USP

Campus de São Carlos

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A SELEÇÃO DE PROCESSOS DE MANUFATURA CONSIDERANDO ASPECTOS FINANCEIROS E TECNOLÓGICOS

NELSON MARINELLI FILHO

Orientador: Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A SELEÇÃO DE PROCESSOS DE MANUFATURA CONSIDERANDO ASPECTOS FINANCEIROS E TECNOLÓGICOS

Nelson Marinelli Filho

Serviço de Pós-Gradução EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 05/07/02
Ass.:

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos – USP, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tit. João Fernando G. de Oliveira

DEDALUS - Acervo - EESC
31100036972

São Carlos, Fevereiro de 2001

EESC-USP Biblioteca

Class. TESE-EESC
Cutt. 3303
Tombo T 0144/02
Sysno 1250690

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M737d

Marinelli Filho, Nelson
Desenvolvimento de uma metodologia para a seleção de processos de manufatura considerando aspectos financeiros e tecnológicos / Nelson Marinelli Filho. -- São Carlos, 2002.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Tit. João Fernando G. de Oliveira

1. Processos de manufatura. 2. Projeto. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **NELSON MARINELLI FILHO**

Tese defendida e julgada em 07-05-2002 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Tit. **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **REGINALDO TEIXEIRA COELHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Assoc. **ANTONIO FREITAS RENTES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **JOSÉ CARLOS DE TOLEDO**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **PAULO CORRÊA LIMA**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Assoc. MARIA DO CARMO CALIJURI
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

À minha querida esposa Alessandra
e ao meu filho Thiago,
aos meus pais, Aparecida
de Lourdes e Nelson.

Agradecimentos

Ao professor Dr. João Fernando Gomes de Oliveira pela orientação no presente trabalho e, sobretudo, pela amizade incondicional nestes dez anos de convívio;

Ao Professor Dr. Reginaldo Teixeira Coelho pelo apoio constante e pela amizade;

À Dna. Irene pela atenção nos momentos decisivos e pelo carinho;

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida;

Aos amigos da SENSIS SÃO CARLOS, Luiz André, João Jorge, Juarez, Otávio e Elivélton pela amizade e pelo apoio para a realização do presente trabalho;

Aos meus amigos que conviveram comigo boa parte destes anos em São Carlos: Buda, Geraldo, Gil, Dadá, Solange e Tachinha.

Sumário

1. Introdução.....1

1.1. Definição do problema.....2

1.2. Objetivos.....7

1.3. Estrutura da tese.....8

2. O projeto de processos de fabricação e a seleção de suas operações....10

2.1. A criação e desenvolvimento de projetos.....12

2.1.1. O projeto tratado como uma ciência.....15

2.1.2. As categorias de projeto 18

2.1.3. Os modelos de projetos.....19

Modelo geral para a criação e desenvolvimento de projetos.....20

2.1.4. O desdobramento da função da qualidade: um modelo descritivo para o planejamento e processo.....24

2.1.5. Considerações práticas da utilização do QFD no desenvolvimento de produtos.....28

2.2. O desenvolvimento de alternativas em problemas de análise de decisão.....33

2.2.1. Uma estrutura unificada para a geração de opções.....35

2.2.2. Padrão para identificar os fatores primários de decisão.....38

2.2.3. Definição de prioridades para os fatores primários de decisão.....40

2.2.4. Geração preliminar de opções.....43

2.2.5. Análise de sensibilidade.....43

2.3. Elementos básicos para a formação de processos de fabricação.....47

2.3.1. Definição de processo, operação, sequência e rota de fabricação.....47

2.3.2. Revisão das metas de qualidade do produto.....53
2.3.3. Conhecimento das condições operacionais.....54
2.3.4. Metas para as característica de um processo.....55

3. Avaliação e acompanhamento de investimentos em sistemas de manufatura.....58
3.1. Tópicos fundamentais da avaliação financeira de investimentos em geral.....64
3.1.1. Perspectiva estratégica.....65
3.1.2. Estrutura decisória.....68
Definição do problema.....68
Natureza de investimento.....70
Custos e benefícios futuros.....70
Fluxo de caixa incremental e o valor do dinheiro no tempo.....71
Dados contábeis relevantes.....74
Custos irrecuperáveis.....74
3.1.3. Métodos determinísitcos para a análise de investimentos.....75
Taxa mínima de atratividade.....76
Taxa média de retorno.....79
Período de recuperação.....79
Índice de lucratividade.....80
Método do valor presente líquido.....81
Método da taxa interna de retorno.....82
Método do VPL anualizado.....82
Compatibilização dos resultados.....83
Projetos com horizontes diferentes.....84
3.1.4. Tópicos complementares.....84
Leasing.....85
Depreciação acelerada.....86
Inflação e análise de investimentos.....86

Exatidão.....87
3.2 Curvas de aprendizagem.....88
3.2.1. O modelo linear logarítmico.....90
3.2.2. O modelo da curva de aprendizagem para múltiplas variáveis.....95
3.2.3. Análise econômica de processos de manufatura através das curvas de aprendizagem.....99
3.2.4. Exemplo da influência do aprendizado no desempenho de sistemas de manufatura.....100

4. A seleção de sistemas de manufatura: proposta de uma metodologia...106
4.1. Suposições iniciais.....106
4.2. Enunciado geral.....108
4.3. Avaliação geral.....109
4.3.1. Avaliação preliminar das alternativas de processo.....113
Determinação das metas da qualidade.....113
Avaliação financeira.....117
Curvas de acompanhamento do projeto de investimento.....119
4.4. Testes de laboratório.....124

5. Caso de estudo.....132
5.1. Avaliação dos processos de retificação e torneamento duro na manufatura de eixos de transmissão de automóvel.....133
5.1.1. Fase 1: avaliação geral do componente e das alternativas de processo.....134
5.1.2. Fase 2: testes de laboratório das alternativas de processo selecionadas.....158
Avaliação de desempenho do torneamento duro.....160
Avaliação de desempenho da retificação.....164
5.1.3. Fase 3: Avaliação de manufatura das alternativas de processo selecionadas.....172

6. Conclusões.....180
ANEXO A.....184
ANEXO B.....200
ANEXO C.....209
BIBLIOGRAFIA.....212

Lista de figuras

Figura 1.1 – Visualização esquemática de uma empresa: o critério de entradas e saídas....1
Figura 1.2 – Esquema inicial de uma árvore de decisão para a escolha de processos de manufatura....2

Figura 2.1 – O sistema da administração da qualidade total....11
Figura 2.2 – Os quatro aspectos distintos da atividade de projeto para a engenharia e a ciência....14
Figura 2.3 – As categorias de projeto e seu espectro criativo....19
Figura 2.4 – O modelo geral do processo de criação e desenvolvimento de um projeto....20
Figura 2.5 – As três fases básicas do processo de desenvolvimento de projetos....21
Figura 2.6 – Versão compreensiva do modelo geral de criação e desenvolvimento de um projeto....22
Figura 2.7 – O desenvolvimento do QFD....25
Figura 2.8 – A "casa da qualidade" no QFD....26
Figura 2.9 – Representação esquemática do QFD....27
Figura 2.10 – O processo de tomada de decisão....36
Figura 2.11 – Geração de opções....37
Figura 2.12 – Padrão genérico para a classificação hierárquica dos fatores de decisão....39
Figura 2.13 – Uma ilustração de hierarquia....41
Figura 2.14 – Esquema básico de um evento probabilísitco....44
Figura 2.15 – Valor esperado e probabilidade....45

Figura 2.16 – Comparação entre dois eventos.....46
Figura 2.17 – Diagrama de insumos e resultados.....49
Figura 2.18 – A estrutura de produção segundo SHINGO.....49
Figura 2.19 – A espiral da qualidade segundo JURAN.....51
Figura 2.20 – Planilha de características do processo para um sistema de aquecimento automotivo.....56

Figura 3.1 – Alternativas para uma decisão de investimento.....69
Figura 3.2 – Representação esquemática de um fluxo de caixa típico de investimento.....72
Figura 3.3 – A variação da taxa mínima de atratividade em função do montante de capital investido.....78
Figura 3.4 – O modelo linear logarítmico da curva de aprendizagem.....92
Figura 3.5 - Comparação dos modelos de curvas de aprendizagem em escala logarítmica.....95
Figura 3.6 – Relações entre as curvas de aprendizagemde engenharia e manufatura.....97
Figura 3.7 – Forma genérica de uma superfície de resposta para o modelo de curvas de aprendizagem de dois fatores.....98
Figura 3.8 - Direcionadores de custo.....103
Figura 3.9 – Curvas de aprendizado para os produtos A e B.....104

Figura 4.1 – Fase 1: avaliação geral.....110
Figura 4.2 – Matriz de relacionamento das metas da qualidade.....114
Figura 4.3 – Gráfico de acompanhamento do projeto de investimento.....120
Figura 4.4 – Folha de resumo da fase de avaliação geral.....123
Figura 4.5 – Fase de testes de laboratório.....127
Figura 4.6 – Fase de avaliação de manufatura.....130

Figura 5.1 – Exemplo geral de um eixo principal de transmissão de automóvel.....133

Figura 5.2 – Tabela de relacionamento para o processo de torneamento duro....143
Figura 5.3 – Tabela de relacionamento para o processo de retificação....144
Figura 5.4 – Curva de aprendizagem para a alternativa de processo do torneamento duro, p =0,90....152
Figura 5.5 – Curva de aprendizagem para a alternativa de processo de retificação, p=0,90....153
Figura 5.6 – Gráfico de VPL acumulado para o investimento no processo de torneamento duro....154
Figura 5.7 – Gráfico de VPL acumulado para o investimento no processo de retificação....156
Figura 5.8 – Protótipo do eixo de transmissão....158
Figura 5.9 – Curvas de aprendizagem para as condições de usinagem do processo de torneamento duro....168
Figura 5.10 – Curvas de acompanhamento de investimento das condições de usinagem do processo de torneamento duro....168
Figura 5.11 – Curvas de aprendizagem para as condições de usinagem do processo de retificação....169
Figura 5.12 – Curvas de acompanhamento de investimento das condições de usinagem do processo de retificação....170
Figura 5.13 – Curvas de aprendizagem para as condições de usinagem do processo de torneamento duro e retificação....171
Figura 5.14 – Curvas de acompanhamento de investimento das condições de usinagem do processo de torneamento duro e retificação....171
Figura 5.15 – Tabela de relacionamento para o processo de torneamento duro....174
Figura 5.16 – Tabela de relacionamento para o processo de retificação....175
Figura 5.17 – Gráfico de acompanhamento de projeto de investimento para o processo de torneamento, condição 1, e retificação, condição 1....177

Figura 5.18 – Gráfico de acompanhamento de projeto de investimento para o processo de torneamento, condição 1, e retificação, condição 1, juntamente com o valor acumulado de receita (R$ 5,00/peça).....178

Figura A.1 – Análise do ponto de equilíbrio através da comparação de custos e receitas.....191

Figura B.1 – As relações entre o índice de capacidade de processo Cp e os limites especificados de um processo.....202
Figura B.2 – Cartas de controle de X e de R.....207
Figura B.3 – Representação esquemática do estudo da capacidade do processo.....208

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – razões para o fracasso no desenvolvimento de produtos.....31
Tabela 2.2 – Escala de comparação.....42

Tabela 3.1 – Dados de custo para o estudo de casso proposto por ANDRADE.....102
Tabela 3.2 – Fórmulas para o cálculo de custos.....103

Tabela 5.1 – Condições de usinagem para os testes de avaliação de desempenho do processo de torneamento duro.....161
Tabela 5.2 – Faixas de CpK para a avaliação dimensional, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para o torneamento duro.....162
Tabela 5.3 – Faixas de CpK para a rugosidade superficial, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para o torneamento duro.....163
Tabela 5.4 – Condições de usinagem para os testes de avaliação de desempenho do processo de retificação.....165
Tabela 5.5 – Faixas de CpK para a avaliação dimensional, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para a retificação.....165
Tabela 5.6 – Faixas de CpK para a rugosidade superficial, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para a retificação.....166
Tabela 5.7 – Componentes de custos calculados a partir dos resultados de desempenho.....167

Tabela B.1 – Estudo da capacidade de processo segundo o exemplo de MESSINA.....205

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

AMT	Advanced Manufacturing Technology
b	Expoente da curva de aprendizagem
Bm	Elementos de custos relacionados com a operação do processo de usinagem
Bg	Elementos de custos relacionados com a operação de reafiação de ferramentas
Cl	Custo de carga e descarga
Cm	Custo de usinagem
Cp	Custo de produção
Cs	Custo de setup
Ct	Custo de produção
C_x	Custo médio acumulado para a produção de x unidades
Cf	Custo da ferramenta
CF_j	Valor do Fluxo de Caixa na data j
Dc	Depreciação da ferramenta ou custo do porta ferramenta por peça
Dd	Custo do rebolo por dressagem
IL	Índice de Lucratividade
K	Custo da primeira unidade produzida
Lg	Valor de mão-de-obra direta para a reafiação de ferramentas
Lm	Valor de mão-de-obra direta de usinagem
n	Número total de fatores de uma curva de aprendizagem
n	Número de períodos de capitalização de um fluxo de caixa
Nd	Número de peças por dressagem
Np	Número de peças usinadas por aresta de corte

p	Taxa percentual de aprendizagem
QFD	Quality Function Deployment
Tc	Tempo de usinagem
Td	Tempo de dressagem
Tg	Tempo de reafiação da ferramenta ou de troca da ferramenta
TIR	Taxa Interna de Retorno
Tm	Tempo de usinagem
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TMR	Taxa Média de Retorno
TQM	Total Quality Management
VAUE	Valor Presente Líquido Equivalente
VPL	Valor Presente Líquido
VPLA	Valor Presente Líquido Anualizado
x	Contagem acumulada de unidades produzidas

Resumo

Nos últimos anos, os processos de manufatura têm sido desenvolvidos assumindo-se uma faixa mais ampla de aplicações e capabilidades. Devido a isto, a seleção destes processos está se tornando uma tarefa mais complexa. Ela inclui a análise de aspectos monetários e tecnológicos. Atualmente, a maioria das indústrias de manufatura tem que decidir sobre os investimentos na produção dentro de uma vasta gama de possibilidades. Portanto, uma metodologia inovadora é necessária para suprir os elementos necessários para o processo de decisão aplicado a investimentos nos sistemas de manufatura. Este trabalho propõe uma nova metodologia que estabelece passos com o objetivo de se obter as informações essenciais para a comparação entre sistemas de manufatura. Esta metodologia considera aspectos ao longo do tempo de uma forma integrada. O método proposto é aplicado a um estudo de caso onde o processo de retificação é comparado à uma operação de torneamento na produção de eixos de transmissão para a indústria automotiva. A aplicação do método ilustra o poder de sua aplicação no ambiente industrial.

Palavras-chave; Processos de manufatura; projeto.

Abstract

The manufacturing processes have been developed in the last years assuming a wider range of applications and capabilities. Due to that, the selection of theses processes is usually getting a more complex task. It includes the analysis of technological and monetary aspects. Nowadays, most of manufacturing industries have to decide the investments in manufacturing within a wide range of possibilities. Therefore an innovative methodology is required to provide the necessary elements for a decision process applied to investments in manufacturing systems. This work proposes a new methodology that provides steps in order to obtain the main information for the comparison between manufacturing systems. It considers technological and financial aspects along the time in an integrated way. The proposed method is applied to a case study where the grinding process is compared to a turning operation in the production of transmission shafts for automotive industry. The application of the method illustrates the power of its application in industrial environments.

Keywords: manufacturing processes; project.

1. Introdução

1.1. Definição do problema

No início da Revolução Industrial a produção de manufaturados era centrada na figura do artesão. Este era responsável por projetar o produto, selecionar a matéria-prima, desenvolver e executar o processo, além de estabelecer o preço, comercializar, entregar e garantir a qualidade do produto. Com os diversos ciclos da Revolução Industrial, o trabalho de manufatura de bens de consumo foi se tornando cada vez mais fragmentado, sendo que o apogeu desta fragmentação aconteceu durante o Século XX, com a utilização das teorias de Taylor da administração científica e o desenvolvimento das linhas de produção por Ford, GALBRAITH (1982) e FREEDMAN (1992).

A aplicação indiscriminada das teorias de Taylor e Ford trouxe grande sucesso econômico à civilização ocidental durante a primeira metade do Século XX e moldou culturalmente suas grandes empresas. Tornou-se inerente ao pensamento empresarial a fragmentação do trabalho, sendo que hoje uma das características mais valorizadas nos líderes das organizações é a habilidade de desenvolver uma visão sistêmica da atividade econômica em questão. Esta afirmação não é mais um dos famigerados modismos empresariais e sim foi feita pelo próprio Taylor, em sua obra, *"The Principles of Scientific Management"*, FREEDMAN (1992). Taylor escreveu:

"The best management is a true science, ..., resting upon clearly defined laws, rules, and principles as a foundation. ...In the past the man has been

first; in the future the system must be first."

A Figura 1.1, apresentada a seguir, ilustra as afirmações feitas a respeito da sistematização do trabalho.

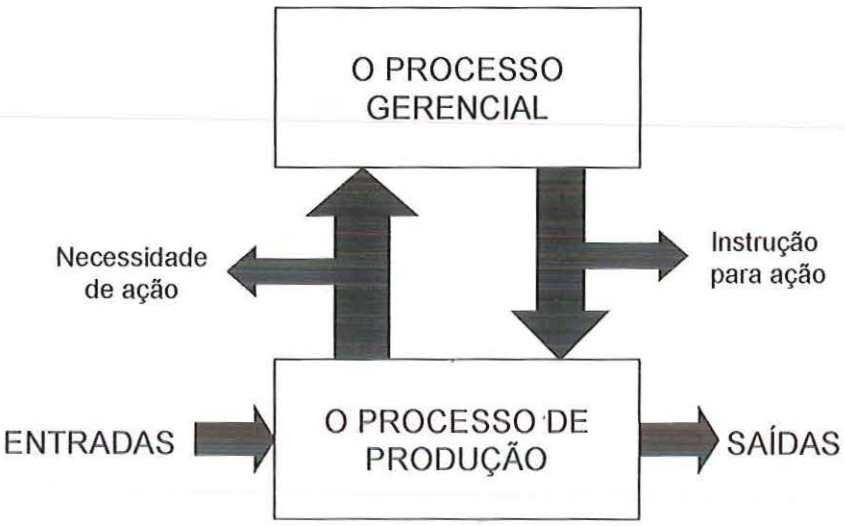

Figura 1.1 – Visualização esquemática de uma empresa: o critério de entradas e saídas, segundo WOILER & MATHIAS (1996).

Na Figura 1.1, que é apresentada em um grande número de textos básicos a respeito da administração da produção, como DAVIS et ali (2001) e WOILER & MATHIAS (1996), observa-se a sistematização total do processo empresarial. Neste modelo, as atividades de uma empresa são divididas em apenas dois processos: o Processo Gerencial e o Processo de Produção, sendo que espera-se do Processo de Produção, além da transformação da matéria-prima em produto acabado (Entradas e Saídas), que este forneça ao Processo Gerencial *"necessidades de ação"* e que o Processo Gerencial, por sua vez, responda com *"instruções para ação"*.

WOILER & MATHIAS (1996) fazem uma afirmação importante a respeito da competitividade das empresas ocidentais, com relação ao modelo apresentado na Figura 1.1. Segundo estes autores, a grande importância que a produtividade assumiu dentro das empresas até a década de 70, em função das características dos mercados consumidores, fez com que este modelo quase se invertesse. Neste contexto, os indivíduos que se formaram

dentro dos processos de produção ascenderam naturalmente ao processo gerencial. No entanto, os executivos formados primeiramente nos processos de produção possuem a tendência a dar preferência aos problemas de operação, que obviamente lhes são mais familiares. Isto faz com que a empresa tenha o seu tempo de resposta às mudanças do ambiente econômico defasados, pois as respostas relacionados com o posicionamento estratégico de uma empresa não se encontram em seus processos de produção, mas sim no seu processo gerencial.

Esta afirmação pode ser comprovada rapidamente na prática, apenas pedindo ao leitor que se recorde entre as suas relações pessoais o número de executivos conhecidos que vieram do processo de produção e aqueles que foram formados apenas dentro do processo gerencial. Historicamente, o número de executivos na indústria de componentes mecânicos que foram formados na operação é muito maior.

A partir de meados da década de 80 a economia ocidental voltou a se recuperar, liderada sobretudo pelas empresas americanas. Segundo WHITELEY (1992) está recuperação começou a tomar força a partir de um evento denominado *"movimento da qualidade"*, e que hoje está tão presente na vida das organizações que é comum encontrar-se afirmações como: *"a Gestão da Qualidade Total (GQT) não é mais uma inovação na vida das empresas, mas sim apenas o preço do ingresso que elas devem pagar para poder entrar no jogo que se tornou a chamada economia globalizada"*, de ERHORN & STARK (1994).

Mesmo assim, a inversão dos círculos de poder dentro das empresas continua a ocorrer e é muito fácil de ser percebido dentro da indústria mundial de componentes mecânicos. Para comprovar esta afirmação basta uma breve corrida de olhos sobre as últimas edições de algumas das mais consagradas revistas comerciais sobre fabricação mecânica, como Manufacturing Engineering, The American Machinist e a brasileira Máquinas & Metais. Estas revistas estão abarrotadas de sugestões de inovações tecnológicas que poderão ser utilizadas pela indústria no futuro. Mas é muito difícil encontrar artigos, nestas revistas, discutindo como realizar a escolha.

Ou seja, não há a preocupação em demonstrar racionalmente como deve se dar o processo de decisão para a ação de se utilizar uma destas chamadas tecnologias.

Um bom exemplo desta observação é uma discussão sobre as principais tendências que os processos de retificação devem seguir nos próximos anos publicada por ARONSON (1999), reunindo representantes de peso entre os fabricantes de ferramentas abrasivas, fabricantes de máquinas retificadoras e grandes usuários de retificação de precisão. Curiosamente os aspectos discutidos são os mesmos citados por KEEG (1983) vinte anos atrás, como sendo essenciais para o desenvolvimento das operações de retificação de precisão.

Isto mostra que o processo de retificação de precisão não se desenvolveu? Não, ao contrário, os profissionais que o utilizaram, nestes vinte anos, sabem muito bem o quanto este evoluiu (ferramentas abrasivas, dressadores, fluídos, controles e máquinas), mas sabem também que a sua complexidade ainda não permitiu que este esteja em grau de domínio equivalente, por exemplo, ao do torneamento. Talvez nunca esteja.

Mais sutil do que isto, é um debate, que aparece na discussão citada acima ARONSON (1999), onde o fabricante de máquinas afirma ser essencial a utilização de sistemas de refrigeração de alta-pressão e alto-fluxo, para que seja possível atingir o ponto de corte. O usuário rebate esta afirmação, dizendo que conseguiu resultados semelhantes, apenas com modificações no desenho do bico de refrigeração. No artigo, a discussão cessa exatamente neste ponto, como em muitos outros artigos semelhantes destas revistas, deixando para o leitor uma pergunta extremamente complexa, que é: Qual é a melhor solução?

Se esta situação estivesse limitada apenas à leitura e reflexão de artigos em revistas comerciais, o impacto sobre a vida das empresas de manufatura mecânica seria limitado, ou até mesmo imperceptível. Hoje, no entanto, uma das atividades mais importantes para a sobrevivência destas empresas é o desenvolvimento de seus projetos, ERHORN & STARK (1994) e BOWEN et ali (1994). E é inerente a qualquer metodologia de desenvolvimento de um

projeto a questão: Qual é a melhor solução?, BAHRAMI & DAGLI (1994).

É neste momento, que o objetivo geral do presente trabalho entra no contexto, pois se um dos pontos fundamentais para a sobrevivência de uma empresa é como esta desenvolve os seus projetos, então, a atividade de criação e desenvolvimento, ou seja, de projeto de seus sistemas de manufatura também é essencial e, por isso, necessita de uma metodologia específica.

Assim, o objetivo geral do presente trabalho pode ser enunciado como sendo a busca de uma metodologia adequada para a seleção de processos de fabricação, dentro da atividade de projeto de sistemas de manufatura, capaz de superar as barreiras implícitas à divisão do processo empresarial em gerenciamento e produção, como visto na discussão da Figura 1.1.

No desenvolvimento do presente trabalho, como é esperado em um trabalho de doutoramento, foi avaliado um grande número de referências bibliográficas, mas entre todas elas uma afirmação muito simples marcou a visão do autor com relação ao tema escolhido, e é a seguinte:

"The most commom mistake that a beginner at decision analysis makes is to include everything the choice involves in the tree. This is a sure way to end up with a mess, which only the analyst, if anyone, can understand. Such a tree is unlikely to influence any manager's decision.

