação, constatou-se que 114 dos 126 cilindros planejados deixaram a Forjaria dentro do prazo previsto.

A Tabela 9 mostra o acerto antes e depois da introdução do modelo no sistema.

Tabela 9 – Acerto na data de remessa dos cilindros

	Acerto
Antes da Implementação	79,7%
Após a Implementação	90,5%

Para comprovar se realmente houve uma melhoria da taxa de acerto dos cilindros, será realizada uma comparação entre as proporções antes (p_1) e depois (p_2) da implementação do modelo computacional.

A variável de teste será a diferença entre as frequências relativas das duas amostras disponíveis, p'_1 e p'_2 . Sabe-se que, se $n_1 \cdot p'_1 \geq 5$, $n_1 \cdot (1-p'_1) \geq 5$, $n_2 \cdot p'_2 \geq 5$, e $n_2 \cdot (1-p'_2) \geq 5$, as distribuições por amostragem de p'_1 e p'_2 poderão ser aproximadas por distribuições normais de médias p_1 e p_2 e variâncias $p_1 \cdot (1-p_1)/n_1$ e $p_2 \cdot (1-p_2)/n_2$ (COSTA NETO, 2002).

Nessas condições, sendo as duas amostras independentes, resultará que a distribuição da variável de teste também será normal; assim, para testar a igualdade de duas proporções, basta utilizar a Equação 21:

$$Z = \frac{p'_1 - p'_2}{\sqrt{p'(1-p') \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (21)$$

onde p' é a estimativa, baseada na fusão das duas amostras, da proporção comum p .

O cálculo da estimativa p' é feito através da Equação 22 (COSTA NETO, 2002):

$$p' = \frac{n_1 \cdot p'_1 + n_2 \cdot p'_2}{n_1 + n_2} = \frac{f_1 + f_2}{n_1 + n_2} \quad (22)$$

onde f_1 e f_2 são as frequências observadas nas duas amostras.

A partir dessas informações, pode-se construir o seguinte Teste de hipóteses:

$$\begin{cases} H_0 : p_1 = p_2 \\ H_1 : p_1 < p_2 \end{cases}$$

A Tabela 10 exibe os parâmetros utilizados para fazer a comparação entre as duas proporções.

Tabela 10 – Acerto antes e após a implementação do método

	Antes da Implementação	Após a Implementação
Quantidade de Cilindros Programados	$n_1 = 222$	$n_2 = 126$
Quantidade de Cilindros Enviados para a UTE até a Data Prevista	$f_1 = 177$	$f_2 = 114$
Proporção	$p'_1 = 0,797$	$p'_2 = 0,905$
$n_i \cdot p'_i$	177	114
$n_i \cdot (1 - p'_i)$	45	12

A partir da Tabela 10, pode se observar que $n_1 \cdot p'_1 \geq 5$, $n_1 \cdot (1 - p'_1) \geq 5$, $n_2 \cdot p'_2 \geq 5$, e $n_2 \cdot (1 - p'_2) \geq 5$. Portanto, as distribuições por amostragem de p'_1 e p'_2 poderão ser aproximadas por distribuições normais.

Utilizando a Equação 22 e os valores da Tabela 10, pode-se calcular a estimativa da proporção comum p :

$$p' = \frac{f_1 + f_2}{n_1 + n_2} = \frac{177 + 114}{222 + 126} \Rightarrow p' = 0,836$$

A partir da Equação 21:

$$Z = \frac{p'_1 - p'_2}{\sqrt{p'(1-p') \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} = \frac{0,905 - 0,797}{\sqrt{0,836 \cdot (1 - 0,836) \left(\frac{1}{222} + \frac{1}{126} \right)}} = 2,6$$

$$Z = 2,6 \Rightarrow p - value = 0,46\%$$

Como o valor de $p - value$ encontrado é muito pequeno, a hipótese H_0 pode ser rejeitada, e é possível afirmar que houve realmente uma melhoria do acerto da data de envio dos cilindros para a UTE após a implementação deste método. O acerto passou, em média, de 93 para 118 cilindros por mês; ou em termos percentuais, de aproximadamente 80% para 90%, o que reduz consideravelmente o número de reprogramações e proporciona um melhor atendimento ao cliente.

Um outro resultado que pode ser conseguido com a utilização do modelo de simulação é a previsão da nova capacidade da Forjaria após a aquisição de mais um forno de pré-aquecimento.

Inicialmente, deve-se adicionar mais um forno ao modelo computacional. A seguir, deve-se executar uma simulação (com as devidas replicações) e construir o intervalo de confiança para a média de cilindros produzidos.

Para isso, deve-se determinar um nível de confiança α e adaptar a Equação 16, substituindo-se σ por s e a distribuição normal pela distribuição *t-Student*; o que levará à Equação 23 (COSTA NETO, 2002):

$$P\left[\bar{X} - t_{n-1, \alpha/2} \frac{s_x}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{n-1, \alpha/2} \frac{s_x}{\sqrt{n}}\right] = 1 - \alpha \quad (23)$$

Embora este procedimento tenha sido realizado na empresa para se determinar a nova capacidade do sistema com a adição de mais um forno de pré-aquecimento, os valores numéricos e os cálculos relacionados à Equação 23 não poderão ser apresentados neste trabalho por questões de sigilo.

5.3 OUTROS RESULTADOS

Além dos resultados apresentados nas seções 5.1 e 5.2, é possível ainda citar outros:

- a) Determinação da capacidade de produção mensal - Através do método proposto está sendo possível substituir a antiga prática de se utilizarem valores médios e cálculos aproximados para se determinar a quantidade de cilindros que pode ser produzida num determinado mês, por outra que considera as particularidades de cada cilindro;
- b) Redução do número de reprogramações - Com um melhor planejamento e com uma melhor programação da produção, o número de reprogramações realizado pelo departamento de Planejamento e Controle de Produção ao longo do mês foi bastante

reduzido. As reprogramações, atualmente, só ocorrem quando surge algum grande imprevisto, tal como a quebra repentina de um equipamento ou o sucateamento de algum cilindro. Além disso, após a quebra de algum equipamento, é possível testar alternativas para contornar o problema;

c) Análise do impacto causado pela priorização um cilindro - Através da simulação, é possível, ainda, verificar qual é o impacto causado no sistema pela priorização de um determinado cilindro. Dessa forma, o tomador de decisão poderá analisar se os benefícios conseguidos pela priorização desse cilindro compensarão as perturbações causadas no sistema;

d) Redução do consumo de gás: A fonte de energia dos fornos de pré-aquecimento é o gás natural. Com a redução do número de enforamentos necessários para produzir os cilindros, há, também, uma redução no consumo de gás de cerca de 10% por mês;

e) Avaliação do momento mais adequado para realizar as Manutenções Preventivas - Por meio da simulação, é possível determinar os momentos mais convenientes para a realização de paradas para manutenções preventivas, de tal forma que o impacto causado sobre a produção seja mínimo. Dessa forma, pode-se evitar que a produção seja interrompida num momento crítico, ou que uma manutenção seja adiada ou realizada inapropriadamente;

f) Planejamento do uso de recursos adicionais - Finalmente, o programador da área pode constatar, com a devida antecedência, uma eventual necessidade de reservar fornos de tratamento térmico em outras áreas da empresa, evitando, com isso, futuros transtornos para os setores envolvidos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 COMENTÁRIOS SOBRE A APLICAÇÃO DO MÉTODO

As organizações vêm enfrentando uma competitividade crescente devido a fatores como globalização, exigências dos clientes, avanços tecnológicos, etc. Para enfrentar adequadamente esta situação, torna-se necessária uma gestão efetiva da manufatura.

Vários autores citados nesta pesquisa, tais como Correa e Giansesi (1996), apresentaram a manufatura como um importante instrumento de competição para atingir os resultados propostos, tais como lucratividade, confiabilidade, capacidade de resposta e credibilidade.

