

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

José Renato Nunes Brighenti

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA LINHA
DE MANUFATURA EM FASE DE PROJETO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia de Produção*

Orientador: Prof. José Arnaldo Barra Montevechi, Dr

Itajubá, outubro de 2006

BRIGHENTI, José Renato Nunes. *Simulação e otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto*. Itajubá: UNIFEI, 2006. 113p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Engenharia de Itajubá).

Palavras-Chaves: Simulação – Otimização – Manufatura

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

José Renato Nunes Brighenti

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE UMA LINHA
DE MANUFATURA EM FASE DE PROJETO**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 6 de outubro de 2006, conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia de Produção*.

Banca Examinadora:

Prof. José Arnaldo Barra Montevechi, Dr

Prof. Edson de Oliveira Pamplona, Dr

Prof. Helder Gomes Costa, Dr

Itajubá, outubro de 2006



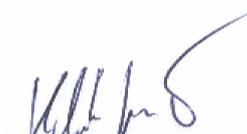
Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

ANEXO I

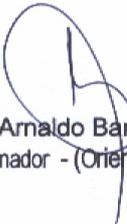
PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 450 de 04 de outubro de 2006, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Simulação e Otimização de uma Linha de Manufatura em Fase de Projeto”**, apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**, na área de Concentração **Economia e Finanças**, satisfeitas as demais exigências regimentais a **José Renato Nunes Brighenti**.

Itajubá, 06 de outubro de 2006.


Prof. Dr. Helder Gomes Costa
1º Examinador – UFF


Prof. Dr. Edson de Oliveira Pamplona
2º Examinador - UNIFEI


Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi
3º Examinador - (Orientador)



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Criada pela Lei nº 10.435, de 24 de abril de 2002

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Simulação e Otimização de uma Linha de Manufatura em Fase de Projeto"

Autor: José Renato Nunes Brighenti

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito		Rubrica
	A = Aprovado	R = Reprovado	
1º	A		
2º	A		
3º	A		

Observações:

- 1) O Trabalho será considerado Aprovado se todos os Examinadores atribuírem conceito A.
- 2) O Trabalho será considerado Reprovado se forem atribuídos pelos menos 2 conceitos R.
- 3) O Trabalho será considerado Insuficiente (I) se for atribuído pelo menos um conceito R. Neste caso o candidato deverá apresentar novo trabalho. A banca deve definir como avaliar a nova versão da Dissertação.

Resultado Final: A ou seja, Aprovado

Observações: _____

Itajubá, 06 de outubro de 2006.

Prof. Dr. Helder Gomes Costa
1º Examinador - UFF

Prof. Dr. Edson de Oliveira Pamplona
2º Examinador - UNIFEI

Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi
3º Examinador - (Orientador)

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus pelas oportunidades a mim concedidas.

Agradeço ao meu amigo e orientador Professor José Arnaldo, pela incansável perseverança, confiança em meu trabalho e amizade.

Agradeço também à minha namorada, Renata, pelo suporte e pela paciência nos momentos mais difíceis.

E finalmente agradeço aos meus pais Djalma e Sylvia, maiores responsáveis por todos os grandes projetos de minha vida, dedicando, dando amor, carinho e suporte.

Sumário

Agradecimentos	ix
Sumário	x
Resumo	xiii
Abstract	xiv
Lista de figuras	xv
Lista de tabelas	xvii
Lista de abreviaturas	xviii
1 Introdução	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 O problema	2
1.3 Objetivo do trabalho	3
1.4 Relevância do trabalho	4
1.5 Metodologia de pesquisa	5
1.6 Estrutura do trabalho	6
2 Simulação	7
2.1 Considerações iniciais	7
2.2 Justificativa econômica da simulação	9
2.3 Definições	11
2.3.1 Sistema	11
2.3.2 Modelo	12
2.3.3 Simulação	13
2.4 Metodologias de simulação	15
2.5 Definição da metodologia	20
2.6 Mapeamento do processo	21
2.7 Construção do modelo	25
2.7.1 Partir de modelos simples	26
2.7.2 Fiscalizar o nível de detalhamento	26
2.7.3 Dividir o modelo	27
2.7.4 Verificar e corrigir os erros	27
2.8 Validação do modelo	28
2.8.1 Mudança dos parâmetros de entrada	30
2.8.2 Turing test	30

2.8.3	Desenvolver o modelo juntamente com o usuário _____	31
2.8.4	Recorrer a especialistas _____	31
2.9	Considerações finais _____	33
3	Otimização _____	34
3.1	Considerações iniciais _____	34
3.2	Definição _____	34
3.3	Métodos de otimização _____	35
3.3.1	Métodos determinísticos _____	36
3.3.2	Métodos probabilísticos _____	37
3.4	Algoritmos Genéticos _____	40
3.4.1	Funcionamento _____	40
3.5	Considerações finais _____	42
4	Otimização + Simulação _____	43
4.1	Considerações iniciais _____	43
4.2	Introdução _____	43
4.3	Funcionamento _____	44
4.4	Metodologia para simulação + otimização _____	44
4.5	Considerações finais _____	46
5	Aplicação _____	47
5.1	Considerações iniciais _____	47
5.2	Definição do sistema a ser analisado _____	47
5.3	Esboço do problema e coleta de dados _____	50
5.4	Simulação do sistema _____	56
5.4.1	Definição do problema e do objetivo _____	57
5.4.2	Coleta de dados _____	57
5.4.3	Escolha do software e construção do modelo _____	57
5.4.4	Validação do modelo _____	61
5.5	Otimização _____	64
5.5.1	Definição das variáveis _____	64
5.5.2	Definição dos tipos de variáveis _____	65
5.5.3	Definição da função objetivo _____	65
5.5.4	Seleção do tamanho da população do Algoritmo Evolutivo _____	66
5.5.5	Análise dos resultados _____	68
5.6	Implementação _____	71
5.7	Considerações finais _____	71
6	Conclusão _____	72

6.1	Considerações iniciais	72
6.2	Conclusões e contribuição do trabalho	72
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	73
6.4	Considerações finais	74
	Referências bibliográficas	75
	ANEXO 1	79
	ANEXO 2	95

Resumo

A simulação computacional juntamente com a otimização são ferramentas de fundamental importância no desenvolvimento de novos projetos, como a implantação de uma nova linha de manufatura. A simulação pode ser aproveitada nas mais variadas fases do desenvolvimento da nova linha, entretanto é na fase de projeto em que são tomadas as decisões mais importantes. Respostas e perguntas como: Quantos operadores são necessários? Qual o regime de trabalho? Qual área necessária? Qual a produtividade esperada da linha? São fundamentais para a formação adequada dos custos da nova linha, sendo que a precisão destes números pode levar a nova linha ao sucesso ou ao fracasso.

O presente trabalho abordou a aplicação da simulação e da otimização como ferramentas de auxílio ao planejamento de uma nova linha de manufatura de uma empresa do setor de autopeças, visando verificar a eficiência do método tradicional utilizado pela empresa onde nenhuma ferramenta computacional é utilizada.

Nos próximos capítulos deste trabalho é abordada a aplicação destas ferramentas. Dentre elas pode-se destacar o mapeamento do processo que além de ser uma ferramenta fundamental para o bom desempenho do modelo auxiliou no entendimento do fluxo da nova linha, permitindo a correção de erros que poderiam levar o estudo ao insucesso. Utilizou-se para isso o pacote de simulação ProModel®, que inclui um *software* de otimização baseado em Algoritmos Genéticos, o SimRunner®.

Pode-se concluir que os resultados alcançados através da simulação foram significativamente diferentes dos obtidos pela metodologia tradicional da empresa, principalmente em dois aspectos: a mão de obra que foi reduzida em 45% e a produtividade da linha que ficou 4% acima do previsto. Estes resultados trouxeram vários benefícios à empresa dentre eles uma nova formação de custos da linha que possibilitará uma redução dos preços dos produtos manufaturados tornando a linha mais competitiva.

Outro benefício destas ferramentas para a empresa é a visualização gráfica do projeto na forma estática e dinâmica, o que além de enriquecer, facilita a análise com dados e gráficos mais precisos.

Abstract

Computational simulation together with optimization is an important tool in the development of new projects, as the implantation of a new manufacture line. Simulation can be used in the most varied phases of a new line development, however is in the project phase where the most important decisions are taken. Questions as: How many operators are necessary? Which is the regimen of work? Which is the necessary area? Which is the productivity of the line? Are essential for cost formation of a new line and the precision of these numbers can take the new line to the success or failure.

The present study approached the application of these techniques as a planning aid tool in an auto parts factory, to verify the efficiency of the traditional method used by the company where no advanced tool as the simulation is used.

The next chapters presented the methodology of these two techniques. Amongst them we can detach the process mapping that beyond of being a basic tool for a good model performance, assisted in the understanding of the process flow of the new line, allowing the correction of errors that could lead the analysis to failure. The ProModel® simulation package, that includes an optimization software based on Genetic Algorithms, the SimRunner®, has been choose.

It can be concluded that the results reached through the simulation had been significantly different from the ones reached by the traditional company methodology, mainly in two aspects: labor was reduced in 45% and the productivity of the line was 4% above of the foreseen one. These results had brought some benefits to the company like a new cost formation that will make possible a reduction on manufactured products prices and also making the new line more competitive.

Another benefit of these tools for the company is the project graphical visualization in the static and dynamic form, what beyond enriching, facilitates the analysis with data and more precise graphs.

Lista de figuras

Figura 1.1 – Formas de classificação das pesquisas científicas (SILVA e MENEZES, 2005)..	5
Figura 2.1 – Transformação da realidade em modelo.	7
Figura 2.2 – Método científico aplicado à simulação (HARRELL, 2000).....	8
Figura 2.3 – Evolução do custo de um sistema em suas diferentes fases (HARRELL <i>et al.</i> , 2000).....	10
Figura 2.4 – Comparativo da evolução dos custos com e sem aplicação da simulação (HARRELL <i>et al.</i> , 2000).	10
Figura 2.5 – Relação entre sistema, modelo e simulador.	14
Figura 2.6 – Procedimento para se conduzir uma simulação (Adaptado de PROMODEL® USER’S GUIDE, 2002).....	18
Figura 2.7 – Sequência da metodologia (LOBÃO e PORTO, 1997).	20
Figura 2.8 – Componentes do processo (HARRINGTON, 1993).....	22
Figura 2.9 – Exemplo de um mapofluxograma (ROSA, 2002).....	25
Figura 2.10 – Revisão do trabalho em caso de não validação.....	32
Figura 3.1 – Classificação dos métodos de otimização (CARNEIRO, 1996).....	36
Figura 4.1 – Otimização em simulação (FU, 2002).	44
Figura 5.1 – Produto fabricado pela empresa e sua localização no veículo.	48
Figura 5.2 – Principais características das longarinas.	49
Figura 5.3 – Mapofluxograma da linha de manufatura <i>roll form</i>	52
Figura 5.4 – Mapa do processo da linha de manufatura de longarinas RF.....	55
Figura 5.5 – Tela de abertura do ProModel®.....	58
Figura 5.6 – Definição de <i>locations</i>	59
Figura 5.7 – Definição de <i>entities</i>	59
Figura 5.8 – Definição de <i>arrivals</i>	60
Figura 5.9 – Definição de <i>processing</i>	60
Figura 5.10 – Definição de <i>resources</i>	61
Figura 5.11 – Percentual de utilização da capacidade dos equipamentos.	63
Figura 5.12 – Definição dos <i>macros</i>	65
Figura 5.13 – Definição das variáveis.	65
Figura 5.14 – Definição da função objetivo	66
Figura 5.15 – Definição do tamanho da população.....	67
Figura 5.16 – Definição do nível de confiança.....	67

Figura 5.17 – Definição do número de replicações	68
Figura 5.18 – Relatório exibido pelo SimRunner® (1 turno).....	68
Figura 5.19 – Comparativo dos tempos de operadores antes e após otimização.....	69
Figura 5.20 – Comparativo dos números de produção antes e após otimização.....	69

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Classificação de sistema, modelo e simulação (PEREIRA, 2000).....	15
Tabela 2.2 – Simbologia proposta por BARNES (1982) para mapeamento.	24
Tabela 4.1 – <i>Software</i> de otimização (Adaptado de FU, 2002).....	43
Tabela 5.1 – Vantagens e desvantagens do processo RF.	47
Tabela 5.2 – Etapas de construção até o modelo final.....	62
Tabela 5.3 – Comparação entre produtividade planejada e simulada.	63
Tabela 5.4 – Comparação entre produtividade planejada e simulada (sem inspeção)	64
Tabela 5.5 – Comparativo dos resultados finais otimizados.	70

Lista de abreviaturas

- AE Algoritmos Evolutivos
AG Algoritmos Genéticos
CNC *Computer Numeric Control*
RF *Roll Form*
WIP *Work in Progress* – Material em processo

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

O capítulo que aqui se inicia tem a finalidade de discutir os aspectos de maior importância do presente trabalho. São realizadas algumas considerações iniciais, apresentando o problema, o objetivo do trabalho, a relevância e a estrutura da dissertação.

A grande competitividade imposta pela globalização obriga as empresas a constantes evoluções nos sistemas de produção. Neste cenário as empresas necessitam não somente manter a sua fatia de participação no mercado, mas também aumentá-la. Sob esta pressão as empresas se questionam: como manter a fatia de mercado já conquistada? Como melhorar a competitividade para concorrer com o mundo? (FERREIRA, *et al.*, 2002b).

Segundo LIM e ZHANG (2003), o mercado mundial vem se tornando cada vez mais dinâmico requerendo dos sistemas de manufatura respostas rápidas e flexibilidade para mudanças de cenários por parte do cliente.

Para SAAD (2003) o cenário internacional tem exigido das empresas mudanças no seu sistema de produção as quais, muitas vezes, levam alguns meses até serem implementadas, mas o cliente não está disposto a esperar e a concorrência já poderá estar pronta para dar a resposta.

Desta forma as empresas necessitam retirar o máximo rendimento possível de todos os seus recursos bem como realizar novos investimentos que podem afetar diretamente o desempenho e conseqüentemente a competitividade da empresas.

Geralmente quando se trabalha na análise de novos investimentos e seus recursos, surgem questões como qual será o layout desta linha e como obter a melhor produtividade, flexibilidade e qualidade da linha com o menor recurso possível. Respostas para estas perguntas podem ser dadas através de análises realizadas sobre crenças e idéias de uma pessoa ou de um grupo, sendo as mesmas pouco quantificáveis; através de modelos matemáticos estáticos que não consideram as características dinâmicas do sistema, levando muitas vezes ao erro; ou, através de modelos de simulação computacional dinâmico, onde são consideradas as

aleatoriedades e interdependências das variáveis do sistema, aumentando assim a capacidade de previsão do comportamento do sistema real. (HARRELL *et al.*, 2000; BANKS, 2000; PIDD, 1998).

A representação de um sistema pela modelagem feita em computador, possibilita a análise de sistemas complexos. Assim, segundo PIDD (1998), para sistemas dinâmicos, complexos e componentes interativos, como os de manufatura, a simulação computacional é uma ferramenta bastante adequada.

A simulação de sistemas de manufatura é uma poderosa ferramenta para a tomada de decisões, minimizando o risco destas decisões (BANKS, 2000; PEREIRA, 2000). Porém, para usar a simulação na avaliação e melhoria do desempenho de um processo, é necessário primeiramente selecionar algumas configurações e então executar a simulação para cada uma delas, analisando os resultados encontrados (OPTQUEST FOR ARENA USER'S GUIDE, 2002). Tal processo pode ser muito tedioso e consumir muito tempo, além de, geralmente, não ser claro o ajuste das variáveis para compor uma configuração. Esta limitação foi superada com a utilização de técnicas de otimização em conjunto com a simulação.

Segundo HARRELL, (2000), a otimização é o processo de tentar diferentes combinações de valores para variáveis que podem ser controladas buscando uma combinação de valores que provê a saída mais desejada de um modelo. Existem atualmente vários softwares que permitem a realização da otimização a partir de uma simulação, dentre eles pode-se citar: AutoStat, OptQuest, OPTIMIZ, SimRunner® e WITNESS Optimizier. Os mesmos fazem parte de pacotes comerciais onde também está incluso o módulo de simulação.

A combinação entre simulação e otimização faz com que as respostas sejam mais eficientes, possibilitando uma melhor tomada de decisão.

1.2 O problema

O estudo foi desenvolvido em uma empresa do setor de autopeças, em fase de expansão, uma nova linha será construída para a produção de longarinas através de um processo diferente do atual.

Sabe-se que atualmente qualquer novo projeto que necessite de altos investimentos é submetido a uma profunda análise técnica e econômica antes de sair do papel e, para tal, os especialistas necessitam de previsões confiáveis.

O problema analisado por este trabalho é a superficialidade das análises feitas para validação técnica e econômica do projeto de construção desta nova linha de manufatura.

A empresa objeto deste estudo utiliza-se de dados históricos e da experiência de especialistas para calcular as previsões. Apesar de serem dados confiáveis as análises são feitas de forma estática, impossibilitando a visualização dinâmica destas previsões bem como a interação entre as variáveis. Além disso, a falta de recursos computacionais torna muito complexa e demorada a análise de diferentes cenários e suas respostas ótimas.

Baseando-se em resultados feitos através de análises superficiais os gestores desta empresa tomam decisões importantes como a formação de preços de novos produtos e até mesmo o impedimento da construção da nova linha.

A simulação e a otimização foram aplicadas na fase de desenvolvimento do projeto com o objetivo de aprimorar os resultados das análises dando melhores condições aos gestores de tomar decisões importantes para o futuro da empresa.

1.3 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é a aplicação da simulação computacional e da otimização na fase de planejamento do projeto de uma nova linha de manufatura visando conhecer seus benefícios comparados ao método empregado pela empresa.

Os objetivos complementares do presente trabalho são:

- Mapear o processo da linha;
- Conhecer a produtividade da linha;
- Definir a área necessária para o estoque em processo;
- Quantificar a mão de obra necessária para o pleno funcionamento;
- Definir o melhor regime de trabalho em turnos.

1.4 Relevância do trabalho

As empresas do setor de autopeças estão cada vez mais pressionadas pela concorrência globalizada. Com esta pressão as empresas estão se mobilizando e procurando racionalizar toda a sua cadeia produtiva, melhorando processos, implantando novos sistemas de gestão, reorganizando *layout*, reduzindo estoques e investindo em novos equipamentos. Estas mudanças requerem ferramentas de planejamento e gestão cada vez mais avançadas e sofisticadas, para suprir os gestores de informações confiáveis para a tomada de decisões. A simulação computacional vem se mostrando uma ferramenta com grande potencial de apoio a tomada de decisão, conforme os autores LIM e ZHANG (2003), SAAD (2003), PERSON (2002), BANKS (2000), HARRELL *et al.* (2000), KOSTURIK e GREGOR (1999), LAW e KELTON, (1982).

A dissertação descreverá a aplicação da simulação computacional e da otimização no auxílio ao planejamento do *layout* e dos recursos a serem utilizados em uma linha de manufatura, comparando a análise feita por especialistas e propondo uma nova solução.

Segundo KELLNER *et al.* (1998), a simulação computacional pode ajudar as pessoas a aceitar a irrealidade das suas expectativas iniciais sobre os resultados esperados, pois a maioria das pessoas não possui capacidade ou habilidade suficiente para visualizar o comportamento de sistemas complexos sem a ajuda da simulação.

Para HARRELL, (2000), a simulação computacional em sistemas de manufatura é uma importante ferramenta de planejamento gerencial que poderá trazer grandes contribuições à empresa, tais como: análise de métodos, implantação de *layout*, análise do impacto na variação do tamanho de lote para fabricação, controle da produção, controle sobre o estoque em processo, planejamento do *supply chain*, programação da produção, controle da produção em tempo real, avaliação do impacto da introdução de um novo produto, previsão de gastos, criação de cenários e avaliação da eficácia dos planos de contingência. Ainda segundo o mesmo autor, a simulação poderá ser usada como ferramenta de planejamento com diferentes focos ao longo do tempo, ou seja, desde o controle da célula no seu dia a dia até o planejamento a longo prazo prevendo mudanças inclusive de tecnologias.

1.5 Metodologia de pesquisa

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

Esta pesquisa investiga os resultados da aplicação da simulação e da otimização na fase de planejamento do projeto de uma nova linha de manufatura. Sendo assim a pesquisa não permite ao pesquisador controle de todas as variáveis do sistema, que caracteriza uma experimentação. A pesquisa também não se preocupa em generalizar os resultados, contribuição obtida através da *Survey*. Como é realizada uma aplicação de um método não empregado atualmente pela organização em estudo, a caracterização da pesquisa como estudo de caso está descartada. A classificação da pesquisa como pesquisa ação, também foi refutada, pois a pesquisa não se preocupa em medir os resultados após a implantação da abordagem metodológica. Na pesquisa serão usadas ferramentas de modelagem e simulação, o que também a caracteriza como simulação. Sendo assim, o método de pesquisa utilizado foi a modelagem e a simulação. A **Figura 1.1** mostra todas as formas de classificação das pesquisas científicas.

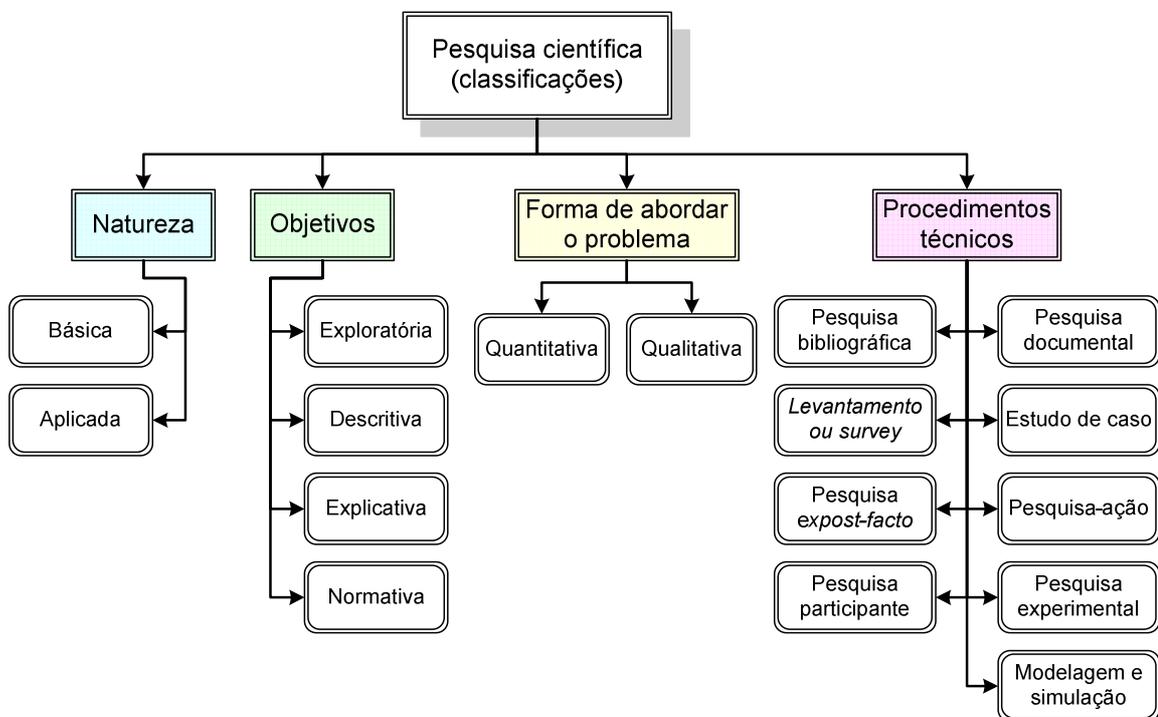


Figura 1.1 – Formas de classificação das pesquisas científicas (SILVA e MENEZES, 2005).

A elaboração de hipóteses, afirmações iniciais que se buscará afirmar no decorrer da pesquisa, é algo essencial na elaboração e execução de uma pesquisa. O presente trabalho busca afirmar a seguinte hipótese:

“A combinação entre simulação e otimização é de grande valia no apoio a decisão, trazendo vantagens significativas na fase de planejamento do projeto de uma nova linha de manufatura em alternativa aos métodos usualmente empregados na empresa”.

1.6 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, o conteúdo deles são:

- O primeiro capítulo foi destinado à introdução, descrevendo a relevância do trabalho e seus objetivos;
- O segundo capítulo traz as definições sobre simulação, a sua justificativa econômica e as metodologias. Na sequência, define a metodologia aplicada no estudo e como construir e validar o modelo;
- O terceiro capítulo foi destinado à ferramenta de otimização, apresentando suas metodologias e aprofundando na metodologia escolhida, o algoritmo genético;
- O quarto capítulo faz a apresentação das ferramentas de simulação e otimização em conjunto;
- O quinto capítulo foi destinado à aplicação dos conceitos abordados anteriormente na linha de manufatura;
- O sexto capítulo traz as conclusões e as recomendações para os trabalhos futuros.

2 Simulação

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como finalidade apresentar uma revisão bibliográfica a respeito da simulação computacional e sua relevância. São levantadas as definições de sistema, modelo e simulação, assim como suas classificações. Ainda neste capítulo é feita a apresentação de algumas metodologias para uma implementação bem sucedida de simulação, dos conceitos de mapeamento de processo e finalmente como construir e validar um modelo.

Segundo HARRELL *et al.* (2000) e LAW e KELTON (1982), simulação é a imitação de um sistema real modelado em computador para avaliação e melhoria do seu desempenho. Ainda, segundo BANKS (2000), a simulação envolve a criação de uma história artificial da realidade e com base nela são realizadas observações e inferências nas características de operação do sistema real representado. A **Figura 2.1** esquematiza este conceito da transformação da realidade em modelo e novamente dos resultados em realidade.