The trick is to design a simple tree that captures the essence of the problem by including its most important elements", ULVILA & BROW (1982).

No início do desenvolvimento do presente trabalho este erro também aconteceu e pode ser ilustrado pela Figura 1.2 apresentada a seguir. Esta figura mostra a visão inicial do autor com relação aos elementos que deveriam ser ponderados na escolha de um investimento em um sistema de manufatura.

O processo gerencial deveria controlar o processo de produção através de uma grande sequência de instruções, mas ao mesmo tempo deveria ser controlado pelo planejamento estratégico da empresa, que por

sua vez foi confeccionado através da avaliação das prioridades competitivas. E, desta maneira, o processo de produção seria responsável apenas pela escolha dos processos de manufatura, sua análise e o controle estatístico de processo.

Integração entre o processo gerencial e o processo de manufatura na administração da produção

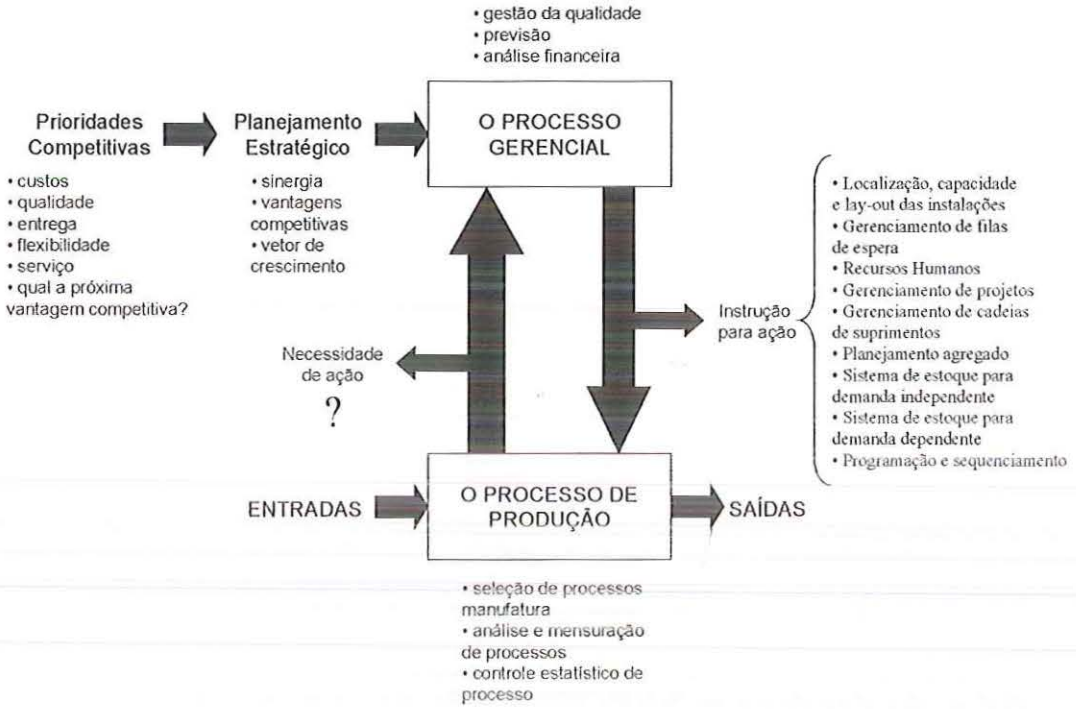

Figura 1.2 – Esquema inicial de uma árvore de decisão para a escolha de processos de manufatura, proposto pelo autor.

Seguindo a afirmação de ULVILA & BROW (1982), obviamente esta proposta não foi adequada e os indivíduos que foram solicitados a avaliá-la, no exame de qualificação não concordaram com a inclusão de todos os elementos apresentados. Ou seja, o modelo não se prestava para o motivo pelo qual foi desenvolvido, o apoio na decisão de escolha de processos de manufatura, pois gerava mais discussão do que solução.

Após esta experiência, decidiu-se reformular o modelo de maneira a simplificá-lo, mas sem perder a intenção de integrar os processos gerenciais e os de produção na decisão da escolha das características de processos de

manufatura. Este novo modelo, que será discutido no desenvolvimento do presente trabalho, concentra o processo de decisão da escolha das características de um processo de manufatura em três itens principais: Qualidade, Investimento e Tecnologia; e utiliza duas metodologias consagradas na planificação do processo de criação e desenvolvimento de um projeto: o QFD ("Quality Function Deployment") e as Curvas de Aprendizagem.

Desta maneira, o objetivo geral discutido até o momento pode ser detalhado nos objetivos específicos apresentados no item 1.2, a seguir.

1.2. Objetivos

Os objetivos específicos do presente trabalho são apresentados abaixo:

- Construir uma revisão bibliográfica procurando fundamentar os elementos a serem considerados na seleção de processos no projeto de sistemas de manufatura, abordando os aspectos de qualidade, investimento e tecnologia que influem no seu desempenho, além das metodologias que podem ser utilizadas para planificar o conjunto destes aspectos;

- Apresentar uma metodologia capaz de orientar o usuário de processos de manufatura na seleção de operações de fabricação de componentes mecânicos, levando-se em conta aspectos tecnológicos e financeiros e

- Aplicar e discutir este método em um caso em estudo.

Sendo que o direcionamento deste trabalho será dado para a escolha de processo de usinagem dentro da indústria metal-mecânica. Com estes objetivos em mente o presente trabalho foi dividido nos seguintes capítulos.

1.3. Estrutura da Tese

O presente trabalho é divido em 6 capítulos e o seu conteúdo é apresentado resumidamente a seguir:

Capítulo 2 - **O projeto de processos de fabricação e a seleção de suas operações** – Neste capítulo são apresentados os passos que traduzem o processo de criação e desenvolvimento de um projeto, com especial atenção à definição dos atributos de um projeto e como esse processo se aplica na formação dos sistemas de manufatura.

Capítulo 3 – **Avaliação e acompanhamento de investimentos em sistemas de manufatura** – O critério básico para a avaliação de qualquer projeto é o econômico, assim, no Capítulo 3 são apresentados os critérios fundamentais para este tipo de avaliação. Além disso, é apresentada uma metodologia muito promissora para a avaliação e acompanhamento de sistemas de manufatura, que são as curvas de aprendizagem.

Os Capítulos 2 e 3 têm por objetivo apresentar uma visão integrada dos aspectos que devem ser considerados no projeto de processos de produção de componentes mecânicos e suas operações.

Capítulo 4 - **A seleção de sistemas de manufatura: proposta de uma metodologia.** – Neste capítulo se faz a descrição de um método inovador para integrar os elementos considerados pertinentes no projeto de um processo de fabricação mecânica na sua avaliação de viabilidade sob os aspectos de qualidade, tecnologia e investimento.

Capítulo 5 – **Caso de estudo** – Com o objetivo de se discutir as características do método proposto no Capítulo 4, este será aplicado em um caso de estudo de projeto de sistema de fabricação mecânica.

Capítulo 6 – **Conclusões** – Com base nos resultados obtidos na aplicação do método e na teoria discutida são apresentadas as conclusões finais do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

2. O Projeto de processos de fabricação e a seleção de suas operações.

A História do Século XX trouxe modificações intensas na maneira do ser humano se relacionar com o seu semelhante. Estas mudanças de comportamento, obviamente também atingiram a forma com os dirigentes das empresas de produção de bens de consumo e de serviços tratam os seus colaboradores e clientes. Agora, dentro das grandes economias mundiais, a figura humana passa a ser valorizada ao extremo e esta preocupação se traduz na forma com que os novos produtos são elaborados e apresentados, VERGARA & BRANCO (2001).

Assim, a qualidade de produtos e serviços passaram a ser parte integrante da estrutura organizacional das empresas, sendo que os autores mais recentes afirmam que atingiu-se um patamar onde não há mais como se comercializar produtos sem uma prestação de serviço de qualidade também elevada e vice-versa. Estas observações podem ser avaliadas mais profundamente através do enunciado do *Quadro da Qualidade* de WHITELEY (1992) e da análise de um caso real no mercado brasilerio, como ROJO (1998).

A maioria das empresas nacionais decidiu utilizar como estratégia, para enfrentar estes novos paradigmas da economia mundial, a metodologia de gestão intitulada como: Gestão da Qualidade Total, muito comumente abreviada como TQM, FLEURY (1993). E ROJO (1998) estabelece muito bem e de maneira esquemática, na Figura 2.1 a seguir, o sistema da administração da qualidade total.

Figura 2.1 – O sistema da administração para a qualidade total, segundo ROJO (1998).

Esta rápida discussão tem como objetivo justificar a afirmação de que a gestão das empresas de maneira geral tornou-se mais complexa, com um forte caráter multi-disciplinar e com uma grande necessidade de integração dos seus processos. E dentro de todo este ainda novo contexto uma idéia se faz cada vez mais presente, que é o conceito de desdobramento da função da qualidade, JURAN (1992).

Para JURAN (1992) a excelência na qualidade de um produto só poderá ser atingida através do desdobramento da função da qualidade, ou seja, se a qualidade for inserida em cada uma das etapas do ciclo de vida de um produto. E a aplicação desta idéia modificou fortemente como a TQM se estruturava, deixando de ter um forte caráter de controle e tornando-se mais ainda uma atividade de planejamento, ou projeto, da qualidade.

No presente trabalho busca-se entender a formação dos processos de manufatura metal-mecânica, de maneira a inseri-los da melhor forma possível dentro de suas empresas, transformado-os em vantagens competitivas e não fontes de problemas. Sendo a TQM a forma de gestão encontrada para fornecer esta vantagem competitiva, ERHORN & STARK

STARK (1994), valorizando cada vez mais o projeto de seus processos, a revisão dos assuntos pertinentes à proposição do método irá iniciar-se através da discussão de como funciona a metodologia geral para conduzir um processo de criação e desenvolvimento de um projeto, dando especial atenção à definição dos atributos de um projeto e a uma ferramenta específica para o gerenciamento da importância de cada atributo em um projeto, que é o QFD (*"quality function deployment).*

Após esta discussão, serão revisados os conceitos de processo de produção, buscando identificar e definir os seus principais elementos, quais os itens devem ser avaliados na formação destes processos.

2.1. A criação e desenvolvimento de projetos.

Uma vez que a seleção de sistemas de manufatura é uma atividade de projeto , neste item são discutidos diversos aspectos relacionados à criação e ao desenvolvimento de projetos. Esta discussão se inicia com os conceitos fundamentais sobre a atividade de projeto e chega aos detalhamentos mais relacionados ao escopo deste trabalho.

De maneira burocrática as atividades de projeto podem ser definidas como qualquer processo de desenvolvimento de planos e esquemas, para a execução de uma determinada ação. No entanto, nas atividades de engenharia, é inerente ao processo de criação e desenvolvimento de um projeto a sua divisão em duas etapas: primeiro o desenvolvimento, ou aproximação criativa, e depois aproximação analítica, onde são utilizados os padrões e as fórmulas de cálculo, bem como, quando necessário, as normas técnicas.

Porém, se estas etapas são tão bem determinadas por que o desenvolvimento de um projeto é uma tarefa tão difícil e ao mesmo tempo tão discutida?

BAHRAMI & DAGLI (1994) fazem uma colocação muito exata a respeito desta questão, quando discutem o trabalho de Louis Kahn, um famoso

arquiteto norte-americano. Segundo estes autores:

"Kahn preferia sumarizar os elementos principais de uma grande variedade de fontes em um único conceito coerente, ao invés de focalizar a sua atenção nos detalhes de um determinado problema. Os indivíduos falham em seus projetos, pois desprendem grandes quantidades de energia em fatos pouco relevantes no início do projeto e, em função disto, devem finalizá-los de maneira impaciente e forçada."

Além disso, BAHRAMI & DAGLI (1994) fazem um comentário muito importante no contexto do presente trabalho, com relação ao primeiro passo do projeto, ou seja, a aproximação criativa.

"Quando Kahn falava sobre sentimento (em um projeto), este estava se referindo ao seu modo preferido de trabalho. Kahn acreditava que a mente criativa entende intuitivamente o todo do processo de criação através de um projeto, mas necessitava de ajuda do pensamento racional para guiar o processo, dividindo-o em passos. O pensamento racional age como uma ferramenta sobre o sentimento, dando-lhe uma forma expressiva."

O projeto ou a resolução de problemas fazem parte da vida diária da humanidade. Os projetos têm início a partir do momento em que os indivíduos adquirem o conhecimento de que algum fato de suas vidas não está funcionando como deveria e a insatisfação toma conta da rotina. Daí, surge a idéia de que uma ação, ou conjunto de ações, deve ser realizada para a correta solução do problema.

Assim, seguindo esta linha de pensamento, um operário que adapta as suas ferramentas de trabalho, para adequar o espaço às suas necessidades está agindo como um projetista. No entanto, esta ação se dá de maneira inconsciente, sem uma visão clara do todo e dos passos a serem seguidos para que os objetivos sejam alcançados.

Para COYNE (1988) o projeto em engenharia é uma atividade

proposital e envolve o esforço consciente para se atingir um determinado estado, ou situação. SUH et al. (1978) define o projeto através de quatro aspectos distintos da engenharia, ou do trabalho científico:

a) A definição do problema através da construção de uma questão coerente, através da observação de um conjunto aleatório de fatos e crenças.
b) O processo criativo de desenvolver um modelo físico de soluções.
c) O processo analítico de desenvolver um modelo físico de soluções.
d) A verificação definitiva da fidelidade do projeto final com o conjunto inicial de necessidades.

Esta sequência de atitudes para a resolução de um problema pode ser transformada em um ciclo auto-alimentado, cuja a representação esquemática pode ser visualizada na Figura 2.2 a seguir.

Figura 2.2 – Os quatros aspectos distintos da atividade de projeto para a engenharia e a ciência segundo SUH et al. (1978).

Todos os campos da engenharia envolvem e dependem das atividades de projeto e dos processos de sumarização de informações, o

que permite o atendimento às metas de trabalho, através da criação de estruturas físicas e de informação, incluindo máquinas, softwares e organizações, SUH et al. (1978).

2.1.1. O projeto tratado como uma ciência

Embora o projeto seja uma atividade natural para o ser humano, que vive em um ambiente transformado para atender as suas necessidades e utiliza produtos gerados a partir da criatividade humana, ainda é muito difícil explicar o processo de desenvolvimento de um projeto, BAHRAMI & DAGLI (1994).

A idéia de projeto se confunde, hoje, com o termo *"design"* utilizado em arquitetura, decoração e em diversas outras artes. Onde projeto significa a composição de um ambiente, levando em conta o estilo e a decoração e composição é o processo de analisar cada elemento individualmente e sua rede de relações com todos os outros elementos do conjunto. Visto desta maneira solta, torna-se difícil, a primeira vista, compreender o conceito de projeto, ou *"design"*, em engenharia.

BAHRAMI & DAGLI (1994) afirmam que a principal fonte de desentendimento na atividade de projeto é que o projeto de engenharia ainda não possui a fundamentação científica necessária e que sem esta base científica adequada, o ensino e a aplicação dos projetos de engenharia é feita com base em um empirismo especializado, intuição e experiência.

Com relação a este tema DIXON (1987) faz algumas colocações muito pertinentes ao entendimento dos objetivos do presente trabalho:

"O projeto não é um objeto de estudo fácil. É muito diferente da física, química e biologia, onde teorias e hipóteses podem ser testadas em laboratórios ou em experimentos de campo controlados. Em função do envolvimento de pessoas e organizações, o projeto é em parte como a psicologia cognitiva ou sociologia em termos de pesquisa. No entanto, além

de pessoas e organizações, o projeto também envolve os princípios naturais do mundo e o projeto em trabalho (isto é, o artefato físico do sistema a ser manufaturado, vendido e utilizado). Assim o projeto é uma atividade muito complexa. Mais do que isso, o projeto é um processo, e na maioria das vezes processos não podem ser tratados através de simples formulações teóricas".

A partir das ideias expostas acima pode-se concluir que o projeto está em uma fase inicial para se tornar uma ciência, ou está na fase de pré-ciência e precisa passar por várias etapas até se tornar uma ciência totalmente estabelecida, ou seja, até que possua uma tradição coerente de pesquisa científica e prática, com embasamento fornecido por leis, teorias, aplicações e instrumentação adequada.

COYNE (1988) argumenta que para se atingir este estágio de maturidade, devem ser emprestadas metodologias de outras disciplinas que já tenham atingido o estágio de ciência em sua plenitude. Basicamente existem duas estratégias para se aumentar o entendimento de disciplinas que ainda carecem de teorias científicas, que são os estudos de casos e os modelos. O caso de estudo prevalece em situações como os primeiros passos da psicologia, antes do estabelecimento de métodos experimentais adequados. Esta técnica também é predominante para o entendimento dos projetos de engenharia, que carece de sólida fundamentação através de teorias científicas e é muito dependente da interpretação dos agentes. A segunda técnica é o uso de modelos para definir e entender o processo de projeto. Embora os modelos sejam menos abrangentes do que as teorias, pois ao contrário das teorias, que buscam explicar um fenômeno observado e prever o comportamento de outros fenômenos relacionados, os modelos e contentam com a explicação de um fenômeno e a previsão do seu comportamento, KUHN (2000).

No entanto, na maioria dos casos para se construir um modelo confiável deve-se possuir relações matemáticas comprovadas entre os componentes. Para isto o projetista deve ser capaz de descrever como um artefato é

projetado, mas pode ser muito difícil traduzir matematicamente o comportamento de um projetista, a menos que se possa desenvolver teorias científicas para isto.

Segundo DIXON (1987) um modelo não constitui uma teoria; a teoria emerge quando há uma explicação testada de como um modelo se comporta. Ainda, segundo DIXON (1987), existem três tipos de modelos relacionados com o processo de desenvolvimento de um projeto, que são:

- *Modelo de perspectiva:* a função deste tipo de modelo é de estipular como o objeto do projeto deve funcionar, potencializando o processo debatendo como o projeto deve ser realizado em circunstâncias específicas;

- *Modelo cognitivo:* este modelo deve representar como os indivíduos realizam suas tarefas mentais e como funciona a relação entre os projetistas e as ferramentas computacionais, como o CAD;

- *Modelo computacional:* Este último modelo tem como objetivo delinear métodos através dos quais os sistemas computacionais possam realizar algumas tarefas, através da computação das variáveis presentes no modelo.

Assim, através do conhecimento acumulado em outras disciplinas, como, por exemplo, inteligência artificial e resolução de problemas, teoria da linguagem, psicologia e outras, poderá se chegar ao estudo e ao entendimento do processo de desenvolvimento de um projeto.

De maneira muito elegante COYNE (1988) sumarizou a definição de ciência e projeto:

"A ciência se encarrega de formular conhecimento através da derivação de relações entre fenômenos observados. O projeto, por outro

lado, começa através da intenção e uso do conhecimento já disponível para chegar a uma entidade que irá de encontro às intenções originais. A função do projeto é de produzir uma forma ou, mais acuradamente, de produzir a descrição de uma forma utilizando o conhecimento já estabelecido para transformar uma descrição amorfa em uma definitiva e especifica. Mais do que isso, o projeto é uma disciplina pragmática, que tem como função providenciar uma solução através da capacidade de conhecimento disponível pelo projetista. Este projeto pode não ser correto ou ideal e pode representar um compromisso, mas irá atingir as intenções em algum grau".

2.1.2. As categorias de projeto

DUVURU et al. (1989) classificou o processo de projeto em quatro categorias: criativo, inovativo, reprojeto e rotina. Esta classificação para as atividades de projeto depende do processo, mas é independente do produto. A descrição destas categorias de projeto é resumida a seguir:

- *O projeto criativo:* Este tipo de projeto acontece quando uma solução a priori não existe. O projeto se torna a atividade abstrata de decomposição em um conjunto de níveis que representam as escolhas para os componentes dos problemas. O ponto chave neste tipo de projeto é a transformação do conhecimento subconsciente em consciente.

- *O projeto inovativo:* Neste caso a decomposição do problema é conhecida, mas as alternativas para cada subparte não existem e precisam ser desenvolvidas. O projeto pode ser uma combinação única de componentes preexistentes.

- *O reprojeto:* Aqui um projeto já existente é modificado para atender as mudanças nos requisitos funcionais originais do sistema que

está sendo trabalhado.

- *O projeto de rotina:* Nesta situação uma solução completa para o projeto já existe. As subpartes e as alternativas já são previamente conhecidas, muitas vezes geradas a partir de projetos criativos ou inovativos anteriores. O projeto de rotina envolve a procura de alternativas apropriadas para cada subparte, que satisfaça uma determinada restrição.

Para DURUVU et al. (1989) estas formas de se pensar o processo de desenvolvimento de um projeto formam um espectro de criatividade, mostranto que este processo pode ser confuso, caótico, espontâneo, imaginativo e ao mesmo tempo rotineiro, sistemático, pré-determinado, preciso e matemático. A Figura 2.3 a seguir ilustra muito bem esta afirmação.

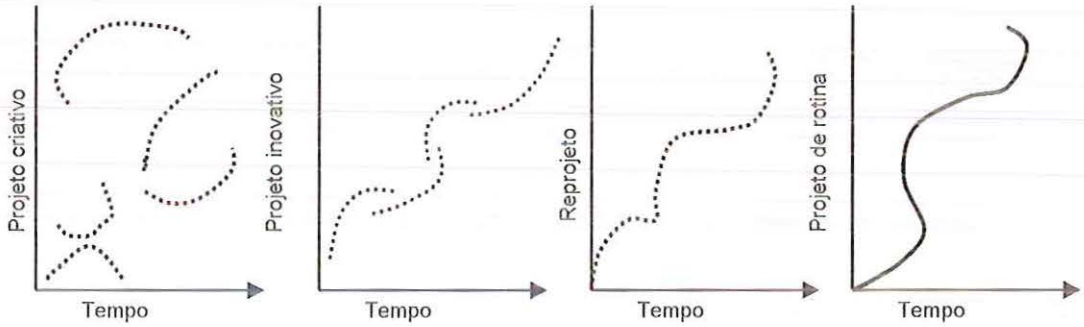

Figura 2.3 – As categorias de projeto e seu espectro criativo, DURUVU et al. (1989).

2.1.3. Os Modelos de Projetos

Segundo JONES (1992) não existe um modelo único que possa

fornecer uma definição satisfatória de como funciona o processo de desenvolvimento de um projeto. E que para se chegar a este modelo satisfatório ainda restam muitos ângulos a serem observados ao mesmo tempo neste processo. Muitos pesquisadores tem tentado desenvolver teorias e modelos que explicam o processo de desenvolvimento de um projeto. Algumas destas perspectivas são apresentadas a seguir e foram escolhidas por serem as mais adequadas, até o momento, para o objetivo principal do presente trabalho.

Modelo Geral para a Criação e Desenvolvimento de Projetos.

O modelo inicial para a visualização esquemática do processo de criação e desenvolvimento de projetos é um ciclo realimentado entre as ações de síntese e análise de um problema, WOILER & MATHIAS (1996) e MAXIMIANO (1997). A Figura 2.4 apresenta esta idéia.

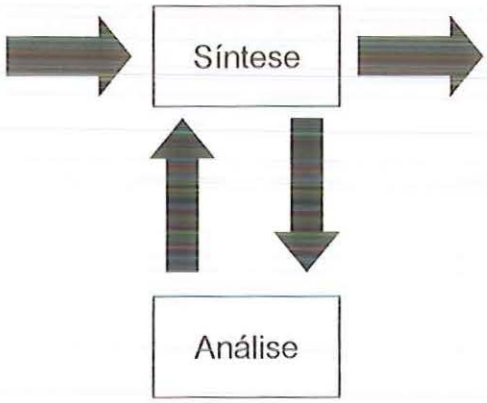

Figura 2.4 – O modelo geral do processo de criação e desenvolvimento de um projeto, WOILER & MATHIAS (1996) e MAXIMIANO (1997).

A essência deste modelo é a sua interatividade, pois o projetista, dentro deste ciclo, deve refinar e melhorar o projeto até atingir todos os requisitos. O projeto é iniciado através da especificação e análise de um determinado problema. O primeiro passo, na maioria das vezes, é dividir o problema

dado em partes, ou problemas menores. A partir daí, o projetista deve procurar soluções práticas. Em alguns casos, a ingenuidade sobre um determinado problema pode ser uma ótima situação, pois é a partir daí é que acontecem soluções inovadoras e criativas. No entanto, muitas vezes espera-se do projetista que este aplique soluções já consagradas anteriormente, resolvendo, assim, o problema da maneira mais rápida possível.

Vários autores, como, por exemplo, WOILER & MATHIAS (1996), MAXIMIANO (1997), VALERIANO (2001) e LUCKMAN (1967), concordam com a sequência apresentada acima e mostram o modelo inicial de maneira expandida em três fases básicas, que são: análise, síntese e avaliação. A Figura 2.5 a seguir mostra este novo modelo.