O objetivo principal, traçado no início deste trabalho, de desenvolver um método de planejamento e gerenciamento da produção de uma indústria siderúrgica integrando os conceitos da Teoria das Restrições, Programação Linear Inteira e Simulação, foi atingido com uma melhor utilização do recurso gargalo e com uma sensível melhora no atendimento do prazo de entrega entre as áreas da empresa, conforme apresentado no Capítulo 5, de 80% para 90%.

Com relação aos objetivos específicos (mapear o fluxo de produção de uma empresa do setor siderúrgico; aplicar os conceitos da Teoria das Restrições para identificar os gargalos existentes na linha de produção da referida empresa; desenvolver e validar um ou mais modelos de Programação Linear Inteira para otimizar o processo de fabricação de cilindros de encosto; desenvolver e validar modelo (s) de Simulação para a linha de cilindros de encosto da empresa; propor uma integração da TOC com os modelos de PLI e Simulação para realizar o planejamento e o gerenciamento da produção desses cilindros; validar o modelo integrado; apresentar um estudo de caso onde se aplicará a ferramenta criada), estes também foram alcançados durante o desenvolvimento desta dissertação, como apresentado no Capítulo 4.

6.2 REVISÃO DO CONJUNTO DE PROPOSIÇÕES E QUESTÕES INICIAIS DA PESQUISA

Na Seção 1.4 foram levantadas algumas proposições e questões que foram examinadas dentro do escopo de estudo, as quais poderiam ser refutadas ou validadas:

- P1: Existe ao menos uma forma de integrar TOC, PLI e Simulação.

Este trabalho apresentou uma forma de aplicar, conjuntamente, a TOC, a PLI e a Simulação. Por meio da primeira, foi possível conduzir os esforços em direção ao ponto crítico do sistema, enquanto as demais foram utilizadas para explorar ao máximo a restrição do sistema;

- P2: É possível utilizar a Simulação como processo de simplificação da PLI.

Como foi visto na Seção 4.2.2, para solucionar o problema de desabastecimento das linhas, havia a necessidade de garantir-se a otimização do equipamento gargalo, o que tornava necessária a utilização de uma técnica de programação matemática. Entretanto, o sistema analisado neste trabalho possuía características que dificultavam uma abordagem por meio da Programação Linear Inteira, mas que poderiam ser modeladas satisfatoriamente por meio de um modelo de simulação.

A solução encontrada foi dividir o problema em duas partes, de forma que uma pudesse ser solucionada através de um modelo de PLI, e a outra, por um modelo de simulação. O resultado foi a elaboração de um modelo de otimização mais simples, que levou em consideração apenas o equipamento gargalo; e de um modelo de simulação que moldou os componentes do sistema que dificultavam a modelagem por meio da programação matemática;

- P3: A gestão do gargalo melhora o desempenho do processo produtivo, e, por consequência, melhora a assertividade do prazo.

Conforme apresentado na Seção 2.1.2, os gargalos governam tanto o ganho quanto o inventário, uma vez que o recurso restritivo determina o fluxo de um sistema. Um recurso não-gargalo produzindo com toda a sua capacidade irá apenas gerar

estoques intermediários e despesas; e a redução do seu tempo de operação aumentará, apenas, seus níveis de ociosidade.

Além disso, a busca pela “otimização” de todos os setores produtivos individualmente pode prejudicar a formação de um fluxo contínuo de produção, o que prejudica o acerto do prazo;

- Q1: Qual (is) é (são) o(s) gargalo(s) que dificulta(m) a relação operacional entre Manufatura e atendimento ao cliente?

Através dos conceitos da Teoria das Restrições, foi possível determinar o gargalo da linha produtiva (Capítulo 4) e verificar que os fornos de pré-aquecimento limitam a quantidade de cilindros a serem produzidos;

- Q2: Quais os problemas existentes nesta linha no nível operacional e quais são suas respectivas causas?

O principal problema é que o planejamento visava maximizar a eficiência local dos recursos em todos os setores produtivos. O planejamento era realizado de forma a impedir a parada de algum recurso por desabastecimento (mesmo não sendo o gargalo), sempre tentando otimizar todos os setores produtivos individualmente. Desta maneira, não havia um fluxo contínuo de produto no recurso gargalo, o que prejudicava a assertividade da produção;

- Q3: Quais alternativas poderiam minimizar os efeitos causados por estes problemas?

Pela utilização dos conceitos da Teoria das Restrições, PLI e Simulação, foi possível gerar um planejamento que melhore a utilização do equipamento gargalo e mantenha a linha de produção alimentada, otimizando o sistema, como foi apresentado no Capítulo 4.

6.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Este estudo mostrou a viabilidade da utilização da Teoria das Restrições, e das ferramentas da Pesquisa Operacional (Programação Linear Inteira e Simulação de Sistemas), em empresas do ramo siderúrgico.

A utilização da Teoria das Restrições permite que o enfoque seja dado aos pontos críticos do sistema, evitando a busca por soluções em setores que pouco ou nada contribuiriam para a melhoria do desempenho do sistema.

Durante a realização deste trabalho, foi possível, também, comprovar diversas das vantagens da Simulação-Otimização. A utilização de um modelo de Programação Linear Inteira tendo como função-objetivo a otimização do equipamento gargalo garante um cenário otimizado para alimentar o modelo de simulação e evita a necessidade de realizar-se uma nova otimização após cada simulação. Além disso, o emprego do modelo de PLI criado evita que o modelo de simulação tenha que procurar por uma “solução ótima” para o recurso gargalo. Dessa forma, consegue-se simplificar o modelo de simulação e reduzir o tempo de sua execução.

O modelo de simulação, por sua vez, além de possibilitar a inclusão de maiores detalhes, permite, também, que as restrições mais complexas do sistema sejam retiradas do modelo de PLI, o que facilita e simplifica sua modelagem e reduz o tempo de sua execução.

Além disso, a simulação permite experimentar decisões, sem a necessidade de interromper as operações do sistema real, possibilitando aos tomadores de decisão, em pouco espaço de tempo, ter uma visão de planejamento de longo prazo de suas ações com a integração de todo o sistema produtivo.

Outros benefícios conseguidos são o gerenciamento com maior eficiência dos recursos, a redução de estoque em processo, maior velocidade de resposta, redução de filas, menores custos operacionais e maior confiabilidade de entrega.

Embora possa parecer óbvio, deve-se ressaltar, entretanto, que para ser uma ferramenta útil, a simulação deve ser utilizada corretamente: os passos do estudo devem ser seguidos sistematicamente, os dados devem ser analisados com cuidado e a implementação deve ser conduzida corretamente. Se tais cuidados forem

negligenciados, erros advindos de uma simulação incorreta causarão danos e prejuízos ao sistema real. Assim, quanto melhores forem os dados de entrada e quanto melhor for a modelagem do sistema que está sendo analisado, melhores serão os resultados obtidos, sendo o inverso também verdadeiro.

Dessa forma, pode-se afirmar que a utilização conjunta da PLI com a Simulação, além de facilitar e simplificar o processo de modelagem permite unir os pontos fortes das duas técnicas, o que torna o modelo resultante mais próximo do sistema real. Além disso, a combinação das duas ferramentas permite realizar análises mais aprofundadas a respeito do sistema real em relação às que seriam conseguidas com a utilização das referidas técnicas, isoladamente.

Vale ainda observar que, embora neste trabalho só tenha sido possível realizar uma única iteração do método proposto (já que não foi possível elevar a restrição do sistema, conforme Seção 4.2.7), o método apresentado na Seção 3.2 permite que os processos de otimização e de melhoramento contínuo sugeridos pela TOC tenham continuidade até que as necessidades dos tomadores de decisão sejam atendidas.