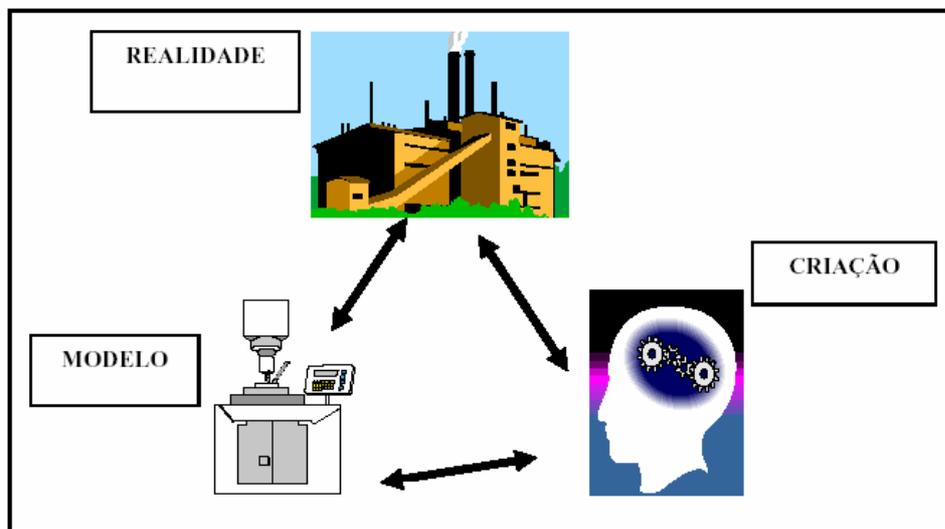


Figura 2.1 – Transformação da realidade em modelo.

O processo de simulação segue o método científico, ou seja, formula as hipóteses, prepara o experimento, testa as hipóteses através do experimento e valida as hipóteses através dos resultados obtidos. Este processo na simulação é mostrado na **Figura 2.2**.

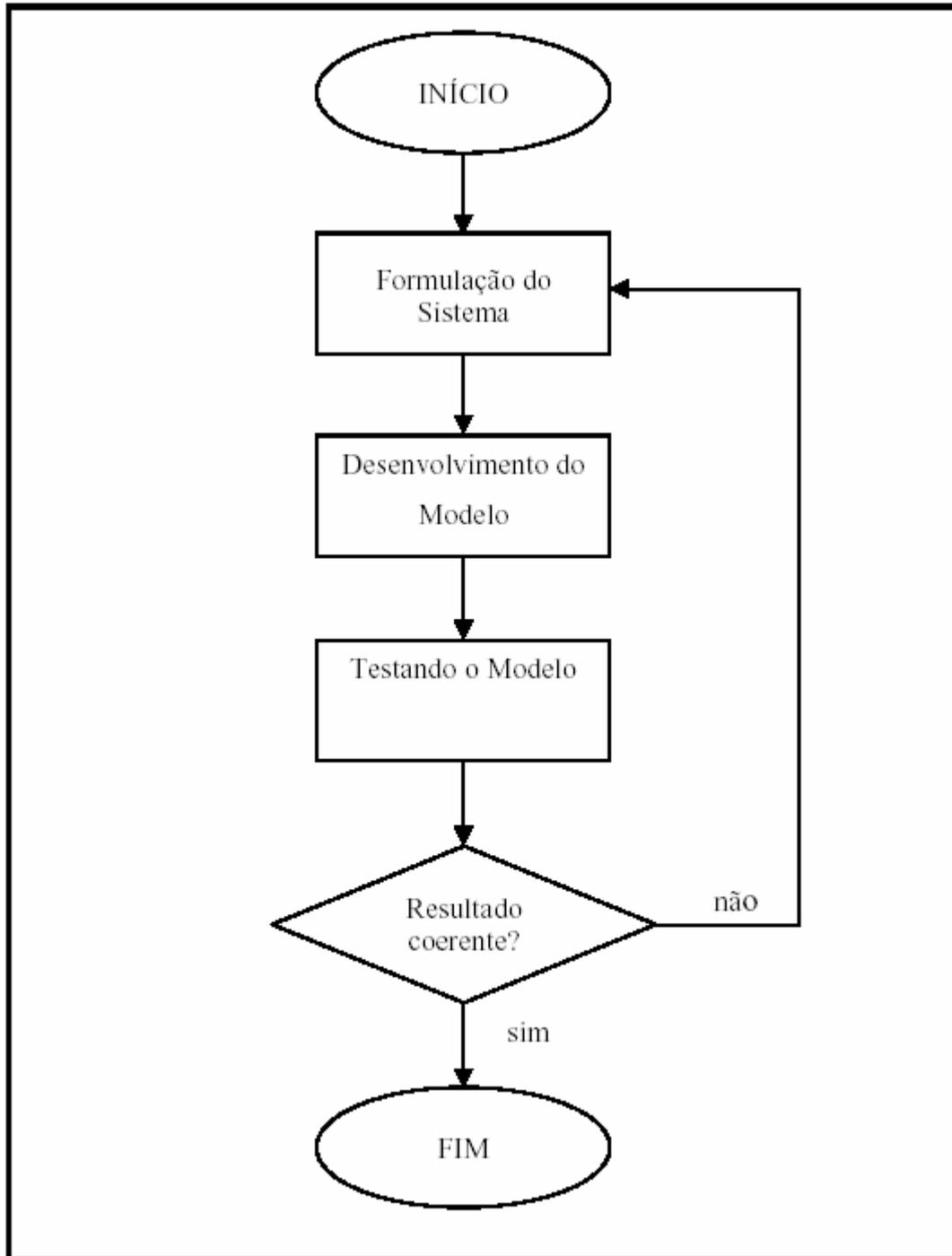


Figura 2.2 – Método científico aplicado à simulação (HARRELL, 2000).

A simulação não é uma ferramenta que substitui o trabalho de interpretação humana, mas sim uma ferramenta capaz de fornecer resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica do sistema, permitindo desta maneira uma interpretação mais profunda e abrangente do sistema estudado.

São diversas as áreas de aplicação da simulação. HARRELL *et al.* (2000), LOBÃO (2000), BANKS *et al.* (1996) e LAW e KELTON (1986) destacam os sistemas computacionais e de telecomunicações, fabricação, negócios, logística, militar, treinamento, científica, econômica e serviços.

Segundo KUMAR e PHROMMATHED (2005), antes da implantação direta de qualquer mudança no sistema produtivo, o mapeamento do processo, a análise dos dados e a simulação computacional podem reduzir com sucesso o risco da ineficácia de uma operação de reprojeto no mundo real.

2.2 Justificativa econômica da simulação

Conforme HARRELL *et al.* (2000) ao utilizar qualquer *software* os custos envolvidos devem ser considerados. Da mesma forma no uso da simulação deve-se considerar o custo benefício da aplicação. Com o envolvimento do custo inicial de implantação para um sistema de simulação (software, hardware e mão-de-obra), frequentemente a aplicação da simulação é prejudicada, porque não é avaliado corretamente o benefício que a simulação trará ao negócio com a economia de gastos e tempo para implantação do projeto em estudo pela empresa.

Segundo KELLNER, MADACHY e RAFFO (1998), o maior motivo para se criar um modelo de simulação ou utilizar qualquer outro método de modelagem é que esta é a forma de menor custo para se obter importantes resultados, quando os custos, os riscos ou a logística de manipulação do sistema real é proibitiva. Os principais ganhos com a simulação são obtidos com a identificação e eliminação de problemas e ineficiências, chegando até a verificação da inviabilidade do projeto, antes da implantação.

Segundo GLENNEY e GERALD (1985), os custos estimados com o uso da simulação em um projeto situam-se entre 1 a 3% do custo total do mesmo.

Uma das dificuldades da justificativa econômica da simulação é o fato de geralmente não se conseguir avaliar qual será a economia total gerada no projeto, conseguindo-se este valor somente após a sua conclusão.

Durante o seu desenvolvimento um projeto ou sistema passa por diferentes fases com características distintas entre si, ou seja, cada qual com o seu tempo e custo. A **Figura 2.3** apresenta a relação entre as fases do projeto e seu custo.

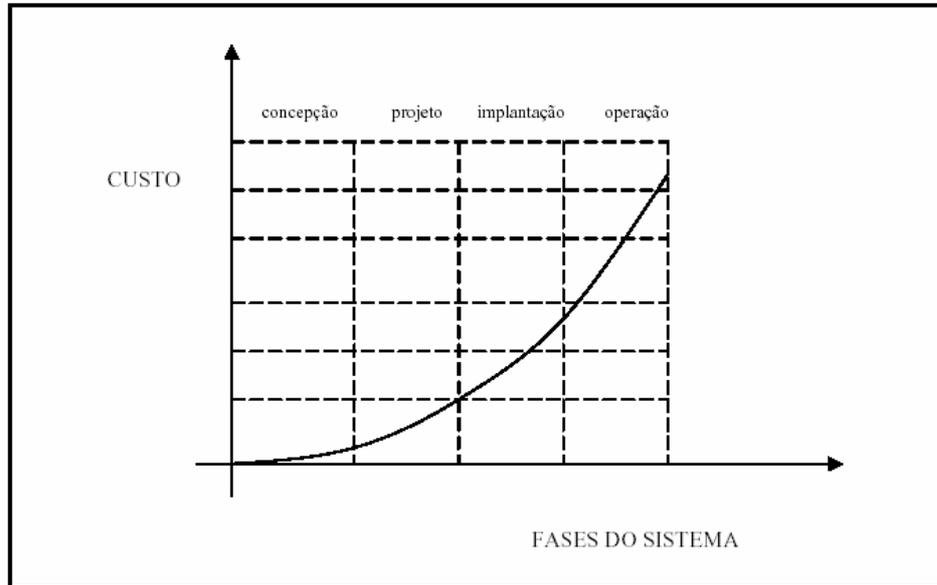


Figura 2.3 – Evolução do custo de um sistema em suas diferentes fases (HARRELL *et al.*, 2000).

Quando a simulação é aplicada no desenvolvimento do projeto ou sistema, a relação entre o custo e as fases do projeto é alterada (**Figura 2.4**). A fase de concepção do projeto ou sistema não sofre nenhum impacto, pois a aplicação da simulação é realizada após esta etapa.

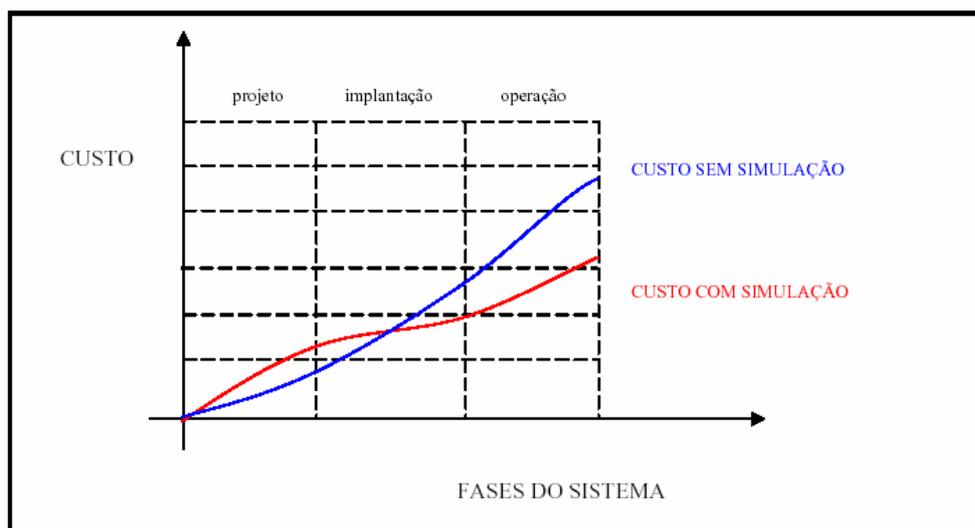


Figura 2.4 – Comparativo da evolução dos custos com e sem aplicação da simulação (HARRELL *et al.*, 2000).

Em um sistema onde é aplicada a simulação, o custo na fase de projeto fica mais elevado, mas é justamente nesta fase, com o auxílio da simulação, onde se consegue planejar um sistema mais otimizado, conseqüentemente nas fases de implantação e operação se obtém a esperada redução do custo (BATEMAN *et al.*, 1997) (**Figura 2.4**).

Ainda na **Figura 2.4** pode-se observar que a área sobre a curva dos custos com a simulação é menor que a dos custos sem a simulação, ou seja, o custo total no final é menor quando a simulação é utilizada.

2.3 Definições

Para um melhor entendimento sobre simulação, é preciso conhecer as definições de sistema e modelo e da simulação computacional.

2.3.1 Sistema

A definição clara do que vem a ser sistema é muito importante para a execução de uma simulação, pois é com base nesta definição que se levantarão as informações necessárias ao estudo. Segundo SEILA (1995), um sistema é um conjunto de componentes ou entidades interagindo entre si, trabalhando juntos para atingir algum objetivo. Na prática, o significado de sistema depende dos objetivos de cada estudo (LAW e KELTON, 2000). São exemplos de sistema: sistema de tráfego, sistema policial, sistema econômico, sistema bancário, entre outros. Um sistema também pode ser uma parte ou conjunto no qual o estudo será realizado, que por sua vez está inserido em universo ainda maior, como a área responsável pelo saque e depósito de uma agência bancária.

A ação entre os elementos do sistema envolve interdependências que podem ser simples ou mais elaboradas, dependendo do número de variáveis. Segundo DUARTE (2003), a variabilidade é uma característica inerente a qualquer sistema que envolva pessoas e máquinas, uma vez que ambas podem falhar. Assim, a variabilidade introduz incerteza no sistema, cuja compreensão se torna difícil sem o uso de ferramentas apropriadas, como a simulação.

Segundo PEREIRA (2000), em simulação, é possível trabalhar com sistemas discretos, contínuos ou a combinação dos dois. Os sistemas são ditos discretos quanto as variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis (por exemplo, peças que chegam

a uma máquina) e contínuos quando as variáveis mudam continuamente no tempo (por exemplo, quilômetros rodados pelos caminhões na simulação de um sistema logístico). Neste caso o *software* de simulação deve ter condições de resolver sistemas de equações diferenciais. Já nas simulações de eventos discretos os programas são dotados de um relógio, que é iniciado com o evento ao qual está vinculado e avança até que o próximo evento esteja programado.

2.3.2 Modelo

Um modelo, segundo HILLIER e LIEBERMAN (2001), é uma representação de um sistema real, onde somente os aspectos relevantes para a análise em questão serão considerados. O uso de modelos traz muitos benefícios como redução de tempo, custo e perdas materiais. Em muitos casos seu uso é até mesmo inevitável, como quando o sistema real não existe por se tratar de um projeto ou não estar disponível para experimentos.

De acordo com o tipo de modelo, ele pode ser classificado em: matemático, físico e de simulação (STAMM, 1998):

- Modelos matemáticos: modelos que fazem uma abstração da realidade utilizando conceitos complexos envolvendo linguagens formais, sentenças e expressões cujas sintaxes e semânticas dentro da lógica e “metalógica” matemáticas guardam uma semelhança básica com o conceito de modelos para simulação, que é a relação de satisfação, ou seja, a condição de semelhança entre a estrutura e a teoria (STAMM, 1998);
- Modelos físicos: modelos que assumem forma física, sobre a qual o estudo será realizado. Dentre outros tipos de modelos físicos pode-se citar (STAMM, 1998): desenho em escala, é um método operacional que permite equacionar, ou otimizar atividades não muito complexas, freqüentemente utilizadas pelos profissionais responsáveis por projetos; e maquetes (ou modelos reduzidos), são miniaturas tridimensionais em escala de redução, utilizadas para apreciação de aspectos estéticos e de distribuição de volumes em obras arquitetônicas e para medições de comportamento, tais como obras hidráulicas ou marítimas;
- Modelos para simulação computacional: quando as relações que compõe o modelo são suficientemente simples, é possível empregar métodos matemáticos como a álgebra, o cálculo ou a teoria da probabilidade para obter informações exatas sobre questões de

interesse (LAW e KELTON, 2000). Entretanto a maioria dos sistemas reais é complexa demais para permitir uma avaliação analítica e por isto estes casos têm que ser estudados por meio computacional.

Este trabalho se atém ao último tipo de modelo, que foi construído com auxílio de programas de computador específicos para simulação.

Este tipo de modelo pode ser classificado quanto a sua variabilidade no tempo em:

- *Estático* - representa o sistema sem levar em conta sua variabilidade;
- *Dinâmico* - representa o sistema a qualquer tempo. Pode ainda ser classificado quanto ao tipo de valores que as variáveis assumem;
- *Determinístico* - quando assumem valores exatos;
- *Estocástico* - assumem diversos valores dentro de uma distribuição de probabilidades.

2.3.3 Simulação Computacional

A simulação computacional, segundo LAW e KELTON (2000), é a imitação de um sistema real modelado em computador, no qual serão executados experimentos para avaliação e melhoria de seu desempenho. De um modo geral, simulação é a importação da realidade para um ambiente controlado onde se pode estudar o comportamento do mesmo sob diversas condições, sem os riscos físicos e/ou custos envolvidos em um estudo tradicional.

Como já mencionado, um modelo é a representação de um sistema real. A simulação é uma ferramenta que utiliza tal modelo para fazer experimentos e responder questões do tipo “*what if*”, manipulando as entradas e verificando suas saídas. No treinamento de pilotos em simuladores de vôo, por exemplo, eles ficam em uma cabina (modelo de um avião real), testando manobras e sentindo a dinâmica do modelo e suas consequências. Assim, a simulação é o resultado de uma série de ações no modelo, que imitam reações do ambiente.

MOREIRA (2001) apresenta de forma bem resumida o que vem a ser sistema, modelo e simulação: sistema - origem dos dados; modelo - grupo de instruções para a geração de novos dados; e simulador - dispositivo capaz de levar adiante instruções do modelo. A relação entre estes fica de fácil entendimento com a apresentação da **Figura 2.5**.

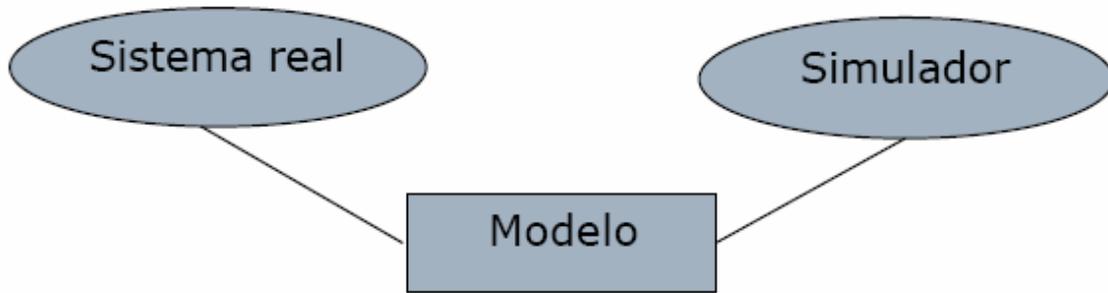


Figura 2.5 – Relação entre sistema, modelo e simulador.

Segundo LAW e KELTON (2000), a simulação é dita *terminante* quando se está interessado em estudar um sistema num dado intervalo de tempo, ou seja, conhecer seu comportamento ao longo deste intervalo, sendo definidas as datas de início e término da simulação. Como no caso de um conjunto de postos de cobrança de pedágio onde se deseja definir o número de postos em funcionamento de acordo com a hora do dia; assim, o intervalo de interesse está entre zero e vinte e quatro horas.

A simulação é dita não terminante quando se está interessado em estudar o sistema a partir do momento em que o mesmo estiver em um estado estável, atingido após certo período de aquecimento, onde se determina e elimina as tendências iniciais. Isso não quer dizer que ela nunca termine, nem que o sistema não tenha fim, mas que ela poderia continuar infinitamente sem nenhuma mudança estatística no comportamento. Assim, uma simulação do comportamento das pás de uma turbina pode ser considerada *não terminante*, desde que o interesse seja estudar as características de seu escoamento em condições estáveis, após um período de aquecimento.

Na **Tabela 2.1** PEREIRA (2000) mostra de maneira sucinta a classificação de sistemas e modelos para simulação, além da classificação da própria simulação.

Sistema	Modelo		Simulação
<i>Discreto:</i> Variáveis envolvidas assumem valores finitos e infinitos numeráveis.	<i>Determinístico:</i> Variáveis assumem valores determinados.	<i>Estático:</i> Estuda o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo.	<i>Terminante:</i> Há interesse em se estudar o sistema num dado intervalo de tempo.
<i>Contínuo:</i> Variáveis mudam constantemente com o tempo.	<i>Estocástico:</i> Variáveis assumem valores diversos segundo uma determinada distribuição de probabilidade.	<i>Dinâmico:</i> Representa o sistema a qualquer tempo.	<i>Não Terminante:</i> Há interesse em estudar o sistema a partir de um determinado estado estável, podendo o estudo prolongar-se indefinidamente.

Tabela 2.1 – Classificação de sistema, modelo e simulação (PEREIRA, 2000).

Para se obter uma maior eficiência no uso da simulação, diminuindo seu tempo de execução sem perder confiabilidade na resposta, faz-se uso do controle sobre alguns fatores como o nível de detalhamento incluído nos modelos, o número de dados estatísticos, o uso de animação além do uso dos elementos do sistema mais importantes para o modelo (HARREL, 2000). A definição e o controle de tais fatores devem ser feitos na fase de planejamento, sendo esta fase de extrema importância onde é recomendado o uso de metodologias para sua execução.

2.4 Metodologias de simulação

Simular requer mais que simplesmente usar um *software*. A simulação é um projeto que deve ser planejado com conhecimento das etapas e suas necessidades. Para tal, deve-se conhecer bem o sistema e ter uma comunicação com usuários e pessoas envolvidas durante todo o processo.

A metodologia nos trabalhos de simulação busca sistematizar os passos de seu desenvolvimento, otimizando a integração entre *software*, modelador e usuário, e evitando desperdício de tempo, dinheiro e resultados frustrantes.

A maioria dos trabalhos de simulações mal sucedidos tem como principal causa a deficiência de um bom planejamento de seu estudo. Por isso, simular requer mais do que o conhecimento de um *software* específico, mas também, pessoas com conhecimento dos passos a serem seguidos, bem como experiência analítica, estatística, organizacional e de engenharia.

PIDD (1997) relata que a modelagem computacional de um sistema é uma tarefa que exige muito esforço por parte do modelador e que, se conduzido com raciocínio cuidadoso e planejado, será bastante beneficiada. Para que isto ocorra, o autor propõe cinco princípios básicos e indispensáveis em qualquer metodologia para a implementação da simulação:

- o modelo deve ser simples apesar de partir de pensamentos complicados. Os modelos não necessitam ser tão complicados quanto à realidade;
- ser parcimonioso começando do simples e acrescentar complexidade na medida do necessário;
- evitar grandes modelos pela dificuldade em entendê-los. A regra é dividir esses grandes modelos;
- a definição dos dados a serem coletados deve ser orientada pelo modelo. O modelador não deve “se apaixonar pelos dados”;
- o comportamento do modelador na construção do modelo seria como este estivesse desembaraçando-se dos problemas pois a modelagem de forma alguma é um processo desordenado.

Segundo o PROMODEL® USER’S GUIDE (2002), a definição dos passos a serem seguidos para se obter bons resultados em simulação com um mínimo dispêndio de recursos varia muito de acordo com o projeto, porém os procedimentos básicos são essencialmente os mesmos. Esses passos básicos de “como conduzir um projeto de simulação” são divididos em seis:

- *Plano de estudo.* Consiste em estabelecer objetivos e definir ferramentas; restrições, principalmente quanto a tempo e custo; especificações da simulação, que definem escopo (tamanho e complexidade da atividade a ser simulada), nível de detalhe e grau de acuracidade (quanto maior, maior será o custo), tipo de experimentação (natureza e número de soluções diferentes), forma do resultado final, orçamento e agenda.
- *Definindo o sistema.* Identificação do modelo conceitual no qual a simulação será baseada. Nesse passo há a tomada de dados, e para ajudar a organizar o processo de junção e análise desses dados para a definição do sistema os seguintes passos são indicados: definição dos dados requeridos, fontes apropriada de dados, fazer certas considerações quando necessário, converter os dados apropriadamente e documentar e aprovar os dados.

- *Construindo o modelo.* O objetivo da construção do modelo é prover uma representação válida do sistema definido. Refinamento dos dados, possível expansão do sistema, verificação e validação do modelo, são alguns passos dessa fase.
- *Condução do experimento.* Baseado no resultado da simulação o modelador tem uma resposta sobre a validade de suas hipóteses, postas no sistema. Em um experimento de simulação há a entrada de variáveis definindo o modelo, tais variáveis são independentes e podem ser manipuladas. O efeito dessa manipulação é então medido e correlacionado. Embora o *software* ajude nessa fase, cabe ao modelador decisões do tipo: número de replicações do teste, o tamanho e complexidade da simulação, etc.
- *Análise dos resultados.* Quando se faz a condução de experimentos de simulação, há a necessidade de extrema cautela para analisar os resultados. O maior benefício da simulação é dar idéias de “o que aconteceria se”.
- *Reportando os resultados.* O último passo é dar recomendações para melhoramentos no sistema atual baseado nos resultados da simulação. Tais resultados devem ser claramente apresentados para a tomada de decisão final.

Como dito no item *construindo o modelo*, é preciso que haja a validação dos dados gerados pelo simulador com os dados tomados em campo. Segundo SARGENT (2004), a validação e verificação de um modelo é crítica no desenvolvimento da simulação. Ainda segundo o autor não existe um conjunto específico de testes que pode ser facilmente aplicado para determinar a validade do modelo.