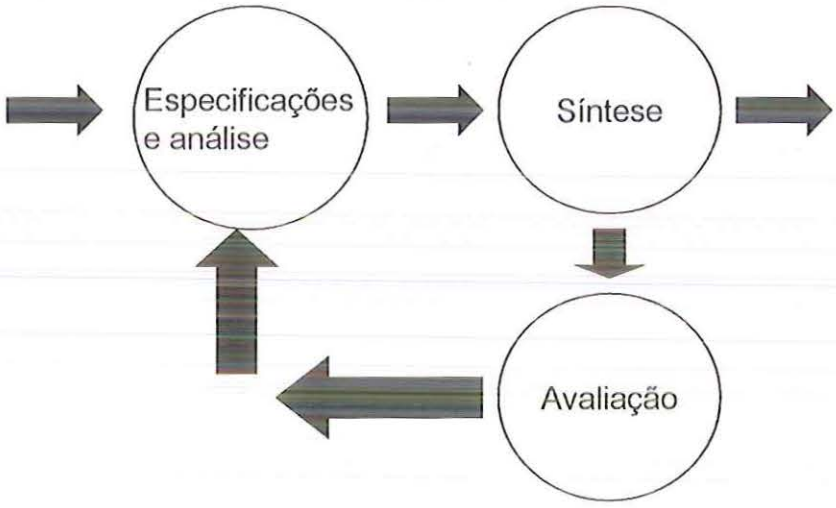

Figura 2.5 – As três fases básicas do processo de desenvolvimento de projetos, WOILER & MATHIAS (1996), MAXIMIANO (1997) e VALERIANO (2001).

Na etapa de análise o projetista deve se preocupar com a definição e entendimento do "O QUÊ" deve ser traduzido em declarações explícitas dos requisitos funcionais. A síntese envolve a procura de soluções confiáveis entre as alternativas possíveis. Finalmente, a fase de avaliação está relacionada com a validação das soluções encontradas nas fases

anteriores como sendo apropriadas para se atingir os requisitos iniciais do projeto.

O modelo discutido acima representa de uma maneira muito ampla a maioria daqueles encontrados na literatura, BAHRAMI & DAGLI (1994). No entanto, é muito comum que os termos que designam as fases principais sejam divergentes, como, por exemplo: divergência no lugar de análise, transformação ao invés de síntese e convergência utilizada na fase de avaliação.

A Figura 2.6, apresentada abaixo, mostra um modelo ampliado para o processo de criação e desenvolvimento de um projeto.

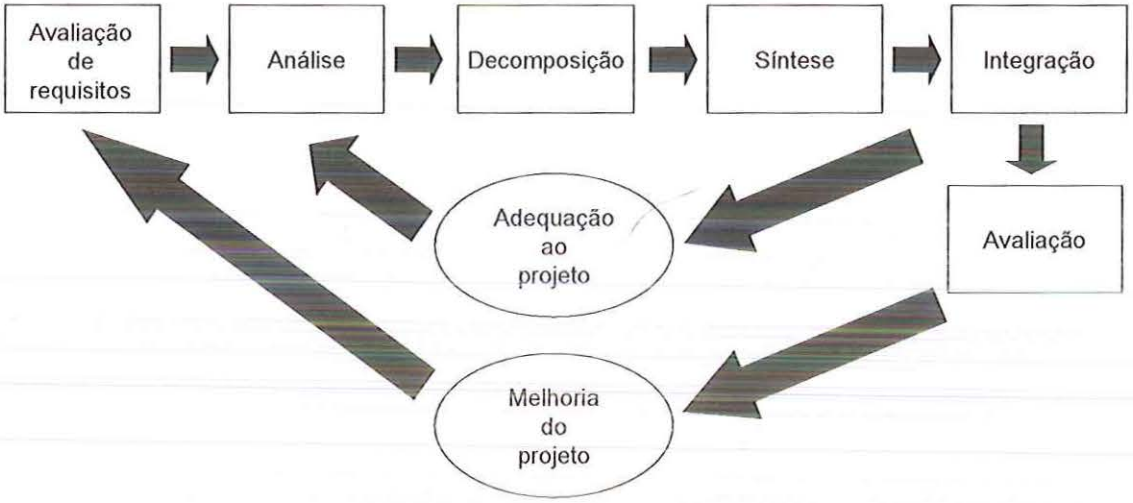

Figura 2.6 – Versão compreensiva do modelo geral de criação e desenvolvimento de um projeto, COYNE (1988).

O modelo apresentado na Figura 2.6 apresenta uma versão mais detalhada e compreensiva dos modelos iniciais de criação e desenvolvimento de um projeto. Neste modelo o processo é dividido nas seguintes fases:

- avaliação de requisitos: a avaliação das necessidades e dos requisitos de um projeto é uma atividade naturalmente difusa e que carece de metodologia;

- análise: esta fase envolve a especificação, identificação e preparação do problema para se produzir um conjunto explícito de afirmações de metas;
- decomposição: aqui o problema é dividido em partes menores e definem-se as fronteiras de um espaço onde a busca por soluções pode ser produtiva;
- síntese: nesta fase os projetistas devem se preocupar com as consequências de cada um dos arranjos selecionados para a solução do problema inicial;
- integração e avaliação: estas duas fases significam o julgamento da efetividade das soluções para o atingimento das metas selecionadas previamente. A diferença é que a integração retorna o seu julgamento à fase de análise e na avaliação a realimentação do ciclo mostra a necessidade de se avaliar a definição inicial dos requisitos do projeto.

SUH et al. (1978) se preocupa especificamente com a fase de decomposição. O projetista deve transferir do domínio teórico para o domínio funcional, e vice-versa para ser capaz de conduzir o processo de desenvolvimento de um projeto. Isto faz com que o projetista deva saber navegar por estes domínios, cada vez que este se desloque na árvore de decisão (árvore funcional) que se constitui o conjunto de requisitos funcionais de um projeto. SUH et al. (1978) ainda afirma que um bom projetista deve ser capaz de identificar os requisitos funcionais mais importantes em cada um dos níveis da árvore funcional, eliminado automaticamente fatores que podem ser considerados como secundários para a obtenção das metas iniciais. Projetistas menos habilidosos, ou experientes, tendem a considerar todas as características funcionais de cada nível simultaneamente, em vez de fazer uso da natureza hierárquica dos requisitos funcionais e do processo de desenvolvimento de um projeto.

Desta segunda maneira, o processo de desenvolvimento de um projeto se torna muito aleatório e complexo para ser gerenciado.

O item a seguir apresenta uma técnica que auxilia na priorização de características.

2.1.4. O Desdobramento da Função da Qualidade: Um Modelo Descritivo para o Planejamento e Processo.

O Desdobramento da Função da Qualidade (QFD – *"quality function deployment"*) é um modelo descritivo que utiliza um procedimento estruturado para tornar realidade a idéia do desdobramento da função da qualidade, invocando a chamada "voz do cliente", em cada fase do planejamento, projeto, manufatura e comercialização de um produto, HAUSER & CLAUSING (1995).

O QFD se inicia com os requisitos (necessidades) do cliente, que são usualmente apresentado de maneira difusa e carecem de afirmações claras, como: bonito, fácil de usar, funcione bem, seja legal, seguro, confortável, luxuoso e dure bastante. Estas características são importantes para o consumidor, mas carecem de quantificação e, assim, são difíceis de serem avaliadas pelas empresas, CHENG (1995) e AKAO (1990) . O QFD permite ao projetista converter as especificações difusas dos clientes em especificações inteligíveis dentro da linguagem de sua organização. Estas são na maioria das vezes características globais de um produto. Isto também torna possível para o projetista explodir as características globais do produto para o nível de cada um dos sistemas e componentes individuais que formam este produto. Para que isto seja possível os requisitos globais do produto, na linguagem do cliente, devem ser traduzidas para cada componente e as características críticas destes componentes irão formar a função essencial a ser realizada pelo produto. O uso de componente é suficientemente efetivo para produtos que são constituídos a partir de montagens mecânicas. Este conceito se aplica igualmente para outros tipos

de produtos que são combinações de ingredientes ou materiais, bem como produtos que não têm apresentação física que são combinações de serviços, CHENG (1995) e AKAO (1990). Aqui, nesta revisão, apesar dos conceitos estarem sendo através de produtos, a idéia de desdobramento pode ser aplicada nas atividades de projeto e, mais especificamente, no projeto de sistemas de manufatura. O desenvolvimento do QFD se dá através das construção de uma sequência de matrizes de relacionamento, cuja a sequência é apresentada na Figura 2.7.

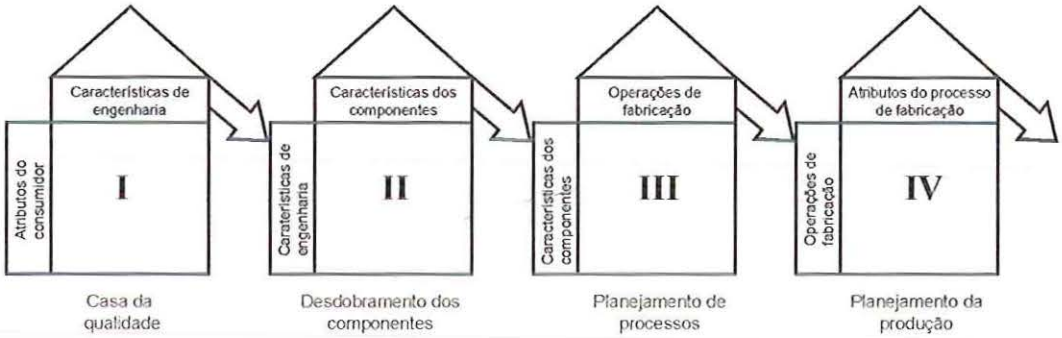

Figura 2.7 – O desenvolvimento do QFD, HAUSER & CLAUSING (1995).

Este se inicia através da confecção de uma lista da objetivos, que na metalinguagem utilizada por este método são chamados de "O QUÊ", ou seja, os requisitos necessários para o desenvolvimento do produto em discussão. Esta lista de requisitos é chamada frequentemente, dentro desta mesma metalinguagem, de "a voz do cliente". Os itens que formam esta lista são geralmente apresentados de forma difusa e difíceis de serem implementados diretamente, sendo necessário que sejam posteriormente definidas detalhadamente. Por exemplo, uma cadeira confortável é um conceito que pode assumir uma grande variedade de concepções, dependentes do indivíduo que a desenvolve. Este é o exemplo claro de um atributo importante do produto, mas que não pode ser atingido diretamente.

A Figura 2.8 apresenta a primeira das matrizes que formam o processo do QFD. Esta matriz geralmente denominada de "casa da qualidade" (em

função da sua representação gráfica), é responsável pela fase de planejamento do produto.

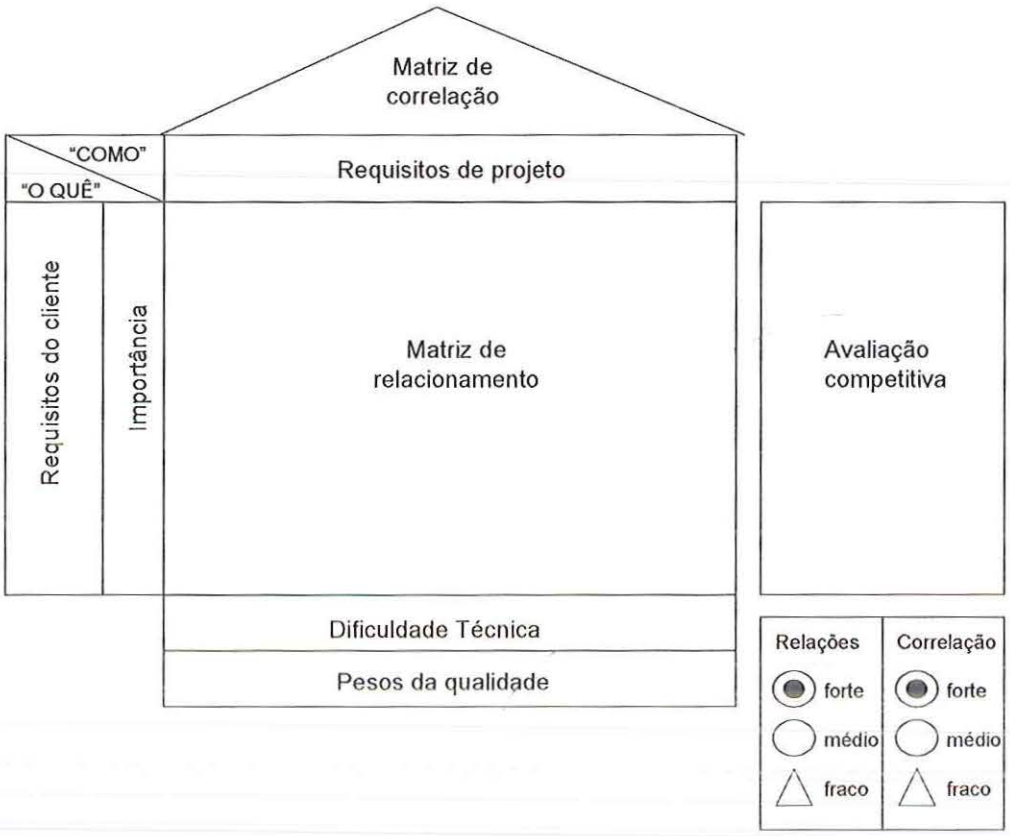

Figura 2.8 – A "casa da qualidade" no QFD (planejamento do produto), CHENG (1995).

A "casa da qualidade" representa a relação entre "O QUÊ" (necessidades do clientes – linhas da matriz) e "COMO" (atributos e requisitos funcionais – colunas da matriz). A relação entre "O QUÊ" e o "COMO" é realizada dentro da matriz. Os itens "COMO" são relacionados entre si e as correlações são estabelecidas, através de julgamento e análise, auxiliados pelo posicionamento em relação à concorrência e graus de importância pré-definidos.

Cada um dos elementos "O QUÊ" irão necessitar de definições futuras. A lista é refinada para um próximo nível de detalhamento, apenas atribuído-se um ou mais "COMO" para cada "O QUÊ". Este é um processo comum às

várias outras metodologias de tomada de decisão utilizada em engenharia e administração de empresas, NEUFVILLE (1990) e BRONSON (1983).

O QFD permite que os requisitos do cliente sejam mapeados e transportados para as características globais do produtos e seus requisitos funcionais. Estes requisitos funcionais possuem características que podem ser medidas e consequentemente podem ser avaliadas no produto acabado. No exemplo da cadeira, a necessidade do cliente cadeira confortável pode ser traduzida nos requisitos funcionais: ângulo entre o encosto e o assento, espessura da forração, etc.

Os itens que são colocados nas colunas do "COMO" representam com maior riqueza de detalhes o produto, do que aqueles encontrados inicialmente nas linhas do "O QUÊ", mesmo que, na maioria das vezes, estes necessitem de melhor posicionamento futuro, por ainda não ser possível utilizá-los diretamente no projeto. Este refinamento das definições é feito simplesmente tratando os "COMO" como sendo "O QUÊ", sendo detalhados em uma nova lista de "COMO". Este processo é mostrado esquematicamente na Figura 2.9 abaixo.

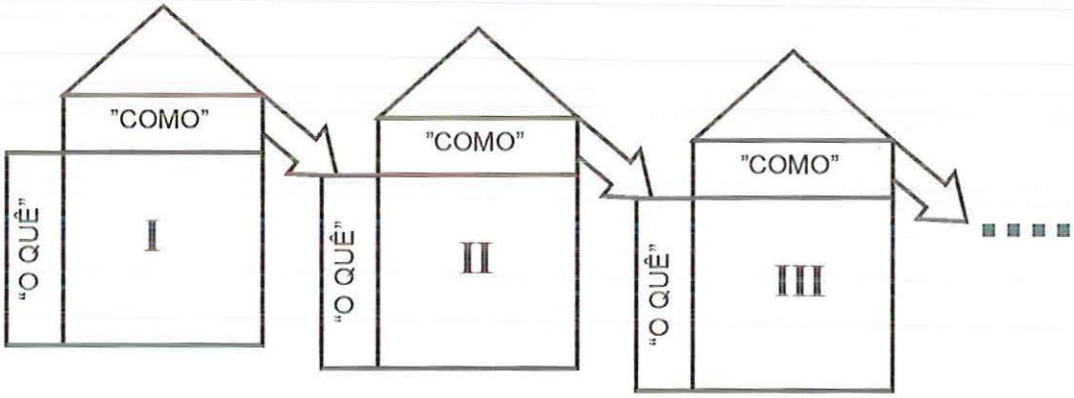

Figura 2.9 – Representação esquemática do QFD, HAUSER & CLAUSING (1995).

Desta maneira o QFD permite o ajustamento dos requisitos funcionais de um produto ("O QUÊ") com as estruturas de projeto ("COMO"). No entanto, a cada nível de refinamento alguns dos "COMO" podem afetar mais de um

"O QUÊ", algumas vezes de maneira adversa. O projetista deve minimizar estes efeitos negativos do "COMO", selecionando aqueles que não estão em conflito com o completo atendimento dos requisitos do cliente, ou da maneira mais efetiva possível.

Nesta década, segundo CHENG (1995), companhias japonesas obtiveram resultados surpreendentes em seus projetos de produtos, utilizando o QFD. Um dos pontos chave do QFD é a sua habilidade em proporcionar um melhor entendimento das necessidades do cliente e inseri-las dentro do projeto e da manufatura do produto. Este modelo também se mostrou adequado para processos de engenharia concorrente, onde há a participação conjunta de elementos de marketing, projetistas, engenheiros de produto e manufatura.

2.1.5. Considerações práticas da utilização do QFD no desenvolvimento de produtos

Deve-se considerar o Desdobramento da Função da Qualidade ou QFD dentro da evolução do processo de desenvolvimento de produtos e serviços, como o primeiro método estruturado e sistematizado para orientar o processo e a execução das tarefas que envolvem desde a concepção até a colocação do produto no mercado, garantindo a transformação das necessidades e desejos dos clientes em produtos que efetivamente os satisfaçam.

Antes do aparecimento do QFD, a preocupação principal sobre o desenvolvimento de produtos era centrada no aperfeiçoamento de ferramentas que garantissem a execução sequencial de todas as tarefas envolvidas (o sistema PERT – CPM, por exemplo). O desenvolvimento de produtos era visto corno um esforço criativo, envolvendo um grande número de atividades não estruturadas, sujeito a uma certa probabilidade de sucesso comercial.

Para uma melhor compreensão do QFD é necessário entender os conceitos de *qualidade positiva* (ou ativa) e *qualidade negativa* (ou passiva). Qualidade negativa refere-se a qualquer aspecto do produto expresso pelas reclamações dos clientes pelos canais existentes. Porém, mesmo quando todas as qualidades negativas forem superadas (conceito de "defeito zero") não significa que o sucesso da empresa esteja garantido. Pois existem ainda necessidades não expressas latentes nos clientes (ou qualidades positivas), normalmente difíceis de quantificar por serem colocadas de forma vaga e variável. É possível inferir quais os itens que devem assegurar e melhorar os produtos existentes, porém para novos produtos tem-se que aprender quais características devem ser asseguradas. No QFD a atenção é direcionada para entender tanto as qualidades positivas como as já existentes e requeridas pelo cliente.

De maneira um pouco mais específica o QFD é um conjunto de matrizes cujo objetivo é focalizar e coordenar as habilidades dentro da organização para desenvolver produtos que não apenas eliminem as razões das reclamações dos clientes, mas também forneçam uma resposta ativa aos seus desejos e expectativas (inclusive aqueles que ainda não estão claros na sua mente), gerando produtos que os clientes venham a desejar comprar.

O QFD se estrutura para garantir que os desejos mais importantes do cliente sejam entendidos nos termos utilizados pelo próprio cliente. Tais desejos são desdobrados (deployed) em características técnicas mensuráveis do produto ou serviço (fase 1: planejamento): que por sua vez são ativadas nas especificações de componentes e partes (fase 2: partes); na adequação dos processos de produção (fase 3: processos) e, por fim, em padrões de procedimento no nível das operações (fase 4: operações). Esta sequência é mostrada esquematicamente na Figura 2.7.

Em outras palavras, o QFD é um método para o desenvolvimento de qualidade que visa a satisfação dos clientes mediante a tradução de suas

necessidades mais importantes em características técnicas, e estas em parâmetros a serem utilizados em todo o processo de produção e distribuição.

Considerando o conceito de qualidade em sua forma mais ampla, ou seja, a satisfação do cliente, verifica-se que o QFD também é uma forma de garantir um projeto de qualidade enquanto o produto ainda está nos estágios iniciais de seu projeto, AKAO (1990). É pressuposto do QFD entender a qualidade como um fazer certo desde a primeira vez, e isto significa focar qualidade no projeto, pois a qualidade na produção será em grande parte conseqüência do projeto. A qualidade que depende diretamente das condições de produção representa a menor parte dos problemas de qualidade que as empresas enfrentam, já que a maior parte reside nas falhas de projeto.

Ao identificar que o processo de desenvolvimento de produtos apresenta, em sua forma tradicional, poucas chances de atender seu principal objetivo que é a efetiva satisfação das necessidades e desejos dos clientes. MERLI (1990) apud ABREU (1997) aponta as principais causas que levam as empresas a falhar, expostas na Tabela 2.1 a seguir. Cabe salientar que o método QFD atende a cada um dos pontos citados.

Tabela 2.1 – Razões para o fracasso no desenvolvimento de produtos, MERLI (1990) apud ABREU (1997).

RAZÕES PARA O FRACASSO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS	
PRINCIPAIS CAUSAS	SEUS RESULTADOS
• Falta de compreensão das necessidades dos clientes, os quais geralmente expressam seus desejos de forma indefinida e fragmentada, e por isso suas expectativas são normalmente vagas e não formuladas;	• Compreensão insufuciente das qualidades requeridas pelos clientes;
• Dificuldade de transformar necessidades expostas verbalmente em expressões numéricas, para se especificar um produto;	• Ênfase na qualidade de características mensuráveis erroneamente consideradas importantes;
• Transferência incompleta de informações do início de processo de desenvolvimento (marketing, por exemplo) ao seu fim (produção);	• Decisões importantes sobre produtos são delegadas a técnicos de pouca visão do mercado e, às vezes, do processo (principalmente decisões relacionadas à produção;
• Dificuldade em determinar e quantificar as características prioritárias a serem desenvolvidas, pontos críticos a serem solucionados e em comparar os produtos com os concorrentes.	• Pouca compreensão da importância crítica dos aspectos relacionados com a engenharia de produção.

O QFD também pode ser considerado um efetivo instrumento para implantação de *benchmarking* para o produto ou serviço, pois relaciona as comparações do produto com os concorrentes mediante avaliações técnicas (geralmente, testes em laboratórios e processos de engenharia reversa de itens que definem a qualidade efetiva e técnica do produto) com a avaliação competitiva (as comparações realizadas pelos próprios clientes da

empresa em termos da qualidade percebida, utilizada pelo cliente no momento de realizar a compra).

Segundo ABREU (1997), os efeitos positivos da utilização do QFD dentro de uma organização são vários, em função do número de informações que são manipuladas e ordenadas pelo método, de forma que os seguintes resultados secundários são obtidos:

- Na área de marketing, gera o aprimoramento das técnicas para posicionamento de produtos e segmentação, garantindo uma objetiva aproximação do cliente;
- permite à alta gerência um controle mais efetivo sobre as responsabilidades por cumprimento das tarefas e acompanhamento dos projetos de desenvolvimento de produtos, por vincular as metas estabelecidas no planejamento estratégico da empresa ao programa de desenvolvimento.

O QFD tem se mostrado particularmente eficiente às empresas que adotam conceitos de desenvolvimento simultâneo, pois assume o papel de linha-guia (definida a partir da "voz do cliente") para todas as áreas envolvidas no processo de desenvolvimento, conforme o esquema da Figura 2.7.

Resumindo, o QFD torna possível à empresa:

- Definir especificações de produto para atender tanto aos requisitos do cliente como aos desenvolvimentos necessários para superar a competição;
- Garantir a consistência entre os requisitos do cliente e os das características mensuráveis do produto, do processo de montagem, dos componentes utilizados e das matérias-primas;
- Tornar evidentes a todos os membros envolvidos com o desenvolvimento de produtos as relações entre as características do produto e a contribuição de cada um;

- Aumentar a consistência entre o planejamento e o processo de produção;e
- Eliminar erros de interpretação que ocorrem no processo de desenvolvimento, principalmente nos estágios iniciais.

2.2. O desenvolvimento de alternativas em problemas de análise de decisão

Em função dos objetivos apresentados para o desenvolvimento do presente trabalho, deve-se dar especial atenção, dentro do desenvolvimento de um projeto de sistema de manufatura, à geração de alternativas para a solução dos problemas propostos.