Finalmente, pode-se concluir que a utilização correta do método apresentado neste trabalho é uma forma eficaz para se obter um melhor planejamento/gerenciamento da linha produtiva estudada, uma vez que proporciona uma análise detalhada do sistema em seu ponto crítico de uma maneira eficiente.

6.4 FUTURAS DIREÇÕES DE PESQUISA

Após a elaboração desta dissertação, foram identificados alguns tópicos a serem abordados em futuros trabalhos:

1. Integrar o modelo atual com o setor de Usinagem e Tratamento Térmico e com o processo logístico. Com esta integração será possível ter um aumento da performance do atendimento ao prazo do cliente.

2. Aplicar os conceitos do *Lean Manufacturing* (WERKEMA, 2004) em conjunto com a simulação. Este tema está em constante desenvolvimento, devido aos estudos que vêm sendo realizados nesta área.

3. Aplicar os conceitos de padronização dos processos (SDCA – *Standard, Do, Control, Action*) em conjunto com o método aplicado nesta pesquisa (WERKEMA, 2004).

REFERÊNCIAS

AGUIAR, R. F.; SILVA, L. T.; CAULLIRAUX, H. M.; PRADO, C. A. S. **A Teoria das Restrições em um processo produtivo de fabricação de chapas de gesso acartonado no Brasil.** In: XXIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Florianópolis, 3 A 5 de nov de 2004. ENEGEP, 2004.

ALVES, J. M.; SANTOS, R. F. **Custeio baseado em atividades e teoria das restrições: um caso real na indústria de eletrodomésticos.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

ANACLETO, M. A.; ACHÃO FILHO, N.; OLIVEIRA, M. J. F. **A simulação como método de avaliação da qualidade de atendimento e fonte de dados para BSC na emergência do hospital municipal Miguel Couto.** In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

ANASTÁCIO, A. F. **Proposta de uma sistemática para estruturar uma rede logística reversa de distribuição para o sistema de coleta, processamento e recuperação de resíduos da construção civil – o caso do município de Curitiba.** 2003. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisão.** 2ªed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998. 277p.

ARAÚJO, S. A.; BARROS JR, A. A.; KAMPKE, E. H. **Pesquisa operacional: referências da área.** In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; GANASSE, H. Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Elsevier Editora, 2007. 523p.

ARENASFERA, 2006. **Análise de risco em planejamento de lavra: integrando simulação geoestatística, simulação a eventos discretos e ferramentas de otimização.** Disponível em < www.paragon.com.br/innova/files/Eventos/Arenasfera/Arenasfera2006/Cases/Arenasfera%202006%20-%202005%20-%20MBR.pdf> Acesso em 30 set. 2008.

AZADIVAR, F.; **Simulation optimization methodologies.** In: 31st Conference of Winter Simulation: simulation, v1. p.93-100, Phoenix,1999.

BALCI, O. **Verification, validation and accreditation of simulation models.** In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, Atlanta, GA, USA, 1997

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event system simulation.** 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001. 594p.

BARBOZA, A. O.; CARNLERL; C.; STELNER, M. T. A.; SIQUEIRA, P. H. Técnicas da pesquisa operacional no problema de horários de atendentes em centrais telefônicas. **Gestão e Produção**, v.10, n.1, p.109-127, abr. 2003

BATEMAN, R. E.; HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A. BOWDEN, R. E., GOGG, T. J. **Simulação otimizando os sistemas.** 2^a Edição São Paulo: Editora. Imam, 2002. 136p.

BERTO, R.M.V.S; NAKANO, D. N. **A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa.** Produção, São Paulo, v. 9, n. 2., p. 65-76, 2000.

BOLWIJN, P., KUMPE, T. **Manufacturing in the 1990's – productivity, flexibility and innovation.** In: Long Range Planning - International Journal of Strategic Management, Londres v.23, (4), p. 44-57, 1990.

BORGES, P.C.R. **Métodos Quantitativos De Apoio À Bibliometria: A Pesquisa Operacional Pode Ser Uma Alternativa?.** Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia – IBICT, 2002, 15 p.

BORNIA, A. C. **Análise Gerencial de Custos em Empresas Modernas.** Porto Alegre, Bookman, 2002. 203p.

BOSCHETTO, S. N.; LÜDERS, R.; NEVES JR, F.; ARRUDA, L. V. R. **Otimização da programação de operações em terminais petrolíferos.** In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, Campinas, 21 a 24 de out de 2007. PDPETRO, 2007.

BUSH, A.; BILES, W. E.; DePUY, G. W. **Iterative optimization and simulation of barge traffic on an inland waterway.** In: Winter Simulation Conference, New Orleans, p. 1751-1756, jul. 2003

BUZZO, W. R.; MOCCELLIN, J. V. **Programação da produção em sistemas *flow shop* utilizando um método heurístico híbrido algoritmo *genético-simulated annealing*.** Gestão e Produção, v.7, n.3, p.364-377, dez. 2000.

CARDOSO, D. F.; VINHOZA, T. T. V.; NETO, R. S.; **A simulação como ferramenta de auxílio na avaliação de um sistema de comunicação CDMA com múltiplas portadoras.** In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro.** 2007. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CHEUNG, W.; ZHOU, H. **Using Genetic Algorithms and Heuristics for Job Shop Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times.** Annals of Operations Research v.107, n.1-4, p. 65–81, out. 2001.

CHWIF, L; MEDINA, A.C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações.** São Paulo: Editora Bravarte, 2006.

CLETO, M. G. **A gestão da produção nos últimos 45 anos: transformações econômicas e avanços tecnológicos determinam o desenvolvimento das novas formas de gestão da produção.** Revista FAE Business, n.4, p.38-41 dez. 2002.

COGAN, S. **Gerenciamento dos custos operacionais em produtos conjuntos.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

COGAN, S. **Teoria das Restrições** In: Seminários da Controladoria Geral, 2005, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www7.rio.rj.gov.br/cgm/comunicacao/publicacoes/cadernos/?2005/02/1>> Acesso em 21jul. 2007.

COGAN, S.; CORREIA, A. B.; BUENO, C. R. **A teoria das restrições aplicada à geração de energia hidrelétrica.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

COGHLAN, D.; COUGHLAN, P. **Acquiring the capacity for operational improvement: an action research opportunity**. Human resource planning, v. 26, n. 2, p. 30-38, 2003.

CORBETT, T. **Contabilidade de Ganhos**. São Paulo: Editora. Nobel, 1997.

CORBETT, T. **Contabilidade de ganhos e activity-based costing: curto prazo versus longo prazo?**, 2003. Disponível em <<http://www.corbett.pro.br>> Acesso em: 04 ago. 2007.

CORRÊA, Henrique L; CORRÊA, Carlos A. **Administração de produção e operação**. 2 ed. São Paulo: Editora. Atlas, 2006.

CORREA, H.; GIANESI, I. **Just in time, MRP II e OPT, um enfoque estratégico**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

CORREIA, K. S. A.; ALMEIDA, D. A. **Aplicação da técnica de mapeamento de fluxo de processo no diagnóstico do fluxo de informações da cadeia cliente-fornecedor**. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Curitiba, 23 a 25 de out de 2002. ENEGEP, 2002.

CORREIA, K. S. A.; LEAL, F.; ALMEIDA, D. A. **Mapeamento de processo: uma abordagem para análise de processo de negócio**. In: XXII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Curitiba, 23 a 25 de out de 2002. ENEGEP, 2002.

COSTA, M. A. B. **Simulação de sistemas**. São Carlos, 2002, 44p.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2002. 266p.

COX III, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual da teoria das restrições**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 280p.

CRUZ, J. P. A. F. **Algoritmos de aproximação estocástica com valor do passo adaptativo**, 2005. 127 f. Tese (Doutorado em Matemática) - Universidade de Aveiro, Aveiro, 2005.