HARREL *et al.* (1996), diz que um teste que pode ser feito para validação do modelo é a comparação entre as respostas fornecidas pelo modelo e as respostas dadas pelo sistema real. Outro meio de validação é o chamado *turing test*, onde as respostas dadas pelo modelo e as respostas que são dadas pelo sistema real são entregues a pessoas que conhecem o sistema, de modo que estas avaliem a representatividade da realidade.

A **Figura 2.6** mostra de forma esquemática a metodologia citada. Nota-se que caso não haja sucesso em algum dos passos é preciso voltar aos passos anteriores, de modo a se alcançar um resultado satisfatório na simulação.

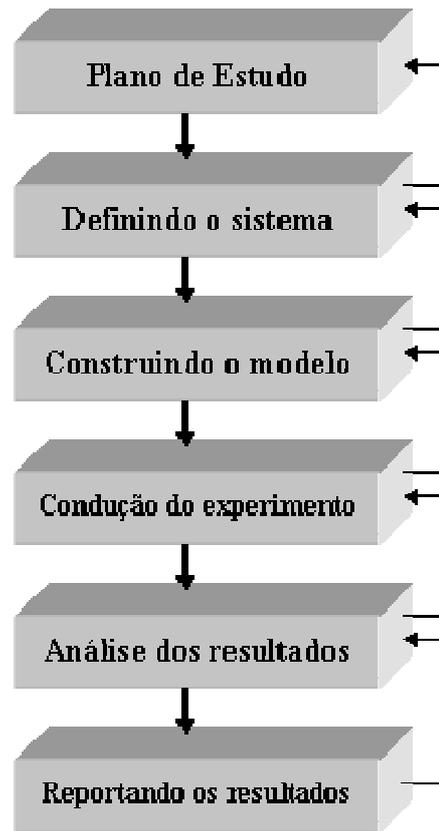


Figura 2.6 – Procedimento para se conduzir uma simulação (Adaptado de PROMODEL® USER'S GUIDE, 2002).

Já LOBÃO e PORTO (1997) apresentam uma metodologia em dez passos (**Figura 2.7**), e enfatizam que os resultados obtidos com o estudo só terão qualidade e consistência se o trabalho for bem fundamentado, conduzido de uma forma lógica e metódica. A seguir é comentado cada um dos passos da proposta.

- *Definição do problema e dos objetivos do estudo*: neste momento o modelador e o usuário deverão estabelecer um diálogo claro e preciso a respeito do problema e dos resultados esperados ao final do estudo de simulação. O modelador deverá fazer uma série de perguntas ao usuário visando entender o funcionamento do sistema na prática. Por exemplo: qual será o propósito do modelo e como será utilizado?; quais serão as variáveis de entrada e saída?; o sistema é existente?; quais serão os usuários do modelo?; quem fará parte da equipe do projeto?; quais os recursos disponibilizados?; qual o prazo esperado?, entre outras. Também nesta fase o modelador deverá esclarecer o usuário sobre as limitações do estudo;
- *Esboço*: o modelador deverá elaborar um esboço do modelo do sistema, visando à realização dos primeiros estudos sobre o fluxo de informações, disposição física dos equipamentos, os dados necessários e de que maneira eles serão coletados e tabulados;

- *Coleta de dados:* deverá ser realizada baseando-se no esboço do sistema. Os meios para obtenção dos dados poderão variar: se o sistema já é existente bastará coletar os dados históricos do mesmo ou coletá-los através de medições, para sistemas não existentes o modelador terá que trabalhar com catálogos de fabricantes, dados de sistemas similares, entrevistas com operadores e especialistas no processo, etc;
- *Verificação dos dados:* o modelador deverá verificar a consistência dos dados coletados para evitar que o modelo seja construído sobre uma base errônea de dados;
- *Construção do modelo:* nesta etapa surge a necessidade da escolha do *software* a ser utilizado. O modelador deverá levar em consideração a necessidade do modelo e a interface oferecida pelo pacote de *software*;
- *Validação:* esta validação poderá ser realizada de diversas formas: a mais comum é confrontar os resultados de saída com os dados reais do sistema; também pode ser feita com o uso de técnicas estatísticas; teste de *Turing*, onde especialistas no sistema estudado recebem dois relatórios – um com os dados simulados e o outro com os dados reais do sistema, sem a identificação de qual é o real e qual o modelado, e discutem as diferenças;
- *Planejamento dos experimentos:* no planejamento alguns itens deverão ser levados em consideração: sob quais condições cada simulação será realizada?; qual a duração de cada simulação?; quantas replicações deverão ser efetuadas para cada cenário?; se será adotado algum método de planejamento de experimentos como Taguchi;
- *Realização dos experimentos:* os experimentos planejados no passo anterior serão executados e analisados, devendo os resultados serem cuidadosamente documentados;
- *Refinamento:* se o resultado for considerado satisfatório poderá seguir para o próximo passo, caso contrário deverá voltar ao passo sete para replanejar o experimento;
- *Encerramento:* ocorrerá o fechamento do projeto com a análise dos relatórios gerados e escolha da melhor alternativa a ser implementada. Nesta etapa deverá ser gerada, pelo modelador, e entregue ao usuário a documentação detalhada referente à construção do modelo.

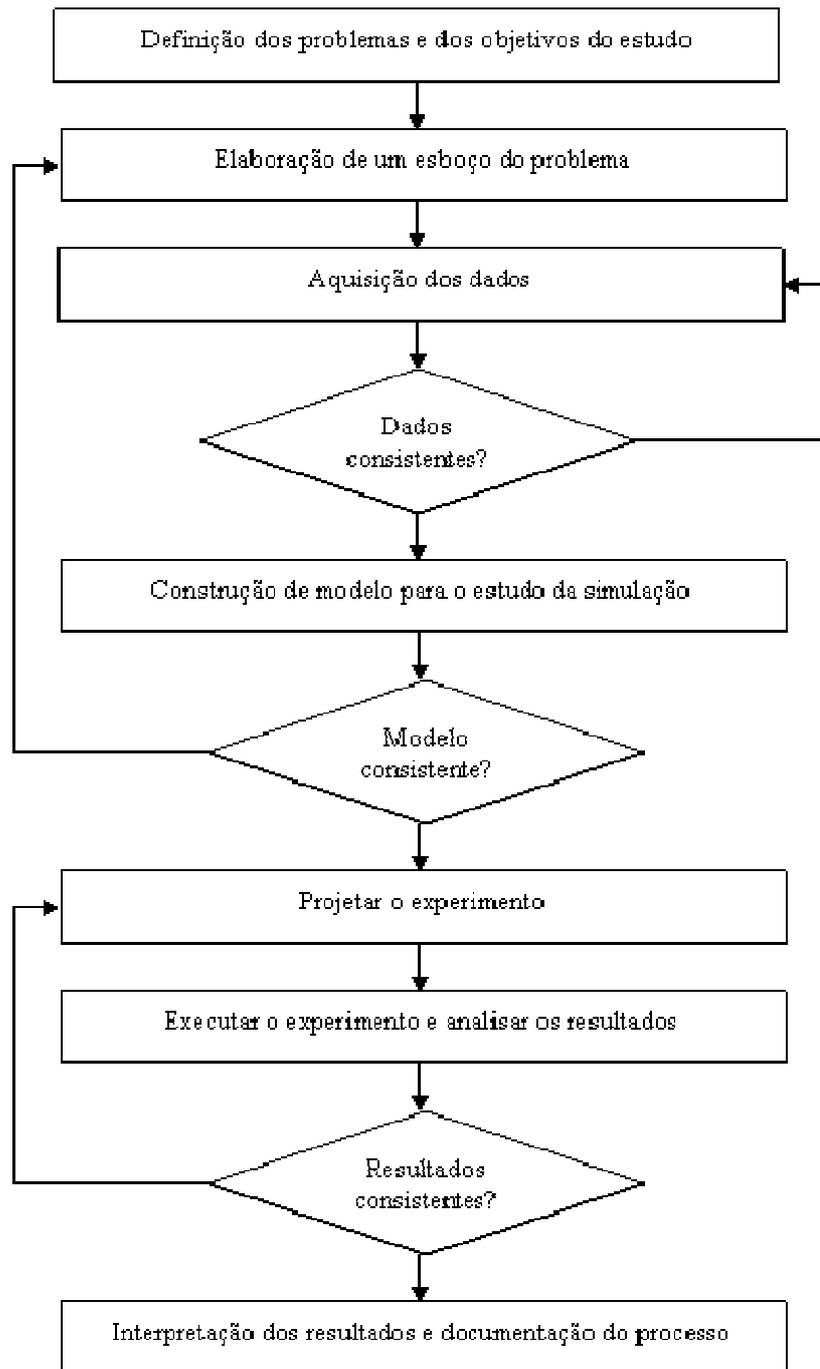


Figura 2.7 – Sequência da metodologia (LOBÃO e PORTO, 1997).

2.5 Definição da metodologia

No tópico 2.4 foram mostradas algumas das metodologias de abordagem do trabalho de simulação encontradas na literatura por vários autores. Comparando-se as metodologias percebe-se que estas não diferem muito nos seus princípios básicos. A metodologia escolhida foi a de LOBÃO e PORTO (1997), com base na observação de que esta possui os mesmos

princípios básicos das demais metodologias com a vantagem da sequência adaptar-se bem à aplicação da simulação em uma indústria de manufatura.

As fases de projeto, execução e análise do experimento serão realizadas em conjunto com a otimização do modelo.

Seguindo as etapas da metodologia definida, nos três próximos tópicos serão abordadas as fases de esboço do problema e coleta de dados através do mapeamento do processo, construção do modelo e a validação do modelo.

2.6 Mapeamento do processo

Para desenvolver ou aplicar sistemas de gerenciamento de processos é necessário definir e entender os processos e as atividades que os compõem. Para VILLELA (2000), processo é uma ordenação específica das atividades de trabalho no tempo e no espaço, com um começo e um fim identificados, assim como os inputs e outputs. Segundo o mesmo autor, os processos seguem uma hierarquia, conforme mostrados na **Figura 2.8**. Deste modo, o nível de detalhamento do trabalho se encaixa em uma destas definições:

- **Macroprocesso:** Processo que envolve mais de uma função na estrutura organizacional, e a sua operação tem um impacto significativo no modo como a organização funciona;
- **Processo:** Conjunto de atividades sequenciais (conectadas), relacionadas e lógicas que tomam um input do fornecedor, acrescentam valor e entregam um output para um cliente;
- **Subprocessos:** Uma parte interrelacionada de forma lógica com outro subprocesso, realizando um objetivo específico em apoio ao macroprocesso e contribui para o objetivo deste;
- **Atividades:** São elementos do processo ou subprocesso. Geralmente são desempenhadas por uma unidade (pessoa ou departamento) para produzir um determinado resultado;
- **Tarefa:** Constitui o micro enfoque do processo, podendo ser um único elemento ou um subconjunto de uma atividade.

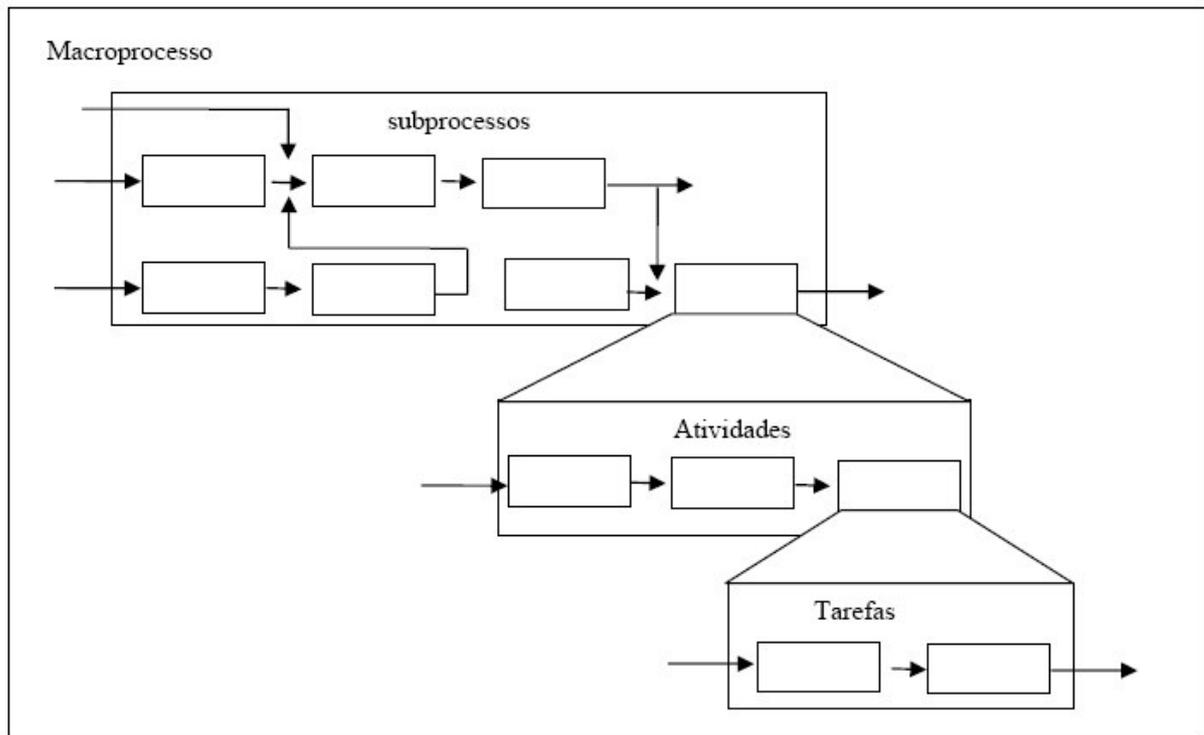


Figura 2.8 – Componentes do processo (HARRINGTON, 1993).

ROHLEDER e SILVER (1997) afirmam que o processo de melhoria da organização começa pelo entendimento dos processos e, principalmente, das atividades que o compõe. Deste modo, SPEDDING e SUN (1999) afirmam que o conhecimento onde as atividades se processam é importante tanto para alocar recursos quanto para iniciar o processo de melhoria.

Estas atividades podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- Atividades com nível de unidade: Desempenhadas a cada vez que uma unidade do produto é produzida;
- Atividades com nível de lote: Atividades desempenhadas cada vez que um lote de produtos é fabricado. O *setup* de uma máquina é exemplo de uma atividade com nível de lote;
- Atividades com nível de produtos: Atividades desempenhadas para cada linha de produtos. Um exemplo seriam as atividades da área de projeto e marketing dos produtos.

ACCIOLY (1999) afirma que uma ferramenta de grande importância para a compreensão dos processos é o mapeamento do processo através de fluxograma, porque permite a visualização do interrelacionamento das atividades da cadeia produtiva.

As técnicas de fluxograma do processo e mapofluxograma do processo são utilizadas visando exatamente um melhor planejamento da simulação. Estas técnicas auxiliam o modelador a representar da forma mais próxima a real o sistema que será simulado.

O mapeamento de processo constitui em uma ferramenta gerencial, analítica, que possibilita melhoria nos processos existentes ou implanta uma nova estrutura voltada para os processos (VILELLA, 2000). Para ANJARD (1996), o mapeamento de processo consiste em identificar, documentar, analisar e desenvolver um plano de melhoria que proporcione a mudança de visão dos gestores de indústrias, ou seja, faça com que diminua o foco nos output ou produtos e fortaleça a gestão dos processos.

ANJARD (1996) afirma que o resultado do mapeamento do processo, geralmente, é uma representação gráfica, o qual mostra como os recursos de entrada são processados e transformados em saídas, destacando-se a relação e a conexão entre cada atividade. VILLELA (2000) afirma que o mapa de processo pode ser confeccionado manualmente ou com ferramentas computacionais.

Segundo BARNES (1986), o fluxograma do processo é uma técnica para registrar o processo de uma maneira compacta e de fácil visualização e entendimento. Usualmente o fluxograma inicia-se com a entrada da matéria prima na fábrica ou célula e segue o caminho da fabricação do produto, passando pelas operações de transformação, transporte e inspeção até a sua saída como produto acabado.

Os passos para execução do mapa do processo podem ser definidos nas seguintes fases:

- Definição do processo: Nesta fase deve-se determinar quais processos devem ser analisados e estabelecer a fronteira de cada um. Trata-se simplesmente de uma análise explanatória que busca uma compreensão do funcionamento dos processos e da realização das atividades. Nesta fase, já é possível definir alguns objetivos ou metas para a análise, tais como reduzir tempo de ciclo de execução das atividades, melhorar a qualidade dos produtos que chegam à organização e os que são entregues aos clientes. Algumas questões que podem guiar a equipe que atua no projeto podem ser: “Quem são os clientes do processo (interno externo ou ambos)?”, “Quem são os fornecedores?”.

- **Análise do processo:** Após estabelecer o processo a ser analisado, a próxima etapa é definir como o processo escolhido trabalha e, principalmente, identificar as oportunidades de melhoria. O objetivo principal desta fase é entender o que ocorre no processo atual, quem está envolvido e as deficiências encontradas no processo atual. Nesta fase, é elaborado o mapa do processo, o qual mostra a relação entre as atividades para desenvolver e fabricar o produto. A **Tabela 2.2** apresenta símbolos propostos por BARNES (1977) para elaboração do mapa.

Símbolo	Denotação
	Denota uma inspeção, ocorrendo quando o objeto é examinado para identificação ou comparado com um padrão de quantidade e qualidade.
	Denota uma operação. A operação ocorre quando o objeto é modificado intencionalmente em suas características. Geralmente é realizado em uma máquina ou estação de trabalho.
	Denota um transporte, ocorrendo quando o objeto é deslocado de um lugar para o outro.
	Denota uma espera. A espera ocorre quando o objeto permanece sem sofrer nenhuma ação, geralmente a espera é uma fonte de desperdício.
	Denota um armazenamento, o qual ocorre quando o objeto é mantido sob controle e sua retirada requer autorização.

Tabela 2.2 – Simbologia proposta por BARNES (1982) para mapeamento.

Quando se aborda a questão de mapear a organização, uma questão levantada por FERNANDEZ *et al.* (2001) é o nível de detalhes da análise. Segundo o mesmo o autor, quando se trabalha com um nível de detalhes muito baixo a análise fica pobre por falta de informações. Por outro lado, um mapa com muitos detalhes se torna complexo, além de aumentar o custo de execução do mapeamento. Experiências têm mostrado que uma relação entre o nível de detalhamento do mapeamento e o custo de execução do mapa do processo pode ser aproximada como uma função exponencial.

BARNES (1977) também salienta que na execução do mapa do processo devem-se escolher pontos definidos para o início e o término do gráfico, de modo a se garantir toda a cobertura do processo no mapa. Além disso, outra medida importante é escolher o objeto a ser seguido dentro da atividade (se é o operador ou uma peça) e não mudar durante a análise. As

questões que podem auxiliar nesta fase são: “Quais são os produtos/serviços e informações produzidas?”; “Quais são e quantos são os clientes internos e/ou externos?”; “Quais são as perspectivas dos clientes em relação ao resultado do processo?”; “Quais são os pontos críticos para o processo?”.

Ainda segundo BARNES (1986), mapofluxograma é o fluxograma desenhado sobre a planta do edifício ou layout para visualizar-se melhor o processo, a **Figura 2.9** apresenta um exemplo da entrada de peças compradas no almoxarifado, com as operações de recebimento e inspeção.

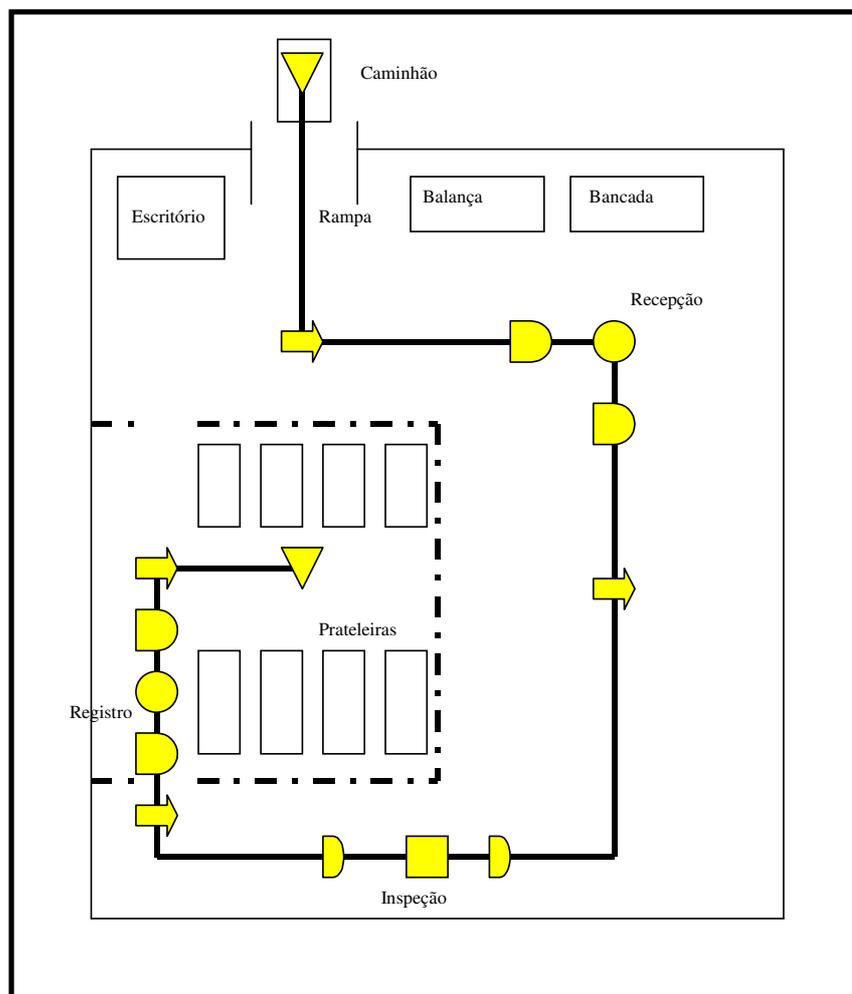


Figura 2.9 – Exemplo de um mapofluxograma (ROSA, 2002).

2.7 Construção do modelo

Uma vez que o modelador e o usuário já possuem uma visão clara de qual o problema será analisado e quais as respostas que se deseja obter com o estudo de simulação, já

conhecem o sistema que a ser modelado, e os dados principais sobre o sistema já foram coletados e analisados quanto à sua correção, ou seja, quanto à maneira como foram coletados e sua correspondência com o sistema real de modo a poder representá-lo, a próxima fase que é a construção do modelo computacional já pode ser iniciada.

Na modelagem todos os dados que foram coletados relativos ao sistema, tais como: layout, equipamentos que participarão da simulação, tempos, número de operadores, tipos de peças processadas, são agora introduzidos no programa, de modo que ao final se tenha o modelo computacional de onde são obtidos resultados e são feitos os estudos e experimentações de simulação. Durante a fase de modelagem o usuário e modelador procuraram a similaridade com o sistema real, dentro de certas limitações, e puderam chegar à conclusão de que alguns dados que foram coletados não são utilizados, e por outro lado, para se atingir o objetivo do estudo, outros dados não previstos, foram levantados.

A seguir são apresentados alguns princípios que se aplicados facilitam os trabalhos de modelagem, possibilitando que se chegue a resultados mais confiáveis em menores tempos de trabalho.

2.7.1 Partir de modelos simples

Os modelos mais complexos são de difícil construção e verificação. Um conceito importante que se deve ter ao modelar é de que os trabalhos de simulação devem partir de modelos simples para os mais complexos. Segundo PIDD (1997), deve-se aprender o máximo possível com esse modelo simples que foi construído, e depois na medida do necessário acrescentando refinamento.

Se o modelador começar a modelagem a partir de modelos simples, e for incrementando-o à medida que o estudo de simulação vai evoluindo, haverá não somente ganho no tempo total de trabalho de modelagem, como também na fase de verificação em que os erros de programação são corrigidos. Dessa forma, no decorrer do estudo vai se refinando esse modelo inicial, até que atenda os objetivos propostos.

2.7.2 Fiscalizar o nível de detalhamento

A modelagem é uma atividade que demanda tempo, e quanto maior o nível de detalhamento, maior o tempo de modelagem, e maiores as necessidades de dados para a

construção do modelo. Segundo DIETZ (1992), um modelo excessivamente detalhado pode não somente reduzir seu desempenho, como também pode obscurecer ou turvar os resultados.

Ao se definir o nível de detalhamento do modelo não se pode perder de vista o objetivo específico da modelagem. Assim sendo, se o objetivo do estudo é, por exemplo, o de se verificar o efeito da compra de mais uma máquina operatriz para dobrar a capacidade desse recurso gargalo, há que se analisar com cuidado se há necessidade de modelar todo o sistema de manufatura ou só parte deste; se é interessante introduzir variáveis relacionadas ao custo do produto ou mesmo ao estoque em processo; se há possibilidade de redução dos dados a serem coletados; se os tempos de parada dos operadores ou equipamentos são significativos para melhorar a precisão da análise. Como já foi citado anteriormente, tanto a coleta de dados quanto à modelagem são atividades dispendiosas, que envolvem também gasto de tempo, desta forma é imperativo que o modelo seja o mais simples possível.

2.7.3 Dividir o modelo

Se o modelo for grande, é aconselhável também sua partição em um conjunto de modelos menores, relacionando-os às áreas lógicas do sistema (DIETZ, 1992). Esses modelos tornam-se mais simples de serem construídos e interpretados. Assim, num processo produtivo em que se têm vários estágios de fabricação, ou a peça passa por diversas células de fabricação, é interessante, caso se tenha que modular todo o processo, que se faça por partes. Cada um desses módulos que constitui o modelo total é verificado separadamente, e após serem feitas as correções, os modelos são agrupados novamente.