O processo de criação e desenvolvimento de projetos, como foi discutido no item 2.1 do presente trabalho é formado por uma sequência de fases e em cada uma destas o projetista obrigatoriamente deve realizar escolhas entre as mais diversas alternativas. Ou seja, pode-se observar a atividade de projeto como uma sequência de tomadas de decisão, que podem ser grandes ou pequenas dentro da escala do projeto em questão.

Dentro do método científico existem várias disciplinas voltadas para ao auxílio da tomada de decisão, sendo que o conjunto destas disciplinas recebe um título de ciência específico, denominado de *Ciências de Decisão*, ou ainda de *Teoria da Análise de Decisão*, BROWN (1970).

Segundo ARBEL (1982), a análise de decisão é a aplicação sistemática da teoria de decisão a problemas de escolha entre alternativas. Como tal, esta se desenvolveu ao longo das duas últimas décadas em uma metodologia poderosa e madura. Esta pode tratar de um grande número de problemas, e existem muitas técnicas desenvolvidas para assessorar a tomada de decisão na escolha de alternativas competitivas.

A análise de decisão deve auxiliar na especificação de alternativas (geração de opções) e na designação de valores para estas alternativas (resolução de escolhas). Apesar da constatação de que, na prática, a

maior parte do tempo gasto nos estudos para a análise de decisão é para a especificação das alternativas pertinentes à resolução do problema em questão, existe uma completo desinteresse dentro da chamada ciência de decisão de ferramentas para a especificação de problemas, WATSON & BROWN (1978).

Ainda, WATSON & BROWN (1978) sugerem que isto acontece pois os pesquisadores desta área de ciência entendem a geração de opções como um ato criativo aleatório e, que por este motivo, não pode ser normatizado através de técnicas específicas. Este posicionamento pode ser considerado como sendo no mínimo limitado, uma vez que a literatura da psicologia está repleta de estudos que mostram que, mesmo sob as circunstâncias mais favoráveis, os indivíduos que tomam decisão exibem um comportamento abaixo do normal e tentem a visualizar um campo muito pequeno de alternativas, JONES & DECKRO (1993). Isto mostra que uma teoria de decisão para ser aplicada com sucesso na prática, deve avaliar todos os aspectos de um problema, e não apenas aqueles que podem ser tratados através da matemática.

Embora a literatura relacionada com as disciplinas que formam a chamada ciência da decisão não apresente muitas possibilidades para a geração de opções para a resolução de um determinado problema, existem outras disciplinas que apresentam estudos relevantes neste campo. Assim, por exemplo, WEBER & BORCHERING (1993) demonstram a influência das condições de informações sobre a habilidade de um indivíduo em gerar opções e os seus resultados mostram que a maneira mais eficiente é focalizar a atenção sobre os objetivos para gerar opções.

O propósito deste item da revisão bibliográfica é explorar a geração de opções na resolução de um problema de maneira genérica e como estes procedimentos podem ser utilizados no projeto de sistemas de manufatura. A meta não é providenciar uma solução definitiva para este problema, mas examinar os fatores que mais afetam a geração de opções no projeto de sistemas de manufatura e então sugerir um método para auxiliar engenheiros e gerentes de manufatura nesta difícil tarefa.

2.2.1. Uma estrutura unificada para a geração de opções.

O processo de tomada de decisão é constituído por uma sequência de fases, que se inicia através do reconhecimento do problema que deve ser resolvido e termina com um plano de ação para isto, ULVILA & BROWN (1982). Uma visualização esquemática desta afirmação é apresentada na Figura 2.10 de ARBEL & TONG (1982). Os passos 5 e 6 são chamados de escolha de soluções e são o domínio da maior parte das disciplinas que forma a ciência de decisão. Os passos de 1 até 4 são denominados de fase de geração de opções, e este item se preocupa em discutir quais são os fatores que influenciam na tarefa de gerar um conjunto apropriado de alternativas para a solução de um determinado problema.

Segundo KORHONEN (1992), o desenvolvimento de qualquer metodologia para sistematizar o processo de geração de opções deve avaliar os seguintes itens:

- A importância das metas e objetivos;
- A mensuração dos principais fatores de influência sobre a decisão;
- O impacto do questionamento e da estrutura;
- A habilidade de identificar os eventos críticos e
- A natureza essencial de iteração e realimentação.

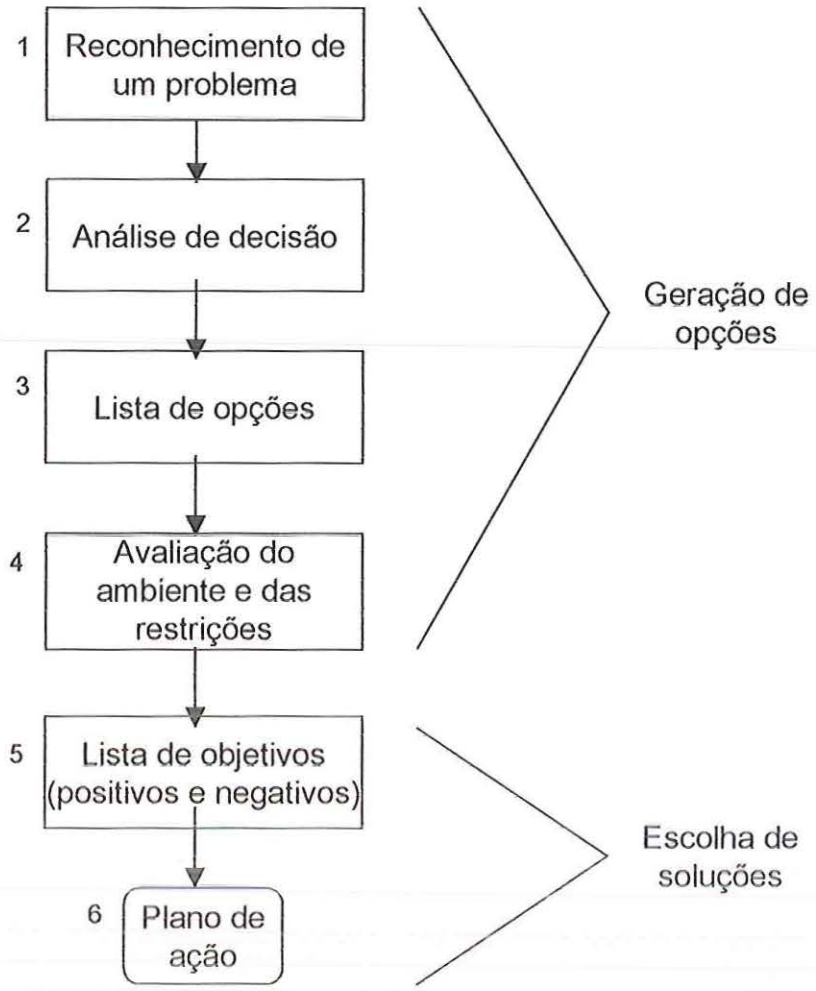

Figura 2.10 – O processo de tomada de decisão, ARBEL & TONG (1982).

A metodologia descrita a seguir foi basicamente proposta por ARBEL & TONG (1982) e mostra uma tentativa de integrar o processo de geração de opções no processo de tomada de decisão. Esta permite que os indivíduos envolvidos consideram cada um dos seus objetivos e ao mesmo tempo estruturam cuidadosamente os elementos que influem no processo de decisão. Esta metodologia obriga os seus usuários a considerar diversos aspectos do problema, e utiliza análise de sensibilidade para concentrar a atenção nos eventos mais importantes. Finalmente, esta permite realimentação global e local para assegurar uma visualização das opções disponíveis.

Esta metodologia é apresentada de maneira gráfica através da Figura 2.11. Esta consiste na avaliação dos fatores de decisão (passos de 1 até 4), seguida pela escolha de opções (passos de 5 até 7).

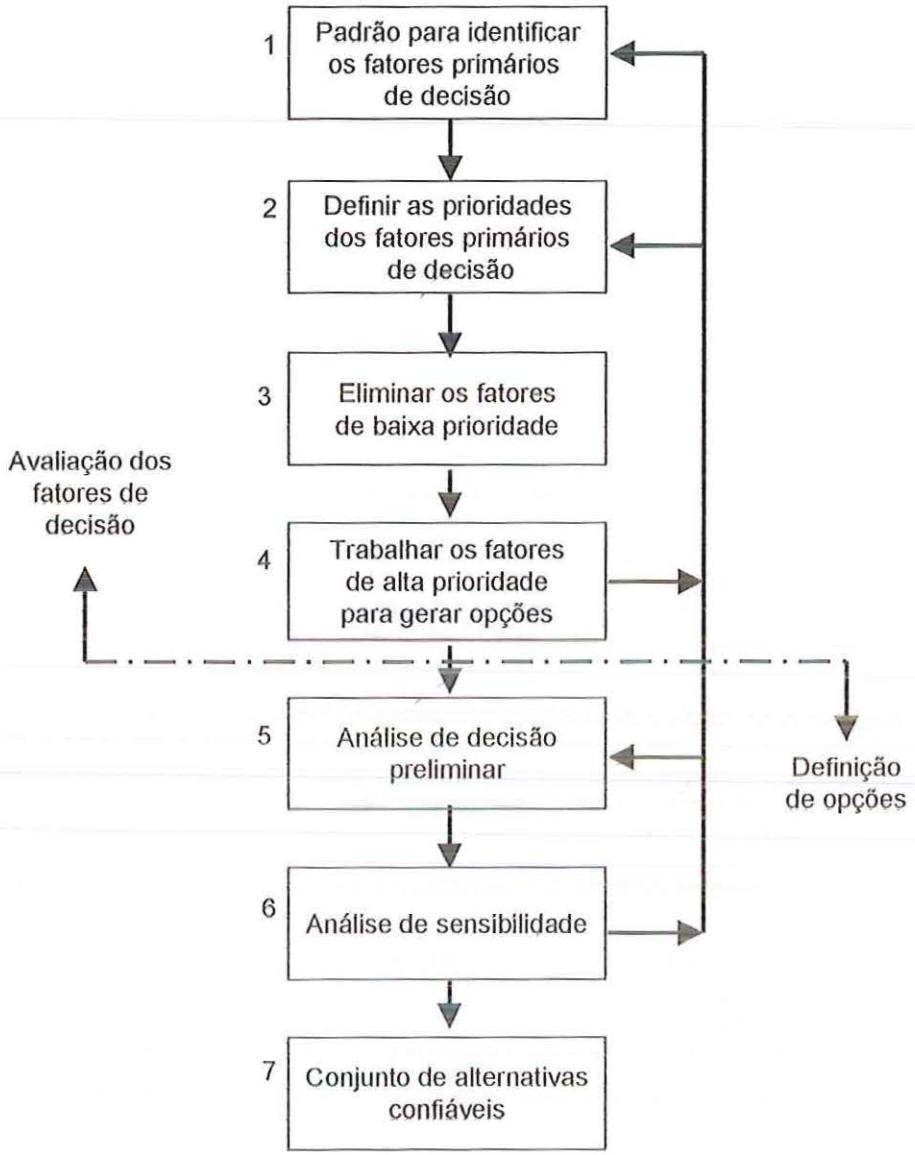

Figura 2.11 – Geração de opções, ARBEL & TONG (1982)

No primeiro estágio são determinados claramente todos os fatores de decisão relevantes. Estes são organizados hierarquicamente e, então, realiza-se uma avaliação para indicar quais são os fatores dominantes com relação aos objetivos iniciais. No segundo estágio utiliza-se a informação

gerada no primeiro estágio para desenvolver uma análise de decisão preliminar. Neste item, se dará atenção às implicações das opções preliminares, com especial atenção à sensibilidade de um conjunto de opções às modificações nas informações.

Uma característica extremamente importante desta estrutura é o mecanismo de realimentação, tanto global como local. Também, utiliza-se análise de sensibilidade para destacar as partes críticas do problema e, então, utilizar este conhecimento para modificar a interpretação dos fatores de maior prioridade (realimentação local), ou para modificar a inteira estrutura dos fatores (realimentação global). O resultado desta aproximação iterativa é um conjunto robusto de alternativas que podem ser analisadas detalhadamente, utilizando as ferramentas disponibilizadas pelas disciplinas da análise de decisão.

A seguir são discutidos cada um dos passos individuais que formam cada estágio do processo de geração de opções para a resolução de um determinado problema.

2.2.2. Padrão para identificar os fatores primários de decisão

O primeiro passo dentro da geração de opções para a resolução de um problema é listar todos os fatores de decisão que possam ter alguma aderência ao problema e à sua solução. A construção deste padrão permite a classificação estruturada dos fatores relevantes ao problema e o seu entendimento KORHONEN et ali (1992).

Após a construção desta lista deve-se estabelecer a hierarquia entre os fatores relevantes para a decisão. Dentro desta hierarquia o ponto máximo deve ser ocupado pelos objetivos e o níveis abaixo devem conter os elementos necessários para se descrever todo o problema. A ordem destes fatores deve refletir uma relação lógica de causa e efeito e o número de elementos em cada nível é afetado pela quantidade de detalhes desejada, isto é, pelo número de objetivos que devem ser atingidos BODILY (1981).

Esta estrutura hierárquica proporciona os alicerces para um padrão genérico para a geração de opções. A forma geral deste padrão é apresentada na Figura 2.12. A generalidade deste padrão depende de cada situação e, é claro, do contexto onde o problema se encontra.

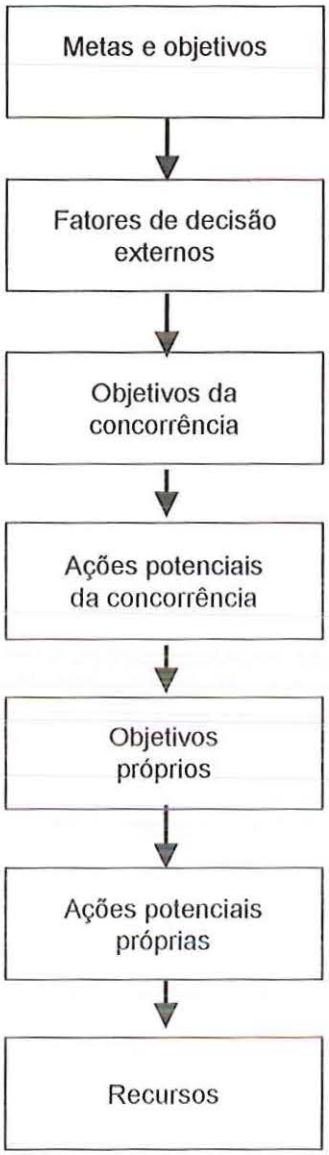

Figura 2.12 – Padrão genérico para a classificação hierárquica dos fatores de decisão, ARBEL & TONG (1982)

A meta de um problema de decisão é usualmente obtida através do entendimento do contexto. Isto pode incluir afirmações como: "aumentar

a participação de mercado", "manter a balança comercial", ou, por exemplo, em um contexto militar, "resolver a questão dos reféns". Os fatores de decisão externos podem incluir elementos como o preço de matérias-primas, a taxa de inflação, atividades políticas e outros fatores que podem afetar o atendimento das metas.

Ao se considerar os objetivos da concorrência, é necessário considerar os seus pontos fortes. Isto é, o quê os competidores querem fazer, e os seus pontos fracos, isto é, quais são as situações que estes querem evitar. Em muitos casos entender quais são os pontos fracos de seus competidores é mais importante do que entender os seus pontos fortes. A avaliação das ações potenciais da concorrência também deve se preocupar com os seus pontos fortes e fracos, relacionados com as ações necessárias para suportar as suas metas, MAHONEY (1997).

Ao considerar os seus próprios objetivos, o executivo deve seguir um formato similar àquele utilizado para avaliar os objetivos da concorrência. Ao considerar suas próprias ações potenciais, este deve explorar todas as áreas nas quais os recursos serão mobilizados para atender os seus objetivos, ou responder à concorrência. Ao se listar os recursos o executivo deve considerar os elementos que darão suporte às ações gerais mencionadas anteriormente, como máquinas, equipamentos e pessoal especializado.

2.2.3. Definição de prioridades para os fatores primários de decisão

Depois da construção do padrão e da hierarquização dos fatores de decisão, a importância relativa de cada elemento na hierarquia deve ser definida. ARBEL & TONG (1982), afirmam que *o "processo analítico de hierarquia"* de SAATY (1980) é a ferramenta ideal para isto.

Para ilustrar como este processo funciona, considere a hierarquia primitiva mostrada na Figura 2.13. Aqui o problema é determinar a importância relativa entre três atividades com relação a uma meta geral.

Tradicionalmente o resultado desta atividade seria uma soma de pesos p_1, p_2 e p_3, onde $p_1 + p_2 + p_3 = 1$. O método mencionado acima envolve uma completa comparação das atividades, duas a duas. O executivo é submetido a questionamentos do seguinte tipo:

"Considerando atividade 1 e atividade 2, qual contribui mais para o atendimento da meta inicial? "

"Qual é a força desta contribuição?"

Figura 2.13 – Uma ilustração de hierarquia, ARBEL & TONG (1982)

A primeira parte desta questão envolve apenas a ordenação dos objetos e comparação, enquanto que a segunda parte necessita do estabelecimento de um ranking cardinal. Para facilitar o julgamento sobre "o peso da contribuição", deve-se definir a priori uma escala, como, por exemplo, a da Tabela 2.2, apresentada abaixo.

Tabela 2.2 – Escala de comparação, ARBEL & TONG (1982).

Intensidade de importância	*Definição*	Explicação
1	Importância igual	Duas atividades contribuem igualmente para o atingimento do objetivo
3	Fraca importância de uma sobre a outra	Experiência e julgamento favorecendo levemente uma atividade sobre a outra
5	Importância essencial ou forte	Experiência e julgamento favorecendo fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito forte ou comprovada	Uma atividade é muito mais importante do que a outra; seu domínio é demonstrado na prática
9	Importância absoluta	A importância de uma atividade sobre a outra atinge o maior grau possível de comparação
2,4,6,8	Valores intermediários	
Valores recíprocos	Se a atividade *i* possui um dos valores de importância acima quando comparada a atividade *j*, então *j* possui o valor recíproco de importância quando comparada a *i*	

Questões, como aquelas expostas acima, são feitas para todas as combinações pareadas possíveis. As respostas são sumarizadas em matrizes de tamanho n x n , onde n é o número de elementos comparados. Cada elemento, a_{ij}, desta matriz mostra o domínio do i-ésimo elemento sobre o j-ésimo elemento. Assim, se a atividade 1 é julgada pelo executivo como fortemente dominante sobre a atividade 2, então, a_{12} é definido com sendo igual a 5. Nesta situação de domínio, a_{21} é o recíproco a a_{12} e deve receber o valor 1/5. A matriz de comparação é uma matriz de reciprocidade, e como resultado principal pode-se recuperar os pesos necessários para a tomada de decisão.

Este processo deve ser repetido para todos os níveis da hierarquia e para todos os elementos nestes níveis, fornecendo um conjunto completo de prioridades globais e locais. A prioridade local indica a importância relativa de um elemento em particular com um outro elemento no nível imediatamente acima. As prioridades globais são calculadas após as

prioridades locais serem dadas e indicam o impacto de um elemento em particular sobre todo o objetivo geral (o ápice da hierarquia).

2.2.4. Geração preliminar de opções

O resultado dos dois passos anteriores é a descrição hierárquica dos fatores que influenciam no problema de decisão e um conjunto de pesos que definem as prioridades relativas entre estes fatores. Então, a geração de opções ajuda a destacar os fatores mais importantes e os apresenta ao executivo. Como este processo foi conduzido através de um exercício estruturado e detalhado, pode-se agora gerar um conjunto preliminar de ações para iniciar-se a resolução do problema. Mas, ainda pode ser que este detalhamento de opções seja muito superficial para a resolução completa do problema. Se isto acontecer o processo de estruturação deve ser repetido, no seu todo ou em parte.

Com o conjunto inicial de opções o executivo deve iniciar a construção de uma árvore de decisão. Este procedimento irá permitir a avaliação do conjunto de opções e delinear o plano de ação. Uma vez que estejam estabelecidos o conjunto de opções e o plano de ação suas consequências devem ser exploradas. A análise de sensibilidade é a maneira indicada para realizar está tarefa, pois permite a identificação das possíveis áreas fracas do plano de ação que está sendo construído.

2.2.5. Análise de sensibilidade

A função da análise de sensibilidade é de ressaltar na árvore de decisão inicial as áreas do problema que ainda não foram completamente entendidas, MATTOS (1989). A principal idéia aqui é que o processo de busca dos eventos mais sensíveis pode gerar novas opções, que poderão reduzir a sensibilidade ou até mesmo eliminá-la.

O evento representado na Figura 2.14 ilustra esta idéia. Nesta figura,

P1 é a probabilidade do evento cujo o valor de saída é dado por V1 e P2 é a probabilidade do evento cujo o valor de saída é dado por V2.

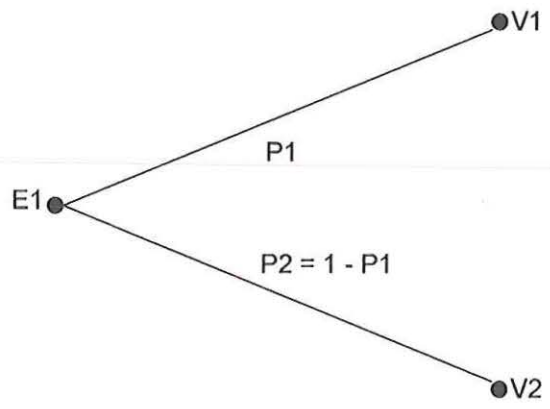

Figura 2.14 – Esquema básico de um evento probabilístico, MAGEE (1964).

O valor esperado E_1 é dado por:

$E_1 = P_1.V_1 + P_2.V_2$.

E como $P_2 = 1 - P_1$, tem-se: $E_1 = P_1.(V_1 - V_2) + V_2$.

Desta forma, o valor esperado E_1 é uma função linear da probabilidade P_1, como mostrado na Figura 2.15, para $V_1 > V_2 > 0$. A inclinação da linha do valor esperado é simplesmente a diferença entre V_1 e V_2, e quanto maior a diferença maior será a inclinação.

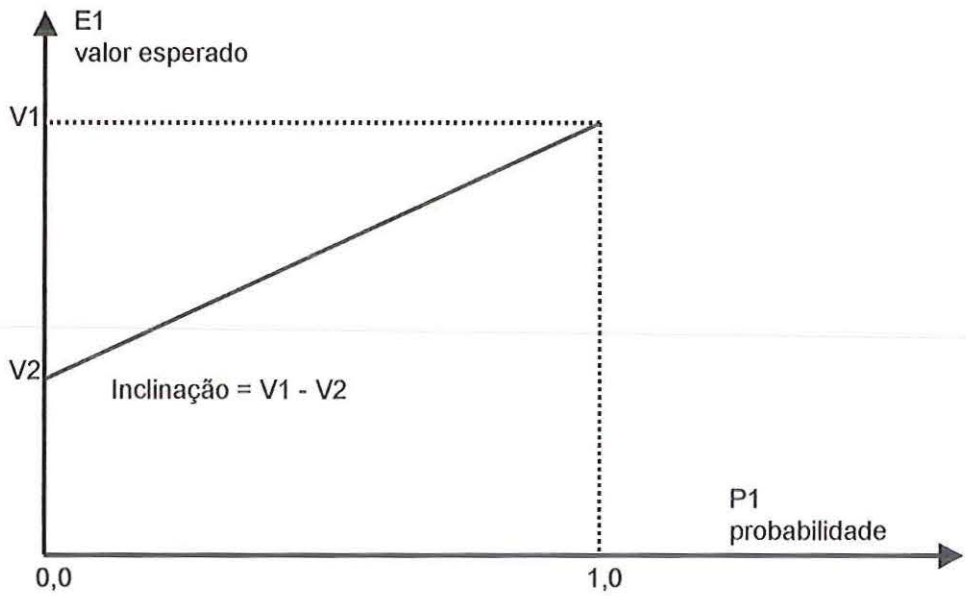

Figura 2.15 – Valor esperado e probabilidade, ARBEL & TONG (1982).

Seja o evento E_2, com a equação de probabilidades dada por:

$E_2 = q_1.(U_1 - U_2) + U_2$.

A Figura 2.16 mostra a dependência da probabilidade dos valores esperados dos dois eventos E_1 e E_2. Assumindo que $U_2 < V_1$; a relação entre U_2 e V_2 não é importante neste ponto da discussão. É evidente que existem valores P e q que irão resultar em ambos os eventos com os mesmo valores esperados e, possivelmente, com a mesma preferência. No entanto, em q_1* o evento E_2 tem a mesma preferência do que E_1 (relacionado com a probabilidade P_1*), mas qualquer pequeno erro na estimativa de q_1* irá resultar em mudanças significativas no valor esperado para este evento, em função da maior inclinação de E_2 em relação a E_1, ou seja, o evento representado por E_2 é muito mais sensível a erros de estimativa do que o evento representado por E_1.