CRUZ, C.; RIBEIRO, U. **Metodologia científica - teoria e pratica** 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Axcel Books, 2004, 340 p.

CSILLAG, J. M. **Análise do valor: metodologia do valor**. São Paulo: Editora Atlas, 1995. 370p.

DANNENBRING, D.G.: **An Evaluation of Flow-Shop Sequencing Heuristics**. Management Science, n.23, p.1174-1182, 1977.

DETTMER, H. W. Teoria das Restrições maximiza os negócios. Revista Banas Qualidade, São Paulo: v.61, n.60, p. 8-13, abr. 2000

DÍAZ, B. A. **An SA/TS Mixture Algorithm for the Scheduling Tardiness Problem**. European Journal of Operational Research, n.88, p.516-524, 1996.

DÍAZ, J. A.; PÉREZ, I. G. **Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season**. In: Winter Simulation Conference, v.2 p. 1114-1117. Orlando, dec, 2000.

DOMINGOS, J. C.; RODRIGUES, C. V.; PEREIRA, N. A.; POLITANO, P. R. BACHEGA, S. J. **Um sistema de apoio à decisão para *scheduling* em *job shop*, utilizando lógica fuzzy**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, 13 A 16 de out de 2008. ENEGEP, 2008.

DONATO, A.A. **Aplicação do processamento paralelo na resolução de problemas de programação linear de grande porte utilizando o princípio de decomposição de Dantzig-Wolfe**. 2002. 94p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

DUARTE, R. N. 2003. **Simulação Computacional: Análise de uma Célula de Manufatura em Lotes do Setor de Autopeças**. 168p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Inst. de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

EHRlich, P.J. **Programação Linear e decisão**. São Paulo: FGV, 2004. 16p. Disponível em: <http://www.fgvsp.br/academico/professores/Pierre_J_Ehrlich/ProgramacaoLineareDecisao.pdf> Acesso em: 04 ago. 2007.

ELIAS, D. A. N.; CAMARGO JR, A. S. **Cobertura e localização de lojas no varejo**. In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

ESPEJO, L.G.A.; GALVÃO, R.D. O uso das relaxações lagrangeana e surrogate em problemas de programação inteira. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v.22, n.3, p.387-402, julho a dezembro de 2002.

FERNANDES, L. J. **Aplicação dos conceitos da teoria das restrições, programação linear inteira (PLI) e simulação em uma indústria siderúrgica**. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.

FERREIRA, P. A. V. **Planejamento e análise de sistemas de produção**. Campinas, 2006. 128 p. Disponível em <http://www.dt.fee.unicamp.br/~valente/capt1_044.pdf> Acesso em: 04 ago. 2007.

FIGUEIREDO, J. C. B. **Construção de um modelo de dinâmica de sistemas voltado para o ensino da teoria das restrições.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

FREITAS, A.A.M.; HENRIQUES, F.C.; MANSUR, R.T. **Comparação entre programação linear e teoria das restrições no cálculo do mix de produtos: um exemplo real.** In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Ouro Preto, 21 a 24 de out de 2003. ABEPRO, 2003.

FU, M. C. **Optimization for Simulation: Theory vs. Practice.** Journal on Computing, v.14, n.3, 2002.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento.** 2003. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

GIL, A. C.. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo: Atlas, 1996.

GIL, A. C.. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** São Paulo: Atlas, 1999.

GÓES, A.R.T. **Otimização na distribuição da carga horária de professores – método exato, método heurístico, método misto e interface.** 2005. 130p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning.** Addison-Wesley Publishing Company, INC. United States of America, 1989.

GOLDRATT, E. M., COX, J. **A Meta.** São Paulo: Editora Educator, 1994.

GOLDRATT, E. M. **Corrente crítica**. São Paulo: Editora Nobel, 1998.

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

GUERREIRO, R. **A Meta da Empresa**. São Paulo: Editora. Atlas, 1996.

GUIMARÃES, I. F. G.; PEREIRA, D. M.; MURTA, J. L. B.; SILVA, R. T. L. **A simulação computacional na identificação dos princípios da teoria das restrições: o caso de uma empresa de ferro-ligas na região do quadrilátero ferrífero**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, 13 A 16 de out de 2008. ENEGEP, 2008.

HARRELL C. R; GHOSH B. K; BOWDEN R. G. **Simulation Using Promodel** 3rd ed. New York: Editora McGraw-Hill, 2000. 603p.

HEIN, N.; LOESCH, C.; FARIA, T. H. **Algoritmo project um método alternativo de resolução de problemas de programação linear**. In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

HENRIQUES, R. P.; GONÇALVES, A. A. **Modelo computadorizado para simulação dos prazos de produção e de entrega na indústria de confecção**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, 13 A 16 de out de 2008. ENEGEP, 2008.

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

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

HOLMEN, J. S. **ABC VS. TOC: it's a matter of time**. Management Accounting, p.37-40, jan., 1995.

IGNALL, E.; SCHRAGE, L.E. **Application of Branch and Bound Technique to some Flow-Shop Problem**. Operations Research, n.13, p.400-412, 1965.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO GERENCIAL - INDG. Nova Lima. Disponível em: <<http://www.indg.com.br/po>>. Acesso em: 04 ago. 2007.

ISHIBUCHI, H.; MISAKI, S. & TANAKA, H. **Modified Simulated Annealing Algorithms for the Flow Shop Sequencing Problem**. European Journal of Operational Research, n.81, p.388-398, 1995.

KLEN, A. M.; GUIMARÃES, I. F. G.; PEREIRA, D. M. **A utilização da simulação em gestão hospitalar: aplicação de um modelo computacional em um centro de imobilizações ortopédicas**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, 13 A 16 de out de 2008. ENEGEP, 2008.

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

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2004. 384p.

LAW, A. M. **Simulation model's level of detail determines effectiveness**. Industrial Engineering, V. 23 (10), p. 16-18, 1991.

LAW, A.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**, 3ª Ed. Boston: Editora Mc Graw-Hill, 2000. 760p.

LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

LEAL, F.; ALMEIDA, D. A. **Simulação computacional para definição de melhorias no processo de atendimento a clientes em uma agencia bancária**. VI Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional, 2004. Universidade Federal de Itajubá, 2004.

LEAL, F.; PINHO, A. F.; CORRÊA, K. E. S. **Análise comparativa de técnicas de mapeamento de processo aplicadas a uma célula de manufatura**. In Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 7 a 9 de nov de 2005. SIMPEP, 2005.

LIMA FILHO, E. R.; PEREIRA, R. C.; CASTRO, V. F.; ALMEIDA, M. A. R. **Simulação de eventos discretos aplicado em manutenção de tomógrafos hospitalares**. In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Pesquisa e Desenvolvimento, 2002. 58p.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986.

MADEIRA JR, A. G. **Modelo de avaliação de navios de escolta: uma abordagem MCDA**. In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

MARTELLO, S.; TOTH, P. **Knapsack problems: algorithms and computer implementations**. Chichester: J. Wiley, 1990. 296p.

MARTIN, A. P. S. **Método de avaliação de tecnologias de edificação para a habitação de interesse social sob o ponto de vista da gestão dos processos de produção**. 1999. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

MARTINS, F. A. **O processo de raciocínio da teoria das restrições na indústria moveleira de pequeno porte: um estudo de caso**. 2002. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J.B. **Metodologia de pesquisa**. Itajubá: UNIFEI, 2007. 147p.

MIGUEL, P. A. C. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. *Produção*, São Paulo, v. 17, n.1, p.216-229, Jan./Abr. 2007.

MILES, M.; HUBERMAN, M. **Qualitative data analysis**. London: Sage Publication, 1994.

MOCCELLIN, J. V. **A New Heuristic Method for the Permutation Flow Shop Scheduling Problem**. *Journal of the Operational Research Society*, n.46, p.883-886, 1995.