2.7.4 Verificar e corrigir os erros

A correção dos erros cometidos durante a programação, é tanto mais fácil quanto menor for o modelo, daí a vantagem em subdividi-lo. Alguns softwares possuem dispositivos que permitem a verificação e correção de erros (*debug*) com mais facilidade. É importante salientar que a recomendação de se partir de modelos mais simples, decorre também da facilidade que se tem para se verificar e corrigir erros nesses modelos, e à medida que essas incorreções são eliminadas, o modelador adiciona ao modelo maiores detalhes de roteamento, introduz variáveis que proporcionam mais informações, adiciona equipamentos, sofisticada a animação (se houver), introduz novos dados do processo, constrói múltiplos cenários, etc. O importante é ter em mente que a verificação e correção de erros, pode ser uma etapa demorada

na modelagem, porém é mais segura do que se tentar ganhar tempo iniciando-a com modelos complexos e muito grandes.

2.8 Validação do modelo

Uma vez que o sistema foi modelado e foi verificado, ou seja, todos os erros de programação foram eliminados, o programa estará em condições de rodar sem problemas. O próximo procedimento será a validação do modelo. A validação vem a ser uma avaliação de quanto o modelo construído é semelhante ao sistema real que se pretendeu simular, no aspecto de se questionar se esse modelo atende ou não as finalidades para as quais foi construído, ou seja, se está dando resposta conveniente ao problema que foi levantado ao se iniciar o projeto de simulação.

O simples fato de a validação ser uma avaliação de semelhança dificulta essa fase, e também gera certa incerteza quanto ao entendimento claro do quanto o modelo está correspondendo ao sistema real. Segundo NAYLOR *et al.* (1971) a validação de modelos computacionais é difícil e dentre todas as complexidades que a envolvem, de ordem prática, teórica e estatística, existe até mesmo uma complexidade de natureza filosófica na validação.

BRATLEY *et al.* (1987) explicam que não há uma receita para se fazer validação, e que devido às aproximações que foram feitas ao se construir o modelo, já seria de se esperar que os dados que o modelo vai gerar não tenham estatisticamente exatamente o mesmo comportamento do sistema.

Segundo SARGENT (2004), determinar a absoluta validade de um modelo para o que ele é proposto a fazer é quase sempre um trabalho lento e de alto custo. Ao invés disto o autor propõe que os testes de validação sejam conduzidos até o modelo produza resultados que sejam confiáveis suficientemente para a sua aceitação.

Desta forma, mesmo que não houvesse limite de tempo disponível, bem como de recursos para se trabalhar na modelagem, e mesmo que os trabalhos de simulação tenham sido bem conduzidos, não há possibilidade de validação absoluta, ou seja, existem circunstâncias do sistema real, que podem acontecer e que não foram previstas no simulador.

NEELANKAVIL (1987), apud PROMODEL USER'S GUIDE, 1997, afirma: “A validação verdadeira é uma impossibilidade filosófica e tudo o que se pode fazer é invalidar ou falhar ao invalidar”.

O principal objetivo da validação, já que não existe fórmula que ajude a se concluir se o modelo é ou não válido, seria o de se determinar a utilidade do modelo ou não. Desta forma, se o modelo atende aos objetivos propostos, mesmo que não tenha semelhança absoluta com o sistema real que foi simulado, o modelo será útil e vai dar respostas que ajudem à empresa em suas decisões. Segundo LAW e KELTON (1982), é preferível se considerar o quanto o modelo está de acordo com o sistema modelado, do que se referir à sua absoluta validade ou invalidade.

O tempo destinado à construção do modelo é um dos fatores limitantes. Ao se elaborar modelos por demais complexos, na tentativa de imitar exatamente o comportamento do sistema, o que estará ocorrendo é uma perda inútil de tempo e recursos, levando o estudo de simulação ao insucesso. Dependendo das respostas que se quer obter, uma linha de produção pode ser modelada em uma semana ou demorar meses, se forem exigidos níveis de detalhamento exagerados. Mesmo que se leve muito tempo modelando o sistema, como já foi visto anteriormente, a validação verdadeira poderia ser impossível.

Desta forma, nessa etapa de validação, não se pode perder de vista os objetivos do estudo da simulação. Uma vez que esses objetivos podem ser cumpridos com o modelo existente, a etapa de validação está terminada. De acordo com a importante observação de CARSON apud KLEINDORFER *et al.* (1998), é necessário que o trabalho de validação não seja feito somente pelo modelador, mas que haja participação do usuário para que o mesmo ganhe credibilidade.

Apesar de ser uma etapa do estudo de simulação, isto não significa que o modelador, bem como o usuário, devam se preocupar com a validade somente após modelar todo o sistema. Assim, ao se definir o problema, esboçar layout, coletar os dados e na modelagem propriamente dita, a preocupação com a validação deverá estar presente, isto posto, é natural que após o modelo estar concluído, a validação será uma fase muito mais fácil de ser executada, pois os dados que fizeram parte do estudo têm consistência com o sistema a ser modelado.

Apesar de não haver uma metodologia que garanta a hipótese de que o sistema seja válido para os objetos propostos, existem algumas propostas que ajudam na tomada de decisão e podem reduzir as probabilidades de que se esteja tomando a decisão errada, validando um modelo que vai gerar resultados não confiáveis, ou invalidando um modelo bom, ocasionando perda inútil de tempo. Essas propostas estão enumeradas a seguir.

2.8.1 Mudança dos parâmetros de entrada

Segundo HARREL *et al.* (1996), um teste que pode ser feito para validação do modelo é o de mudar os dados de entrada e verificar se as respostas que serão fornecidas serão próximas às respostas que o sistema real daria. A recomendação é de que se varie somente o os dados de entrada que serão avaliados, os demais deverão permanecer constantes. Este teste também vai realizar uma análise de sensibilidade, de modo a indicar ao modelador quais são os parâmetros para os quais se deve dar maior atenção na coleta de dados, tendo em vista o seu nível de influência nas saídas do programa.

Assim, por exemplo, se o sistema que se está modelando é simples, como uma célula de fabricação envolvendo apenas três ou quatro máquinas, poder-se-ia testar uma mudança de frequência de entrada das peças na linha, ou mesmo a quantidade com que estas peças entram por vez, lembrando que só se deve mudar um desses parâmetros por vez. Isto ocasionaria uma variação da quantidade de material em processo (WIP), que poderia ser facilmente medido na célula de fabricação e comparado com o resultado fornecido pelo modelo. Poder-se-ia também aumentar propositalmente um tempo de operação e verificar-se qual o efeito causado no estoque intermediário entre essa operação e a posterior, desta forma também se pode avaliar a importância dessa informação para a precisão das respostas.

2.8.2 Turing test

De acordo com a sugestão de HARREL *et al.* (1996), pode ser realizado o chamado Turing test. Nesse teste as respostas dadas pelo modelo e as respostas que são dadas pelo sistema modelado, são ambas entregues a pessoas que conheçam o sistema. A essas pessoas não é dito quais são as respostas do sistema e do modelo, para que não sejam influenciadas em sua opinião. Caso essas pessoas consigam distinguir entre os dois conjuntos de dados, elas devem explicar ao modelador que distinção encontraram.

Essas diferenças são então analisadas uma a uma, juntamente com o modelador, que dessa forma poderá implementar mudanças no modelo de maneira a aproximar os resultados.

2.8.3 Desenvolver o modelo juntamente com o usuário

LAW e KELTON (1982) sugerem que no desenvolvimento do modelo é imprescindível que haja envolvimento tanto das pessoas que conhecem o sistema a ser modelado, quanto à interação com aqueles que vão tomar as decisões. Essa medida vai propiciar tanto o aumento da validade do modelo, quanto à percepção dessa validade por parte daqueles que vão tomar decisões.

Apesar de essa ser uma atividade típica do modelador, quando a linha de produção estiver sendo modelada, é interessante que o gerente da área de produção, os técnicos da área, até mesmo em certas circunstâncias, os operadores tomem parte na modelagem.

Os modernos softwares de simulação possibilitam a animação. Através dessa animação, o modelador pode interagir facilmente com as pessoas que conhecem o sistema, além de motivá-las para o envolvimento com o estudo de simulação. A velocidade de animação pode ser aumentada ou diminuída, de modo a se observar detalhadamente, momento a momento, quais são os eventos que estão ocorrendo na simulação, quais os percursos que o operador está fazendo, quais suas decisões, há quebra das máquinas, etc.

2.8.4 Recorrer a especialistas

Em muitas circunstâncias, não se tem o sistema a ser modelado, neste caso, segundo HARREL *et al.* (1996), o modelador poderá recorrer ao auxílio de pessoas que conheçam um sistema similar, ou mesmo dos fornecedores de equipamentos.

É normal que os fornecedores de equipamentos possuam dados que possam ajudar na modelagem. Um fornecedor de torno CNC, por exemplo, pode até mesmo realizar uma determinada operação para que se obtenham os tempos de troca e operação. Um fornecedor de fornos de tratamento térmico pode fornecer, através dos dados a respeito da peça a ser tratada, qual o rendimento de uma determinada operação.

A validade nesses casos pode até mesmo ser verificada através de outros sistemas similares existentes, ou mesmo que não se tenha o sistema todo, mas apenas uma parte deste,

a validação através da comparação com o sistema real poderia ser feita somente para aquele determinado módulo que se tem.

Se a conclusão for de que o modelo não é válido, haverá necessidade de se rever os passos anteriores conforme a **Figura 2.10**. Essa revisão deve ser feita juntamente com o usuário. O esboço do layout deverá ser revisado, tendo em vista se verificar se ele realmente está correspondendo à linha de produção que foi modelada. Poderá ter havido incorreção ao se lançar as distâncias percorridas, caminhos percorridos pelos operadores, posição ou sequência das máquinas e dados de balanceamento de linha.

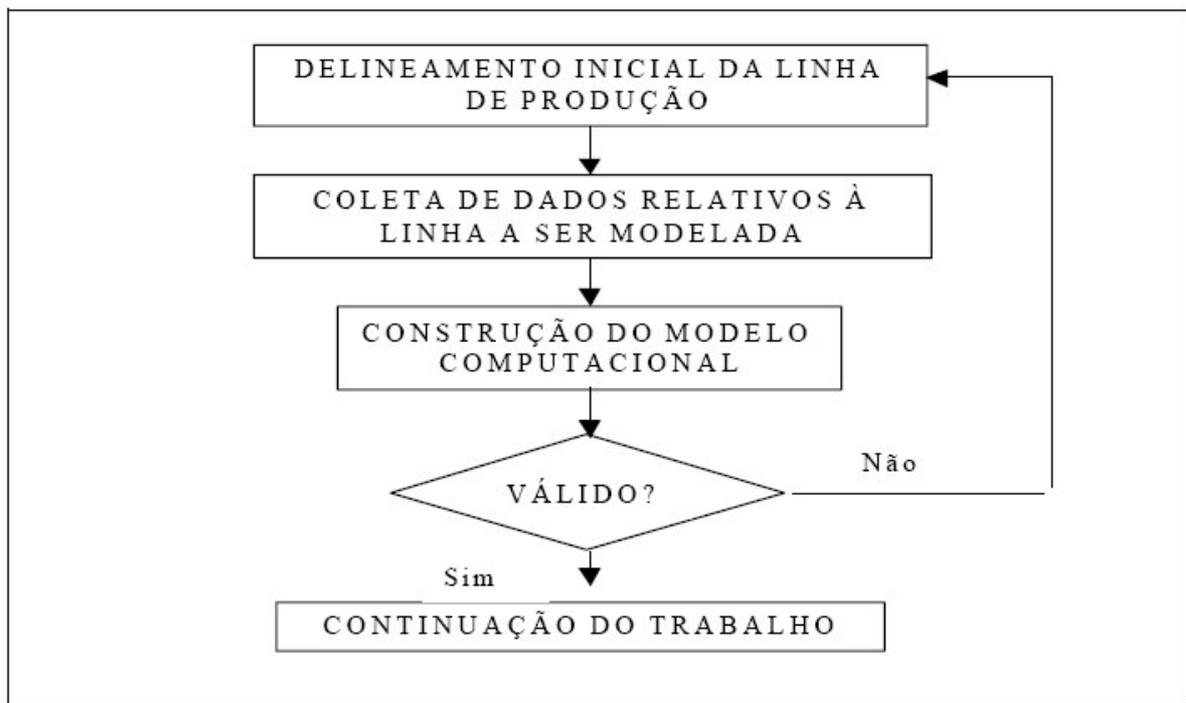


Figura 2.10 – Revisão do trabalho em caso de não validação.

Deve-se verificar se a coleta de dados foi realizada criteriosamente. Podem não estar correspondendo ao sistema real. A metodologia de coleta de dados pode não ter sido a mais correta para aquela determinada máquina ou operação. Se não houve simplificações exageradas, de modo que tempos importantes tenham sido esquecidos.

Mesmo que o programa esteja rodando bem, ou seja, foi verificado, isto não quer dizer que todas as variáveis deram entrada no programa de maneira correta, em consequência devem ser verificadas novamente, principalmente quanto às distribuições de probabilidades que estão associadas a cada um dos conjuntos de dados que foram coletados.

2.9 Considerações finais

Após a apresentação pôde-se verificar que a simulação é uma ferramenta que se mostra adequada nos mais diversos campos, e que tem se tornado bastante difundida nas áreas de logística, manufatura e serviços. Sua dificuldade está em como usar esta ferramenta de forma eficaz, e de como se obter dela respostas que sejam válidas, ou seja, que realmente estejam identificadas com o sistema que se está estudando, e ao mesmo tempo, que estas respostas sejam rápidas de modo a não frustrar o usuário na expectativa de aumentar sua competitividade no mercado. Mostrou-se ainda que a ferramenta de mapeamento do processo e a metodologia de validação do modelo são de fundamental importância neste processo.

3 Otimização

3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo aborda a otimização, apresentando sua definição e ainda, uma visão geral dos métodos de otimização mais usados em Pesquisa Operacional. Em seguida este capítulo se foca em Algoritmos Evolutivos, mais especificamente nos Algoritmos Genéticos, uma vez que o *software* otimizante a ser utilizado na fase de aplicação desta dissertação está baseado neste método.

3.2 Definição

Otimizar é melhorar algo que já existe, visando determinar a melhor configuração para um determinado sistema sem que seja necessário testar todas as possibilidades envolvidas, reduzindo assim o tempo destinado a ele. Com isso tem-se a possibilidade do tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização (gráfica ou tabular) e a obtenção de soluções não tradicionais com menor custo.

Segundo HARREL (2000), a otimização é o processo de tentar diferentes combinações de valores para variáveis que podem ser controladas (variáveis independentes), buscando uma combinação de valores que provê a saída mais desejada. Na maioria das vezes este processo de tentar diferentes combinações para as variáveis se torna difícil ou mesmo impossível de ser realizado em um sistema real, e por isso é feito através de modelos.

Se a resposta do modelo for submetida a todos os possíveis valores das variáveis (ditas variáveis de decisão), a representação gráfica destes valores com os resultados obtidos é chamada de superfície de resposta. Essa superfície de resposta se torna de difícil visualização quando há mais de duas variáveis de decisão, uma vez que o número de dimensões na qual está inserida tal superfície também aumenta (n° . de dimensões = 1 + n° . de variáveis), além de uma grande demanda de tempo. Assim, em uma otimização deve haver um equilíbrio entre a busca da solução ótima e o tempo alocado a essa tarefa.

3.3 Métodos de otimização

Para a execução de uma otimização, de uma forma geral, é preciso seguir alguns passos ou etapas. Na primeira etapa, análise do problema, se define as variáveis do processo e as características específicas de interesse. A etapa seguinte propõe a determinação de um critério para a otimização e especificação da função objetivo de acordo com as variáveis identificadas na primeira etapa.

A modelagem de um problema envolve o desenvolvimento, muitas vezes através de expressões matemáticas, de uma representação para o processo ou sistema. Tal modelo deve relacionar as variáveis de entrada (inputs) e de saída (outputs). Devem também ser incluídas aqui as restrições impostas ao sistema. Se a formulação do problema for muito ampla para sua utilização, faz-se necessário a simplificação da função objetivo e/ou do modelo, sem perda das características essenciais do problema.

Finalmente, a fase de resolução e análise da solução envolve a aplicação de um método de otimização adequado à representação formal estabelecida para o problema, análise dos resultados e exame da sensibilidade do resultado a alterações nos coeficientes, no problema e nas hipóteses. A etapa de análise envolve a avaliação da solução candidata para determinar se ela já é ótima. Embora em grande parte dos casos seja difícil chegar a uma resposta ótima, o resultado da função objetivo, dado por cálculos numéricos repetitivos, para uma suposta solução ótima será a melhor dentre todas as outras alternativas conhecidas.

Para EDGAR e HIMMELBLAU (2001), não existe método ou algoritmo de otimização que possa ser aplicado a todos os problemas. A escolha do método de otimização para qualquer caso particular dependerá fundamentalmente das características da função objetivo e se ela é conhecida explicitamente, da natureza das restrições e do número de variáveis dependentes e independentes.

CARNEIRO (1996), baseada na classificação de outros autores, propôs uma nova classificação dos métodos de otimização de forma que fosse abrangente, proporcionando uma melhor compreensão da distribuição dos métodos, facilitando o estabelecimento de relações entre eles (**Figura 3.1**).

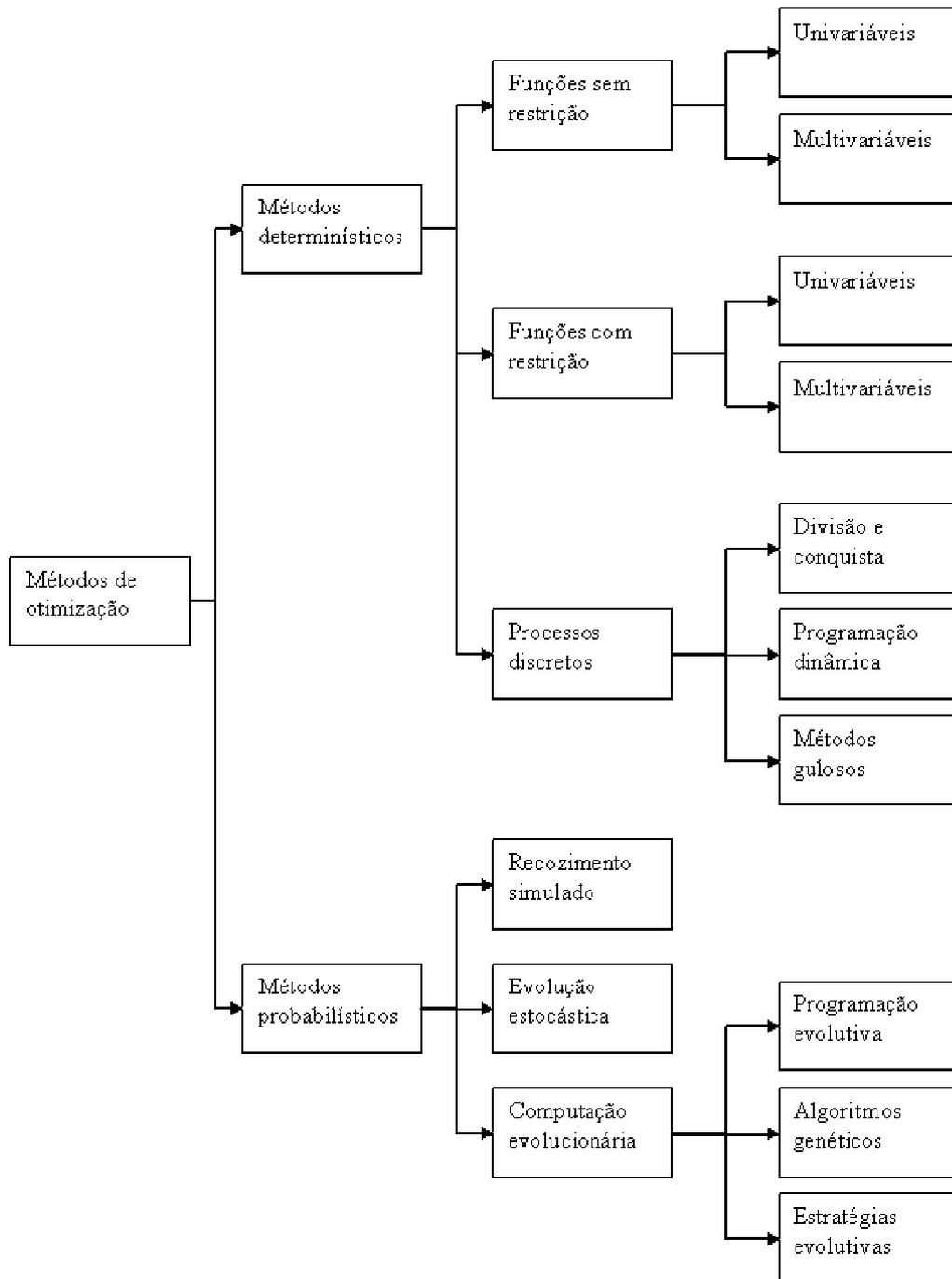


Figura 3.1 – Classificação dos métodos de otimização (CARNEIRO, 1996).

3.3.1 Métodos determinísticos

LAW e KELTON (2000) definem um modelo determinístico como aquele que não contém nenhum componente probabilístico (descrito mais à frente). Nestes modelos, tanto as saídas como as entradas são determinadas, ou seja, são representadas por números, não tendo qualquer relação com funções probabilísticas. Esta definição pode ser estendida para os

métodos de otimização, cuja principal característica é que sua aplicação independe dos valores das funções envolvidas.

Funções sem restrições

Os métodos que fazem parte desta categoria foram denominados por TANOMARU (1995) de métodos enumerativos de otimização. Estes métodos examinam cada ponto do espaço de estados em busca do valor ótimo para a função objetivo, adotando procedimentos específicos para determinar a direção de busca, ou seja, o próximo valor a ser examinado.

Os métodos desta categoria são métodos de programação não-linear (CARNEIRO, 1996), e podem ser univariáveis ou multivariáveis.

Funções com restrições

Métodos deste tipo são aqueles formados pela Programação Linear, que são amplamente usados e um dos mais efetivos. A Programação Linear envolve o planejamento de atividades para obter um resultado ótimo, isto é, o melhor resultado que atinge o objetivo especificado entre todas as possíveis alternativas.

Processos discretos

Muitas plantas de processos e partes de equipamentos são representadas como processos multiestágios, mesmo se o conjunto sob análise não é constituído por unidades separadas. A determinação das condições ótimas de operação ou projeto em tais processos é complicada, porque os próprios estágios são quantidades discretas e as condições a serem estabelecidas para cada estágio estão interrelacionadas (CARNEIRO, 1996).

O método de Processos Discretos engloba outros métodos: Divisão e Conquista, Programação Dinâmica e Métodos Gulosos.

3.3.2 Métodos probabilísticos

Os métodos determinísticos descritos anteriormente pressupõem que todos os dados necessários para descrição do modelo sejam conhecidos. Mas, na vida real, dificilmente se conhece todos estes valores com absoluta certeza e necessita-se avaliar situações em que algumas variáveis, pertencentes ao espaço do problema, possuam valores aleatórios.

Assim, segundo HARREL (2000), métodos probabilísticos são aqueles em que uma ou mais variáveis de entrada são aleatórias, ou seja, assumem uma distribuição de probabilidade, conhecida ou não. Nos métodos probabilísticos as funções objetivo são tipicamente não-lineares, tornando a tarefa de otimização mais complexa. No entanto, os métodos probabilísticos permitem uma melhor exploração do espaço de soluções, aumentando a possibilidade de determinação do extremo global da função objetivo pesquisada (CARNEIRO, 1996).

Segundo a classificação proposta por CARNEIRO (1996), os métodos probabilísticos de otimização englobam três métodos: Recozimento Simulado, Evolução Estocástica e Computação Evolutiva.

Recozimento simulado

Este método de otimização, o qual foi proposto na década de 50, faz uma analogia com o processo de recozimento (*annealing*) da metalurgia (SARAMAGO, 2003). No recozimento o metal é aquecido a altas temperaturas, causando um choque em sua estrutura atômica. Se o metal for resfriado de forma brusca, a microestrutura tende a um estado aleatório instável, porém, se o metal é resfriado de forma suficientemente lenta, o sistema procurará um ponto de equilíbrio caracterizado por uma microestrutura ordenada e estável.

Para encontrar o valor mínimo da função objetivo, o processo inicia-se a uma alta temperatura e aplica o algoritmo até ser alcançado o estado estacionário, quando não ocorrem mais alterações no sistema. Quando o valor da função objetivo não decresce sistematicamente, mas somente varia aleatoriamente de uma iteração para a seguinte, inicia-se a lenta redução da temperatura e são realizadas mais algumas iterações. Eventualmente um novo estado de equilíbrio é alcançado com um valor menor que o anterior. O processo continua até que a temperatura seja reduzida a zero, proporcionando uma configuração final com um valor muito baixo da função objetivo, talvez até o valor ótimo (CARNEIRO, 1996).

Evolução Estocástica

Este método é similar ao Recozimento Simulado, tendo como principal diferença o fato da Evolução Estocástica aceitar inicialmente somente ganhos positivos fazendo com que a “subida” (ou “descida”) inicie somente quando for alcançado um mínimo local, permitindo que a Evolução Estocástica apresente convergência mais rápida, com resultados similares ou até melhores.

Computação Evolutiva

A Computação Evolutiva (também chamada de Computação Evolucionária) é o nome dado a métodos computacionais inspirados na teoria da evolução. Os algoritmos usados nesses métodos são conhecidos como Algoritmos Evolutivos (AEs).

Os AEs diferem de outras técnicas não-lineares de otimização em vários pontos. A diferença mais significativa é que os AEs conduzem sua busca usando uma população de soluções ao invés de uma só, possibilitando uma maior coleta de informações sobre a superfície de resposta.