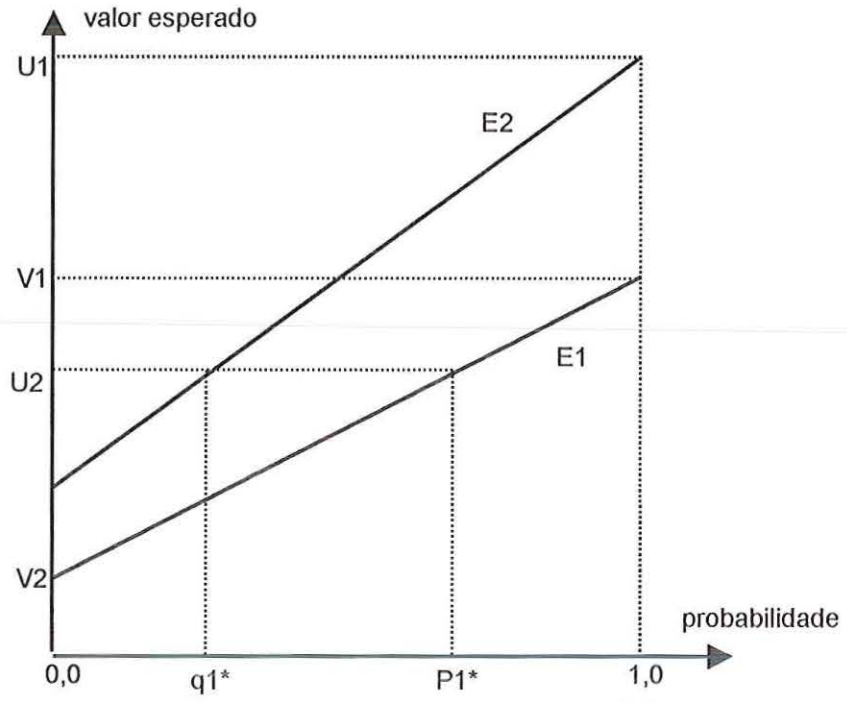

Figura 2.16 – Comparação entre dois eventos, ARBEL & TONG (1982)

Esta forma de avaliação permite que se acessem os eventos cujos os erros de estimação podem afetar significativamente o plano de ação. Este processo reduz o tempo de argumentação com questões do tipo "E se ...?", ou "O quê aconteceria se....?" em cada possível evento, concentrando a atenção nos eventos que realmente possuem sensibilidade às alterações da configuração de decisão. Além disso, a identificação dos eventos sensíveis poderá levar à análise para a redução da sensibilidade, ou até mesmo, a eliminação dos destes eventos. Isto requer iteração com o conjunto de opções básicas e o resultado pode ser o aumento, a diminuição, ou até mesmo o descarte deste conjunto.

2.2.6. Realimentação

O elemento final deste processo é a realimentação. Este integra os dois estágios e os seus passos dentro do processo de geração de opções. Na

maioria das aplicações das ferramentas de tomada de decisão, estas são utilizadas em um único procedimento e muitas são estruturadas de maneira que os agentes não possam revisar ou modificar suas colocações a respeito do problema que está sendo tratado.

Na estrutura proposta acima há três ciclos de realimentação. O primeiro fornece ao agente um mecanismo para utilizar a hierarquia priorizada, ajudando-o a restabelecer prioridades e reestruturar os elementos do seu problema de decisão (é o ciclo entre o passo 4 e os passos 1 e 2 da Figura 2.11). A segunda maneira de se modificar as opções existentes é após a análise de sensibilidade (o ciclo entre os passos 5 e 6). O terceiro ponto envolve uma significativa reestruturação e reavaliação dos elementos básicos de decisão (o ciclo que vai do passo 6 e os passos 1 e 2), que espera-se acontecer apenas sob circunstâncias especiais.

O paradigma aqui exposto ressalta a natureza iterativa dos processo de geração de opções e, consequentemente, de análise de decisão. Através de constante atualização e melhoria da percepção do problema, os agentes de decisão irão assegurar um conjunto confiável e estável de alternativas.

No item a seguir serão apresentados os elementos básicos que formam um processo de manufatura e quais são os atributos básicos, ou opções, que estes processos devem responder.

2.3. Elementos básicos para a formação de processos de fabricação.

Neste item da revisão bibliográfica serão apresentadas as definições básicas dos elementos que compõe um sistema de manufatura, voltado para a indústria metal-mecânica, e a rotina que deve ser implementada para que este sistema se adeque às idéias da Gestão da Qualidade Total (TQM).

2.3.1. Definição de processo, operação, seqüência e rota de fabricação.

Um dos objetivos principais do presente trabalho é discutir quais são os aspectos relevantes do projeto de um processo de fabricação. Assim, torna-se imperativo que antes de se realizar esta discussão, defina-se claramente o quê é um processo de fabricação e quais são os subsistemas que o compõe e lhe dão forma.

A definição que se pode chamar de clássica a respeito do quê é um processo de fabricação pode ser encontrada em BALAKSHIN (1983), mas se repete ao longo dos anos em textos, também famosos, como NIEBEL (1989), KALPAKJIAN (1991) e DAVIS (1999). Esta definição pode ser resumida da seguinte forma:

"Um processo de produção é todo o procedimento utilizado para converter os produtos da natureza em artigos para o uso da humanidade. Um processo de produção é composto por vários estágios de transformação das mais diversas matérias-primas em artigos acabados. Estes estágios de transformação são denominados de processos de fabricação e estão intimamente relacionados com o estado qualitativo da matéria-prima (matéria-prima, blanque, peças ou máquinas).

Dentro do processo de fabricação a matéria em transformação é submetida a várias operações de processamento, que no caso dos processos de fabricação mecânica podem ser com ou sem remoção de cavaco. Assim, ao termo operação de fabricação relaciona-se toda a

etapa completa de um processo de fabricação, que pode ser realizada por diferentes operários e até mesmo em locais diferentes. Uma operação é a menor divisão de um processo de fabricação dentro da programação da produção, da atividade gerencial e da contabilidade.

Para o completo entendimento da forma dos processos de fabricação mecânica faz-se necessária mais uma sub-divisão do conceito de operação, que é a operação elementar. A operação elementar pode ser visualizada como sendo toda a etapa de obtenção de uma nova superfície, ou combinação de superfícies, através do trabalho de uma única ferramenta."

Durante os anos 70 a relação entre mercados consumidores e meios de produção sofreu uma modificação forte, que certamente modificou a história econômica do Século XX. Os mercados consumidores deixaram de ser passivos e passaram a ser compradores, no exato momento em que a oferta de produtos superou a demanda existente. Este novo panorama econômico modificou a forma com que a concorrência entre as empresas era realizada e a partir deste momento passou-se a valorizar a eficiência em lugar do volume de produção, FALCONI (1989).

Toda esta nova conjuntura trouxe novas prioridades para a forma com que os processos de produção deveriam ser conduzidos e depois estabelecidos. Neste momento passou-se a valorizar uma visão sistêmica dos processos de produção, que se observa claramente nos textos dos autores que mais se destacaram neste assunto, como JURAN (1992), SHINGO (1996) e OHNO (1997).

Assim, torna-se fácil encontrar definições como: *"Processo é uma série de ações sistemáticas dirigidas à realização de uma meta."*, de JURAN (1992), que pode ser representada pela Figura 2.17 abaixo:

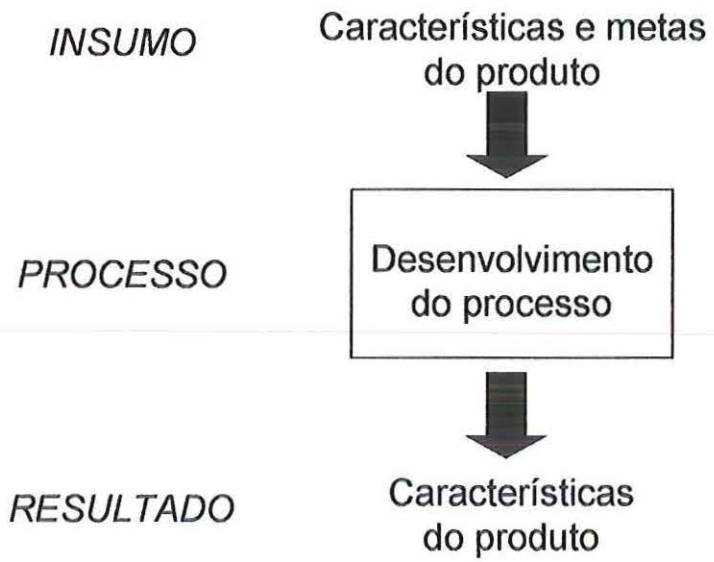

Figura 2.17 – Diagrama de insumos e resultados (JURAN 1992).

Já SHINGO (1996) define o processo de produção como sendo uma rede de processo e operações.. A Figura 2.18 mostra esta visão dos processos de produção.

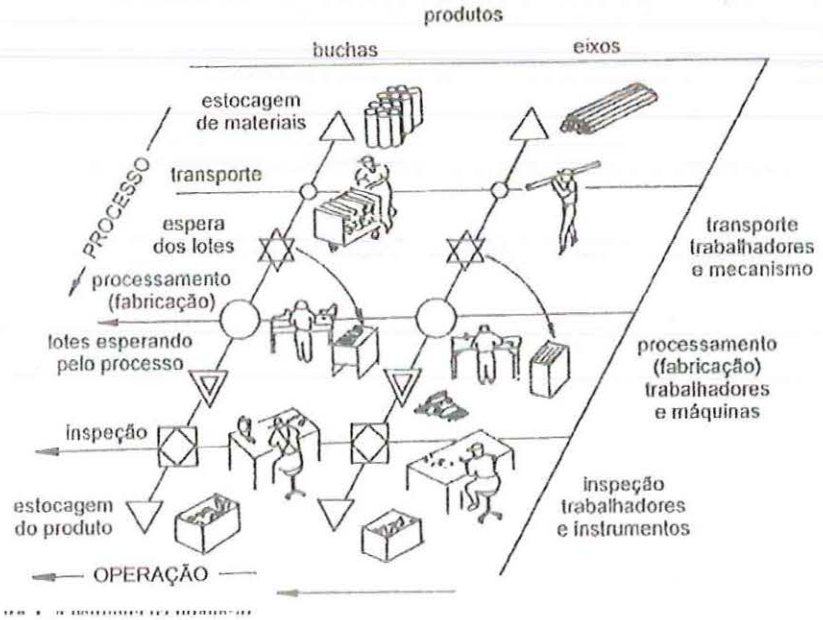

Figura 2.18 – A estrutura de produção segundo SHINGO (1996).

Desta forma, o processo de produção é visualizado como o fluxo de materiais no tempo e no espaço, com o objetivo de transformar a matéria-

prima em componentes semi-acabados e daí em produtos acabados. Por sua vez, as operações devem ser visualizadas como cada tarefa realizada para efetivar esta transformação. Nesta visão é essencial a interação entre o fluxo de materiais, equipamentos e ações dos trabalhadores no tempo e no espaço. Esta maneira de tratar o processo de produção é um dos pontos principais daquilo que tornou-se conhecido como o Sistema Toyota de Produção.

Os pontos discutidos neste item do texto mostram que invariavelmente os processos de fabricação seguem uma hierarquia de terminologia e critérios, que varia em função do momento histórico e da filosofia de trabalho escolhida. Mas uma avaliação cuidadosa destas filosofias mostra que todos seguem as mesmas orientações básicas a respeito das características gerais de um processo de produção ou fabricação e as suas respectivas operações, JURAN (1992), SHINGO (1996), DAVIS (1999), entre tanto outros. Assim, todo o processo de produção e suas operações devem seguir as seguintes orientações:

a) Orientado para metas.
b) Sistemático.
c) Capaz.
d) Legítimo, ou seja, deve evoluir através dos canais autorizados, ostentando a aprovação daqueles a que foram delegadas as responsabilidades associadas.

A Gestão da Qualidade Total, que foi a filosofia de gestão adotada pela maioria das empresas no mundo para enfrentar a mudança do mercado consumidor já citada anteriormente, possui uma metodologia própria para inserir em seus produtos e em seus processos os pontos enumerados acima. Esta metodologia é o desdobramento da função da qualidade e foi enunciada principalmente por JURAN (1992). O desdobramento da função da qualidade é a idéia de que a qualidade do produto só pode ser atingida se a qualidade for inserida em todas as etapas do seu ciclo de vida. Esta idéia

pode ser muito bem ilustrada por uma figura denominada *A Espiral da Qualidade*, que também estabelece a idéia que o ciclo de vida de um produto não é estático mas sim dinâmico, ou seja, dentro da gestão da qualidade total implícito ao ciclo de vida de um produto a melhoria contínua. A Figura 2.19 a seguir mostra esquematicamente a espiral da qualidade, segundo JURAN (1992).

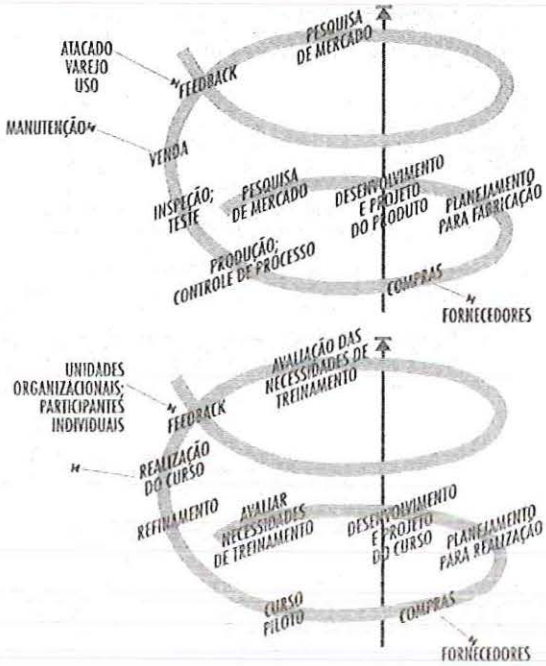

Figura 2.19 – A espiral da qualidade segundo JURAN (1992).

A idéia do desdobramento da função da qualidade é um ponto de transição marcante dentro da teoria da gestão da qualidade total. Até o momento de sua apresentação a qualidade total era trabalhada segundo a visão de três autores, DEMING (1990), ISHIKAWA (1993) e FEIGENBAUN (1991) e que de maneira resumida acreditavam que a qualidade só poderia ser atingida através do controle intensivo do trabalho. Para isto basta avaliar nos enunciados destes três autores (os 14 princípios administrativos e os 8 obstáculos para a gestão da qualidade de DEMING (1990); os 6 pontos do programa de qualidade e os três grupos de técnicas de controle estatístico da produção de ISHIKAWA (1993) e os 18 passos do programa de melhoria qualidade de FEIGENBAUM (1991)) o número de vezes em que a palavra

controle aparece. A partir de JURAN (1992) e de TAGUCHI (1990) a palavra chave para a obtenção da qualidade passa a ser planejamento, ou seja, só irá obter a qualidade de produto necessária para enfrentar o mercado a empresa que possuir habilidade suficiente para planejar a qualidade de seus produtos e processos.

Desta maneira, torna-se fácil encontrar a expressão projeto do processo no ambiente da indústria de processos de produção e, principalmente, dentro da indústria de processos de fabricação mecânica, que é o principal interesse do presente trabalho.

O projeto de um processo de fabricação mecânica é a atividade de definição dos meios específicos a serem utilizados pelas forças operacionais para atingir as metas da qualidade de um produto. Desta atividade de projeto devem resultar as seguintes definições:

a) As características do processo de fabricação.
b) Os equipamentos físicos a serem providenciados.
c) Os softwares associados.
d) As informações de como operar, controlar e manter o processo de fabricação.

O planejamento de um processo de fabricação mecânica sob a ótica da gestão da qualidade total requer o planejamento prévio da qualidade do produto, JURAN (1992) e TAGUCHI (1990). Assim, o projeto de processos de fabricação devem contar com os seguintes insumos:

a) Conhecimento das metas de qualidade do produto.
b) Conhecimento das condições ambientais.
c) Conhecimento da capacidade de processos.
d) Conhecimento da capacidade de processos alternativos.

Desta forma, o projeto de processos de fabricação deve primeiramente avaliar os itens citados acima e que serão discutidos detalhadamente a

seguir.

2.3.2. Revisão das metas de qualidade do produto.

A satisfação do cliente com relação à qualidade de um produto pode ser divida em dois componentes básicos: a presença de atributos e a ausência de deficiências, para que isto ocorra clientes e projetistas devem compreender as metas da qualidade e serem capazes de encontrar um ponto ótimo, com relação as necessidades a serem atendidas e a capacidade dos processos disponíveis.

Dois autores se destacam na definição dos atributos da qualidade, GARVIN (1992) e JURAN (1992), sendo que a definição apresentada por GARVIN (1992) se adequa muito bem ao projeto de produtos da indústria metal-mecânica.

Segundo GARVIN (1992) são oito os atributos da qualidade:

- Desempenho: que são as características essenciais de um produto.
- Características: que são as características complementares para o funcionamento ou utilização do produto.
- Confiabilidade: é a probabilidade do produto falhar em uso em um determinado período.
- Conformidade: é o grau de ajusto do produto em relação às suas especificações de projeto.
- Durabilidade: é a vida útil do produto.
- Atendimento: é o conjunto de todos os elementos que formam a relação entre cliente e fornecedor: negociação de venda, cobrança, tempo de entrega, assistência técnica, entre tantos outros fatores.
- Estética.
- Qualidade Percebida: é o somatório de todos os atributos

enunciados acima, que ajuda a formar a opinião do cliente a respeito do fornecedor.

Na indústria de autopeças, ou de componentes mecânicos, este trabalho de identificar e quantificar os atributos da qualidade do produto é facilitado pelo desenho do produto. Através do desenho do produto pode-se observar claramente quais são os atributos da qualidade, que agora podem ser melhor entendidos como metas da qualidade, e quais são os valores a serem atingidos, ou conformados.

A observação cuidadosa do desenho de produto permite ao projetista de processo identificar facilmente, por exemplo, os seguintes elementos de desempenho do produto:

- Materiais e tratamentos térmicos.
- Dimensões e tolerâncias dimensionais.
- Tolerâncias de forma e posição.
- Acabamento e integridade superficial.

E assim, consecutivamente, para as demais metas da qualidade para este produto. A tarefa de avaliar e de rever as metas da qualidade do produto começa a se tornar mais complexa a partir do momento em que se deseja estipular qual é o ponto ótimo de utilização de recursos disponíveis.

Para isto mais informações devem alimentar o processo decisório e são enumeradas e discutidas no próximos itens.

2.3.3. Conhecimento das condições operacionais

O conhecimento das condições operacionais é essencial para se determinar o ponto ótimo entre as metas da qualidade do produto e os

recursos disponíveis. As condições operacionais de um processo de produção estabelecido, ou a ser estabelecido, possuem várias dimensões, JURAN (1992). Estas dimensões são listadas a seguir.

- Verificação da capacitação dos usuários;
- Avaliação das condições tecnológicas presentes;
- Avaliação das limitações do processo;
- Estudo das operações existentes para aproveitamento;
- Avaliação concorrente dos processos existentes para aproveitamento;
- Determinação das operações críticas;
- Avaliação atual de erros humanos.

Sendo que a forma mais utilizada para quantificar o desempenho de um processo de fabricação, nas avaliações realizadas acima, é o cálculo da capacidade do processo. O Anexo B traz um breve resumo a respeito das definições básicas sobre a capacidade de um processo e um exemplo de cálculo e interpretação.

2.3.4. Metas para as características de um processo.

Os pontos discutidos até o momento formam o conjunto básico de variáveis que devem ser avaliadas e incluídas no projeto de um processo de fabricação. Percebe-se, ao se acompanhar o texto, que o seu número é grande bem como a sua complexidade, já que são assuntos discutidos amplamente pelas empresas do setor de componentes mecânicos, mas apenas superficialmente na maioria dos casos.

Além disso, a partir do momento que se lembra que as variáveis independentes do processo devem ser avaliadas juntamente com os atributos da qualidade estabelecidos para o produto, o nível de complexidade do projeto de um processo de fabricação aumenta

sensivelmente, tornando esta tarefa virtualmente impossível sem uma ferramenta de gestão da informação que privilegie o raciocínio humano.

JURAN (1992), sugere rapidamente uma ferramenta específica para este propósito, que é a *planilha para as características do processo*, com o objetivo de estabelecer relações dentro processo, desde o seu nível macro até o seu detalhamento. A Figura 2.20 a seguir mostra esta planilha preenchida rapidamente para o processo de um sistema de aquecimento automotivo.

PLANILHA DE PROJETO DE PROCESSO

Produto: sistema de aquecimento automotivo

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO	*METAS DO PRODUTO*	soldar núcleo	montar ventilador	encher o sistema de resfriamento						
		CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO								
Núcleo do aquecedor	Produção de calor segundo projeto			●						
	Sem vazamentos	●								
Montagem do soprador	Baixo nível de ruído		○							
	Fulo de ar de 200 CFM		●							
Fluído refrigerante do motor	Sistema completo de resfriamento			●						
		juntas à prova de vazamento	cubo do ventilador contra a lingueta do eixo	sistema de resfriamento cheio						
		METAS DO PROCESSO								

● Relação muito forte

○ Relação forte

△ Relação fraca

Figura 2.20 – Planilha de características do processo para um sistema de aquecimento automotivo, JURAN (1992).

Além do detalhamento do processo em si, a forma da planilha de

características do processo favorece que se estabeleçam relações entre as metas, ou atributos, da qualidade do produto e as metas do processo. Através da discussão destas relações, de maneira mais ou menos acurada, pode-se estabelecer prioridades dentro das características do processo favorecendo que se alcancem as metas de qualidade do produto.

A planilha de características do processo é uma forma mais determinada da idéia do desdobramento da qualidade no ciclo de vida de um produto ou a espiral da qualidade, do próprio Juran. Mas, ao mesmo tempo é bem menos determinada e possível de se automatizar que a metodologia do QFD (quality function deployment, ou também, em português, desdobramento da função da qualidade), enunciada por AKAO (1996) e discutida muito bem, no Brasil, por CHENG (1995). A Figura 2.8, apresentada anteriormente é o equivalente à planilha das características da qualidade dentro da metodologia do QFD.

Além de estabelecer a relação entre as características de processo e as variáveis independentes que o formam, o projetista de processos deve ter sempre em mente mais duas metas:

- Otimização: o projeto de processos de fabricação deve ter otimização intermitente, através da revisão constante e do planejamento conjunto, procurando atingir os fornecedores externos sempre que possível.

- Medição: é uma meta do projetista de processos prover o mesmo de capacidade de medição e de ajuste.

Além dos aspectos relacionados à escolha dos processo de fabricação, é importante entender o desempenho econômico que cada um deles deve oferecer à empresa. O próximo capítulo apresenta os conceitos básicos relacionados a este assunto, que devem ser parte integrante da metodologia aqui proposta.

3. *Avaliação e acompanhamento de investimentos em sistemas de manufatura*

Nos primeiros anos do Século XX os gerentes de manufatura trabalhavam com máquinas comparativamente mais simples e as tecnologias envolvidas podiam ser facilmente compreendidas. Se ocorria o desenvolvimento de uma máquina ou processo, não era difícil decidir qual seria a aquisição mais lucrativa para a fábrica.

Com o desenvolvimento tecnológico, as máquinas se tornaram mais complexas e a taxa de mudanças se acelerou, até o ponto em que hoje muitas vezes parece que um novo processo é colocado no mercado antes mesmo do anterior ter sido plenamente desenvolvido, ERMER (1997).

Hoje, as empresas de manufatura têm a sua disposição uma grande variedade de tecnologias de manufatura em que podem investir. Estas são denominadas genericamente muitas vezes de "advanced manufacturing technology (AMT)", que é uma denominação muitas vezes mal compreendida, pois estas afetam toda a companhia e não apenas as áreas de manufatura. Mas, apenas por conveniência, o termo AMT é utilizado para se referir a todo o espectro da tecnologia à disposição das companhias. O investimento em AMT não é só encorajado pelos governos, mas também por outros setores da sociedade em geral, como vendedores, consultores, acadêmicos e jornalistas, que enfatizam a importância de convencer as empresas em investir em novas tecnologias, FELDMANN at al. (1996).

O argumento mais forte daqueles que defendem os investimentos em novas tecnologias é a importância de se manter a frente dos seus

rivais, mesmos nos casos em que a tecnologia esta sendo apenas reformulada, não fornecendo benefícios significativos na competitividade. Isto leva à proliferação de siglas (CAPM, CIM, CAD/CAM, JIT, GT, FMS, CAPP, etc.), ou ao desenvolvimento da tecnologia da moda.