MOCCELLIN, J.V.; NAGANO, M.S.: **Evaluating the Performance of Tabu Search Procedures for Flow Shop Sequencing**. *Journal of the Operational Research Society*, n.49, p.1296-1302, 1998.

MOCCELLIN, J.V. & SANTOS, M.O. **An Adaptive Hybrid Metaheuristic for Permutation Flowshop Scheduling**. Journal of Control and Cybernetics, n. 3, 2000.

MONTEVECHI, J. A. B.; COSTA, R. F. S.; LEAL, F.; BATISTA, F. D.; MIRANDA, R. C.; SANTOS, A. C. O.; SANTOS, M. J. **Modelagem de uma célula de manufatura complexa através de IDEFO e simulação de eventos discretos**. In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

MONTEVECHI, J. A. B.; TURRIONI, J. B.; ALMEIDA, D. A.; MERGULHÃO, R. C.; LEAL, F. **Análise comparativa entre regras heurísticas de sequenciamento da produção aplicada em *job shop***. Produto & Produção, v.6, n.2, p.12-18, jun. 2002.

MORAES, E. F. **Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina cauê da CVRD**. 2005. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MORITO, S.; KOIDA, J.; IWAMA, T.; SATO, M.; TAMURA, Y. **Simulation based constraint generation with applications to optimization of logistic system design**. In: 31st Winter Simulation Conference, v.1, p 531-536. Phoenix, dez. 1999.

MURATA, T.; ISHIBUCHI, H.; TANAKA, H. **Genetic algorithms for flow shop problems**. Computers and Industrial Engineering, n.30, v.4, p.1061-1071, 1996.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V. LORENA, L. A. N. **Redução do estoque em processamento em sistemas de produção *flow shop* permutacional**. Revista Produção *on-line*, Florianópolis, v. 5, n.3, set. 2005.

NAKASHIMA, P.H.R. **Alocação de gás de elevação em campos de petróleo: modelos e algoritmos.** 2007. 110p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

NAKAYAMA, A. Y. **Análise de margem de contribuição e capacidade produtiva por programação linear e simulação para apoio à tomada de decisão num sistema de manufatura.** 2005. 85 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

NAWAZ, M.; ENSCORE Jr., E.E. & HAM, I. **A Heuristic Algorithm for the m-Machine, n-Job Flow-Shop Sequencing Problem.** Omega, n.11, p.91-95, 1983.

NOREEN, E. W.; SMITH, D.; MACKEY, J. T. **A Teoria das Restrições e suas Implicações na Contabilidade Gerencial.** São Paulo: Editora Educator, 1996.

NOWICKI, E. & SMUTNICKI, C. **A Fast Tabu Search Algorithm for the Permutation Flow-Shop Problem.** European Journal of Operational Research, n.91, p.160-175, 1996.

NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA – NUMA. São Paulo. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/TOC.html>. Acesso em: 21 jul. 2007.

OLIVEIRA, F. A.; DUARTE, R. N.; MONTEVECHI, J. A. B. **O reflexo da mudança organizacional sobre o desempenho de uma empresa de autopeças: estudo de caso.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 22, 2002, Curitiba. Anais...Curitiba: PUC-PR, 2002.

OLIVEIRA, C. A.; RIBEIRO, J. R.; SILVA, A. C. S.; BELDERRAIN, M. C. N. **Gestão de estoques de peças de reposição de sistemas construídos com tecnologia**

cots utilizando simulação. In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

PAIVA, A. F. O. **Geração automática de modelos de simulação de uma linha de produção na indústria têxtil.** 2005, 225 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

PALMER, D. S. **Sequencing Jobs through a Multistage Process in the Minimum Total Time – A Quick Method of obtaining a Near Optimum.** Operational Research Quarterly, n.16, p.101-107, 1965.

PAPADOPOULOS, H. T; HEAVEY, C; BROWNE, J. **Queueing Theory in Manufacturing Systems Analysis and Design.** 1st. ed. London: Chapman & Hall, 1993.

PARAGON. **Introdução à Simulação com o Arena 10.0.** São Paulo, 2007, 285 p.

PARASUARAMAN, A.; ZEITHAML, V.; BERRY, L. L. **A conceptual model of service quality and its implications for future research.** Journal of Marketing, v.48, p.41-50. 1984.

PARK, M.W. & KIM, Y.D. **A Systematic Procedure for Setting Parameters in Simulated Annealing Algorithms.** Computers & Operations Research, n.25, p.207-217, 1998.

PEINADO, J.; GRAEML; A R. **Administração da produção (operações industriais e serviços).** Curitiba: UnicenP, 2007. 750p.

PEIXOTO, E. C. **Planejamento de pedidos de compra e estoque de insumos a partir de previsão agregada de vendas e histórico de demanda utilizando**

simulação. 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PINHO, A. F. Metodologia para utilização de algoritmos genéticos em modelos de simulação computacional em ambientes de manufatura. 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

PINHO, A. F.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A. Combinação entre as técnicas de fluxograma e mapa de processo no mapeamento de um processo produtivo. In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Foz do Iguaçu, 9 a 11 de out de 2007. ENEGEP, 2007.

PINTO JR., O. P. F. Simulação e otimização; desenvolvimento de uma ferramenta de análise de decisão para suprimento de refinarias de petróleo através de uma rede de oleodutos. 2001. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

POZO, H.; TACHIZAWA, T.; SOUZA, J. H. Teoria das restrições: um estudo de caso através da redução do tempo de *set up* em uma metalúrgica do ABC. In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

PRADO, D. Programação Linear. Belo Horizonte: Editora Desenvolvimento Gerencial, 1999, 206p.

REEVES, C.R. A Genetic Algorithm for Flowshop Sequencing. Computers & Operations Research, n.22, p.5-13, 1995.

ROBINSON, S. **Simulation: the practice of model development and use**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. 316p.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Aplicação da Teoria das Restrições e de técnicas da Pesquisa Operacional na melhoria de manufatura**. 2007. 116p. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

ROSA, B. A.; SOUZA FILHO; E. M. **Dimensionamento de recursos humanos em uma empresa fabricante de materiais sanitários: uma abordagem via programação inteira**. In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

SANTOS, A.R. **Metodologia científica: a construção do conhecimento**. Rio de Janeiro: DP&A, 1999.

SANTOS, O. M.; SILVA, P. D. A.; FURTADO, K. G.; COGAN, S. **A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo**. Rio de Janeiro. 2006, 15p.

SEED TECNOLOGIA LTDA. Disponível em: <<http://www.seed.com.br/pt/Scheduler/TOC.aspx>>. Acesso em 21jul. 2007.

SELLITTO, M. A.; BORCHARDT, M.; PEREIRA, G. M. **Análise de uma operação logística de carregamento e expedição por simulação computacional**. In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

SENGE, P. M. **A Quinta Disciplina: arte e prática da organização de aprendizagem**. 7ª ed. São Paulo: Editora Best Seller, 2000. 443p.

SELEN, W.J.; HOTT, D.D. **A Mixed-Integer Goal Programming Formulation of the Standard Flow-Shop Scheduling Problem**. Journal of the Operational Research Society, n.37; p.1121-1128, 1986.

SILVA, R. T. **Planeamento florestal, modelos de programação inteira multiobjectivo e aplicações**. 2004. 120f. Dissertação (Mestrado em Gestão da Informação nas Organizações) - Universidade de Coimbra - Faculdade de Economia, Coimbra, 2004.

SIMONETTO, E. O.; LÖBLER, M. L. Os modelos de programação linear sob a ótica da racionalidade limitada. **Revista Do CCEI - Centro de Ciências da Economia e Informática**. Bagé: EDIURCAMP, v.7, n.11, 107p., mar. 2003.