Segundo TANOMARU (1995), os AEs encaram a teoria de evolução Darwiniana como um processo adaptativo de otimização, sugerindo um modelo em que populações evoluem de modo a melhorar o desempenho geral da população com respeito a um dado problema.

Segundo BÄCK (1997) este método deve ser entendido como um conceito geral adaptável à solução de problemas, especialmente bem adaptável para a solução de problemas complexos de otimização.

Atualmente, os AEs são técnicas alternativas às convencionais de busca e otimização (COELHO e COELHO, 1999), e englobam um crescente número de métodos, sendo os mais importantes: Algoritmos Genéticos, Programação Evolutiva e as Estratégias Evolutivas.

Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos são mecanismos de busca baseados nos processos de evolução natural e na genética. Neles, uma população de possíveis soluções para um dado problema evolui de acordo com operadores probabilísticos concebidos a partir de metáforas biológicas, de modo que haja uma tendência de que, na média, os indivíduos representem soluções cada vez melhores à medida que o processo evolutivo continua (TANOMARU, 1995).

Estratégias Evolutivas

Ao contrário dos Algoritmos Genéticos, que também empregam cruzamentos, este método emprega apenas operadores de mutação. Em um esquema bem simplificado da

Estratégia Evolutiva, um indivíduo-pai gera um só filho através de aplicação de mutações de distribuição Gaussiana, média zero e variância variável, de modo que pequenas mutações ocorram mais freqüentemente que mutações mais radicais. Sempre que um filho “melhor” que o pai é gerado, o pai é substituído e o processo é reiniciado (TANOMARU, 1995).

Programação Evolutiva

Os métodos de Programação Evolutiva (também chamados de Programação Evolucionária) foram desenvolvidos por Lawrence J. Fogel em 1962, e originalmente concebidos como uma tentativa de criar inteligência artificial (BÄCK, 1997). Porém este método tem sido bastante usado em problemas de otimização e é, neste caso, virtualmente equivalente às Estratégias Evolutivas, diferenciando-se apenas nos procedimentos de seleção e codificação de indivíduos.

3.4 Algoritmos Genéticos

Os AGs são as técnicas mais estudadas e difundidas de Algoritmos Evolutivos graças a sua flexibilidade, relativa simplicidade de implementação e eficácia em realizar busca global em ambientes adversos (TANOMARU, 1995). Outra vantagem no uso dos AGs é que estes não necessitam de uma função objetivo matematicamente explícita para realizar a busca pela solução do problema (SILVA, 2002).

Sua flexibilidade possibilita aplicações em áreas tão distintas tais como: engenharias, desenho industrial, pesquisa operacional, computação, bioquímica e biologia, composição musical, e ciências sociais (LOPES, 1999).

3.4.1 Funcionamento

De maneira similar à teoria da evolução, os AGs manipulam uma população de pontos na superfície de resposta (indivíduos), ou seja, possíveis soluções para um problema proposto, de tal modo que as piores soluções desaparecem enquanto que as melhores continuam a evoluir na busca da solução ótima, explorando simultaneamente diversas áreas da superfície de resposta (TANOMARU, 1995). Os passos são:

- O primeiro passo para a aplicação de um AG é definir a representação da população.
- O passo seguinte é a geração da população inicial. Normalmente a população inicial é formada por um conjunto aleatório de indivíduos, em alguns casos se utiliza alguma

técnica heurística para definir os indivíduos, ou o uso conjunto de ambas as técnicas (TANOMARU, 1995).

- A seguir é feita a manipulação da população de respostas, tal manipulação tem como objetivo a criação de novos indivíduos com maior adaptabilidade através das gerações, utilizando para isso os “operadores genéticos”. Os operadores são (em ordem de aplicação): seleção, cruzamento e mutação.

Seleção

A idéia principal deste operador é oferecer aos melhores indivíduos da população corrente preferência para o processo de reprodução, permitindo que estes indivíduos passem suas características às próximas gerações. O processo de seleção geralmente causa um aumento médio no valor de adaptação dos indivíduos da população a cada geração.

Entre os métodos de seleção encontra-se o método da Roleta, a Amostragem Universal Estocástica, Seleção Elitista, Seleção Baseada na Posição, Seleção por Torneio, Seleção Estado Estável, Seleção por Truncatura e Seleção local (SIMÕES, 1999).

Cruzamento

O operador de cruzamento (*crossover* ou recombinação) cria novos indivíduos através da combinação de dois ou mais indivíduos. A idéia intuitiva por trás deste operador é a troca de informação entre diferentes soluções candidatas.

Geralmente dois indivíduos progenitores são escolhidos da população, por um método aleatório com probabilidade definida por uma “taxa de cruzamento” (TANOMARU, 1995), para produzir dois novos indivíduos.

Mutação

O operador de mutação usado nos AGs tem o objetivo de alterar aleatoriamente a característica de um indivíduo, através da mudança do valor de um gene. Uma vez que as características dos “descendentes” são limitadas à constituição de seus “ancestrais”, a mutação possibilita o aparecimento de indivíduos com características até então não identificadas (CUNHA e PINTO, 2001). Esta alteração garante que a probabilidade de chegar a qualquer ponto da superfície de resposta nunca seja zero, além de contornar o problema de ótimos locais.

Parâmetros

Os AGs dependem essencialmente de um conjunto de parâmetros que devem ser definidos. Os principais parâmetros são (TAVARES, 2000):

- Taxa de Cruzamento: é definida como a medida da possibilidade de aplicação do operador de cruzamento a um dado par de indivíduos. Os valores típicos para esta taxa situam-se no intervalo de 0,6 a 1,0.
- Taxa de Mutação: é uma medida da taxa de ocorrência da operação mutação sobre um dado cromossomo.
- Taxa de Substituição: define que proporção de indivíduos da população será substituída em cada geração.
- Critério de parada: depende do problema e do esforço computacional exigido. Em face do tempo e dos recursos disponíveis, é necessário definir qual a qualidade da solução desejada.

Segundo CUNHA e PINTO (2001), não existem parâmetros ótimos para os “operadores genéticos”, eles são específicos para cada problema e cada esquema de codificação, não podendo ser adotados de forma genérica, uma vez que comprometem o desempenho global do algoritmo.

3.5 Considerações finais

Este capítulo se iniciou buscando apresentar o conceito e alguns métodos de otimização, passando pelos Algoritmos Evolutivos e se focando nos Algoritmos Genéticos. Através da revisão bibliográfica pôde-se verificar que este é um método bastante flexível e por isso é indicado para o uso conjunto com simulação, o que tem se tornado bastante difundida.

4 Otimização + Simulação

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo busca apresentar a integração entre simulação e otimização, apresentados nos dois últimos capítulos, seu funcionamento e metodologia de execução. É mostrado ainda o funcionamento do SimRunner®, incorporado ao pacote de simulação ProModel®, o qual é utilizado no estudo.

4.2 Introdução

Com a utilização da simulação computacional é possível prever e visualizar as consequências no modelo proporcionadas por determinadas variáveis em, por exemplo, uma linha de manufatura. Porém, não é possível dizer se tais valores são os ótimos para, por exemplo, a maximização da produtividade da linha.

Métodos de tentativa e erro são muito cansativos, demorados e, além disso, o resultado encontrado pode não representar o ótimo. Esta limitação é superada com a integração dos softwares de simulação com os de otimização. Ainda segundo FU (2002) até a última década, simulação e otimização eram mantidas separadamente na prática. Atualmente essa integração tem se mostrado bastante difundida, principalmente pelo fato de alguns pacotes de simulação incluírem rotinas de otimização. A **Tabela 4.1** apresenta alguns *softwares* de otimização, os pacotes de simulação que estão incluídos e as técnicas de otimização utilizadas.

Software de otimização	Pacote de simulação	Técnica de otimização
AutoStat	AutoMod	Algoritmos evolutivos e algoritmos genéticos
OptQuest	Arena, Crystal Ball, etc.	Busca Scatter e tabu e redes neurais
OPTIMIZ	SIMUL8	Redes neurais
SimRunner	ProModel	Algoritmos evolutivos e algoritmos genéticos
Optimizer	WITNESS	Simulated annealing e busca tabu

Tabela 4.1 – *Software* de otimização (Adaptado de FU, 2002).

4.3 Funcionamento

Para FU (2002), na interação entre simulação e otimização, a última deve ser vista como uma ferramenta complementar à simulação. Neste processo, a otimização fornece as variáveis de uma possível solução (*inputs*) à simulação; esta, após todo o processo de simulação, fornece respostas (*outputs*) para a situação proposta, que retornam à otimização. A otimização gera novas variáveis, utilizando técnicas de otimização específicas, que serão novamente testadas pela simulação. Este ciclo, representado na **Figura 4.1**, é repetido até sua parada, definida de acordo com o método de otimização utilizado. Quando o método de otimização é baseado em Algoritmos Genéticos, para cada possível solução é efetuada uma tentativa, ou seja, um ciclo.

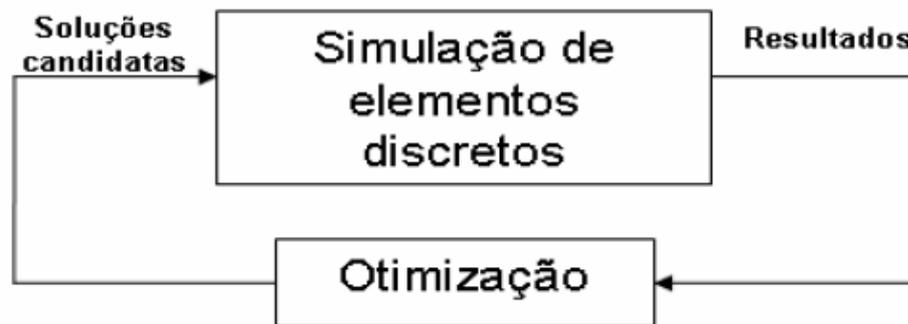


Figura 4.1 – Otimização em simulação (FU, 2002).

A grande limitação para o uso da otimização em simulação é o número de variáveis, sendo seu desempenho reduzido enormemente diante de um modelo com alto número de variáveis a serem manipuladas pela otimização.

4.4 Metodologia para simulação + otimização

Não há uma metodologia simples ou padrão para otimizar um sistema onde os dados são baseados em experimentos conduzidos com um modelo de simulação. A grande parte das metodologias foca em um processo de busca que envolve múltiplas rodadas de simulação (DIAZ e PÉREZ, 2000).

Em geral, metodologias de otimização em simulação partem de um modelo já existente e validado. O primeiro passo é a definição das variáveis de decisão, ou seja, as variáveis que afetam o objetivo final do problema. Após isso, define-se a função objetivo, que

pode ser a maximização ou minimização de uma função pré-definida. É o resultado desta função que será avaliado pelos algoritmos de otimização na busca de um valor ótimo. O próximo passo é a definição das restrições do problema seguido do estabelecimento de alguns parâmetros, como: número de replicações, precisão e critério de parada. Uma metodologia mais específica para o uso do SimRunner® é proposta por HARREL *et al.* (2000). Segundo ele, após a construção de um modelo eficiente e validado, deve-se executar alguns passos para uma otimização bem sucedida; estes passos são os seguintes:

- Definir as variáveis que afetarão as respostas do modelo e que serão testadas pelo algoritmo de otimização. São estas variáveis que terão o valor alterado a cada rodada de simulação;
- Definir o tipo de variável (real ou inteira) e limites inferiores e superiores. Durante a busca, o algoritmo de otimização gerará soluções respeitando o tipo das variáveis e seus limites. O número de variáveis de decisão e a gama de valores possíveis afetam o tamanho do espaço de busca, alterando a dificuldade e o tempo consumido para identificar a solução ótima. É por isso que se recomenda que somente as variáveis que afetem significativamente o modelo sejam usadas;
- Definir a função objetivo para avaliar as soluções testadas pelo algoritmo. Na verdade, a função objetivo já poderia ter sido estabelecida durante a fase de projeto do estudo de simulação. Esta função pode ser construída tendo por base peças (*entities*), equipamentos (*locations*), operários (*resources*) entre outros, buscando minimizar, maximizar ou fazer uso de ambos em diferentes variáveis, dando inclusive pesos diferentes para compor a função objetivo;
- Selecionar o tamanho da população do Algoritmo Evolutivo. O tamanho da população de soluções usado para conduzir o estudo afeta a confiabilidade e o tempo requerido para a condução da busca, assim, é necessário que haja um equilíbrio entre o tempo requerido e o resultado esperado da otimização. Nesta fase também é importante definir outros parâmetros como: precisão requerida, nível de significância e número de replicações;
- Após a conclusão da busca, um analista deve estudar as soluções encontradas, uma vez que, além da solução ótima, o algoritmo encontra várias outras soluções competitivas. Uma boa prática é comparar todas as soluções tendo como base a função objetivo.

Mesmo seguindo metodologias para a execução da otimização em simulação, alguns fatores afetam diretamente o desempenho da busca, entre eles: precisão do modelo, número de variáveis, complexidade da função objetivo, valores iniciais das variáveis e seus limites (OPTQUEST FOR ARENA USER'S GUIDE, 2002).

4.5 Considerações finais

A simulação e a otimização são métodos de Pesquisa Operacional bastante difundidos, porém, somente a pouco mais de uma década estes dois métodos vem sendo usados conjuntamente. Este uso conjunto se mostra bastante eficiente e de uso relativamente simples sendo aplicável nas mais diversas áreas. Em um estudo de otimização em simulação, tão importante quanto conhecer o funcionamento dos programas é a sequência e o modo de execução de cada etapa do projeto. Assim é preciso que se siga uma metodologia de implementação bastante consistente e devidamente planejada.

5 Aplicação

5.1 Considerações iniciais

Este capítulo faz uma descrição da empresa onde é realizado o estudo, da linha de manufatura e do produto a ser fabricado.

O problema abordado neste trabalho consiste em dimensionar os estoques máximos intermediários, a quantidade mínima de mão de obra necessária e produtividade máxima da linha. Para a obtenção destas informações foi utilizada a otimização através da simulação.

5.2 Definição do sistema a ser analisado

O estudo é desenvolvido em uma das empresas de um grupo de capital nacional no setor de autopeças. Dentre os produtos fabricados pelo grupo, pode-se destacar: vagões de trem, travessas, suportes, chassis, eixos, rodas e longarinas. Este grupo possui três unidades no Brasil e aproximadamente nove mil funcionários. A empresa do grupo que é alvo do estudo atua na área de produtos estruturais e possui três mil e quinhentos funcionários. Em fase de expansão, uma nova linha será construída para a produção de longarinas através de um processo diferente do atual.

A longarina, ou viga com perfil “U”, pode ser produzida através do método convencional, com prensas e ferramentas ou através do processo chamado *roll form* (RF). No processo convencional de produção são utilizadas matrizes, que chegam a pesar setenta toneladas, e prensas com capacidades superiores a três mil toneladas. No processo RF a longarina é feita através de um processo contínuo de dobra através de rolos. O processo RF possui algumas vantagens e desvantagens, conforme **Tabela 5.1**.

Vantagens	Desvantagens
Baixo custo de investimento	Baixa produtividade
Alta flexibilidade	Produz somente longarinas com perfil reto
Baixo tempo de <i>setup</i>	Maior custo de produção

Tabela 5.1 – Vantagens e desvantagens do processo RF comparados ao processo em prensa.

A longarina é o componente estrutural de maior importância na linha de montagem de chassis de caminhões e ônibus, apesar de não ser a de maior custo para a montadora. Sua função é suportar todos os demais componentes da montagem do veículo. Sem a longarina é impossível iniciar a montagem do veículo.

A **Figura 5.1** mostra a ilustração de uma longarina.

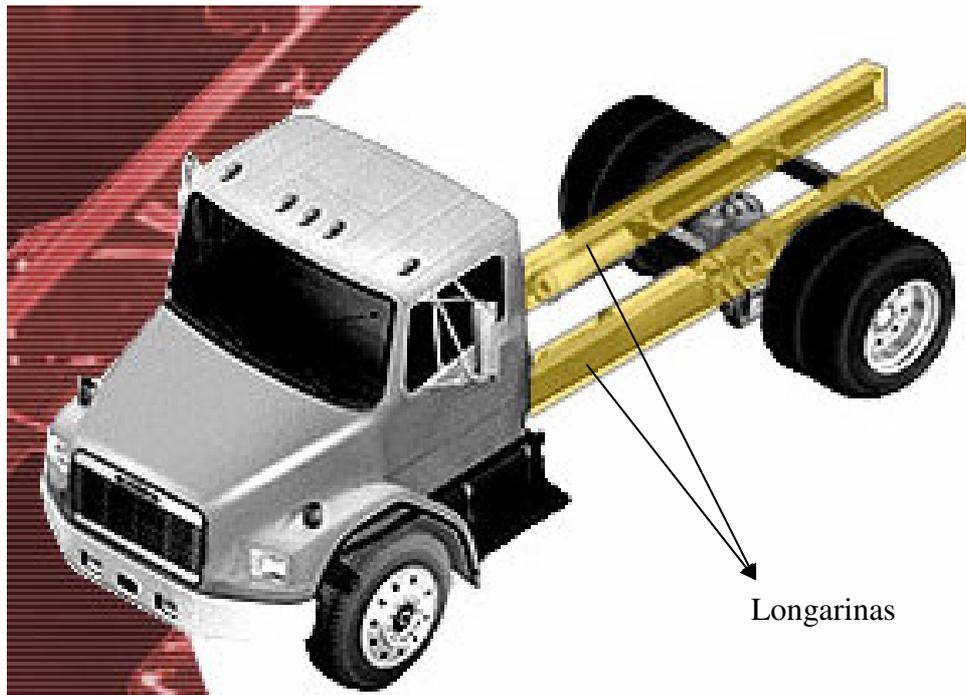


Figura 5.1 – Produto fabricado pela empresa e sua localização no veículo.

Todas as longarinas fabricadas pelo processo RF possuem basicamente as mesmas características conforme mostrado na **Figura 5.2**.

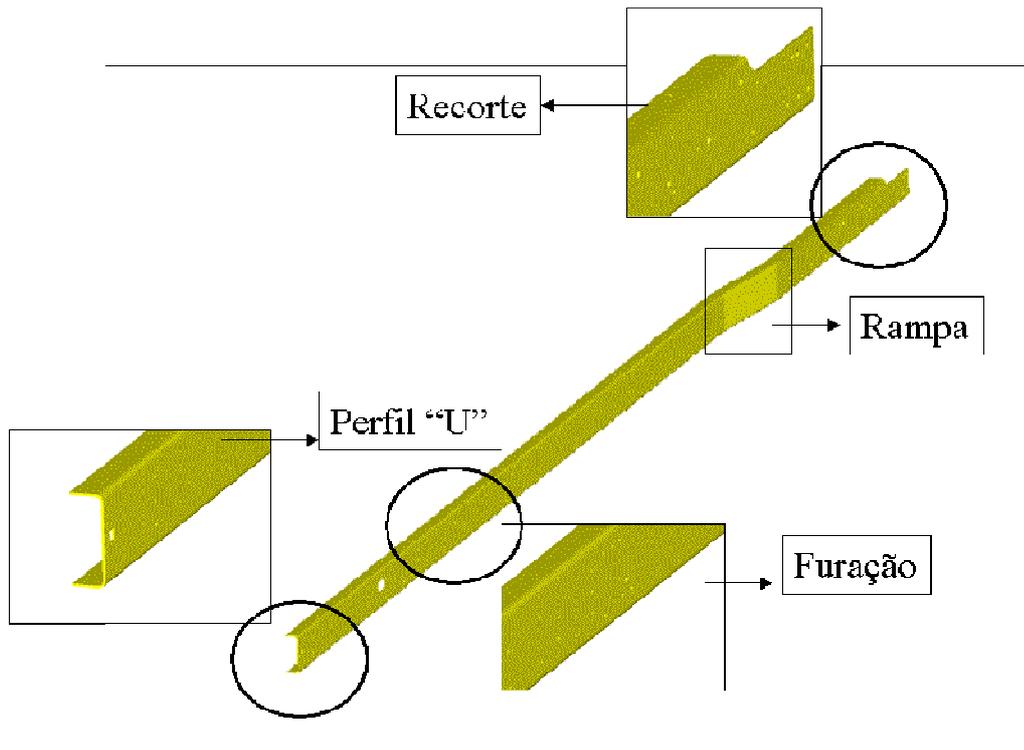


Figura 5.2 – Principais características das longarinas.

As diferenças entre as longarinas ficam por conta dos seguintes aspectos:

- Quantidade, tamanho e posição de furos;
- Altura das abas;
- Largura do perfil;
- Comprimento;
- Quantidade, tamanho e posição dos recortes.

Como objeto de estudo desta dissertação foi escolhida a linha de manufatura de longarinas RF. Esta decisão tem como base os seguintes aspectos:

- por ser um novo processo de produção, para o qual não há experiência na empresa, a simulação pode ser uma excelente ferramenta para estudos de previsão;
- pela importância da linha na estratégia da empresa de obtenção de novos mercados;
- pelo alto valor do investimento em equipamentos;
- pela necessidade da empresa em definir a necessidade ou não dos estoques intermediários, suas áreas e as melhores utilizações de recursos para a formação de preços.

5.3 Esboço do problema e coleta de dados

A linha de manufatura de longarinas RF é idealizada com o layout em série, contando com sete operadores de máquina, dois inspetores e quatro máquinas principais.

Para execução do mapa do processo o passo inicial é a criação do mapofluxograma, o qual fornece uma visão geral das atividades se desenvolvendo nos diferentes equipamentos facilitando a validação do modelo.

Para tal foi estruturada uma equipe de cinco especialistas da empresa, que atuam diretamente na nova linha de produção, com os seguintes objetivos:

- definir o fluxo geral da linha;
- detalhar as atividades e criar o mapofluxograma;
- definir os tempos de cada processo e criar o mapa do processo.

Fluxo geral

A nova linha de produção recebe quatro equipamentos principais: RF, puncionadeira, robô para corte a plasma e a dobradeira (**Anexo 2**):

- O RF é o equipamento que transforma uma chapa de aço em uma viga “U”;
- A puncionadeira, como o próprio nome diz, executa a furação em todo o comprimento da viga “U”;
- O robô de corte realiza pequenos recortes permitindo a passagem de eixos e outros componentes do veículo;
- A dobradeira executa a chamada rampa que em alguns veículos é necessária para a acomodação do motor.

Foi definido pela equipe que todos os equipamentos, com exceção da dobradeira, são fundamentais para a produção de longarinas, ou seja, todo e qualquer produto a ser produzido deve obrigatoriamente passar pelos três primeiros processos. Já a dobradeira é utilizada por apenas 10% do total produzido.

Atividades e o mapofluxograma

Depois de concluído o fluxo geral de processo foram definidas as atividades de inspeção, operação, transporte, espera e armazenamento. Com estas informações foi possível montar o mapofluxograma do processo da linha de manufatura de longarinas roll form, representado na **Figura 5.3**.

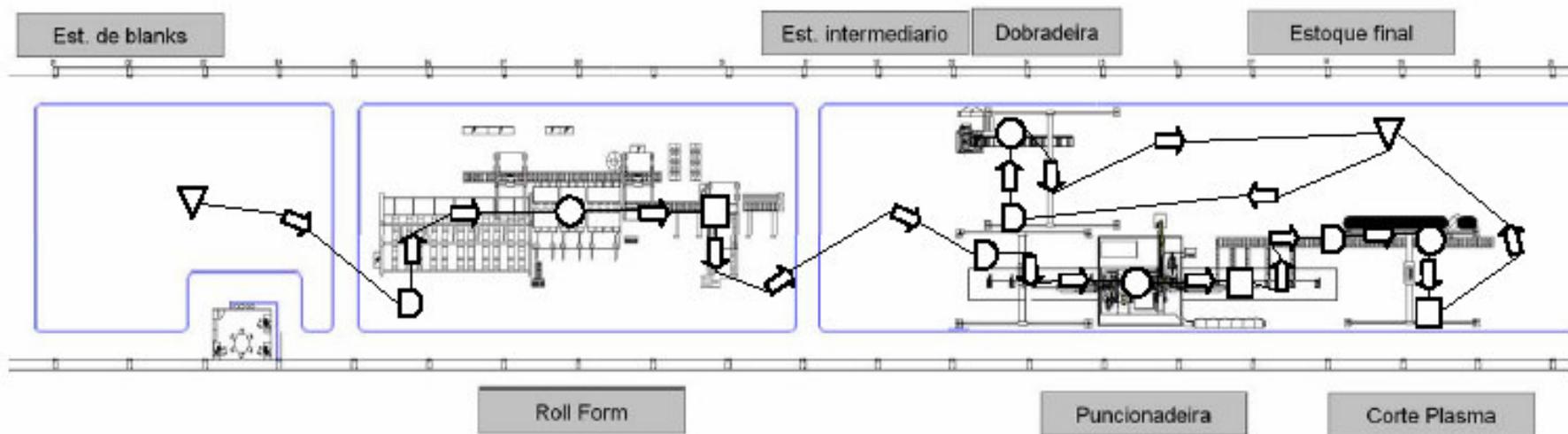


Figura 5.3 – Mapofluxograma da linha de manufatura *roll form*

Tempos e o mapa do processo

O mapofluxograma fornece a visão geral dos processos. Contudo, é necessário um detalhamento maior dos processos para compreender o que ocorre em cada etapa da manufatura.

Para a linha de manufatura de longarinas RF procurou-se mensurar todas as atividades através do tempo de realização. As informações de tempo de processo de cada equipamento bem como seus tempos de setup foram baseados nas propostas comerciais dos fabricantes. Isto foi necessário pois trata-se de equipamentos novos que não possuem histórico conhecido. Já a quantidade de mão de obra e layout foram retiradas do plano de viabilidade técnica e econômica feita pela engenharia de desenvolvimento da empresa. As informações de tempo de movimentação da mão de obra, talha manual, talha automática, esteiras motorizadas e ponte rolante foram cronometradas na atual linha de prensas para produção de longarinas, por serem estas atividades usualmente utilizadas pela empresa.