Embora as empresas possam, na teoria, encontrar uma aplicação para cada um dos aspectos da AMT, seu grande problema é decidir quais investimentos em AMT são realmente necessários, ou se estes devem concentrar os seus esforços e recursos em mudanças organizacionais e em novos sistemas gerenciais, projeto de novos produtos, ou ainda melhorar o seu marketing e distribuição, YUEJIN & CHUAH (1999).

Segundo PRIMROSE (1991) a atitude tradicional na avaliação de investimentos é a de superar a barreira final, onde deve-se superar o investimento no processo. Tendo gasto um considerável esforço na seleção das especificações técnicas, os gerentes devem então fazer com que os investimentos passem pelos contadores. Para o aumentar a dificuldade desta tarefa, as tecnologias têm se tornado cada vez mais complexas e caras, o que ajudou a desenvolver a crença de que as técnicas de contabilidade existentes são inadequadas quando tratamos com as complexidades da AMT. Na verdade as técnicas de avaliação de investimento não devem ser utilizadas como o veredicto final na aprovação de projetos (passa e não-passa), estas devem ser tratadas como elementos para auxiliar a tomada de decisões e utilizados como parte integral na seleção de um processo.

São dois os principais problemas relacionados com a avaliação de investimentos em AMT: um é assegurar que a técnica correta de avaliação do investimento vai ser utilizada, e o outro é superar a crença arraigada de que alguns benefícios da AMT são intangíveis e não podem ser incluídos em avaliações financeiras.

A crença de que alguns benefícios da AMT são intangíveis é incorreta e pode ser agora definida segundo PRIMROSE (1991) da seguinte maneira:

"Não existe a idéia de um benefício intangível, todo o benefício que pode ser identificado também pode ser redefinido e quantificado em termos financeiros e incluído na avaliação de investimento. Nenhum benefício deve ser excluído em uma avaliação a partir da afirmação que este é intangível".

Enquanto os gerentes acreditarem que existem benefícios que não podem ser quantificados, estarão apenas se desculpando para realizarem investimentos sem avaliação financeira. Como resultado, a política de investimento de uma empresa se torna subjetiva e as decisões são influenciadas pelas personalidades, como afirmado por WOODGATE (1991) e BEISCHEL & SMITH (1991).

A habilidade de quantificar todos os benefícios potenciais mostra que a magnitude de alguns dos excluídos anteriormente por serem intangíveis podem ser maiores do que os ganhos diretos, onde os gerentes tradicionalmente se concentram. Ao mesmo tempo, alguns dos benefícios aclamados previamente pela AMT podem mostrar-se de pequeno valor, e em alguns casos, até inexistentes. A importância de se quantificar os benefícios intangíveis é que o investimento na maioria da AMT só terá sentido financeiramente quando o objetivo for atingir estes benefícios, KAPLAN (1984).

Muito da literatura sobre AMT e Just in time (JIT) coloca considerável ênfase na necessidade de redução dos inventários, mas estudos mais acurados mostram que a modificação dos inventários tem um efeito controverso sobre o desempenho das empresas, muitas vezes sendo negativo. Isto mostra que para a maioria das empresas a magnitude dos ganhos com a redução dos inventários podem ser muito menores do que aqueles obtidos através de outras estratégias, MATHER (1984) e D'OUVILLE et al. (1998).

Uma das razões para o aparecimento do conceito de benefícios

intangíveis é que estes muitas vezes não aparecem no departamento onde o investimento é feito, mas em outros pontos da empresa. Assim, se os benefícios de uma escolha não forem claramente quantificados e alocados para a avaliação financeira, uma grande parte destes será perdida e atribuída a variações aleatórias que não serão relacionadas com o projeto em questão. Além disso, mesmo quando os benefícios não podem ser quantificados, todos os custos serão conhecidos (já que as contas devem ser pagas) e serão incluídos no sistema de custeio da empresa.

Então o resultado é que qualquer investimento feito sem uma avaliação financeira acurada irá aparecer no sistema de custeio da empresa como um aumento de custo de manufatura. A inabilidade prévia em se quantificar muitos dos benefícios percebidos da AMT não levará apenas à crença de que há alguma coisa errada com a avaliação financeira, mas também com o sistema de custeio,

Outra razão para o aparecimento do conceito do benefício intangível é que não existe uma ligação direta de causa e efeito entre a magnitude do benefício que foi estimada e aquela que foi calculada. Por exemplo, se com uma nova máquina-ferramenta pode-se produzir o mesmo do que com duas máquinas velhas e, assim, o número de operadores será reduzido pela metade. Por outro lado, com um sistema flexível de manufatura (FMS) que pode melhorar os prazos de entrega, e quem sabe melhorar um nível de vendas, a relação entre melhora nas entregas e melhoria do nível de vendas é indireta e pode apenas ser estimada.

Isto faz com que os projetos que têm como objetivos ganhos indiretos sejam acompanhados de um nível de risco muito maiores. Entretanto, além das técnicas existentes para a redução do nível de risco devido as incertezas, a magnitude potencial dos ganhos indiretos pode ser tão grande que irá compensar qualquer elemento de risco.

A habilidade em se quantificar todos os custos e benefícios das AMT em termos financeiros significa que estes serão refletidos pelo

sistema de custeio, e estes sistemas poderão ser utilizados para monitorar e controlar o desempenho, KAPLAN (1984).

Uma vez que os esforços na melhoria da qualidade de produtos são normalmente concentradas na redução do custo de refugo, retrabalho, etc., os investimentos relacionados com a qualidade têm a tendência de apresentar uma natureza defensiva, onde sua justificativa se baseia apenas na redução de custos. A habilidade em se quantificar os benefícios de produtos de melhor qualidade mostrará que os maiores benefícios desta política virão do aumento potencial do nível de vendas. Isto não significa apenas que os investimentos para melhorar a qualidade de produto podem ser lucrativos, mas também as mudanças que são atreladas a sistema de gestão na estrutura das empresas envolvidas, MILLER & VOLLMANN (1985) e SKINNER (1986).

A introdução do JIT não é normalmente vista como uma decisão de investimento. Entretanto (como qualquer outro investimento), o JIT envolve consideráveis gastos e pode produzir ganhos financeiros, e estes podem ser avaliados da mesma maneira do que outros projetos de AMT. A habilidade em se avaliar o JIT em termos financeiros mostra que muitos dos benefícios aclamados pelo JIT podem ser muito pequenos quando comparados com os custos que o acompanham, WOODGATE (1991).

Como um resultado, companhias que estão considerando a introdução do JIT, ou que já o tenham introduzido, podem reavaliar os seus objetivos e resultados. Quando o uso do JIT não for avaliado, não será possível refletir os custos e os benefícios no sistema de custeio. Isto ajudou a divulgar que os sistemas atuais de custeio não são adequados para o controle do ambientes de JIT.

Segundo PRIMROSE (1991), no passado, a maioria dos investimentos em AMT tinham como objetivo aumentar o desempenho departamental. Isto significava que, na maioria das empresas, as inovações técnicas deveriam ser iniciadas nos departamentos que estão mais envolvidos. Com as mudanças das AMT, estas passaram a afetar

toda a companhia, com os maiores benefícios se localizando fora dos departamentos onde esta foi instalada. Como resultado, uma mudança de conceito é necessária para se avaliar quais são as áreas prioritárias de investimento, e os administradores devem ser capazes de identificar os benefícios das AMT dentro da empresa.

As técnicas de avaliação de investimento utilizadas no passado enfatizavam fortemente os benefícios da redução do trabalho direto. O resultado disto é que muitas da AMT são vistas principalmente como redutoras de trabalho direto, ou seja, têm como objetivo eliminar empregos. Isto faz com que em muitos casos a implantação das AMT sejam acompanhadas de problemas de relação trabalhista. A mudança de objetivos com a redução de custos deve ser clara com relação ao aumento da competitividade e lucratividade, mostrando que os investimentos em AMT devem ser feitos para aumentar a segurança dos empregos. O resultado assim será uma implementação muito mais entusiástica e eficiente.

No passado, havia a crença universal de que os procedimentos existentes de custeio eram inadequados para se tratar com as complexidades das AMT. Felizmente, podemos hoje observar que os problemas de avaliação e custeio das AMT são resultantes de uma falha de comunicação entre contadores e gerentes não-financeiros, originada na sua falta de habilidade em relacionar tecnologia e custeio.

Enquanto existia a crença de que havia alguma coisa errada com o custeio, as empresas refreavam as mudanças nos seus sistemas porque também não sabiam quais eram as mudanças que deveriam ser feitas. Na verdade não havia nada errado com os seus princípios de custeio, mas sim na dificuldade das empresas em atualizar os seus procedimentos para refletir claramente a maneira como a AMT escolhida irá modificar a organização da empresa.

Embora os investimentos em AMT sejam geralmente muito caros, estes podem também ser os mais lucrativos. Para muitas empresas, os investimentos em AMT podem ser essenciais para manter a sua

viabilidade a longo prazo.

3.1. Tópicos fundamentais da avaliação financeira de investimentos em geral.

O objetivo desta parte da revisão bibliográfica do presente trabalho é de apresentar as metodologias que são realmente utilizadas para a avaliação financeira de investimentos, sejam estes feitos em sistemas de manufatura ou qualquer outra atividade.

Com certeza as obras que mais influenciam a formação dos profissionais brasileiros na administração de recursos financeiros são: ASSAF NETO (2000), GITMAN (1997), ROSS et al. (2000) e OLIVEIRA (1982). O primeiro em função de sua influência na formação das escolas de administração brasileira e sua grande obra sobre o assunto, e os demais por fazerem parte dos currículos das escolas que mais têm se destacado no exame nacional de cursos promovidos pelo Mistério da Educação. Vale a pena ressaltar que o objetivo desta revisão não é de estabelecer o uso das ferramentas mais avançadas de avaliação financeira de projetos, mas sim aquelas que podem ser mais úteis no âmbito deste trabalho.

Dentro deste enfoque duas das referências citadas anteriormente se destacam, OLIVEIRA (1982) em função da experiência profissional do autor, como gerente de orçamento e custos da Siderúrgica Mendes Júnior e GITMAN (1997), também em função da experiência profissional dos autores dos capítulos específicos sobre avaliação financeira de projetos de investimentos em renomadas instituições internacionais como: Merrill Lynch, Morgan Stanley & Co., Quaker Oats e Continental Bank.

Além dos textos citados acima, existem mais dois textos , que ainda não fazem parte dos currículos das escolas nacionais, mas que assumem grande importância no desenvolvimento deste assunto no presente trabalho.

O primeiro é HELFERT (2000), cuja a primeira edição americana já possui quase 35 anos e vem influenciando durante todo este tempo a

formação dos executivos das principais empresas americanas, na Harvard Business School e, além disso, a empresa escolhida para a apresentação dos exemplos do livro é a TRW Co., uma das mais importante indústrias de autopeças do mundo.

O segundo texto é de GALESNE, FENSTESSEIFER & LAMB (1999), que discute com todo o formalismo acadêmico as decisões de investimento de uma empresa, desde as metodologias mais consagradas e amplas, até as mais recentes e específicas. Este texto é muito importante para o desenvolvimento do presente trabalho, pois confirma que as ferramentas de avaliação financeira de projetos de investimento utilizadas pelos profissionais de indústrias e instituições financeiras, que são encontradas nos textos citados anteriormente, ainda possuem respaldo dentro do ambiente acadêmico, sendo sempre utilizadas na resolução destes tipos de problemas.

A seguir são apresentados em sequência os passos que são usualmente considerados na avaliação de projetos de investimentos.

3.1.1. Perspectiva Estratégica.

Segundo HELFERT (2000), a primeira consideração a ser feita na decisão de investir é com relação ao posicionamento estratégico da empresa e se o investimento em questão vai ajudar a empresa a atingir as suas metas. Assim, as alternativas de investimento sempre devem refletir o rumo que a empresa deseja seguir, considerando:

- Condições econômicas esperadas.
- Perspectivas da empresa dentro do setor específico ou segmento de negócios.
- Posição competitiva da empresa.
- Competências essenciais da empresa.

No entanto, entre as possibilidades quase infinitas de investimento que uma empresa pode gerar, o ponto crítico é sempre o mesmo: o desembolso que esta sendo feito na expectativa de retornos futuros. Por exemplo, dentro de seu planejamento estratégico uma determinada empresa deseja assumir uma parte nova do seu mercado através de preços mais competitivos de seus produtos, assim, decide investir em novas instalações para otimizar o fluxo de material em processo. Aqui o retorno esperado será a redução dos custos operacionais, GITMAN (1997).

Essas e outras alternativas são continuamente analisadas dentro do ambiente empresarial. Tipicamente, as listas de projetos são examinadas durante o processo estratégico da empresa dentro do contexto e das restrições de seus objetivos e metas. Várias alternativas são descartadas, até que restem opções que deverão ser analisadas seriamente. A partir daí, os planos de gastos periódicos são preparados, contendo os desembolsos de capitais que foram selecionados e aprovados, WOILER & MATHIAS (1996).

Esse processo inclui todo um conjunto lógico de idéias para análises econômicas muito refinadas. No final, o orçamento de capital da empresa engloba regularmente um grupo aceitável de projetos que, individual e coletivamente, segundo se espera, darão retorno econômico coerente com as metas da administração a longo prazo, com o objetivo de gerar valor para o acionista.

Em uma empresa típica, segundo ROSS et al. (2000), a gestão de investimentos é complicada e não apenas pela necessidade de selecionar uma carteira de projetos, mas também por operar as instalações, as prestações de serviço ou outros ativos aplicados com eficiência. Além disso, analisar o potencial dos investimentos em um contexto empresarial é mais complexo do que selecionar ações e obrigações, porque envolve freqüentemente dispêndios múltiplos distribuídos durante um certo tempo. Construir e equipar uma fábrica nova e formar gradualmente uma empresa de serviços e sua infra-estrutura são exemplos disso. Determinar os benefícios econômicos resultantes de desembolsos é até ainda mais

complexo, pois a análise dos investimentos de capitais potenciais envolve um grau justo de raciocínio econômico e projeção das condições futuras, o que vai além do uso dos balanços financeiros normais.

Em termos simplificados, a teoria argumenta que os investimentos empresariais, classificados por ordem decrescente de atratividade, devem ser aceitos até o ponto em que a receita adicional se iguala ao custo adicional, dados os níveis de risco apropriados. No entanto, essa teoria enfrenta vários problemas quando aplicada na prática, segundo HELFERT (2000):

- Quando o orçamento de capital é preparado, é simplesmente impossível prever todas as oportunidades de investimento, porque a economia muda continuamente o horizonte de planejamento, no qual novas oportunidades continuam aparecendo, enquanto as oportunidades conhecidas podem ficar enfraquecidas com as mudanças rápidas nas condições existentes.
- Os orçamentos de capital são preparados apenas uma vez por ano na maioria das empresas. Como ocorrem vários atrasos, a implementação efetiva pode ser demorada ou até mesmo cancelada, porque as circunstâncias mudam freqüentemente.
- Os critérios econômicos, como taxa de retorno e custo de capital, são apenas aproximações. Além disso, eles não são a base exclusiva das decisões de investimento. Também servem como base o contexto estratégico mais abrangente, o ambiente competitivo, a habilidade da administração de implementar o investimento, as considerações organizacionais e outros fatores de como a administração pondera o risco de um investimento contra o lucro econômico em potencial.

Assim, não há nada automático ou simples para chegar às decisões sobre o fluxo dos investimentos potenciais que aparecem continuamente nas empresas.

3.1.2. Estrutura Decisória.

A própria essência dos investimentos empresariais, segundo ASSF NETO (2000), requer que as decisões tomadas sejam muito conscientes e específicas a respeito dos inúmeros aspectos envolvidos. É necessário fixar uma série de regras básicas para garantir que os resultados sejam coerentes e confiáveis. Essas regras podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Definição do problema.
- Natureza do investimento.
- Estimativa dos custos e benefícios futuros.
- Fluxo de caixa incremental.
- Dados contábeis relevantes.
- Custos históricos.
- Valor do dinheiro no tempo.

A seguir estes pontos serão discutidos detalhadamente:

Definição do problema.

A avaliação de qualquer investimento inicia-se declarando explicitamente quais são os motivos que o tornam necessário. Mas, muitas vezes, esse ponto elementar é deliberadamente posto de lado, quando o desejo em prosseguir com um projeto de investimento se sobrepõe ao julgamento ponderado, OLIVEIRA (1982).

Juntamente com a definição do problema a ser resolvido, duas ou três alternativas devem estar disponíveis para atingir o propósito de um investimento, e o exame cuidadoso das circunstâncias específicas pode

revelar um número até maior. O exercício de responder algumas questões básicas a respeito do contexto do problema, pode ser muito útil na busca da solução. Para HELFERT (2000), o diagrama da Figura 3.1 serve como ponto de apoio na busca da visualização das opções principais para decidir entre as alternativas de uma proposta de investimento.

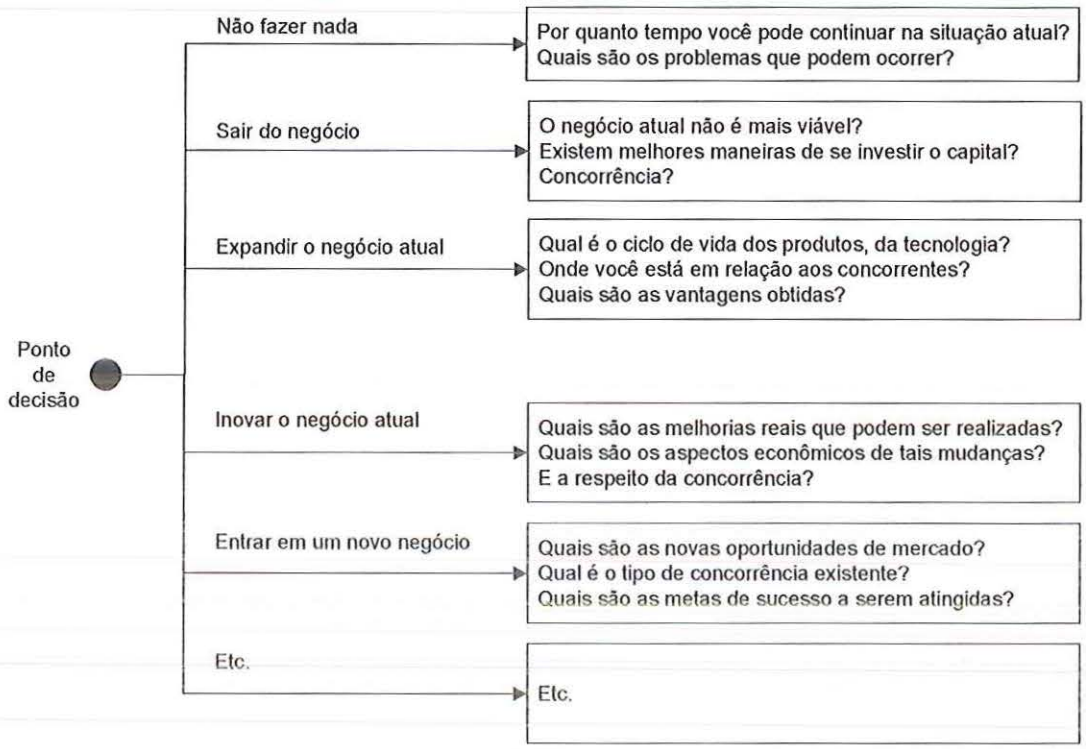

Figura 3.1 – Alternativas para uma decisão de investimento, HELFERT (2000).

Ainda para HELFERT (2000) e GALESNE, FENSTESSEIFER & LAMB (1999), é crucial selecionar as alternativas apropriadas para analisar e estruturar o problema, de tal modo que se possa aplicar as ferramentas analíticas corretas às questões reais a serem decididas. Para decisões de grande importância estratégica, processos formais são fornecidos através do uso das disciplinas da teoria da decisão, para ajudar a estruturar o problema e estabelecer um conjunto ordenado de alternativas criativas.

Assim, como regra geral, nenhum investimento deve ser iniciado a

menos que o melhor julgamento analítico permitisse descobrir os obstáculos existentes nos dois primeiros ramos da árvore de decisão.

Natureza do investimento.

Para OLIVEIRA (1982) e GITMAN (1997), os investimentos podem ser de dois tipos: independentes ou mutuamente exclusivos. No primeiro caso, a escolha de um investimento não é influenciada por uma escolha anterior e também não impede que sejam escolhidos outros investimentos. Os investimentos mutuamente exclusivos ocorrem tipicamente na comparação de diversas soluções para o mesmo problema, que é o caso da escolha do sistema de manufatura mais adequado para um determinado componente mecânico. A restrição do capital a ser aplicado também torna os investimentos mutuamente excludentes.

Outro aspecto sobre a natureza dos investimentos, que sempre deve ser levada em conta, é que investimentos em bens de produção de capital implicam em desembolsos futuros de capital, que serão utilizados em ações de manutenção, atualização ou substituição parcial dos bens. Esses desembolsos futuros devem ser considerados quando a decisão inicial é tomada, para HELFERT (2000) e GALESNE, FENSTESSEIFER & LAMB (1999).

Custos e benefícios futuros.

Quando se faz a análise da viabilidade econômica de um investimento os indivíduos envolvidos devem sempre se ater ao fato de que todos os cálculos serão realizados a partir de projeções de receitas e custos. E, além disso, de que estas projeções serão feitas a partir do histórico das operações semelhantes realizadas no passado. Nunca se esquecendo que o passado é um indicador imperfeito na situação mais favorável e ,na pior das hipóteses, irrelevante para a análise, GITMAN (1997).

Assim, as equipes de projeto devem estar preparadas para identificar nos eventos futuros as suas incertezas, explorando cada possibilidade de mudança sob as condições de trabalho de cada variável independente. Avaliando claramente a sensibilidade do projeto a cada uma destas variáveis, sendo que, as mais comuns são: quantidade produzida, preço, custo de matéria-prima e assim por diante, WOILER & MATHIAS (1996).

A incerteza das condições futuras que afetam um investimento é o risco de se não satisfazer às expectativas e ter como resultado um retorno econômico insuficiente ou mesmo um prejuízo. O grau de risco é uma função da incerteza relativa sobre as principais variáveis independentes do projeto. Estimativas e pesquisas cuidadosas são garantias para reduzir a margem de erro nas condições previstas sobre as quais a análise está baseada.

Fluxo de caixa incremental e o valor do dinheiro no tempo

Em função das características discutidas acima a correta avaliação financeira de um investimento necessita que se estabeleça acuradamente a relação entre dois tipos de informação:

- O ponto no tempo em ocorrerão as entradas e as saídas de capital no projeto; e
- O valor corrigido destas entradas e saídas de capital no momento no tempo em que estará sendo tomada a decisão de investir

A razão disto é bem simples e vem do fato de o valor de R$ 1,00 hoje não ser o mesmo do ano passado e também não ser o mesmo do próximo ano. Ou seja, o valor do dinheiro não é constante no tempo, ASSAF NETO (2000).

Esta afirmação é muito simples, mas suas implicações na análise de um investimento são severas. Ela significa que a decisão de investir está

fortemente relacionada com os prazos de recebimento e pagamento envolvidos e, mais do que isso, à oportunidade de obter retorno sobre qualquer outro tipo de investimento neste mesmo período de tempo. Desta maneira, percebem-se as dificuldades inerentes à avaliação financeira de um investimento.

Então, para iniciar-se a análise, estes dois elementos são colocadas em um modelo universalmente utilizado para a sua visualização, que é o fluxo de caixa. A Figura 3.2 a seguir mostra este modelo, onde pode-se observar o desembolso inicial, uma série de valores positivos (entradas de caixa), um valor negativo intermediário (saída de caixa) e um valor positivo recuperado no final, ASSAF NETO (2000).

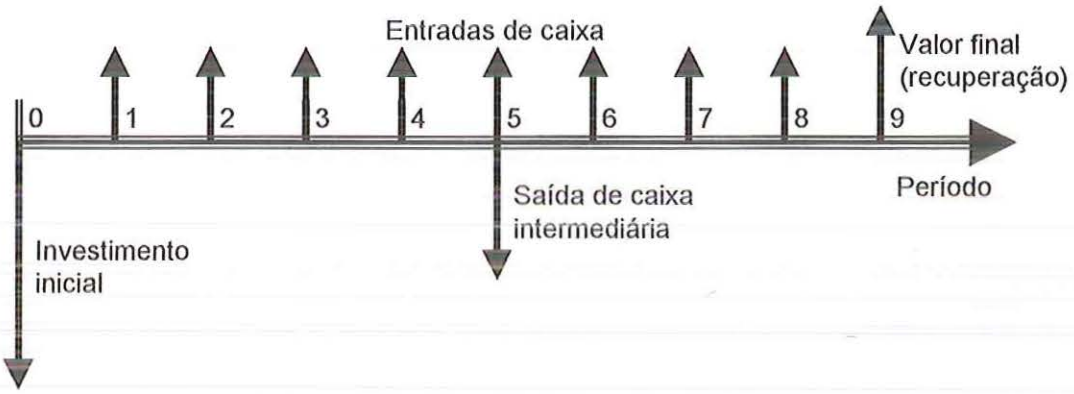

Figura 3.2 – Representação esquemática de um fluxo de caixa típico de investimento, ASSAF NETO (2000).