SOUZA, F. B.; TAKAO, E. L.; SILVA, M. A. C.; ANTONIOLLI, P. D.; VICENTINI, J. P. **Utilização da abordagem da teoria das restrições na gestão da cadeia de suprimentos: uma revisão conceitual**. In Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP, 11, 2004, Bauru. Anais... Bauru: UNESP, 2004. (CD ROM).

SOUZA, F. S.; GUARDIA, L. E. T. **Aplicação do modelo de roteamento e programação de veículos à distribuição de fardamento destinada aos postos de vendas e de encomendas na marinha do Brasil**. In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

SOUZA, A. B. D. & MOCCELLIN, J. V. **Metaheurística Híbrida Algoritmo Genético-Busca Tabu para Programação de Operações Flow Shop**. In: Anais do XXXII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, p.314-325, Viçosa, out. 2000. SBPO, 2000.

STAFFORD JR, E. F.; TSENG, F. T. **Two models for a family of flowshop sequencing problems.** European Journal of Operational Research, v.142, p. 282-293, out. 2002.

STEBEL, S.L.; NEVES JR.; ARRUDA, L. V. R.; RODRIGUES, L. C. A. **Scheduling de processos contínuos baseado nos recursos de estocagem.** In: XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, Natal, 2003. Anais do XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2003.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa ação.** São Paulo: Atlas, 1997.

VAMANAN, M.; WANG, Q.; BATTÀ, R.; SZCZERBA, R. J. **Integration of COTS software products ARENA & CPLEX for an inventory/logistics problem.** In: Computers & Operations Research, p. 533-547, mar. 2000.

VASHI, V. H.; BIENSTOCK, C. C.; MENTZER, J. T. **The use of response surface methodology to optimize logistics simulation models.** Journal of Business Logistics, v.14 p 197-225, 1995.

WERKEMA, C. **Criando a cultura seis sigma volume 1.** Nova Lima: Werkema Editora, 2004, 253p.

YARMISH, G. **A distributed implementation of the Simplex method.** 2002. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências da Computação e Informação) - Polytechnic University, New York, 2002.

ZEGORDI, S.H.; ITOH, K. & ENKAWA, T. **Minimizing Makespan for Flow Shop Scheduling by Combining Simulated Annealing with Sequencing Knowledge.** European Journal of Operational Research, n.85, p.515-531, 1995.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ALTIOK, T., MELAMED, B. **Simulation Modeling and Analyses with Arena**. San Diego: Academic Press, 2007. 440p.

ARAUJO, S. A, ARENALES, M. N. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, vol.23, nº3, p. 403-420, Sept./Dec. 2003.

AZADIVAR, F.; TOMPKINS, G. Simulation optimization with qualitative variables and structural model changes: a genetic algorithm approach. **European Journal of Operational Research**, v.113, p. 169-182, fev. 1999.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. **Modeling and simulation: operations management research methodology using quantitative modeling**. International Journal of Operations and Production Management, v. 22, n. 2, p. 241-264. 2002.

BRANDÃO, R. S.; CORTEZ, J. M. R. **Estudo de aplicação prática de resolução do problema de seqüenciamento da produção sob encomenda com algoritmo genético**. In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

CALADO, R. D.; RUGGIERO, S.; COOPER, R. **Mapeamento da cadeia de valor na transformação de chapas**. In: Congresso de Corte e Conformação, São Paulo, 2003.

CAMPOS, T. R.; SILVA, S. L. **Mapeamento do fluxo do produto para projetos de redução de custos**. In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Foz do Iguaçu, 9 a 11 de out de 2007. ENEGEP, 2007.

CAMPOS, V. F. **Qualidade Total - Padronização de Empresas**, Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços, 2004, 142 p.

DONATO, F. A. S.; MAYERLE, S. F.; FIGUEIREDO, J. N. **Um modelo de planejamento agregado da produção para otimizar o mix de produtos e clientes em uma indústria metal-mecânica.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

FEG-UNESP. **Diretrizes para apresentação de dissertação, tese, monografia e trabalho de conclusão de curso FEG-UNESP.** Guaratinguetá, 2007. 89p. Disponível em < www.feg.unesp.br/pos-graduacao/diretrizes2007.doc > Acesso em 7 mar. 2009.

FERNANDES, R. O. P. **Estudo de seqüenciamento da produção em uma indústria de meias.** 2006. 35p. Monografia – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006.

FINK, C. **A programação da produção em fundições de pequeno porte: modelagem matemática e métodos de solução.** 2007. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação e Matemática Computacional) - Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2007.

FIORONI, M. M.; FRANZESE, L. A. G.; HARANO, E. L. M.; COSTHEK, B. P.; MENDES, J. B.; CUZZUOL, J.; LIMA, J. S.; SANTOS, R. B.; COELHO, R. J.; SILVA, A. C.; KIMSR O. J. **Simulation based decision for steelmaking operations challenges.** In: 37° Winter Simulation Conference, Orlando, 2005.

GEORGES, M. M. R.; BATOCCHIO, A. **Modelagem do processo de negócio da produção de aço: a visão do fluxo produtivo orientada em eventos discretos.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

GOMES JR, A. C.; CARVALHO, C. R. V.; MUNHOZ, P. L. A.; SOUZA, M. J. F. **Métodos heurísticos baseados em grasp, ils e vnd aplicados à resolução do problema de seqüenciamento em uma máquina com penalidades por antecipação e atraso da produção.** In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional.** 2003. 220 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

LIRA, A. S.; SANTOS, A. H. S. **Implementação e aplicação do método simplex no “R PROJECT”.** In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

PARAGON. **Rolling Mill Simulator.** Disponível em < http://www.paragon.com.br/Innova/files/Case/MiningSteel/simulacao_arena_case_01.pdf > Acesso em 30 set. 2008.

RYAN, J.; HEAVEY, C. **Process modeling for simulation.** Computers in Industry, n.57, p. 437–450, 2006.

SILVA, D. N. **Aplicação de processos estocásticos em gestão de custos de manutenção - uma abordagem da utilização da cadeia de Markov.** In: XI SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 5 e 6 de ago de 2008. SPOLM, 2008.

SOLETTI, J. I.; CARVALHO, S. H. V.; SOLETTI, L.; CARVALHO, D. F.; PUCÚ, P. A. B. **Simulação numérica de transporte naval para distribuição de produtos petroquímicos.** In: X SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, Rio de Janeiro, 8 e 9 de nov de 2007. SPOLM, 2007.

GLOSSÁRIO

Forma Padrão. Diz-se que um problema de Programação Linear está em sua forma padrão se houver uma maximização da função-objetivo e se todas as restrições forem do tipo igual, bem como os termos constantes e variáveis de decisão não-negativos.

Pivoteamento. Operações de pivoteamento são as operações elementares aplicadas a um sistema para transformar uma dada variável em variável básica, utilizando o método de eliminação de Gauss-Jordan.

Solução Básica: Uma solução básica é a solução de um sistema na forma canônica, obtida fazendo-se as variáveis não-básicas iguais a zero.

Solução Básica Viável. Uma solução básica viável de um sistema é uma solução básica onde todas as variáveis assumem valores não-negativos.

Solução Degenerada: quando uma variável básica é igual a zero. Soluções degeneradas são decorrências de uma estrutura particular do problema de PL.

Solução Ilimitada (*Unbounded*): quando o conjunto convexo que define os pontos factíveis é aberto na direção de otimização.

Solução Não-Factível (*Infeasible*): quando não há ponto factível que satisfaça todas as restrições. Isto significa que o problema, do modo que foi formulado, não tem solução.

Solução Ótima: Uma solução é ótima é uma solução viável que tem o valor mais favorável da função-objetivo em toda a região viável, podendo ser única ou não.

Solução Viável: Uma solução é viável se satisfizer todas as restrições do problema; uma solução é inviável, caso contrario.