Para a cronometragem dos tempos primeiramente foi definido o número necessário de ciclos de coleta para um grau de confiança de 95% ($z = 1,96$) e uma precisão de 10% (a) através da seguinte fórmula:

$$n = \left(\frac{100 \cdot z \cdot s}{a \cdot x} \right)^2$$

sendo:

n = número de ciclos;

z = grau de confiança;

s = desvio padrão da amostra;

a = precisão desejada;

x = média da amostra.

Para isso foram tomados cinco tempos e calculadas a sua média (x) e desvio padrão (s).

Para cada atividade foi calculado um número de ciclos, porém, para este estudo foi utilizado o número de ciclos apresentado pela atividade de maior coeficiente de variação (s/x), no caso igual a 30, para facilitar a coleta de dados.

Após coletados os 30 tempos de cada atividade foram calculadas as suas médias que podem ser vistas na **Figura 5.4**.

Além disso, foi definido que os tempos de processo e os tempos de *setup* dos variados produtos são praticamente os mesmos, podendo então ser considerado somente um tempo de processo para todos os produtos. A **Figura 5.4** mostra o mapa do processo da linha de manufatura de longarinas RF.

MAPA DO PROCESSO		
LOCAL:	Linha de manufatura de longarinas "Roll Form"	
DATA:	06/04/06	
Tempo [min]	Simbolos	Descrição
0,1	○ ⇌ □ ● ▽	Setup da máquina roll form (tempo total dividido por 30 peças)
0,26	○ → □ D ▽	Transportar fardo de blanks para buffer do roll form
0,04	○ → □ D ▽	Movimentar com talha automática um blank para mesa de entrada do roll form
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada um blank para a operação de roll form
1,5	● ⇌ □ D ▽	Formar uma longarina no roll form
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada uma longarina para saída do roll form
0,5	○ ⇌ ■ D ▽	Inspecionar a primeira longarina do lote na saída do roll form (tempo total dividido por 30 peças)
0,04	○ → □ D ▽	Movimentar com talha automática uma longarina para o rack (cada rack armazena 30 longarinas) na área de embalagem
0,26	○ → □ D ▽	Movimentar com ponte rolante um rack para o estoque intermediário
0,26	○ → □ D ▽	Movimentar com ponte rolante um rack para a área de entrada da puncionadeira
0,05	○ → □ D ▽	Movimentar com talha manual uma longarina para entrada da puncionadeira
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada para a operação de puncionar
0,3	○ ⇌ □ ● ▽	Setup da máquina de puncionar (tempo total dividido por 30 peças)
3,5	● ⇌ □ D ▽	Puncionar uma longarina
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada para saída da puncionadeira
0,83	○ ⇌ ■ D ▽	Inspecionar a primeira longarina do lote na saída da puncionadeira (tempo total dividido por 30 peças)
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada para o buffer de saída da puncionadeira
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada para entrada do corte a plasma
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada para o corte a plasma
0,1	○ ⇌ □ ● ▽	Setup da máquina de corte a plasma (tempo total dividido por 30 peças)
1,5	● ⇌ □ D ▽	Cortar a plasma
0,15	○ → □ D ▽	Movimentar com esteira motorizada para a saída do corte de plasma
0,5	○ ⇌ ■ D ▽	Inspecionar a primeira longarina do lote na saída do corte a plasma (tempo total dividido por 30 peças)
0,05	○ → □ D ▽	Movimentar com talha manual uma longarina para área de embalagem do corte a plasma (um rack com 30 peças)
0,26	○ → □ D ▽	Movimentar com ponte rolante para área de estoque de produtos acabados
0,26	○ → □ D ▽	Movimentar com ponte rolante um rack para área de entrada da máquina de dobrar
0,05	○ → □ D ▽	Movimentar com talha manual uma longarina para a máquina de dobrar
0,1	○ ⇌ □ ● ▽	Setup da máquina de dobrar (tempo total dividido por 30 peças)
3	● ⇌ □ D ▽	Dobrar
0,05	○ → □ D ▽	Movimentar com talha manual uma longarina para a área de saída da máquina de dobrar (um rack com 30 longarinas)
0,26	○ → □ D ▽	Movimentar com ponte rolante um rack para área de estoque de produtos acabados
14,97		TOTAL

Figura 5.4 – Mapa do processo da linha de manufatura de longarinas RF.

Os *blanks*, nome dado à chapa de aço já previamente cortada em tiras de aproximadamente dez metros, são a matéria prima inicial desta linha. Eles chegam em pacotes de aproximadamente trinta peças em caminhões e são armazenadas no estoque de matéria prima. As etapas seguintes são:

- Na primeira etapa, dois operadores utilizando uma ponte rolante abastecem o RF que tem a capacidade de armazenar até três pacotes em sua entrada. Neste momento o equipamento atua automaticamente, até o desabastecimento do que se chama viga “U”. Novamente dois operadores utilizando uma ponte rolante movimentam uma embalagem contendo trinta vigas para o estoque intermediário antes da segunda máquina ou diretamente para o ponto de alimentação do segundo equipamento, a puncionadeira.
- Nesta segunda etapa, um operador é responsável pelo abastecimento do equipamento, utilizando para isso um talha manual. Este equipamento realiza toda a furação na viga “U” automaticamente. A saída deste equipamento para a entrada na máquina de corte a plasma, é feita automaticamente. Uma vez automaticamente posicionada, o corte é realizado e a peça retirada por um operador utilizando uma talha manual.
- Depois desta etapa, mais uma vez dois operadores utilizando uma ponte rolante levam uma embalagem de trinta longarinas para o estoque final ou, caso o produto necessite, para a entrada da máquina de dobrar. Um operador alimenta o equipamento, opera a máquina e retira para uma embalagem vazia. Depois de concluída a operação esta nova embalagem retorna para o estoque, sendo movimentada por dois operadores e uma ponte rolante.

Os operadores desta linha são responsáveis pelos *setups* das máquinas bem como por toda a movimentação das peças. Cabe ressaltar que esta é uma linha com um alto nível de automatização dos equipamentos, onde não existe quase nenhuma necessidade de intervenção dos operadores.

5.4 Simulação do sistema

A aplicação da simulação para verificar os dados utilizados na elaboração da linha de manufatura de longarinas RF e propor possíveis mudanças foi dividida em três partes: a primeira parte corresponde à definição do problema e o objetivo do estudo. Na segunda fase realiza-se a coleta de dados, a escolha do software, modelagem do sistema e a validação do

modelo conforme o método científico apresentado por HARREL (2000) na **Figura 2.2**. Na última fase é realizada a otimização.

5.4.1 Definição do problema e do objetivo

O objetivo principal deste estudo é o de representar, através da simulação, a nova linha de produção de longarinas comprovando ou não as previsões da empresa relacionadas às seguintes necessidades: número de operadores, produtividade da linha, necessidade de estoque intermediário e sua área. Além disso, pretende-se obter um resultado ótimo para estas variáveis utilizando o módulo de otimização do ProModel® (SimRunner®).

5.4.2 Coleta de dados

A coleta de dados para a simulação ocorreu previamente durante a fase de mapeamento do processo. Os dados coletados foram os tempos de movimentação, *setup*, transformação, inspeção, e a quantidade de mão de obra. Os dados serão utilizados de forma determinística, pois a linha ainda está em fase de projeto e ainda não se dispõe de tempos reais para uma análise de distribuição. Além disso, os tempos de processo para os variados produtos serão considerados iguais, fato já explicado anteriormente.

5.4.3 Escolha do software e construção do modelo

Para a modelagem de sistemas existem diversos softwares. Na construção do modelo da linha de manufatura de longarinas RF, o software escolhido foi o ProModel®. A decisão em adotar o ProModel® partiu do fato de que ele é utilizado na disciplina de Simulação no curso de mestrado em engenharia de produção da UNIFEI, o que garante certa familiaridade em relação às ferramentas do software. Além disto o software da ProModel® possui uma excelente interface gráfica, facilitando a validação do modelo e a análise dos dados simulados.

A **Figura 5.5** mostra a tela de abertura do ProModel®.



Figura 5.5 – Tela de abertura do ProModel®.

Para a construção de um modelo, o ProModel® apresenta os seguintes elementos: *locations*, *entities*, *resources*, *processing* e *arrivals*, encontrados no *menu build* do software. Apresenta ainda outros elementos auxiliares como: *shifts* para definição de turnos de trabalho, *variables* para ajudar na construção da rotina do modelo e *macros* que serão utilizadas na fase de experimentação.

Locations: Representam os lugares fixos do sistema, onde se realizam os processos; são usadas para representar elementos como: *workstations*, *buffers*, *conveyors* e *queues*. Neste elemento pode-se definir: capacidade, unidades (simples ou múltiplas), *setups*, manutenção, nível de detalhamento estatístico, além de regras de chegada e saída de matéria. A **Figura 5.6** exhibe a tela do programa na edição das *locations* do caso estudado, representada pelas máquinas e volantes.

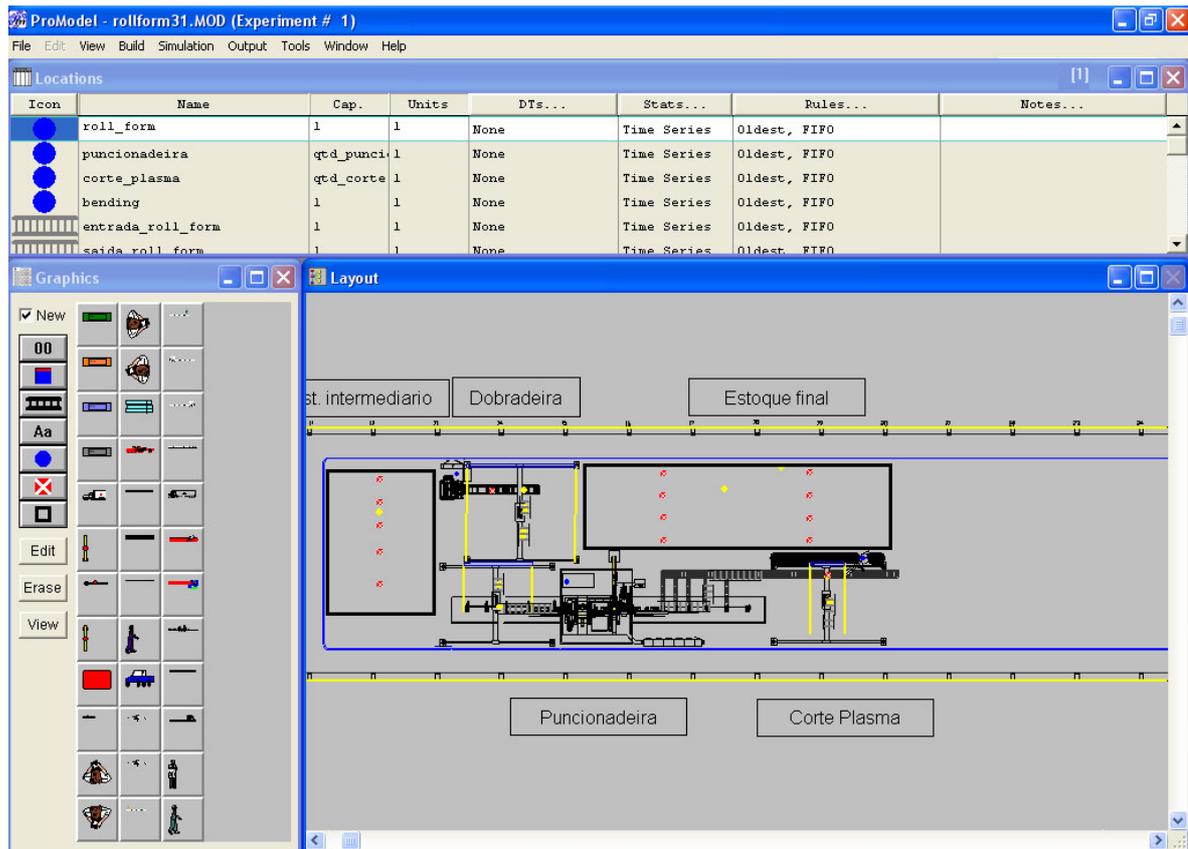


Figura 5.6 – Definição de *locations*

Entities: As *entities* são os itens a serem processados pelo sistema, podendo ser: matéria-prima, produtos, *pallets*, pessoas ou documentos. As *entities* possuem velocidades definidas e podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo, se movimentando de uma *location* para outra utilizando uma rota definida ou uma rede de trabalho. A **Figura 5.7** exibe uma tela do programa com algumas *entities*, neste caso os vários tipos de anéis.

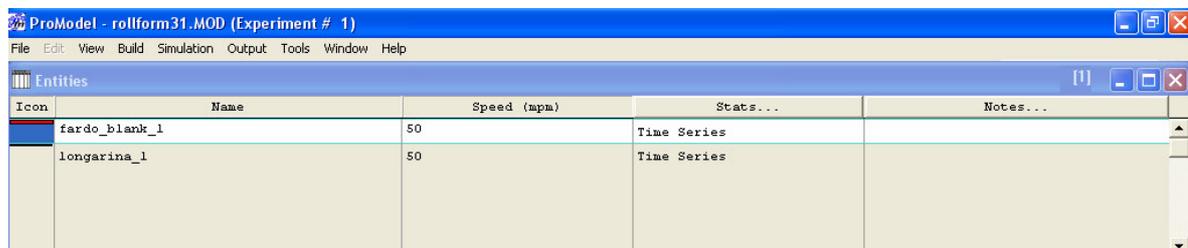


Figura 5.7 – Definição de *entities*

Arrivals: Define a entrada das *entities* dentro do modelo. Podendo ser definidas as quantidades, frequência e períodos de chegada, bem com a lógica de chegada. Pode-se também definir as chegadas através de um arquivo externo de chegada de peças referenciado no *File Editor*. A **Figura 5.8** apresenta uma tela com algumas das *arrivals* do problema.

Entity...	Location...	Qty each...	First Time	Occurrences	Frequency	Logic	Disable
fardo_blank_1	estoque_inicial_blan	1	0	999	1		No
longarina_1	esteria_puncionadeira	1		1		GRAPHIC 2	Yes

Figura 5.8 – Definição de *arrivals*

Processing: Consiste em uma tabela onde são definidas as operações de cada *entity* em cada *location* e o *resource* necessário para estas operações, e uma tabela de rotas que define o destino e a movimentação de cada *entity*, bem como o modo como se dá essa movimentação e o *resource* necessário. A **Figura 5.9** apresenta a utilização do menu *processing* para o caso estudado.

The screenshot displays the ProModel interface with several windows open:

- Process Table:**

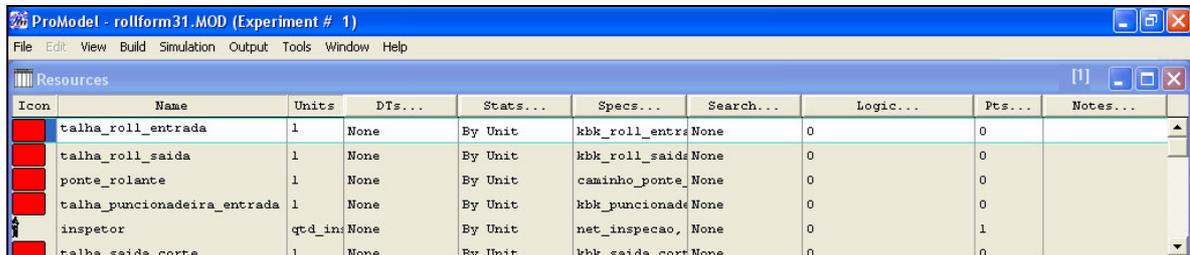
Entity...	Location...	Operation...
longarina_1	corte_plasma	INC cortadas, 1000END
longarina_1	saida_corte	DEC cap_corte, 1
longarina_1	pos_saida_corte	COMBINE 30
longarina_1	estoque_longarin	WAIT 9000
longarina_1	entrada_bend	
longarina_1	bending	INC bend_inspecao, 1
- Routing Table (for longarina_1 @ corte_plasma):**

Blk	Output...	Destination...	Rule...	Move Logic...
1	longarina_1	saida_corte	EMPTY 1	GET talha_saida_cort
- Operation Window:** Contains logic for the 'corte' operation, including 'GET oper', 'WAIT 3', 'tempo_corte', 'FREE ALL', and 'INC cortadas, 1'.
- Move Logic Window:** Contains logic for the routing step: 'GET talha_saida_corte AND oper', 'MOVE WITH talha_saida_corte', and 'FREE ALL'.
- Layout Window:** Shows a 3D model of the production line with components like 'st. intermediario', 'Dobradeira', 'Puncionadeira', and 'Corte Plasma'.

Figura 5.9 – Definição de *processing*

Resource: São os elementos usados para transportar *entities*, executar operações, realizar manutenção sobre as *locations* ou outros. Estes elementos podem ser: pessoas ou equipamentos. Um sistema pode ter um ou mais *resources*, sendo dotado de movimento ou

não. Contudo, para cada *resource* deve ter designado uma *path network*, ou seja, um percurso na qual a movimentação se dará. A **Figura 5.10** mostra as *resources* para a célula analisada.



Icon	Name	Units	Dts...	Stats...	Specs...	Search...	Logic...	Pts...	Notes...
	talha_roll_entrada	1	None	By Unit	kbk_roll_entr	None	0	0	
	talha_roll_saida	1	None	By Unit	kbk_roll_saida	None	0	0	
	ponte_rolante	1	None	By Unit	caminho_ponte	None	0	0	
	talha_puncionadeira_entrada	1	None	By Unit	kbk_puncionade	None	0	0	
	inspetor	qt'd in:	None	By Unit	net_inspecao,	None	0	1	
	talha_saida_corte	1	None	By Unit	kbk_saida_cort	None	0	0	

Figura 5.10 – Definição de *resources*

Uma etapa anterior à definição dos elementos descritos acima foi a inserção de elementos gráficos externos no ProModel®. Optou-se por utilizar o layout desenvolvido pela própria empresa como fundo da simulação, além de outros elementos gráficos não só por tornar o modelo mais atraente mas principalmente para facilitar seu entendimento reduzindo assim o tempo necessário para a validação.

O ProModel® permite ainda que um arquivo texto seja gerado com toda a programação da simulação. Esta programação feita no ProModel® é mostrada no **Anexo 1**.

5.4.4 Validação do modelo

Na modelagem da linha de manufatura de longarinas RF, a preocupação de que o modelo refletisse o sistema real norteou o processo de construção do início ao fim. Portanto, já na fase de mapeamento do processo, procurou-se envolver as pessoas que tinham conhecimento do processo produtivo para não só fornecerem as informações, mas para avaliar a modelagem do sistema, seja através do mapeamento do processo ou do software de simulação. Além disso, a animação que pode ser visualizada no software facilitou a análise e a discussão por toda equipe do correto funcionamento e modelagem do sistema real.

Buscou-se validar o modelo através da comparação dos resultados esperados pela equipe de engenharia da empresa com os resultados do modelo simulado utilizando o *turing test*.

É importante ressaltar que para chegar ao modelo definitivo utilizado neste trabalho nove modelos foram criados. Optou-se por iniciar a construção do primeiro modelo na sua

forma mais simples e a cada novo modelo uma nova complexidade foi adicionada. Desta forma a validação do modelo final foi muito mais simples. A **Tabela 5.2** demonstra as principais modificações entre os modelos construídos até o modelo definitivo.

Modelo	Itens acrescentados
Modelo 1	Locations
	Entitie longarina
	Arrivals
	Processing basico (caminho da entitie)
Modelo 2	Processing avançado
Modelo 3	Entitie fardo de longarina
Modelo 4	Resources movimentação
	Path network dos sistemas de movimentação
Modelo 5	Resources operadores
	Path network dos operadores
Modelo 6	Processing (interação dos operadores e da movimentação)
Modelo 7	Variables
Modelo 8	Macros
Modelo 9	Modelo final validado

Tabela 5.2 – Etapas de construção até o modelo final.

Os dados de entrada utilizados na simulação da linha de manufatura foram os seguintes:

- O modelo foi simulado por um período de vinte e quatro horas (três turnos);
- O equipamento RF operando em somente um turno e os demais em três turnos;
- Para que a simulação representasse a linha já em ciclo foi considerada uma entrada direta de um *rack* com trinta longarinas na puncionadeira;
- Existem na linha sete operadores/carregadores e dois inspetores;
- Entre a saída da puncionadeira e a entrada do corte não existe buffer.

Após a primeira simulação pode-se verificar que o número de produtos acabados na simulação chega a ser 19% menor que o planejado (**Tabela 5.3**).

	Planejado (1 Turno no RF)	Simulado (1 Turno no RF)	
Número operadores	7	7	
Número inspetores	2	2	
Tamanho do buffer	1	1	Variação
Roll formadas	280	229	18%
Estoque intermediário	100	90	10%
Puncionadas	260	210	19%
Produção total	260	210	19%

Tabela 5.3 – Comparação entre produtividade planejada e simulada.

Porém foi observado junto aos engenheiros responsáveis pelo planejamento da linha que eles haviam esquecido de considerar os tempos de parada para inspeção do produto no planejamento realizado, sendo estes somente considerados na simulação.

Os tempos de parada para inspeção são consideravelmente altos, pois em um primeiro momento será feita manualmente, chegando a 20 % do total do tempo disponível para produção no equipamento RF (fatia bloqueada), conforme **Figura 5.11**.

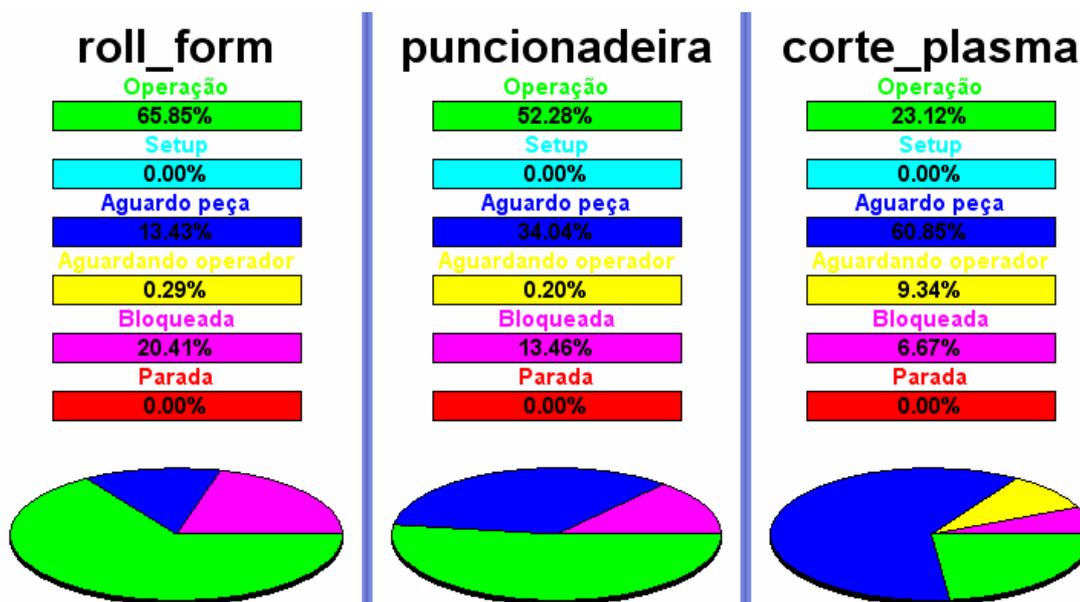


Figura 5.11 – Percentual de utilização da capacidade dos equipamentos.

Para comprovar e validar o modelo, foram retirados os tempos de inspeção e um novo modelo foi simulado. Estes novos resultados vieram a confirmar o erro no planejamento da linha e a validar o modelo simulado, conforme **Tabela 5.4**.

Ficou definido, no entanto, que o modelo a ser simulado deve manter os tempos de inspeção para que os resultados se aproximem o máximo possível da realidade.

	Planejado (1 Turno no RF)	Simulado (1 Turno no RF)	
Número operadores	7	7	
Número inspetores	2	2	
Tamanho do buffer	1	1	Variação
Roll formadas	280	280	0%
Estoque intermediário	100	150	50%
Puncionadas	260	270	4%
Produção total	260	270	4%

Tabela 5.4 – Comparação entre produtividade planejada e simulada (sem inspeção)

5.5 Otimização

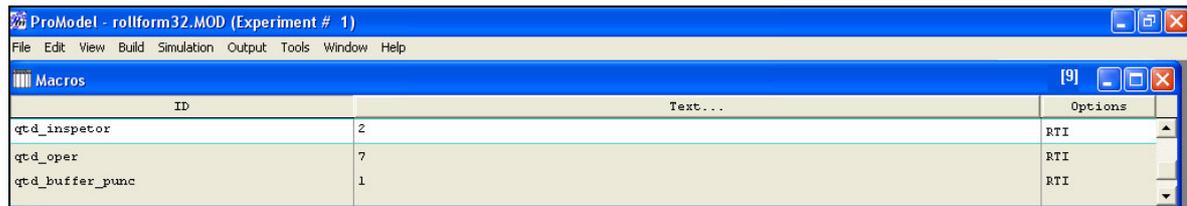
Esta etapa do estudo busca aumentar a eficiência no consumo de recursos da célula através do *software* SimRunner®, que usa Algoritmos Evolutivos como método de otimização. Como na simulação, a realização de uma otimização segue uma metodologia. Buscando a maior produtividade da linha, serão construídos três cenários distintos para a simulação, onde o equipamento RF irá funcionar em um turno, dois turnos e três turnos.