Todos os valores que formam um fluxo de caixa devem ser atualizados para o momento em que se está tomando a decisão de investir, ou qualquer outro que se mostre vantajoso. Está data é chamada de *data focal*. Na maioria das análise, por facilidade, a data focal escolhida é a data atual ou data zero. Esta é a base para todas as modernas técnicas de análise e avaliação de investimentos.

O fluxo de caixa também pode ser utilizado para comparar entradas e saídas de capital com o planejamento estratégico, no qual este investimento

se insere. Para isto deve-se principalmente prestar atenção em quatro pontos:

- Montante gasto — investimento líquido;
- Benefícios potenciais — entradas de caixa operacionais líquidas;
- Período de tempo dos benefícios — vida econômica; e
- Qualquer recuperação final de capital — valor final.

Além disso, segundo GALESNE, FENSTESSEIFER & LAMB (1999), o fluxo de caixa não deve ser considerado como uma figura estática, sendo utilizado apenas no momento de decisão. Este deve ser constantemente atualizado no monitoramento do desenvolvimento do projeto e são os seguintes os principais elementos que devem ser acrescentados ao fluxo de caixa:

- Investimento adicional;
- Receitas adicionais; e
- Custos e despesas adicionais.

Uma característica muito importante do fluxo de caixa é que este identifica apenas os movimentos de entrada e saída de caixa, sendo que qualquer transação contábil relacionada à decisão, mas que não afeta os fluxos de caixa, é irrelevante para o caso. Esta característica é particularmente importante na análise de projetos de sistemas de manufatura, pois as discussões abrangem várias disciplinas e os nem todos os participantes possuem o conhecimento necessário para entender manobras contábeis complicadas.

Finalmente, na montagem de um fluxo de caixa deve-se determinar com muita certeza o prazo de tempo, ou seja, o número de períodos contábeis consecutivos pelos quais este vai se estender. Pois toda a análise será baseada no momento em que os valores financeiros irão ocorrer, ou seja, terá forte vínculo com a vida econômica do investimento, OLIVEIRA

(1982).

O Anexo A mostra de forma concisa as equações de custos básicas para as operações de usinagem de torneamento e de retificação, que usualmente vão ser utilizadas na previsão das saídas do fluxo de caixa.

Dados Contábeis Relevantes

A análise de investimento envolve, em grande parte, a utilização de dados derivados dos registros contábeis, mas nem todos são relevantes para o que se tem em vista. Convenções contábeis que não envolvem fluxos de caixa devem ser vistas com extrema precaução. Isso está particularmente relacionado com os investimentos que causam mudanças nos custos operacionais. Neste caso, deve-se distinguir claramente entre aqueles elementos que de fato variam com a operação do novo investimento e aqueles que parecem variar. Eles estão relacionados às alocações contábeis que podem mudar na magnitude, mas não representam necessariamente uma mudança efetiva nos custos suportados, HELFERT (2000) e ROSS et al. (2000).

Custos irrecuperáveis.

Uma tentação comum é incluir na análise de um novo investimento, no todo ou em parte, as despesas enfrentadas no passado, talvez na preparação de um novo empreendimento. Entretanto, não existem bases na análise econômica que justifiquem recuperações de dispêndios que já foram feitos e que não podem ser recuperados em parte ou no total. As decisões passadas simplesmente não são consideradas nas compensações econômicas da decisão de investimento presente. A razão básica para isso é que tais custos irrecuperáveis (incluindo até mesmo aqueles relacionados de algum modo à decisão) não podem ser alterados pela realização do novo investimento, GITMAN (1997) e ROSS et al. (2000).

Por exemplo, se montantes significativos tivessem sido gastos em

pesquisa e desenvolvimento de um novo produto, a decisão presente a respeito do investimento em instalações para fabricar o produto não deveria ser afetada de forma alguma por esses custos irrecuperáveis. Talvez a decisão anterior de pesquisar e desenvolver fosse menos compensadora que o esperado, e não deveria ter sido tomada. Mas agora o que conta é: se o investimento exigido para explorar os resultados dessa pesquisa anterior pareceu ser economicamente justificável por seus próprios méritos. Se sim ele deveria ser realmente executado agora.

As decisões econômicas são sempre prospectivas e devem envolver apenas elementos que podem ser modificadas pela ação que for decidida. Este é o teste essencial de relevância para qualquer elemento a ser incluído na análise.

3.1.3. Métodos Determinísticos Para A Análise de Investimentos.

O grande campo de aplicação das técnicas de análise de investimentos, sem dúvida, ainda está associado ao processo de geração de indicadores utilizados na seleção de alternativas de investimentos. A decisão de fazer Investimento de capital é parte de um processo que envolve a geração e avaliação das diversas alternativas que atendam às especificações técnicas dos investimentos. Após relacionadas as alternativas viáveis tecnicamente é que se analisará quais delas são financeiramente atrativas. É nessa última parte desse processo que são empregadas as técnicas de análise de investimentos.

Em um primeiro momento, os projetos de investimentos devem ser representados por um fluxo de caixa tal como apresentado na Figura 3.2. E a partir daí serão aplicadas as técnicas de análise de investimentos, ASSAF NETO (2000).

Segundo SOUZA (1999), as técnicas de análise de investimentos podem ser subdivididas em dois grandes grupos: as técnicas que servem para selecionar projetos e técnicas que servem para gerar indicadores

adicionais para os projetos já selecionados. Na primeira categoria estão os chamados *métodos robustos de análise de alternativas de investimentos*, quais sejam: *método do valor presente líquido (VPL); o método do valor anual uniforme equivalente (VAUE)*. Na segunda categoria estão os chamados métodos classificatórios ou de corte, como, por exemplo, *método da taxa interna de retorno (TIR); método do índice benefício/custo (IL); método da taxa de retorno contábil e método do período de recuperação do capital (pay-back)*.

A diferença básica entre as duas categorias de técnicas de análise de investimentos reside no fato de que, enquanto os *métodos robustos* sempre apresentam a mesma classificação para um conjunto de projetos de investimentos, os *métodos classificatórios ou de corte* apresentam, não raramente, resultados contraditórios e, por essa razão, devem ser evitados no processo inicial de seleção de projetos, GITMAN (1997).

No entanto, existe um conceito que deve ser explorado antes da aplicação destas técnicas que é o da *taxa mínima de atratividade (TMA)*, que será apresentado a seguir.

Taxa Mínima de Atratividade

Em diversos textos, incluindo ASSAF NETO (2000) e SOUZA (1999), a *taxa mínima de atratividade (TMA)* é a taxa de juros utilizada para transportar valores financeiros que irão ocorrer no futuro para o momento atual. A denominação correta deste tipo de operação no Brasil é de descapitalização e não desconto, como algumas traduções do inglês apresentam. Em nossa legislação bancária, as operações de desconto são realizadas na situação específica, onde um locatário deseja antecipar o pagamento de um ou mais títulos. A recompensa que o locatário recebe por isso é chamada de desconto.

A importância da taxa mínima de atratividade reside no fato que o seu valor pode tornar um investimento viável ou inviável, dentro do mesmo

horizonte financeiro.

A taxa mínima de atratividade deve representar o custo de oportunidade do capital para a empresa. Diante disso, percebe-se que o horizonte de planejamento influencia indiretamente a taxa mínima de atratividade, à medida que as empresas que possuem estratégias de médio e longo prazos a serem observadas estarão menos suscetíveis às flutuações de curto prazo do mercado financeiro. Ou seja, o custo de oportunidade do capital tende a ser estável para empresas com planejamento de longo prazo, enquanto tende a flutuar de acordo com o mercado financeiro na ausência de planejamento de longo prazo, HELFERT (2000).

Uma forma usual e rápida para visualizar o valor da taxa mínima de atratividade, em avaliações preliminares de investimentos, é que esta deve ser semelhante à taxa de juros que deixa de ser obtida na melhor aplicação alternativa quando há emprego de capital próprio, ou é a menor taxa de juros que tem de ser paga quando recursos de terceiros são aplicados. No entanto, este conceito varia fortemente em função do porte de uma empresa e o seu posicionamento no mercado, WOILER & MATHIAS (1996).

A Figura 3.3, de SOUZA (1999), ilustra as considerações anteriores. Se o volume de investimento planejado por certa empresa não ultrapassar o limite de sua capacidade de autofinanciamento, região A, a taxa mínima de atratividade deverá ser superior à taxa de emprestar, que é o custo de oportunidade do capital, cabendo à empresa amplo leque de escolha. Se a empresa se situa na região B, porque não consegue autofinanciar o volume de investimentos planejado, então a taxa mínima de atratividade também deverá ser limitada pela taxa de emprestar, mas não poderá ser superior à taxa de tomar emprestado, porque isso restringiria automaticamente o volume de investimentos à sua capacidade de autofinanciamento. Finalmente, a região C representa situação insustentável, porque o volume de investimentos planejado excede de tal forma a capacidade de financiamento que o custo do capital se torna proibitivo. Como consequência, a empresa terá de restringir seus investimentos ao volume correspondente à taxa de emprestar.

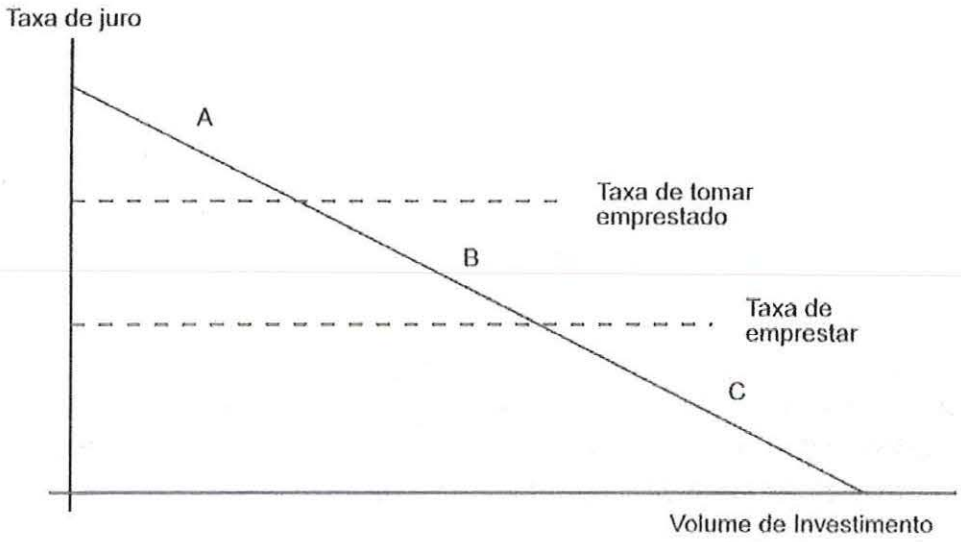

Figura 3.3 - A variação da taxa mínima de atratividade em função do montante de capital investido SOUZA (1999).

A escolha da taxa mínima de atratividade é muito importante e algumas considerações feitas de maneira equivocada dificultam a sua determinação acurada. As mais comuns são as seguintes:

- A taxa mínima de atratividade não deve ser utilizada como quantificador do risco envolvido em um projeto. Ou seja, a idéia de que quanto maior for o risco envolvido em um projeto maior deve ser a TMA é conceitualmente errada. Pois o risco está relacionado com a probabilidade de ocorrência dos valores inseridos no fluxo de caixa e não na rentabilidade mínima desejada por uma empresa em seus investimentos. E o indicador correto para realizar está comparação é a taxa interna de retorno (TIR).

- Outra idéia que pode surgir é que a taxa mínima de atratividade deveria ser inversamente relacionada com o tempo de maturação do investimento. Essa idéia também é inadequada, porque a

distribuição dos ganhos no tempo é levada em conta através do expoente do denominador, no cálculo do valor presente.

A seguir serão apresentados, em ordem crescente de importância, os critérios mais utilizados na avaliação determinística de projetos de investimentos.

Taxa Média de Retorno

A *taxa média de retorno (TMR)*, segundo ASSAF NETO (2000), é o critério mais simples para indicar o retorno médio do projeto por período. A vantagem da sua utilização reside em sua simplicidade de cálculo, isto é:

TMR = (Fluxo de caixa médio) / (Investimento médio)

A principal restrição que se faz ao uso desse indicador é que o mesmo desconsidera o valor do dinheiro no tempo. Em principio, não existe nenhuma dificuldade em corrigir essa distorção, contudo, o uso popular já o consagrou da forma como foi apresentado.

Quando se utiliza o lucro projetado antes do imposto de renda (LAIR), no lugar do fluxo de caixa médio, o indicador passa-se a se chamar de taxa de retorno contábil. Esta taxa também é de uso consagrado, em função da sua simplicidade de cálculo.

Período de Recuperação.

Outro indicador bastante usado no processo de seleção de projetos é *o período de recuperação do investimento (PRI)* ou *Pay-back,* isto é, o número de períodos necessários (tempo) para se recuperar o investimento realizado.

O procedimento de cálculo desse indicador também é bastante simples. Para calcular o *PRI*, somam-se os valores dos benefícios, período a

período, até que essa soma se iguale ao valor do investimento inicial. O período correspondente à última parcela da soma será o *PRI*.

A utilidade de conhecer o *PRI* é que ele pode ser interpretado também como uma medida do grau de risco do projeto. As incertezas associadas a um projeto tendem a aumentar à medida que as previsões das receitas e dos custos se afastam da data focal zero. Nesse sentido, o *PRI* pode ser utilizado para mensurar o risco associado ao projeto, isto é, quanto maior for o *PRI* mais incerta estará a recuperação do capital, WOILER & MATHIAS (1996).

As duas principais falhas do *PRI* estão no fato de ele não considerar o valor do dinheiro no tempo e de desconsiderar tudo o que acontece após o período de recuperação. Essa última restrição penaliza todos aqueles projetos que tenham receitas iniciais pequenas, porém crescentes ao longo da vida do projeto, OLIVEIRA (1982).

Índice de Lucratividade.

O *índice de lucratividade (IL)* é uma medida de quanto se ganha por unidade de capital investido inicialmente. É, na verdade, um aperfeiçoamento da *taxa média de remuneração* do capital investido no projeto e uma variante *do método do valor presente liquido (VPL)*, que será discutido mais a frente, SOUZA (1999).

O *IL* nada mais é do que uma razão entre o fluxo esperado de benefícios de um projeto e o fluxo esperado de investimentos necessários para realizá-lo. Assim, o *IL* pode ser calculado pela fórmula abaixo:

$$IL = \frac{\sum_{j=1}^{n} CF_j/(1+TMA)^j}{CF_0} \qquad (3.1)$$

onde, CF_j representa o valor do fluxo de caixa no tempo j e n é o número de

períodos de capitalização. Lembrando que o valor do fluxo de caixa em qualquer tempo é a diferença entre as entradas e as saídas de caixa.

A análise do *IL*, para efeito de aceitar ou rejeitar um projeto de investimento, é feita em função da própria recuperação do investimento, isto é, *IL* igual a 1. Assim, tem-se o seguinte critério:

- Se *IL* > 1 deve-se aceitar o projeto de investimento;
- Se *IL* < 1 deve-se rejeitar o projeto de investimento.

Método do Valor Presente Líquido

O *método do valor presente líquido (VPL)*, com certeza, é a técnica robusta de análise de investimento mais conhecida e utilizada, GITMAN (1997) e WOILER & MATHIAS (1996). Como o seu próprio nome indica, este nada mais é do que a concentração de todos os valores esperados de um fluxo caixa na data focal zero. Para tal, é utilizada como taxa de juros a *taxa de mínima atratividade* da empresa. Assim, para um fluxo de caixa qualquer o *VPL* será calculado da seguinte forma:

$$VPL = \sum_{j=0}^{n} \frac{CF_j}{(1+TMA)^j} \tag{3.2}$$

onde, CF_j representa o valor do fluxo de caixa no tempo *j*.

Segundo SOUZA (1999), o *VPL* e o *IL* são, na verdade, codificações diferentes de uma mesma informação. Assim, o quadro a seguir mostra a correspondência entre o *VPL* e o *IL*.

- Se o *IL* for 1,0, então, o *VPL* será 0 (zero).
- Se o *IL* for maior do que 1,0, então, o *VPL* será maior do que 0 (zero).
- Se o *IL* for menor do que 1,0, então, o *VPL* será menor do que 0 (zero).

Método da Taxa Interna de Retorno

Para ASSF NETO (2000), a *taxa interna de retorno (TIR)*, por definição, é a taxa de juros que torna *o valor presente líquido (VPL)* de um fluxo de caixa igual a zero. Assim, para um fluxo de caixa genérico, esta seria a taxa *i* que tornasse verdadeira a seguinte sentença:

$$VPL = \sum_{j=0}^{n} \frac{CF_j}{(1+TMA)^j} = ZERO \qquad (3.3)$$

A regra para decidir se um projeto é atrativo financeiramente, utilizando-se a *TIR*, é bastante simples. Se *TIR* > *TMA*, então o projeto é viável, caso contrário, o projeto será considerado inviável.

Novamente, para SOUZA (1999), uma análise mais detalhada da fórmula da *TIR*, do *VPL* e do *IL* evidencia o fato de que esses indicadores são, na verdade, codificações diferentes de uma mesma informação. Assim, o quadro que segue mostra a correspondência entre a *TIR*, o *VPL* e o *IL*.

- Se *IL* for igual a 1,0, o *VPL* igual a zero e a *TIR* igual a *TMA*, então, haverá indiferença em investir.
- Se *IL* for menor do que 1,0, o *VPL* negativo e a *TIR* inferior à *TMA*, então, o projeto será inviável.
- Se *IL* for maior do que 1,0, o *VPL* positivo e a *TIR* superior à *TMA*, então, o projeto será viável.

Método do VPL Anualizado

O método do *valor presente líquido anualizado (VPLA)*, também conhecido como método do *valor anual uniforme equivalente (VAUE)*, é mais uma variação do *valor presente líquido*. Enquanto no método do *VPL*

todos os valores do fluxo de caixa são concentrados na data zero, no método do *VPLA* o fluxo de caixa representativo do projeto de investimento é transformado em uma série uniforme. O procedimento para essa transformação é bastante simples, porém um pouco trabalhoso, e é resumido pela relação apresentada abaixo:

$$VPLA = VPL.\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \qquad (3.4)$$

Compatibilização dos resultados

Na análise de projetos de investimentos, utilizando os índices apresentadas acima, exceto pelos métodos que não consideram o valor do dinheiro no tempo *(TMR e PRI)*, todos os métodos deveriam apontar para a mesma decisão. No entanto, verifica-se que aqueles métodos que trabalham com conceito de valor monetário podem não apontar para a mesma decisão, para HELFERT (2000) e GALESNE, FENSTESSEIFER & LAMB (1999).

Este comportamento será marcante quando a análise for feita sobre projetos que apresentam investimentos iniciais diferentes. Como os métodos do *VPL* e do *VPLA* são os únicos que, implicitamente, já consideram no resultado essas diferenças nos investimentos iniciais, então eles, nesse caso, não sofrem nenhuma distorção e apontam para a solução correta. No entanto, esta distorção poderá ocorrer com os valores calculados para o *IL* e a *TIR*.

Para eliminar a distorção apresentada pelos métodos do *IL* e da *TIR*, é necessário considerar um orçamento de capital definido pelo projeto que demande maior investimento inicial. Se qualquer um dos métodos do *IL* ou da *TIR* apontar para o projeto que requeira menor investimento inicial, então há a necessidade de se considerar um conceito adicional, que é *o capital flutuante*, SOUZA (1999).

O *capital flutuante* é a diferença entre os investimentos iniciais. Na falta

de alguma informação adicional, a hipótese mais plausível é que o capital flutuante será aplicado à *TMA*. O resultado combinado do projeto com menor investimento inicial e mais a aplicação do capital flutuante à *TMA* será suficiente para corrigir a distorção apresentada.

Projetos Com Horizontes Diferentes

Os métodos descritos neste item foram delineados para comparar projetos com horizontes de planejamento iguais. Em termos práticos, pode-se afirmar que projetos com o mesmo horizonte de planejamento são muito mais uma exceção do que uma regra, HELFERT (2000). Felizmente, existem algumas manipulações que permitem analisar projetos com vidas diferentes. Para tanto há de se considerar em duas situações, quais sejam:

1. Se pretende continuar no mesmo ramo de atividade, é plausível imaginar que, se a opção recair no projeto com menor número de períodos de capitalização (*n*), então, ao término desse projeto, o projetista deverá se deparar com decisão similar. Nesse caso, é realístico fixar um horizonte de análise idêntico para ambos os projetos. Isso pode ser feito replicando-se os projetos até o mínimo múltiplo comum de suas vidas.

2. Se não se sabe o que fazer após o final da vida útil do projeto com menor n, então deve-se fixar um horizonte de análise idêntico para ambos os projetos igual a duração do projeto de menor *n*. Isso pode ser feito diminuindo-se o horizonte de análise do projeto de maior *n* e redefinindo-se seu valor residual.

3.1.4. Tópicos Complementares.

Na apresentação do presente item vários aspectos especializados da análise de investimento empresarial foram mencionados brevemente. Um

tratamento mais detalhado iria além do âmbito dos objetivos deste trabalho. Contudo, ainda se faz necessária, a discussão de alguns elementos complementares sobre o efeito do leasing no investimento, sobre o impacto da depreciação acelerada nas análises de valor presente e sobre o impacto da inflação.

Leasing

O *leasing* é um dos meios populares de usar uma grande variedade de ativos fixos tangíveis nas empresas e também individualmente, em troca de pagamentos fixos periódicos. Para a avaliação de investimentos, porém, o ponto principal é considerar que o *leasing* financeiro representa apenas uma forma de financiamento. Então, apenas depois de, na análise de investimento econômico, escolher o projeto a ser aceito é que as formas alternativas de financiamento devem ser analisadas. Esse princípio é adequado à abordagem da maioria dos sistemas empresariais, onde claramente as decisões de investimentos, de operações e de financiamentos são separadas. Enquanto os fundos para investimentos empresariais deveriam vir de fontes apropriadas — de acordo com sua natureza de longo prazo —, as alternativas específicas de financiamentos, incluindo o *leasing,* deveriam permanecer independentes da justificativa econômica do próprio investimento, ROSS et al. (2000).

Desde o início, discutiu-se a análise de investimento como uma compensação de fluxos de caixa independente da remuneração paga aos fundos que financiam o ativo. O custo de capital ou um padrão de retomo relacionado automaticamente a ele leva em conta as expectativas dos vários fornecedores de capital para a compensação apropriada. Se tal análise econômica é favorável, um teste separado pode ser aplicado para saber se a empresa é melhor fora do *leasing* ou se possui os fundos em questão. Isto envolve a comparação de vários métodos de financiamento onde a questão é "*leasing versus* compra", e não "investir *versus* não investir".

Depreciação acelerada

Por ser mais simples, a depreciação linear é o método de depreciação mais utilizado, a fim de mostrar o efeito da economia de imposto propiciada pelas despesas de depreciação e como ela afeta a análise econômica, WOILER & MATHIAS (1996).

Do ponto de vista do valor presente, a diminuição da vida econômica legal, ou a depreciação acelerada, fornece uma vantagem porque antecipa o impacto favorável sobre o imposto de renda. Em outras palavras, nos primeiros anos de um projeto, o efeito da economia de imposto será maior que sob as condições lineares. Assim, toda a vez que vidas menores forem permitidas pelo Regulamento do Imposto de Renda sempre serão aumentados os benefícios do projeto no contexto do valor presente, HELFERT (2000).

O analista de projetos deve sempre procurar as informações publicadas pelo Imposto de Renda (Receita Federal) para averiguar o tipo de depreciação apropriada e os padrões de compensação para os ativos que são analisados, e também para ficar ciente das características específicas do gerenciamento tributário da empresa que podem afetar sua escolha dos padrões de compensação para propósitos do imposto.

Inflação e análise de investimentos

Ainda, segundo HELFERT (2000), o ponto mais importante a ser lembrado sobre o impacto da inflação na análise do investimento é a carência entre as medidas utilizadas e os dados que são analisados. Os padrões de retorno de uma empresa são normalmente baseados na medida do custo de capital. Esse custo incorpora a expectativa da inflação na taxa de juros definida para a dívida e a expectativa de retomo do investidor, que está baseada sobre o custo de capital próprio.