Soluções Múltiplas: quando dois ou mais pontos extremos adjacentes são igualmente ótimos (com o mesmo valor para a função objetivo). Neste caso todo o segmento (ou plano, ou hiperplano) que contém estes pontos (combinação linear dos pontos) também é ótimo.

Variável Básica. Uma variável é chamada de variável básica para uma dada equação de um sistema se ela possuir coeficiente 1 nesta equação e coeficientes nulos nas demais equações do sistema.

Variável Não-Básica. Variáveis que não satisfazem a condição acima são chamadas de variáveis não-básicas.

ANEXO A – RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO

Category Overview

Values Across All Replications

Unnamed Project

Replications: 23 Time Units: Hours

Key Performance Indicators

System

Average

Number Out

31

Category Overview

Values Across All Replications

Unnamed Project

Replications: 23 Time Units: Hours

Entity

Time

VA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	243,37	1,86	235,94	252,08	194,28	297,16
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	118,69	1,98	110,76	127,57	1,6493	537,62
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Other Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	8,0000	0,00	8,0000	8,0000	8,0000	8,0000
Total Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	370,06	3,21	356,20	383,03	237,72	747,74

Other

Number In	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	76,0000	0,83	74,0000	80,0000		
Number Out	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	48,3043	0,44	45,0000	50,0000		
WIP	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Entity 1	37,0825	0,22	36,0954	37,9610	17,0000	57,0000

Category Overview

Values Across All Replications

Unnamed Project

Replications: 23 Time Units: Hours

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Batch 2.Queue	4,6654	0,26	3,6571	5,7909	0,00	18,6101
Batch 3.Queue	4,7603	0,25	3,9309	6,2175	0,00	21,4575
Batch 4.Queue	3,5445	0,38	2,3523	5,7705	0,00	17,8576
F1 Calor 1.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F2 Calor 1.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 2.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 3.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 4.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 5.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 2.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 3.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 4.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 5.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxi Corte.Queue	1,7624	0,08	1,4761	2,2447	0,00	8,3599
Prensa 1.Queue	0,4014	0,08	0,1631	0,9535	0,00	4,9401
Prensa 2.Queue	0,1287	0,05	0,04318992	0,4059	0,00	2,6530
Prensa 3.Queue	1,5384	0,19	0,9095	2,4165	0,00	7,8308
Prensa 4.Queue	1,1345	0,12	0,7470	1,7999	0,00	9,3105
Prensa 5.Queue	1,0339	0,07	0,7545	1,3279	0,00	7,5084
ToTo UTE.Queue	333,45	6,33	303,83	363,14	55,1571	581,73
ToTo.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Other

Category Overview

Values Across All Replications

Unnamed Project

Replications: 23 Time Units: Hours

Queue

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Batch 2.Queue	0,1850	0,01	0,1422	0,2252	0,00	4,0000
Batch 3.Queue	0,1917	0,01	0,1529	0,2418	0,00	4,0000
Batch 4.Queue	0,07844123	0,01	0,05227416	0,1282	0,00	4,0000
F1 Calor 1.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F2 Calor 1.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 2.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 3.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 4.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 1 Calor 5.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 2.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 3.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 4.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Forno 2 Calor 5.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Oxi Corte.Queue	0,07364240	0,00	0,05677750	0,0966	0,00	5,0000
Prensa 1.Queue	0,03122340	0,01	0,01268753	0,07416354	0,00	5,0000
Prensa 2.Queue	0,01014383	0,00	0,00335922	0,03247078	0,00	3,0000
Prensa 3.Queue	0,1367	0,02	0,08084027	0,2148	0,00	5,0000
Prensa 4.Queue	0,0995	0,01	0,06403437	0,1600	0,00	3,0000
Prensa 5.Queue	0,08405838	0,01	0,06196818	0,1107	0,00	3,0000
ToTo UTE.Queue	21,6374	0,17	20,9643	22,3775	6,0000	40,0000
ToTo.Queue	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Category Overview

Values Across All Replications

Unnamed Project

Replications: 23 Time Units: Hours

Resource

Usage

Instantaneous Utilization						
	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
F2	0,8411	0,00	0,8231	0,8628	0,00	1,0000
F4	0,8431	0,00	0,8269	0,8604	0,00	1,0000
Forno UTE	1,0000	0,00	1,0000	1,0000	0,6667	1,0000
oxicorte	0,08474350	0,00	0,07560407	0,08887722	0,00	1,0000
Prensa	0,5246	0,00	0,5021	0,5411	0,00	1,0000
T1	0,7767	0,02	0,7091	0,8591	0,00	1,0000
Number Busy						
	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
F2	3,3644	0,02	3,2924	3,4513	0,00	4,0000
F4	3,3726	0,01	3,3075	3,4415	0,00	4,0000
Forno UTE	3,0000	0,00	3,0000	3,0000	2,0000	3,0000
oxicorte	0,08474350	0,00	0,07560407	0,08887722	0,00	1,0000
Prensa	0,5246	0,00	0,5021	0,5411	0,00	1,0000
T1	0,7767	0,02	0,7091	0,8591	0,00	1,0000
Number Scheduled						
	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
F2	4,0000	0,00	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
F4	4,0000	0,00	4,0000	4,0000	4,0000	4,0000
Forno UTE	3,0000	0,00	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
oxicorte	1,0000	0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Prensa	1,0000	0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
T1	1,0000	0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Category Overview

Values Across All Replications

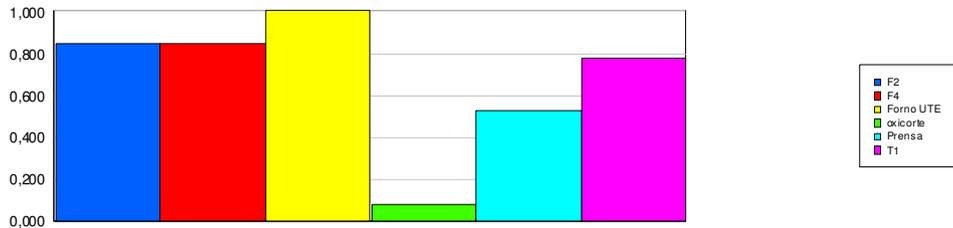
Unnamed Project

Replications: 23 Time Units: Hours

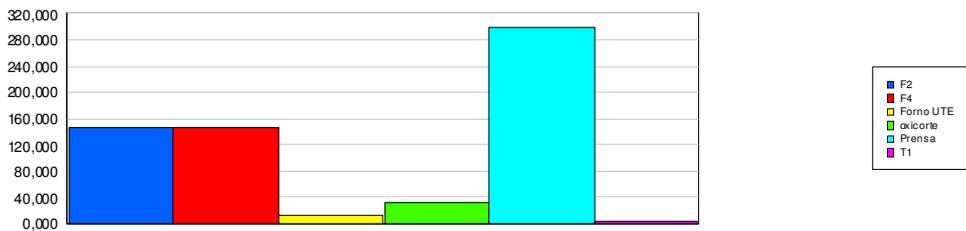
Resource

Usage

Scheduled Utilization	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
F2	0,8411	0,00	0,8231	0,8628
F4	0,8431	0,00	0,8269	0,8604
Forno UTE	1,0000	0,00	1,0000	1,0000
oxicorte	0,08474350	0,00	0,07560407	0,08887722
Prensa	0,5246	0,00	0,5021	0,5411
T1	0,7767	0,02	0,7091	0,8591