5.5.1 Definição das variáveis

Nesta fase deve-se definir as variáveis que serão testadas pelo algoritmo de otimização, também chamadas de variáveis de decisão ou inputs, e que terão seu valor alterado a cada rodada da simulação.

As variáveis de decisão deste problema de otimização foram definidas como sendo os *resources* (operadores/carregadores e inspetores) e *locations* (buffer da saída da puncionadeira). Também foram simuladas duas condições de turno, a primeira onde o equipamento RF funcionará em regime de um turno e na segunda ele funcionará em regime de três turnos. O restante da linha vai obedecer ao regime de três turnos em todas as simulações. Estas variáveis afetam diretamente o número de peças acabadas bem como a utilização dos equipamentos.

Para que estas variáveis estejam disponíveis para escolha no software SimRunner® é necessário que no modelo a quantidade de cada uma delas seja definida como uma macro, como mostra a **Figura 5.12**.

Figura 5.12 – Definição dos *macros*

5.5.2 Definição dos tipos de variáveis

Após as variáveis serem definidas é necessário definir o tipo de variável e seus limites para que, durante a busca, o algoritmo de otimização gere soluções respeitando estas definições.

No presente problema, como as variáveis representam o número de operadores e peças, assim eles devem ser do tipo inteiro. Na definição dos limites das variáveis, foi tomado o número de operadores planejado pela empresa como limite máximo (uma vez que não se deseja utilizar quantidades maiores que estas, podendo assim interferir na análise econômica feita para linha). Já para o *buffer* de saída da puncionadeira foi utilizado o número de dez longarinas como limite máximo (é importante lembrar que este *buffer* não havia sido considerado no plano, ou seja, o buffer planejado é igual a um). Este *buffer* tem como objetivo reduzir o tempo de bloqueio da puncionadeira pela obstrução da linha causada pela operação de corte em inspeção. Como limite mínimo as variáveis receberam uma única unidade. Com exceção da variável número de operadores que, conforme o processo, necessita de pelo menos dois operadores para o funcionamento. A **Figura 5.13** apresenta a definição das variáveis, seus tipos e limites.

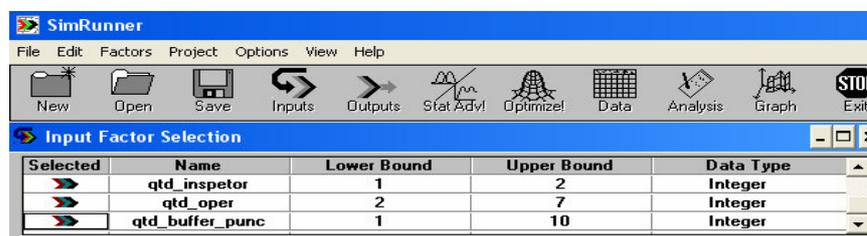


Figura 5.13 – Definição das variáveis.

5.5.3 Definição da função objetivo

A função objetivo, que algumas vezes já é estabelecida durante a fase de projeto do estudo de simulação, pode ser constituída por *entities*, *locations*, *resources* entre outros,

buscando minimizar, maximizar ou fazer uso de ambos em diferentes variáveis, dando inclusive pesos diferentes para compor a função.

Como este trabalho busca a otimização da linha levando-se em conta a produtividade, a função objetivo foi definida como sendo a maximização do número de peças produzidas e peças puncionadas, pois além do estoque final de peças o número de peças puncionadas é de fundamental importancia pois esta operação se trata de um gargalo. Porém, como todas as empresas necessitam reduzir seus custos diretos, foi definido que a maximização da produção deverá acontecer utilizando-se do menor número de operadores e inspetores possível como exemplifica a **Figura 5.14**.

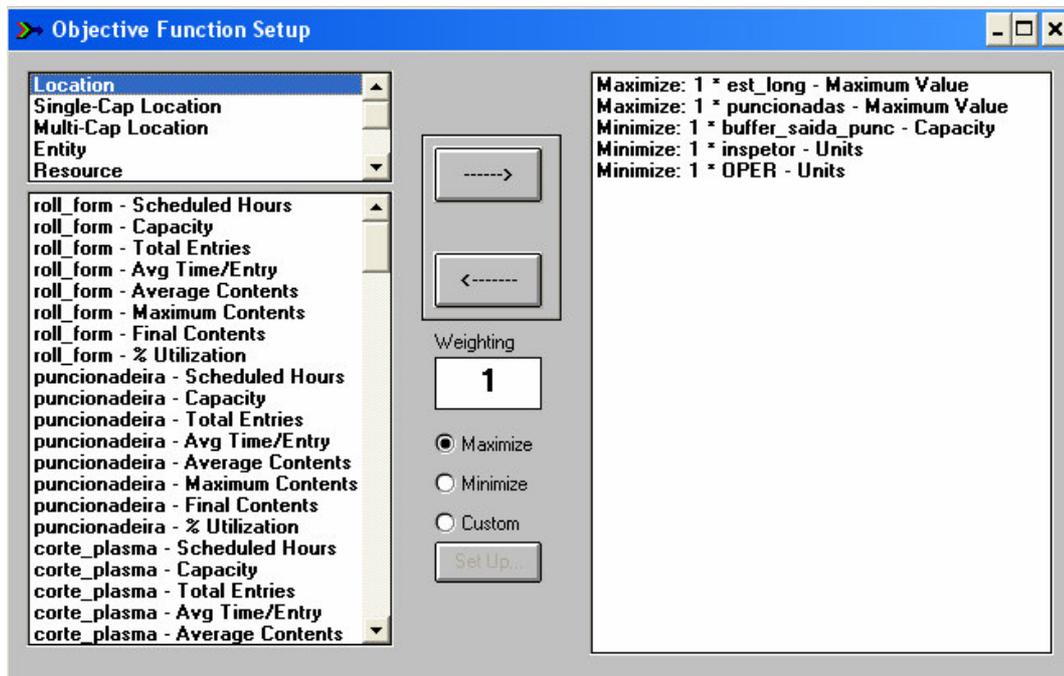


Figura 5.14 – Definição da função objetivo

5.5.4 Seleção do tamanho da população do Algoritmo Evolutivo

O tamanho da população de soluções afeta a confiabilidade e o tempo necessário para a condução de uma busca, assim é necessário um equilíbrio entre o tempo requerido e o resultado esperado.

No SimRunner® a seleção do tamanho da população é feita através da opção *setup*, onde é possível escolher três tamanhos diferentes: *aggressive*, tem uma população pequena o que permite convergir para uma solução mais rapidamente, porém a confiabilidade de tal solução é menor; *moderate*, apresenta um equilíbrio entre o tempo de processamento e

confiabilidade da resposta; *cautions*, tem uma grande população, o que implica em maiores tempos de processamento. Neste estudo foi utilizada a opção *cautions*, pois mesmo com uma grande população esta otimização apresentou um tempo de aproximadamente quinze minutos, considerado baixo.

A janela para a escolha do tamanho da população do algoritmo é apresentada na **Figura 5.15**.

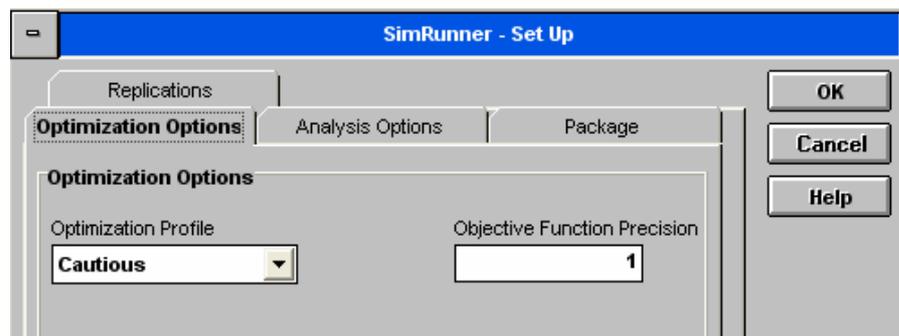


Figura 5.15 – Definição do tamanho da população

Nesta fase ainda se define a precisão requerida na resposta do problema, o nível de significância e número de replicações. A precisão requerida neste problema foi de um, uma vez que a resposta será dada em centenas. O nível de significância adotado foi o nível padrão do software, 95% conforme pode ser visto na **Figura 5.16**. Já para o número de replicações, adotou-se o mesmo utilizado na fase de simulação, ou seja, somente uma replicação (**Figura 5.17**).

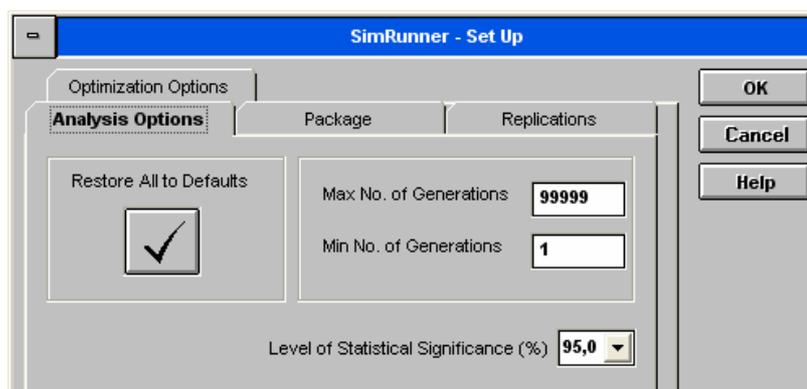


Figura 5.16 – Definição do nível de confiança

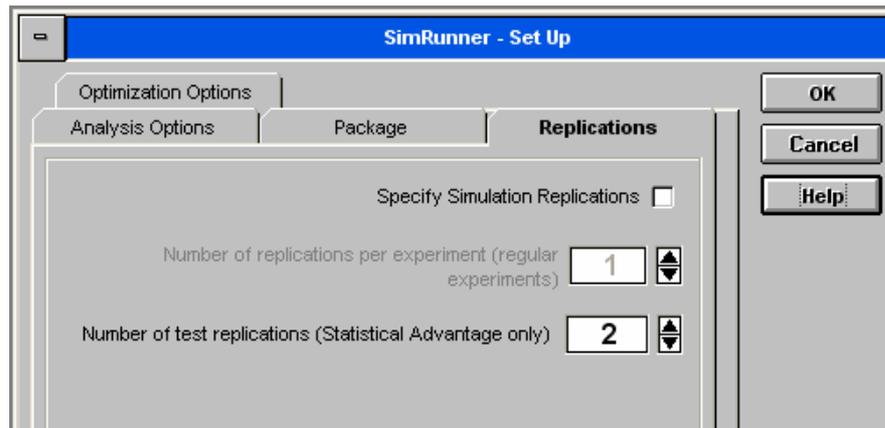


Figura 5.17 – Definição do número de replicações

5.5.5 Análise dos resultados

O último passo da metodologia para o estudo de otimização é a análise dos dados obtidos através da busca efetuada pelo algoritmo otimizador. Assim, para a primeira otimização utilizando o modelo onde o equipamento RF funciona em somente um turno, após quarenta e três experimentos o software convergiu para o seguinte resultado: um inspetor, dois operadores/carregadores e com um *buffer* para uma longarina conforme **Figura 5.18**.

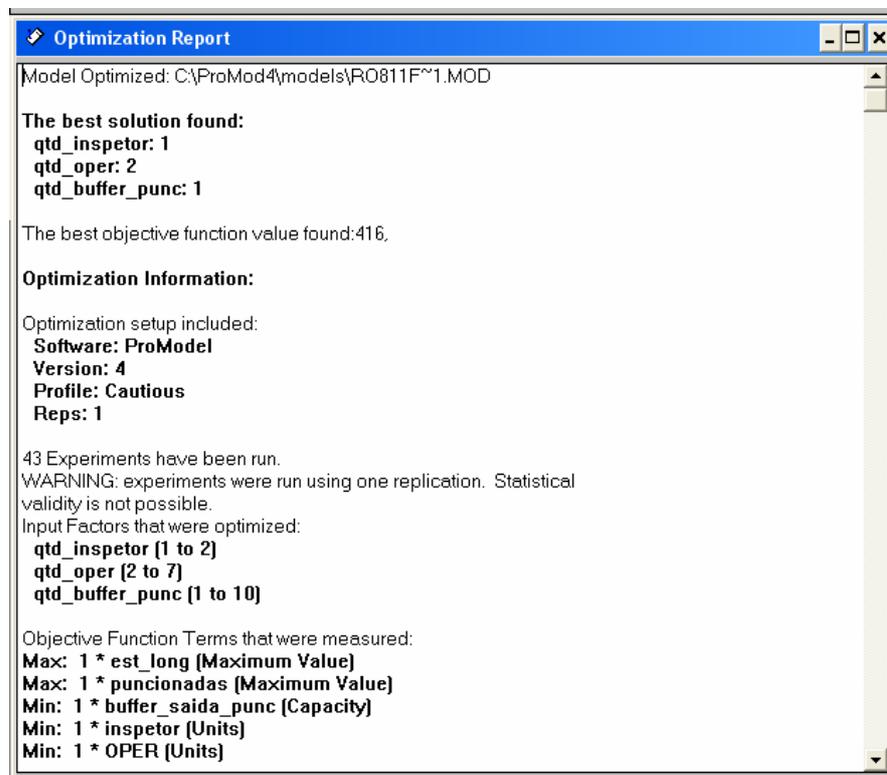


Figura 5.18 – Relatório exibido pelo SimRunner® (1 turno).

Após a execução da otimização repetiu-se a simulação, agora com os valores encontrados na otimização, de modo a fazer uma análise dos resultados antes e após a otimização. Conforme se pode verificar na **Figura 5.19** o tempo médio em uso dos operadores e inspetores aumentou, pois ao reduzir a sua quantidade também reduziu-se o tempo ocioso médio.

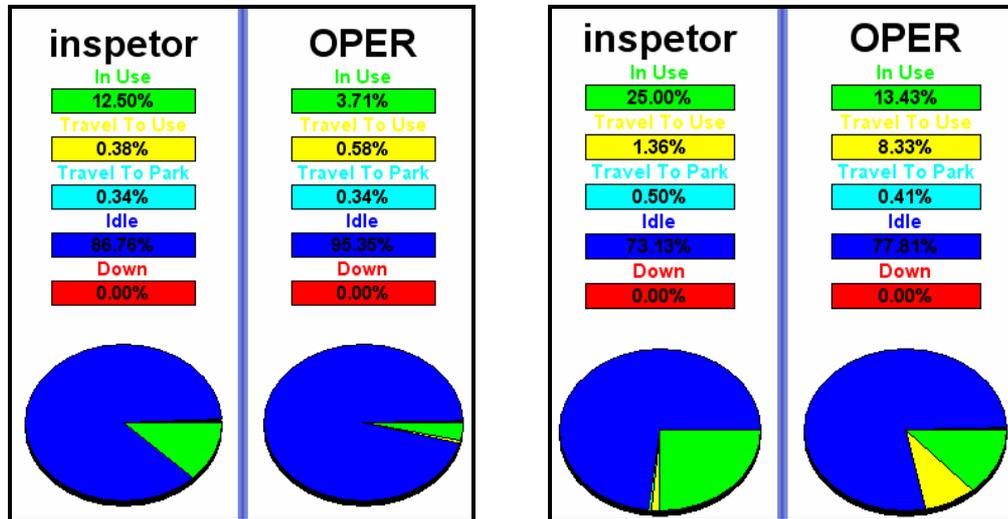


Figura 5.19 – Comparativo dos tempos de operadores antes e após otimização.

Apesar da redução no número de operadores e inspetores e do melhor aproveitamento dos seus tempos, a linha continuou com a mesma produtividade (**Figura 5.20**), sendo a quantidade de peças produzidas nos dois casos, igual a duzentos e dez. Já o estoque intermediário aumenta em trinta unidades, devido à indisponibilidade de operadores para a movimentação. Entretanto isto não prejudicou a produtividade.



Figura 5.20 – Comparativo dos números de produção antes e após otimização

O objetivo agora é definir qual regime de trabalho do equipamento RF proporciona o maior número de peças produzidas. Para isso foi executada a otimização por duas vezes,

alterando somente o regime de trabalho do RF. Pode-se observar na **Tabela 5.5** os resultados obtidos nas otimizações para um, dois e três turnos.

	Planejado (1 Turno no RF)	Simulado (1 Turno no RF)	Otimizado (1 Turno no RF)	Otimizado (2 turnos no RF)	Otimizado (3 turnos no RF)
Número operadores	7	7	2	3	3
Número inspetores	2	2	1	2	2
Tamanho do buffer	1	1	1	4	4
Roll formadas	280	229	225	392	533
Estoque intermediário	100	90	120	180	240
Puncionadas	260	210	210	278	278
Produção total	260	210	210	270	270

Tabela 5.5 – Comparativo dos resultados finais otimizados.

Abaixo se pode ver algumas observações e conclusões:

- Os regimes de dois e três turnos possuem a mesma capacidade total de produção de duzentas e setenta longarinas;
- Da mesma forma a quantidade de longarinas puncionadas é a mesma nas duas opções, dois ou três turnos. É importante dizer que nem sempre o total de longarinas produzidas é igual ao total de longarinas puncionadas, pois algumas longarinas podem estar em transporte ao final da simulação e somente as longarinas já no estoque são consideradas como produto final neste modelo;
- O regime de dois turnos necessita de 25% menos espaço para o estoque intermediário com relação ao regime de três turnos;
- Da mesma forma o número de vigas “U” produzidas pelo RF é 25% menor no regime de dois turnos. Vale lembrar que a operação de puncionamento é o gargalo da linha e já está trabalhando em três turnos, portanto este excedente de estoque intermediário gerado por dia deverá ser consumido trabalhando com a puncionadeira sete dias por semana e o RF somente cinco dias.
- Por último, o regime de dois turnos leva vantagem quanto à quantidade de mão de obra, já que o equipamento RF não opera no terceiro turno.

Com isto pode-se concluir que o regime de trabalho mais vantajoso é o de dois turnos, pois apesar de ambos os regimes terem capacidades finais iguais, outros fatores como mão de obra, área para estoque e estoque excedente são determinantes para a escolha.

5.6 Implementação

Os resultados obtidos na otimização não proporcionaram redução de custos imediatos, pois a linha ainda se encontra em fase de projeto e instalação. Porém, tão ou mais importante que isto é a indicação de que os custos de mão de obra serão aproximadamente 45% menores e que o e a produtividade será 4% maior do foi planejado pelos engenheiros da empresa. Considerando ainda que a produtividade planejada não seja viável, como mostrado na **Tabela 5.4**, pode-se concluir que a produtividade da linha será 22% maior, o que representa uma produção de aproximadamente 16.000 longarinas a mais que o previsto.

Utilizando estes novos valores, a empresa recalculou os custos da nova linha e segundo informações da área comercial da empresa, esta nova base de custos mudará as condições de preços dos produtos produzidos por ela, tornando a linha mais competitiva no mercado. Vale dizer que a redução dos custos e a maior produtividade da linha não são consequências de novos equipamentos, reorganização do ou qualquer outro tipo de investimento, mas sim de uma correção dos valores utilizados anteriormente, os quais são agora baseados em estudos mais precisos por consequência da utilização da simulação e da otimização computacional.

Cabe ainda ressaltar que os resultados obtidos neste trabalho fizeram com que a empresa repensasse a forma com que as análises técnicas de novos investimentos são feitos.

A possibilidade de se obter resultados mais precisos em suas análises fez com que a empresa iniciasse um estudo de viabilidade para a compra do software utilizado.

5.7 Considerações finais

A combinação de simulação e otimização mostrou-se bastante eficiente e de uso relativamente simples. Através da aplicação destas duas ferramentas pode-se avaliar a linha de manufatura planejada e propor uma nova configuração otimizando seus resultados.

Pode-se concluir que estas duas ferramentas combinadas trouxeram grandes benefícios para a empresa em estudo, comprovando a eficácia da metodologia. Verificou-se ainda que a metodologia atualmente utilizada pela empresa não é eficaz gerando resultados duvidosos que posteriormente são utilizados pelos gestores da empresa na tomada de importantes decisões.

6 Conclusão

6.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas e as recomendações para futuros trabalhos, apresentando os resultados obtidos com a aplicação das ferramentas propostas na linha de manufatura, as contribuições fornecidas com a elaboração deste trabalho e propondo sugestões para futuros trabalhos em aprimoramento de processos.

6.2 Conclusões e contribuição do trabalho

A simulação computacional mostrou ser uma ferramenta extremamente eficaz para a previsão de resultados onde ainda não é possível obter dados reais. Porém, ficou evidente durante o estudo que, por não ser algo trivial, são necessárias pessoas bem treinadas e capacitadas para que os resultados sejam satisfatórios.

Através da simulação pode-se verificar alguns erros no planejamento da nova linha cometidos pelos especialistas da empresa sendo o mais grave deles o esquecimento das operações de inspeção. Tal fato somente pode ser identificado comparando os dados da empresa com os resultados da simulação. Os técnicos da empresa previram uma capacidade 20% maior do que seria possível em um regime de um turno. Além disso, o uso da otimização, através do software SimRunner®, possibilitou as seguintes melhorias e respostas:

- Reduzir em três vezes o número de operadores planejados mantendo a produtividade da linha;
- Definir a quantidade de estoque intermediário e conseqüentemente o tamanho da sua área;
- Conhecer a produtividade da linha para os três diferentes regimes de turno;
- Fazer a melhor escolha entre os três regimes de turno, considerando o tamanho dos estoques, a produtividade e o número necessário de operadores.

É importante ressaltar que seria praticamente impossível chegar a estas conclusões com a velocidade e a precisão que a simulação e a otimização nos oferecem.

Porém a maior contribuição deste trabalho foi a possibilidade de simular e otimizar uma linha que ainda não existe na prática por se tratar ainda de um projeto.

Segue abaixo outros benefícios do estudo:

- A precisão dos dados utilizados nos estudos proporcionados pelo mapeamento do processo e pela validação do modelo melhorou os resultados obtidos nas análises;
- A visualização da linha de forma dinâmica facilita o entendimento do processo e ajuda a identificar problemas de layout e fluxo;
- A precisão dos resultados obtidos auxilia a melhorar a qualidade de todos os outros estudos quem se utilizam deles;
- A possibilidade de alterar qualquer variável do modelo e em pouco tempo poder analisar os resultados;

Sabe-se o quanto é importante para uma empresa que um projeto aconteça conforme planejado, pois os estudos de viabilidade econômica e até mesmo os compromissos de produção dependem deste acerto. A aplicação da simulação junto à otimização na fase de planejamento do projeto auxilia na redução de graves erros de projeto, como o que já foi destacado anteriormente. Esta redução beneficia a empresa no momento da implantação do projeto reduzindo o tempo necessário para o bom e correto funcionamento da linha, eliminando assim os desperdícios de tempo com testes práticos que podem ser substituídos por análises ainda na fase de projeto através das ferramentas utilizadas neste estudo.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para futuros trabalhos, dando sequência a este, propõe-se:

- Realizar nova simulação da linha de manufatura aprimorando o modelo com tempos de parada para manutenção e alterando os sistemas de movimentação;
- Após a construção da linha, refazer as simulações utilizando dados estocásticos e compará-los com os resultados deste trabalho;
- A partir da inclusão de um novo equipamento de funcionamento verificar qual seria o novo gargalo da linha, analisando os novos volumes de produção;
- Aplicar as técnicas de custeio ABC em novos experimentos com o modelo.

6.4 Considerações finais

O presente trabalho aplicou as técnicas de simulação e otimização em uma linha de manufatura na fase de projeto. O desenvolvimento deste trabalho mostrou que a aplicação das técnicas de simulação e otimização em uma linha de manufatura não é uma tarefa trivial e é totalmente dependente do conhecimento das pessoas, não somente nas técnicas de modelagem, mas também da análise dos resultados. Além disto, vale ressaltar que a qualidade dos dados inseridos no modelo é de fundamental importância para que os resultados sejam satisfatórios, sendo a ferramenta de mapeamento de processo a melhor forma para isso. Também deve ser ressaltado o poder da simulação como ferramenta de análise de um sistema produtivo complexo onde existem diversas interações entre as suas variáveis, nem sempre claras ao entendimento.

A metodologia aplicada pela empresa foi considerada insatisfatória em seus resultados, sendo superada pela simulação e otimização em todos os aspectos, dentre eles pode-se destacar:

- Visualização do processo de forma dinâmica;
- Confiança nos dados de entrada;
- Precisão nos resultados;
- Abundância de dados para análise;
- Facilidade das análises.

Segundo KELLNER, MADACHY e RAFFO (1998), a participação ativa de pessoas em um processo de simulação pode gerar oportunidades de aprendizado que somente poderiam ser obtidas em anos de experiência no mundo real.