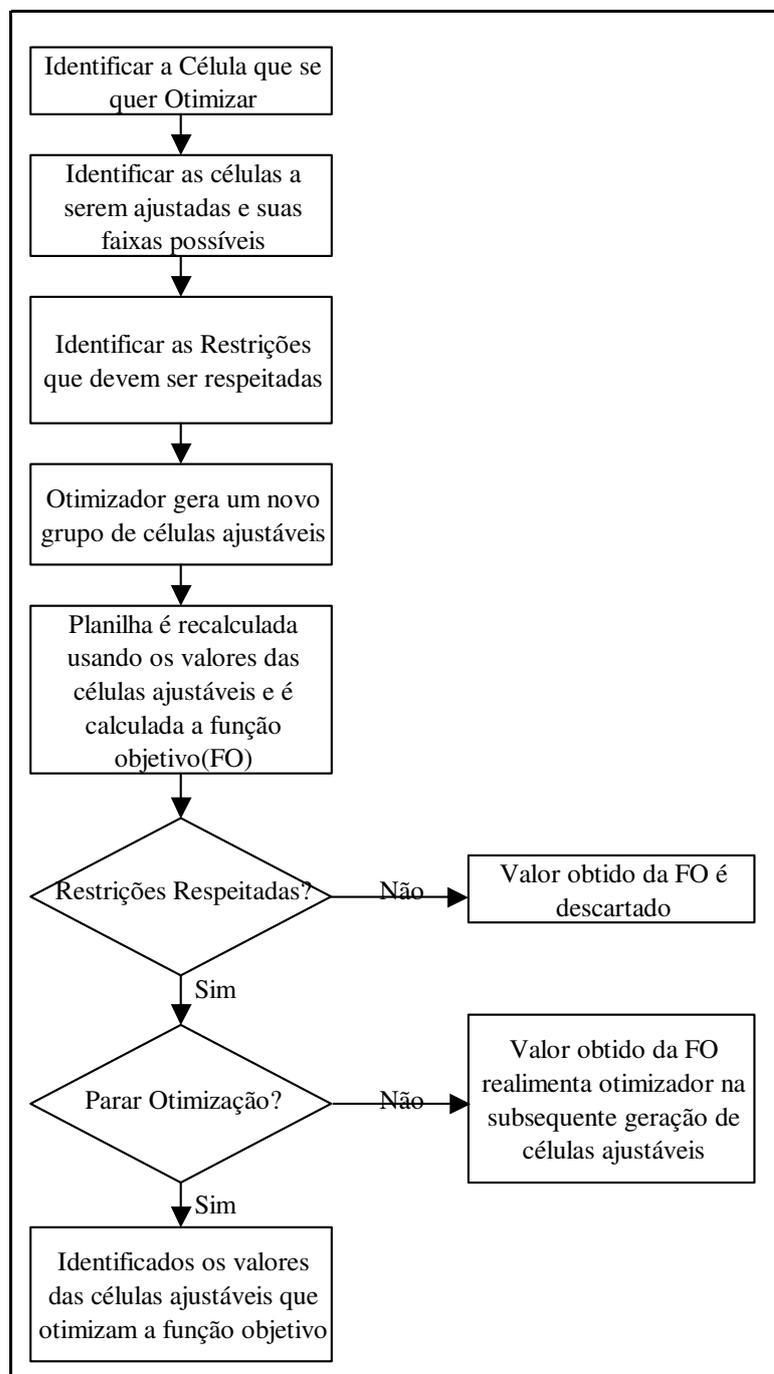


Total Number Seized	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average
F2	146,87	0,74	143,00	149,00
F4	148,30	0,85	146,00	152,00
Forno UTE	14,2609	0,46	12,0000	16,0000
oxicorte	30,3478	0,52	26,0000	32,0000
Prensa	297,30	1,42	290,00	302,00
T1	3,9565	0,09	3,0000	4,0000



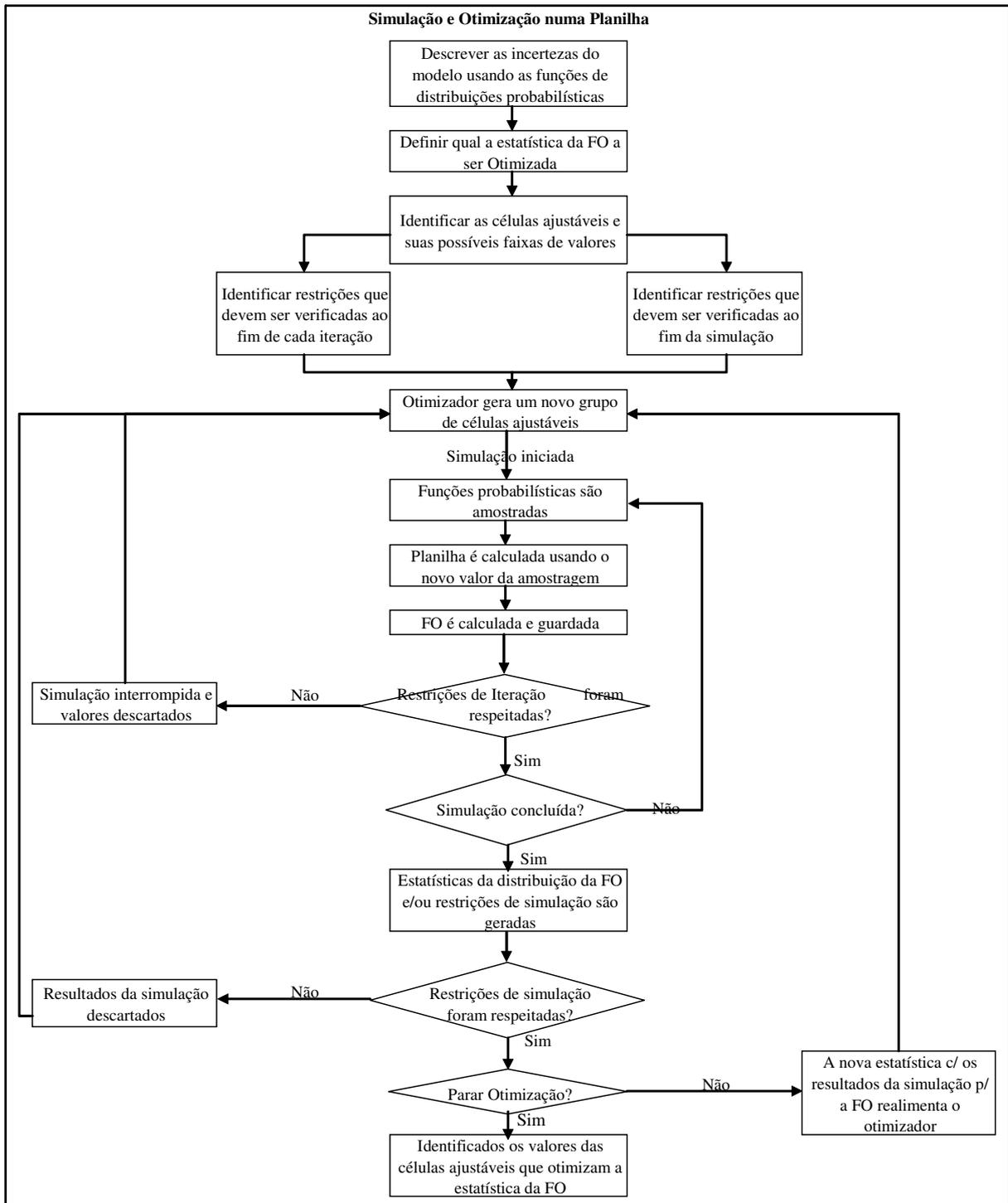
ANEXO B – COMPARAÇÃO ENTRE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DETERMINÍSTICO TRADICIONAL DE UMA PLANILHA ELETRÔNICA COM UM MODELO DE SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO

FLUXOGRAMA 1 - OTIMIZAÇÃO TRADICIONAL NUMA PLANILHA



Fonte: Pinto Jr., 2001

FLUXOGRAMA 2 - SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO NUMA PLANILHA



Fonte: Pinto Jr., 2001