Referências bibliográficas

- ANJARD, R. P., Process Mapping: one of three, new, special quality tools for management, quality and all the other professionals. Microelectronum Realiab, 1995.
- BÄCK, Thomas; HAMMEL, Ulrich; SCHWEFEL, Hans-Paul. Evolutionary computation: comments on the history and current state. *Evolutionary Computation*, April, v. 1, n. 1, p. 3-17, 1997.
- BANKS, J. Introduction to simulation. Proceedings of the Winter Simulation Conference. Atlanta, 2000.
- BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. O. ; GOGG, T. J.; HARRELL, C. R.; MOTT, J. R. A. System improvement using simulation. Utah: ProModel® Corp., 1997
- BARNES, R. M. Estudo de movimentos e de tempos: Projeto e medida do trabalho. Editora Edgard Blucher Ltda, 1986.
- BRATLEY, Paul; FOX, Bennett L.; SCHRAGE, Linus E. A Guide to Simulation. New York:Springer-Verlag, 1987.
- BRYMAN, J. L. A research Methods and organization studies. London Unwin Hyman, 1989.
- CARNEIRO, Mara Lúcia F. Síntese Automatizada de Colunas de Destilação: uma abordagem alternativa ao processo de projeto. Dissertação de mestrado em engenharia da informática. PUCRS, Porto Alegre, RS, 1996.
- COELHO, L. S.; COELHO, A. A. R. Algoritmos Evolutivos em identificação e controle de processos: uma visão integrada e perspectivas. Revista Controle & Automação, v. 10, nº. 1, p. 13-30, 1999.
- CUNHA, Alexandre S.; PINTO, Ricardo L. U. S. Uma técnica para ajuste dos parâmetros de um Algoritmo Genético. XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Campos do Jordão, SP, p. 1105-1116, 2001.
- DUARTE, Roberto N. Simulação computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de autopeças. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. UNIFEI, Itajubá, MG, 2003.
- DIAZ, José A.; PÉREZ, Ileana G. Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season. Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference, p. 1114-1117, 2000.
- DIETZ, M. Outline of a successful simulation projects. Industrial Engineering, Nov., 1992
- EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M. Optimization of chemical processes. New York, McGraw-Hill, 2001.
- FERREIRA, J. C. E.; MOURA, E. B.; RIBEIRO, L. P. G. O uso da simulação para aumentar a competência da indústria junto ao mercado externo. XXII ENEGEP. Curitiba, outubro 2002.

- FU, Michael C. Optimization for Simulation: Theory vs. Practice. *Journal on Computing*, vol. 14, n 3, 2002.
- GLENNEY, N. E.; GERALD T. M. Modeling & Simulation Provide Key to CIM implementation Philosophy. *Industrial Engineering*, may 1985.
- HARREL, C. R.; BATEMAN, R. E.; GOGG, T. J.; MOTT, J. R. A. System Improvement Using Simulation. Orem, Utah: PROMODEL® Corporation. 1996.
- HARREL, Charles R.; GHOSH, Biman K.; BOWDEN, Royce. Simulation Using ProModel®. McGraw-Hill, 2000.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introduction to operations research. McGraw-Hill, 2001.
- KELLNER, M. I., MADACHY, R. J., RAFFO, D. M. Software process simulation modeling: Why? What? How?, 1998.
- KLEINDORFER, George B.; O'NEILL, Liam; GANESHAN, Ram. Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science. *Management Science*, Vol. 44, nº. 8, ago. 1998.
- KOSTURIK, J.; GREGOR, M. Simulation in production system life cycle. *Computer in Industry*, 38, pp. 159-172, 1999.
- KUMAR, S.; PHROMMATHED, P. Improving a manufacturing process by mapping and simulation of critical operations, 2005.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. Simulation modeling and analysis. New York: Mc Graw-Hill, 1982.
- LAW, A.; KELTON, D. Simulation modeling and analysis. New York, McGraw-Hill, 2000.
- LIM, M. K.; ZHANG, Z. A multi-agent based manufacturing control strategy for responsive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 139, pp. 379-384, 2003.
- NAYLOR, Thomas, H.; BALINTFY, Joseph, L.; BURDICK, Donald S.; CHU, Kong. *Técnicas de Simulação em Computadores*. São Paulo: Editora Vozes, 1971.
- LOBÃO, Elidio C.; PORTO, Arthur José V. Proposta para sistematização de estudos de simulação. XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. Gramado, RS, 1997.
- LOBÃO, E. C. Discussão, sistematização e modelamento do processo de realização de estudos de simulação. Tese doutorado. São Carlos: USP, 2000.
- LOPES, Heitor S. Algoritmos genéticos em projetos de engenharia: aplicações e perspectivas futuras. IV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Paulo, SP, p. 64-74, 1999.
- MOREIRA, C. M. Estratégias de reposição de estoque em supermercados: Avaliação por meio de simulação. Dissertação mestrado em engenharia de produção. UFSC, Florianópolis, SC, 2001.
- OPTQUEST FOR ARENA USER'S GUIDE, Rockwell Software Inc., 2002.

- PERSON, J. F. The impact of different levels of detail in manufacturing systems simulation models. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 18, pp. 319-325, 2002.
- PEREIRA, I. C. Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes. Dissertação mestrado em engenharia de produção. UNIFEI, Itajubá, MG, 2000.
- PIDD, M. Five simple principles of simulation modeling. Rio de Janeiro: Workshop de Simulação, 1997.
- PIDD, M. Modelagem empresarial. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- PROMODEL USER'S GUIDE. PROMODEL Corporation, 1997.
- PROMODEL® USER'S GUIDE. ProModel® Corporation, 2002.
- RHOLEDER, T. R., SILVER, E. A. A tutorial on business process improvement. *Journal of Operational Management*, Volume 15. Elsevier Science, 1997.
- ROSA, E. B. Racionalização da produção. Apostila do curso de Pós-Graduação Especialização em Produtividade e Qualidade – UNIFEI, 2002.
- SARGENT, R. G. Validation and Verification of Simulation Models. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. R. G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, 2004.
- SAAD, S. M. The reconfiguration issues in manufacturing systems. *Journal of Materials Processing Technology*, 138, pp. 277-283, 2003.
- SARAMAGO, Sezimária F. Pereira. Métodos de otimização randômica: Algoritmos genéticos e simulated annealing. XXVI CNMAC. UFU, Uberlândia, MG, p. 1-40, 2003.
- SEILA, A. F. Introduction to simulation. *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*. Arlington, Virginia, United States, p. 7-15, 1995.
- SILVA, Alexandre P. A. Tutorial: Genetic Algorithms. *Revista Brasileira de Redes Neurais*, nº. 1, v. 1, 2002.
- SILVA, E. L., MENEZES, E. M. Metodologia de pesquisa e elaboração da dissertação, 4 ed. Ver. Atual., Florianópolis, UFSC, 2005.
- SIMÕES, Anabela B. Transposição: estudo de um novo operador genético inspirado biologicamente. Dissertação de mestrado em engenharia informática. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 1999.
- SPPEDING, T. A, SUN, G. Q. Application of discrete event simulation to the activity based costing of manufacturing system. *International Journal Production Economics*, 1998.
- STAMM, Harro. Simulação industrial: uma avaliação de sua utilização no sudeste e sul do Brasil. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. UFSC, Florianópolis, SC, 1998.
- TANOMARU, J. Motivação, fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos. II Congresso Brasileiro de Redes Neurais. Curitiba, PR, p. 373-403, 1995.

TAVARES, José A. R. Geração de Configurações de Sistemas Industriais com o Recurso à Tecnologia das Restrições e Computação Evolucionária. Tese de doutorado em Informática. Universidade de Minho, Braga, Portugal, 2000.

VILLELA, C. S. S. Mapeamento do processo como ferramenta de reestruturação e aprendizagem organizacional. Dissertação de mestrado. UFSC. Santa Catarina, 2000.

ANEXO 1

Programação do modelo no Promodel

```
*****  
*                                                                 *  
*           Formatted Listing of Model:                          *  
*           C:\ProMod4\models\rollform32.MOD                     *  
*                                                                 *  
*****
```

```
Time Units:           Minutes  
Distance Units:      Meters
```

```
*****  
*                               Locations                          *  
*****
```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
roll_form	1	1	Time Series	Oldest, FIFO, First	
puncionadeira	qtd_puncionadeira	1	Time Series	Oldest, FIFO, First	
corte_plasma	qtd_corte	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
bending	1	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
entrada_roll_form	1	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
saida_roll_form	1	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
entrada_corte	qtd_corte	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
saida_corte	1	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
entrada_puncionadeira	qtd_puncionadeira	1	Time Series	Oldest, FIFO, First	

buffer_roll_form	3	1	Time Series Oldest, FIFO,
estoque_inicial_blanks	999	1	Time Series Oldest, FIFO,
estoque_puncionadeira	999	1	Time Series Oldest, FIFO,
estoque_longarina	999	1	Time Series Oldest, FIFO,
esteria_descarga_roll_form	60	1	Time Series Oldest, FIFO,
esteria_puncionadeira	qtd_puncionadeira	1	Time Series Oldest, FIFO, First
entrada_bend	1	1	Time Series Oldest, FIFO,
saida_bend	30	1	Time Series Oldest, FIFO,
saida_punc	1	1	Time Series Oldest, FIFO,
buffer_saida_punc	qtd_buffer_punc	1	Time Series Oldest, FIFO,
pos_saida_corte	30	1	Time Series Oldest, FIFO,

* *Entities* *

Name	Speed (mpm)	Stats	Cost
fardo_blank_1	50	Time Series	
longarina_1	50	Time Series	

* *Path Networks* *

Name	Type	T/S	From	To	BI	Dist/Time	Speed Factor
kbc_roll_entrada	Crane	Speed & Distance	Origin	Rail1End	Uni		
			Origin	BridgeEnd	Uni		
			BridgeEnd	Rail2End	Uni		
kbc_roll_saida	Crane	Speed & Distance	Origin	Rail1End	Uni		

			Origin	BridgeEnd	Uni		
			BridgeEnd	Rail2End	Uni		
caminho_ponte_rolante	Crane	Speed & Distance	Origin	Rail1End	Uni		
			Origin	BridgeEnd	Uni		
			BridgeEnd	Rail2End	Uni		
kbk_puncionadeira_entrada	Crane	Speed & Distance	Origin	Rail1End	Uni		
			Origin	BridgeEnd	Uni		
			BridgeEnd	Rail2End	Uni		
net_inspecao	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	53	1
			N2	N3	Bi	13	1
			N2	N5	Bi	2	1
			N1	N4	Bi	23	1
			N1	N6	Bi	8	1
			N4	N7	Bi	20	1
kbk_saida_corte	Crane	Speed & Distance	Origin	Rail1End	Uni		
			Origin	BridgeEnd	Uni		
			BridgeEnd	Rail2End	Uni		
kbk_bending	Crane	Speed & Distance	Origin	Rail1End	Uni		
			Origin	BridgeEnd	Uni		
			BridgeEnd	Rail2End	Uni		
NET_OPERADOR	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	13	1
			N2	N3	Bi	10	1
			N3	N4	Bi	13	1
			N5	N6	Bi	5	1
			N5	N7	Bi	38	1
			N7	N8	Bi	8	1
			N4	N11	Bi	3	1
			N11	N5	Bi	3	1
			N11	N12	Bi	20	1
			N12	N13	Bi	14	1
			N13	N14	Bi	2	1
			N9	N10	Bi	13	1
			N10	N15	Bi	5	1

N15	N16	Bi	5	1
N13	N10	Bi	11	1
N8	N17	Bi	15	1
N17	N9	Bi	20	1
N2	N18	Bi	2	1
N3	N19	Bi	2	1
N4	N20	Bi	2	1
N5	N21	Bi	3	1
N8	N22	Bi	3	1
N2	N23	Bi	20	1

```
*****
*                               Interfaces                               *
*****
```

Net	Node	Location	Coords (R,B)

kbk_roll_entrada	N1	buffer_roll_form	5.74, 6.60
	N2	entrada_roll_form	1.52, 6.60
kbk_roll_saida	N1	saida_roll_form	1.55, 6.20
	N2	esteria_descarga_roll_form	6.60, 6.07
caminho_ponte_rolante	N1	estoque_inicial_blanks	9.12, 13.24
	N2	buffer_roll_form	33.62, 8.68
	N4	esteria_puncionadeira	74.53, 9.47
	N6	estoque_longarina	93.24, 18.95
	N3	esteria_descarga_roll_form	52.63, 9.99
	N7	estoque_puncionadeira	64.49, 16.61
	N9	entrada_bend	76.55, 14.67
	N10	saida_bend	76.60, 16.67
	N8	pos_saida_corte	102.02, 7.59
kbk_puncionadeira_entrada	N1	esteria_puncionadeira	5.64, 6.72
	N2	entrada_puncionadeira	11.59, 6.94

```

net_inspecao      N3      saida_corte
                  N6      saida_roll_form
                  N5      saida_punc
kbc_saida_corte  N1      corte_plasma      2.47, 6.83
                  N2      saida_corte        6.98, 7.49
kbc_bending      N1      entrada_bend      9.67, 6.76
                  N3      saida_bend        5.67, 7.01
                  N2      bending           3.40, 6.86
NET_OPERADOR     N1      estoque_inicial_blanks
                  N6      esteria_puncionadeira
                  N6      entrada_puncionadeira
                  N9      estoque_longarina
                  N16     puncionadeira
                  N15     saida_bend
                  N15     entrada_bend
                  N18     buffer_roll_form
                  N19     roll_form
                  N20     esteria_descarga_roll_form
                  N21     estoque_puncionadeira
                  N22     corte_plasma
                  N15     bending
                  N22     pos_saida_corte
                  N22     saida_corte

```

```

*****
*                               Resources                               *
*****

```

Name	Units	Stats	Res Search	Ent Search	Path	Motion	Cost
talha_roll_entrada	1	By Unit	Closest	Oldest	kbc_roll_entrada	Empty: 50,50 mpm	

					Home: N1 (Return)	Full: 50,50 mpm Pickup: 2 Seconds Deposit: 2 Seconds
talha_roll_saida	1	By Unit	Closest Oldest	kbk_roll_saida	Home: N1 (Return)	Empty: 50,50 mpm Full: 50,50 mpm Pickup: 2 Seconds Deposit: 2 Seconds
ponte_rolante	1	By Unit	Closest Oldest	caminho_ponte_rolante	Home: Origin	Empty: 50,50 mpm Full: 50,50 mpm Pickup: 60 Seconds Deposit: 60 Seconds
talha_puncionadeira_entrada	1	By Unit	Closest Oldest	kbk_puncionadeira_entrada	Home: N1 (Return)	Empty: 40,40 mpm Full: 40,40 mpm Pickup: 5 Seconds Deposit: 5 Seconds
inspetor	qtd_inspetor	By Unit	Closest Oldest	net_inspecao	Home: N2	Empty: 50 mpm Full: 50 mpm
talha_saida_corte	1	By Unit	Closest Oldest	kbk_saida_corte	Home: N1 (Return)	Empty: 40,40 mpm Full: 40,40 mpm Pickup: 5 Seconds Deposit: 5 Seconds
talha_bending	1	By Unit	Closest Oldest	kbk_bending	Home: N1	Empty: 40,40 mpm Full: 40,40 mpm

1 longarina_1 roll_form

FIRST 1 INC cap_roll_form, 1
MOVE FOR .15

longarina_1 roll_form

```
INC roll_inspecao, 1
IF roll_inspecao = 30 THEN
  BEGIN
    GET oper
    WAIT 3
    tempo_roll_form
    GRAPHIC 1
    INC roladas, 1
    FREE ALL
```

END

ELSE

BEGIN

```
tempo_roll_form
GRAPHIC 1
INC roladas, 1
```

END

1 longarina_1 saida_roll_form

FIRST 1 MOVE FOR .15

longarina_1 saida_roll_form

```
DEC cap_roll_form, 1
IF roll_inspecao = 30 OR roll_inspecao = 0 THEN
  BEGIN
    roll_inspecao = 0
    GET inspetor
    WAIT 15
    FREE ALL
```

END

ELSE

BEGIN


```

longarina_1  punctionadeira      INC punc_inspecao, 1
                                      IF punc_inspecao = 30 THEN
                                          BEGIN
                                              GET oper
                                              WAIT 3
                                              tempo_punctionadeira
                                              FREE ALL
                                              INC punctionadas, 1
                                          END
                                      ELSE
                                          BEGIN
                                              tempo_punctionadeira
                                              INC punctionadas, 1
                                          END
                                          1  longarina_1  saida_punc                FIRST 1  MOVE FOR .15

longarina_1  saida_punc          DEC cap_punc, 1
                                      IF punc_inspecao = 30 OR punc_inspecao = 0 THEN
                                          BEGIN
                                              punc_inspecao = 0
                                              GET inspetor
                                              WAIT 15
                                              FREE ALL
                                          END
                                      ELSE
                                          BEGIN
                                          END
                                          1  longarina_1  buffer_saida_punc        FIRST 1  MOVE FOR .15
longarina_1  buffer_saida_punc    1  longarina_1  entrada_corte        FIRST 1  MOVE FOR .15
longarina_1  entrada_corte       WAIT UNTIL cap_corte < 1
                                          1  longarina_1  corte_plasma          FIRST 1  INC cap_corte, 1
                                          MOVE FOR .15

longarina_1  corte_plasma        INC corte_inspecao, 1

```

```

IF corte_inspecao = 30 THEN
  BEGIN
    GET oper
    WAIT 3
    tempo_corte
    FREE ALL
    INC cortadas, 1
  END
ELSE
  BEGIN
    tempo_corte
    INC cortadas, 1
  END
  1 longarina_1 saida_corte          EMPTY 1  GET talha_saida_corte AND
                                     MOVE WITH talha_saida_corte
                                     FREE ALL
DEC cap_corte, 1
IF corte_inspecao = 30 OR corte_inspecao = 0 THEN
  BEGIN
    corte_inspecao = 0
    GET inspetor
    WAIT 15
    FREE ALL
  END
ELSE
  BEGIN
  END
  1 longarina_1 pos_saida_corte      FIRST 1  MOVE
longarina_1 pos_saida_corte
COMBINE 30
GRAPHIC 2
INC CONTADOR_ESTOQUE_FINAL, 1
IF CONTADOR_ESTOQUE_FINAL = 4 THEN
  BEGIN
    ROUTE 2

```

```

CONTADOR_ESTOQUE_FINAL = 0
END
ELSE
BEGIN
ROUTE 1
END          1   longarina_1   estoque_longarina          FIRST 1   GET ponte_rolante AND 2

oper

MOVE WITH ponte_rolante
FREE ALL
INC est_long, 30
LOG "Ciclo Total",

ciclo_total

LOG "Ciclo Puncionadeira",

ciclo_puncionadeira

          2   longarina_1   entrada_bend          FIRST 1   CONTADOR_ENTRADA_BEND = 1
          GET ponte_rolante AND 2 oper
          MOVE WITH ponte_rolante
          FREE ALL
          INC est_long, 30

longarina_1   estoque_longarina   WAIT 9000          1   longarina_1   EXIT          FIRST 1
longarina_1   entrada_bend          1   longarina_1   bending          FIRST 30 GRAPHIC 1
          GET talha_bending AND oper
          MOVE WITH talha_bending
          FREE ALL

longarina_1   bending          INC bend_inspecao, 1
          IF bend_inspecao = 30 THEN
          BEGIN

```

```

                                GET oper
                                WAIT 3
                                tempo_bend
                                FREE ALL
                                END
                                ELSE
                                BEGIN
                                tempo_bend
                                END
                                1   longarina_1   saida_bend           FIRST 1   GET talha_bending AND oper
                                                                MOVE WITH talha_bending
                                                                FREE ALL
longarina_1   saida_bend           COMBINE 30
                                GRAPHIC 2           1   longarina_1   estoque_longarina   FIRST 1   GET ponte_rolante AND 2 oper
                                                                MOVE WITH ponte_rolante
                                                                FREE ALL

```

```

*****
*                               Arrivals                               *
*****

```

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
fardo_blank_1	estoque_inicial_blanks	1	0	999	1	
longarina_1	esteria_puncionadeira	1	1			GRAPHIC 2 INC roladas, 30

```

*****
*                               Shift Assignments                       *
*****

```

Locations Resources Shift Files Priorities Disable Logic

```
-----
roll_form talha_roll_entrada      C:\Documents and Settings\Rena 99,99,99,99 No
          talha_roll_saida
```

```

          ponte_rolante           C:\Documents and Settings\Rena 99,99,99,99 No
          talha_puncionadeira_entrada
          inspetor
          OPER
          talha_bending
          talha_saida_corte
```

```
*****
```

```
*                               Attributes                               *
```

```
*****
```

ID	Type	Classification
ciclo_total	Real	Entity
ciclo_puncionadeira	Real	Entity
ciclo_saida	Real	Entity

```
*****
```

```
*                               Variables (global)                               *
```

```
*****
```

ID	Type	Initial value	Stats
est_roll	Integer	0	Time Series
cap_bend	Integer	0	Time Series
cap_roll_form	Integer	0	Time Series

cap_punc	Integer	0	Time Series
est_long	Integer	0	Time Series
cortadas	Integer	0	Time Series
est_roll_max	Integer	0	Time Series
roladas	Integer	0	Time Series
roll_inspecao	Integer	-1	Time Series
punc_inspecao	Integer	-1	Time Series
corte_inspecao	Integer	-1	Time Series
CONTADOR_ESTOQUE_FINAL	Integer	0	Time Series
CONTADOR_ENTRADA_BEND	Integer	0	Time Series
cap_corte	Integer	0	Time Series
bend_inspecao	Integer	-1	Time Series
puncionadas	Integer	0	Time Series

```
*****
*                               Arrays                               *
*****
```

ID	Dimensions	Type
-----	-----	-----
Arr1	1	Integer

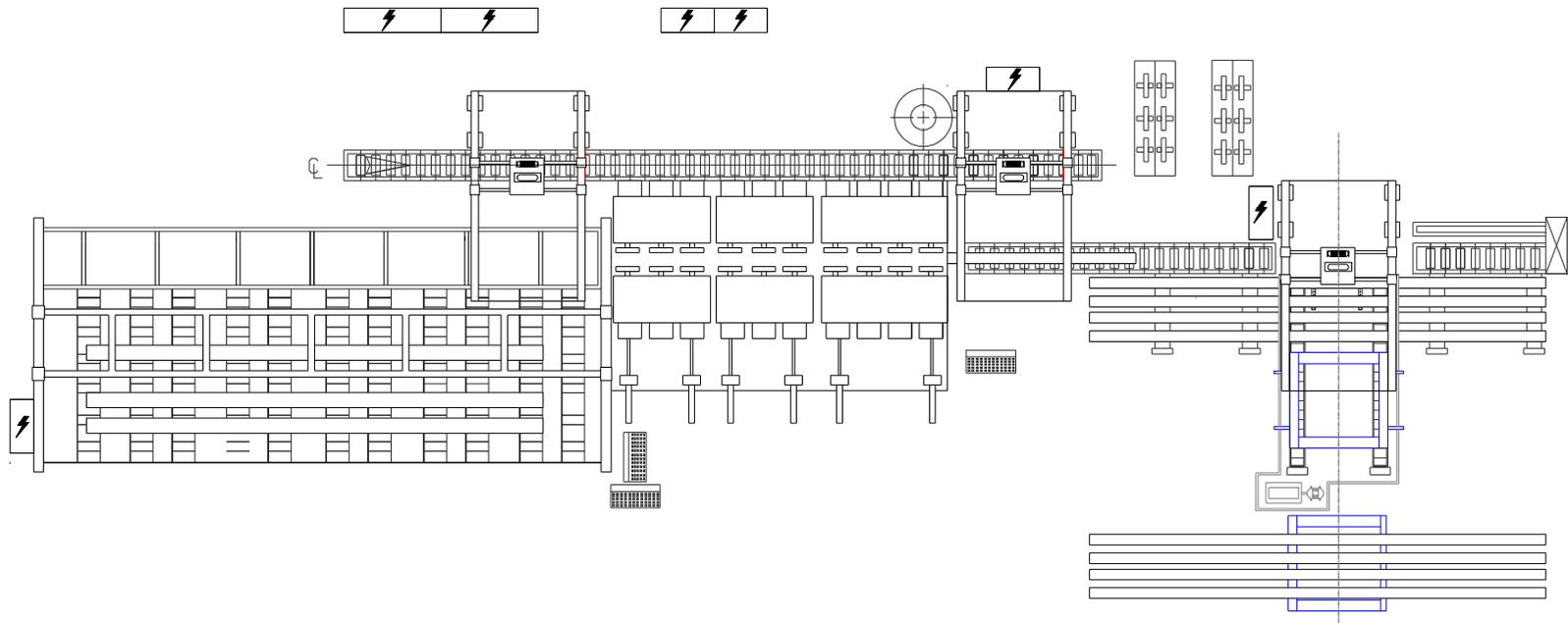
```
*****
*                               Macros                               *
*****
```

ID	Text
-----	-----
tempo_roll_form	WAIT 1.5
tempo_puncionadeira	WAIT 3.5
tempo_corte	WAIT 1.5

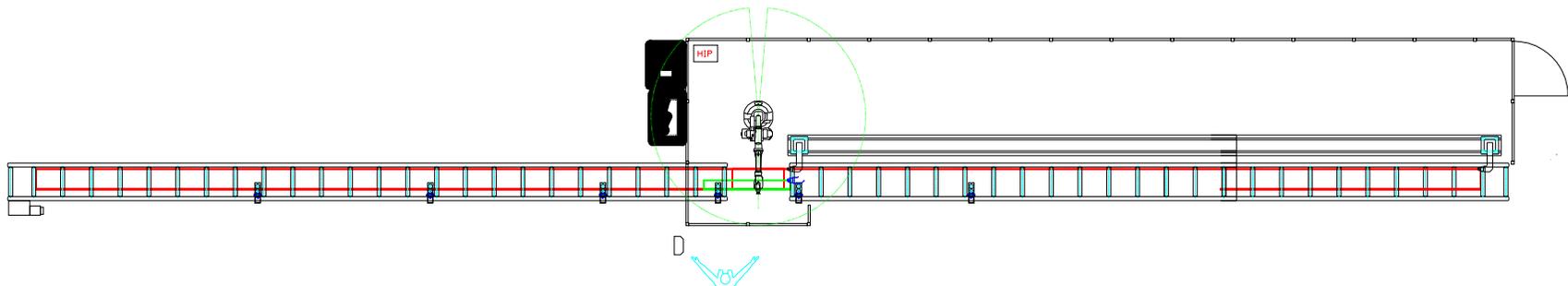
ANEXO 2

Equipamentos da linha de manufatura estudada

ROLL FORM



CORTE A PLASMA



DOBRADEIRA