A análise de projetos de investimento empresarial deve ser realizada estimando receitas e custos que contenham as mesmas expectativas de inflação como padrão de retorno. Em outras palavras, as hipóteses razoáveis sobre as mudanças no nível dos preços que afetam todas as partes da análise do fluxo do caixa do investimento devem ser embutidas para tornar o processo de desconto significativo. Por exemplo, utilizar um padrão de retorno que contenha uma previsão de inflação nas projeções em valores constantes resultaria numa redução das chances de viabilidade do projeto. Da mesma forma, utilizar um padrão de retorno em valores constantes para descontar fluxos de caixa inflacionados melhoraria indevidamente os critérios de mensuração do projeto.

Exatidão

Para ASSAF NETO (2000), ROSS et al (2000) e GITMAN (1997), a precisão fornecida pela base matemática das ferramentas de análise de investimentos deve ser vista com precaução extrema. A verdadeira natureza das estimativas do fluxo de caixa — ao qual as ferramentas são aplicadas — é incerta, porque elas estão baseadas em expectativas, previsões, projeções e, às vezes, suposições. Raramente o analista trabalha com somas contratuais, como juros ou pagamentos de *leasing,* e até mesmo estes estão sujeito a certo grau de incerteza. Portanto, não faz sentido chegar a resultados enganosamente precisos ou a números altamente específicos para obter valores inadequados.

Manter a precisão sob a perspectiva apropriada é ainda mais importante quando se percebe que o poder do desconto é tal que estimativas muito divergentes para períodos de tempo diferentes podem ser tão minimizadas em termos de valor presente que acabam tendo efeitos relativamente secundários no resultado final. Um olhar de relance sobre as tabelas de valor presente confirmará a redução rápida dos fatores quando as taxas de desconto sobem e os períodos se alongam.

3.2. Curvas de aprendizagem

Aprendizagem, dentro do contexto dos processos de produção, refere-se à melhoria da eficiência, devido à repetição das operações de produção. De maneira geral, espera-se que o desempenho dos profissionais envolvidos diretamente com a produção melhore através da repetição das ações. Sendo que este aprendizado, como qualquer outro, é dependente do tempo e pode ser controlado externamente. O número de estudos que confirmam esta afirmação é muito grande e têm aparecido com maior frequência a partir da década de 40, mas alguns trabalhos apresentam grande destaque como HIRCHMAN (1964), CONLEY (1970), YELLE (1979) e mais recentemente BELKAOUI (1986), pois documentam com muito acuracidade o desenvolvimento dos modelos de curvas de aprendizagem.

As curvas de aprendizagem são, hoje, ferramentas muito importantes para o estabelecimento de metas de manufatura e o seu monitoramento, TOWILL & CHERRINGTON (1994), sendo que a sua utilização proporciona resultados comprovados na redução dos custos de instalação de um sistema de manufatura, BALOF (1966). Quando as características deste modelo são desprezadas, ou seja, quando não se prevê o aprendizado na implementação de sistemas de manufatura, os custos e tempos de operação podem ser superestimados, gerando desperdício e ineficiência, ABERNATHY & WAYNE (1980) e KNECHT (1974).

A idéia básica das curvas de aprendizagem é de um modelo onde se visualiza a relação entre os custos de produção (ou tempo) e a evolução do volume de produção, baseado no aprendizado. O primeiro caso de aplicação foi exposto por WRIGHT (1936) apud YELLE (1979), onde este constatou que nos processos de montagem de aeronaves, durante a 2ª Guerra Mundial, havia um aumento de 20% de produtividade, cada vez que a quantidade produzida dobrava. Com este tipo de informação, a curva de aprendizagem se torna uma ferramenta de projeção para a estimativa de tempos de tarefas que se repetem durante um determinado ciclo.

Segundo BADIRU (1992), as curvas de aprendizagem podem ser aplicadas em todos os aspectos do planejamento e controle de operações de manufatura. Sendo que diversas denominações foram utilizadas para descrever o mesmo fenômeno, entre os mais conhecidos estão:

- Função de progresso de manufatura;
- Relação custo-quantidade;
- Curva de custo;
- Curva de aceleração de produto;
- Curva de melhoria;
- Curva de desempenho;
- Curva de experiência; e
- Curva de eficiência.

Desde a primeira publicação formal sobre a teoria das curvas de aprendizagem em 1936, WRIGHT (1936) apud YELLE (1979), foram desenvolvidas várias alternativas com relação a adequação da geometria e forma funcional das curvas de aprendizagem. Sendo que as mais difundidas são, segundo BADIRU (1992):

- O modelo linear logarítmico (1936);
- A curva S (1946);
- O modelo Stanford-B (1956);
- Fórmula de aprendizagem de DeJong (1957);
- Função de adaptação de Levy (1965);
- Fórmula de aprendizagem de Glover (1966);
- Função exponencial de Pegel (1969);
- Modelo de transição de Knecht (1974);
- Modelo de produto de Yelle (1976); e
- Modelo multiplicativo de poder (1981).

Para o desenvolvimento do presente trabalho serão detalhados apenas dois modelos: o modelo linear logarítmico, uma vez que toda a teoria das curvas de aprendizagem foi desenvolvida a partir deste e pelo fato deste possuir a maior quantidade de aplicação reais; e o modelo de

múltiplas variáveis, que não consta da lista acima.

3.2.1. O modelo linear logarítmico

Este modelo foi primeiro descrito por WRIGHT (1936) apud YELLE (1979) e muitas vezes é denominado de modelo tradicional de curva de aprendizagem. Neste modelo, assume-se primeiramente que a melhoria da produtividade é constante (inclinação constante) em função do aumento do número total de unidades produzidas. Existem duas formas básicas para o modelo linear logarítmico: o modelo de custo médio e o modelo de custo unitário.

Modelo de custo médio

A função de custo médio é mais utilizada que a função de custo unitário. Esta específica a relação entre o custo médio acumulado por unidade e o volume de produção acumulado. Esta função indica que o custo acumulado por unidade irá diminuir em uma porcentagem constante, conforme o volume acumulado de produção dobra. Este modelo pode ser expresso pela seguinte função:

$$C_x = K\prod_{i=1}^{n} c_i x_i^{bi} \qquad (3.5)$$

onde:

- C_x é o custo médio acumulado para a produção de x unidades;
- K é o parâmetro do modelo, que é igual ao custo da primeira unidade produzida C_1;
- b é o expoente da curva de aprendizagem (a constante de inclinação da curva de aprendizagem quando esta é plotada em escala dilogarítmica);

- n é o número total de fatores;
- p é a taxa percentual de aprendizagem;
- x é a contagem acumulada de unidades produzidas; e
- $b = (\log p)/(\log 2)$ e $p = 2^{b}$.

Quando se utiliza uma escala linear, o modelo linear logarítmico da curva de aprendizagem é uma hipérbole, como a apresentada na Figura 3.4. Já quando se utiliza uma escala dilogarítmica, o modelo é representado pela seguinte equação de reta:

$$\log C_x = \log C_1 + b.\log x \tag{3.6}$$

A expressão para p é derivada considerando-se dois níveis de produção, onde um é o dobro do outro.

Nível 1: x_1

Nível 2: $x_2 = 2.x_1$,

então:

$C_{x1} = C_1(x_1)^b$

$C_{x2} = C_2(2x_1)^b$

e, assim, o ganho percentual de produtividade pode ser calculado através da expressão:

$$p = \frac{C_1(2x_1)^b}{C_1(x_1)^b} = 2^b$$

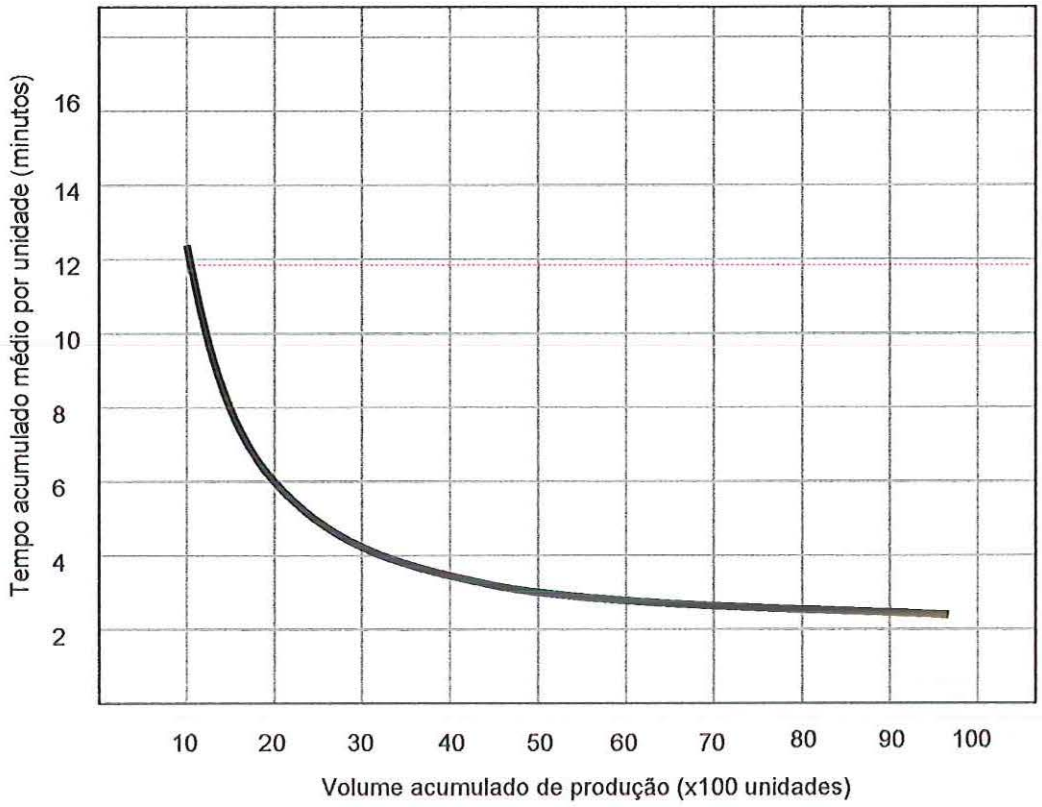

Figura 3.4 – O modelo linear logarítmico da curva de aprendizagem, JABER (1999).

As relações expostas acima podem ser utilizadas no desenvolvimento das seguintes relações:

a) função de custo total: utilizando-se a função do custo médio acumulado, o custo total para se produzir x unidades pode ser calculado através de:

$$CT_x = (x)C_x = (x)C_1x^{\,b} = C_1x^{\,(b+1)} \qquad (3.7)$$

b) função de custo unitário: o custo unitário para a produção x-ésima unidade é dada por:

$$CU_x = C_1\,x^{\,(b+1)} - C_1\,(x-1)^{\,(b+1)} = C_1\,[x^{\,(b+1)} - (x-1)^{\,(b+1)}]$$

(3.8)

c) função do custo marginal: o custo marginal de produção da x-ésima unidade pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$CM_x = \frac{d[CT_x]}{dx} = (b+1).C_1.x^b \qquad (3.9)$$

Modelo de custo unitário

O modelo de custo unitário é expressado através do custo específico de produção da x-ésima unidade. A expressão do modelo de custo unitário determina que o custo por unidade irá diminuir uma porcentagem constante conforme o volume de produção acumulado dobra. A forma funcional deste modelo é a mesma do modelo de custo médio, apenas a interpretação dos termos é diferente. Esta é expressa da seguinte maneira:

$$CU_x = C_1 x^b \qquad (3.10)$$

onde:

- CU_x é o custo de produção da x-ésima unidade;
- C_1 é o custo da primeira unidade;
- x é o número acumulado de unidades produzidas;
- b é o expoente da curva de aprendizagem = (logp)/(log2), sendo p a taxa percentual de aprendizagem = 2b.

A partir da expressão do custo unitário é também possível definir as expressões das outras equações básicas de custo, como foi feito anteriormente para o custo médio.

Para o caso discreto, o custo total para a produção de x unidades é dado por:

$$CT_x = \sum_{i=1}^{x} CU_i = C_1 \sum_{i=1}^{x} (i)^b \tag{3.11}$$

Já o custo médio acumulado por unidade é dado por:

$$Y_x = \frac{CT_x}{x} = \frac{1}{x} \sum_{i=1}^{x} CU_i = \frac{C_1}{x} \sum_{i=1}^{x} (i)^b \tag{3.12}$$

E o custo marginal é calculado da seguinte maneira:

$$CM_x = \frac{d[CT_x]}{dx} = \frac{d[C_1 \sum_{i=1}^{x} (i)^b}{dx} \tag{3.13}$$

Para o caso contínuo as expressões mudam e assumem as seguintes formas:

$$CT_x = \int_0^x CU(z)dz = C_1 \int_0^x z^b dz = \frac{C_1 x^{(b+1)}}{b+1} \tag{3.14}$$

$$Y_x = \left(\frac{1}{x}\right) \frac{C_1 x^{(b+1)}}{b+1} \tag{3.15}$$

$$CM_x = \frac{d[CT_x]}{dx} = \frac{d\left[\frac{C_1 x^{(b+1)}}{b+1}\right]}{dx} = C_1 x^b \tag{3.16}$$

Os outros modelos citados anteriormente procuram detalhar melhor particularidades específicas do processo de aprendizagem em manufatura, mas, basicamente, seguem as mesmas linhas gerais do modelo descrito acima. A comparação entre estes modelos pode ser feita através da Figura 3.5, onde todos os modelos são plotados na mesma escala logarítmica.

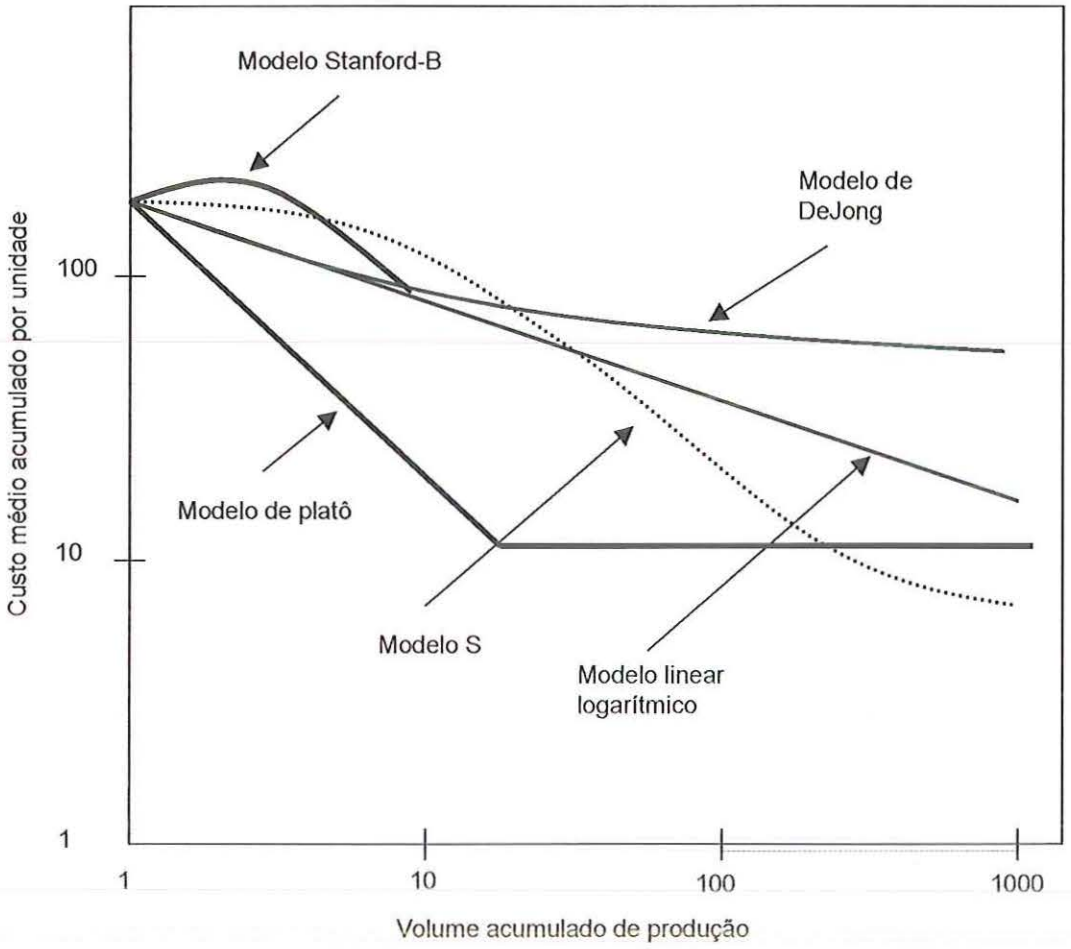

Figura 3.5 – Comparação dos modelos de curvas de aprendizagem em escala logarítmica, segundo YELLE (1979).

A seguir serão discutidas as idéias básicas dos modelos de curva de aprendizagem para múltiplas variáveis e em especial o modelo analítico desenvolvido por BADIRU (1992), pois este será utilizado no desenvolvimento da metodologia do presente trabalho.

3.2.2. O modelo da curva de aprendizagem para múltiplas variáveis

A aplicação tradicional das curvas de aprendizagem é feita apenas com relação ao nível de produção. No entanto a taxa de aprendizado dos operários fabris é influenciada constantemente por diversos fatores,

que estão relacionados com o posicionamento operacional da empresa, ou seja, a sua forma de organizar e conduzir o trabalho de seus empregados. Segundo BADIRU (1992) estes outros fatores de influência no aprendizado dos operários são os seguintes:

- Nível de habilidade;
- Nível de experiência;
- Quantidade de treinamento anterior;
- Quantidade de treinamento atual;
- Mudanças de projeto;
- Métodos de melhoria;
- Substituição de material;
- Mudança no nível de tolerâncias;
- Complexidade da tarefa;
- Quantidade de interferência externa afetando a tarefa e/ou o operador;
- Nível de competência com as ferramentas disponíveis; e
- Experiência anterior com trabalhos correlacionados (transferência de habilidades).

CONWAY & SCHULTZ (1959) apud BALOFF (1966) foram os primeiros a sugerir a necessidade de um modelo de múltiplas variáveis para a aplicação das curvas de aprendizagem, chamando a atenção de que há outros fatores que influem no custo na análise das curvas de aprendizagem. Estes autores expuseram uma superfície de controle hipotética, relacionando o custo à taxa de produção e ao volume acumulado de produção. Esta idéia também foi explorada por BRUNS (1970) e pode ser visualizada na Figura 3.6 apresentada a seguir:

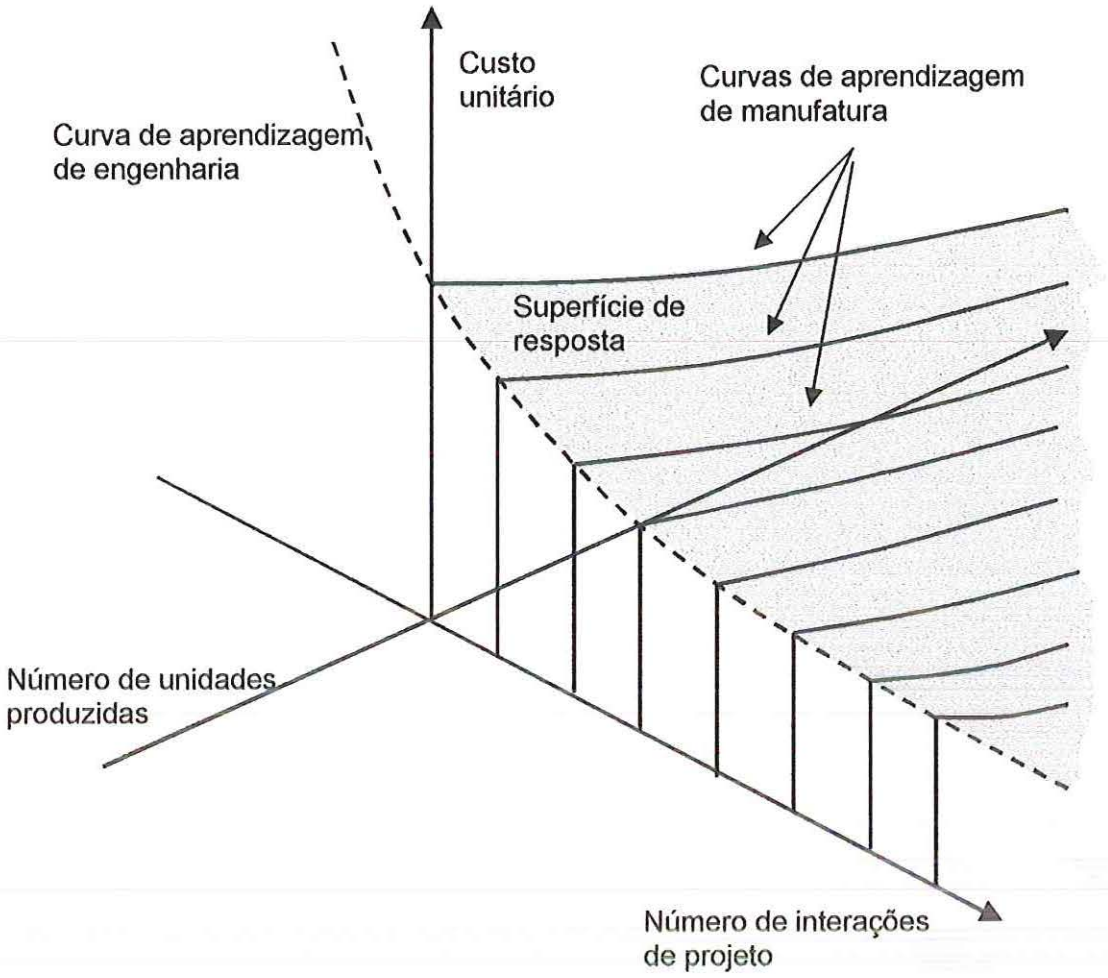

Figura 3.6 – Relações entre as curvas de aprendizagem de engenharia e manufatura, segundo BRUNS (1970).

BADIRU (1992) apresentou um modelo analítico para as curvas de aprendizagem para múltiplas variáveis. Onde demonstrou que a forma geral para o modelo de múltiplas variáveis é dado por:

$$C_x = K\prod_{i=1}^{n} c_i x_i^{bi} \qquad (3.17)$$

onde:

- C_x é o custo médio acumulado por unidade para um

determinado conjunto de valores de um fator;

- K é o parâmetro do modelo, que é igual ao custo da primeira unidade do produto;
- x é o vetor dos valores específicos das variáveis independentes (fatores);
- x_i é o valor específico do i-ésimo fator;
- n é o número de fatores relacionados no modelo;
- c_i é o coeficiente para o i-ésimo fator; e
- b_i é o expoente de aprendizagem para o i-ésimo fator.

A Figura 3.7 mostra um exemplo genérico de uma superfície de resposta para a curva de aprendizagem com dois fatores (n=2), sendo que os fatores mais comuns encontrados são o volume de produção (x1) e o tempo (x1). O tempo é quase sempre incluído neste modelo, pois a maioria dos fatores que influem no aprendizado são dependentes do tempo e, além disso, para facilitar a análise do modelo assume-se que o volume de produção se comporta como uma variável contínua.

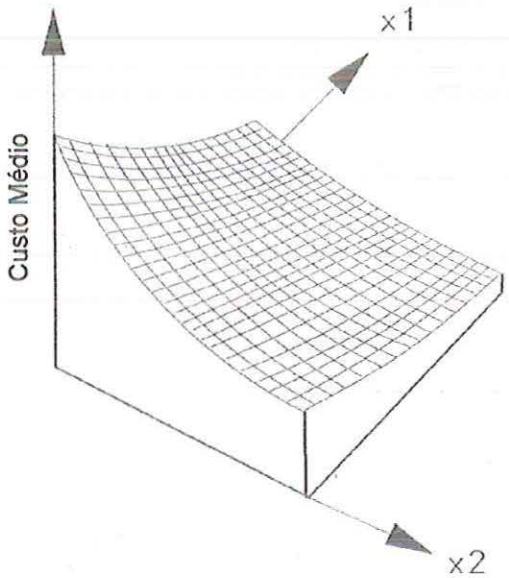

Figura 3.7 – Forma genérica de uma superfície de resposta para o modelo de curva de aprendizagem de dois fatores, BADIRU (1992).

A grande vantagem desta aproximação do problema de como se dá a aprendizagem nos ambientes de manufatura é que agora pode-se visualizar que este é influenciado por fatores, que por sua vez são dependentes do tempo. Isto supera a simplificação inicial de que a aprendizagem era dependente apenas do volume de produção, como mostra a equação de reta dos modelos iniciais, que segundo CARLSON (1973) foi um dos principais motivos das restrições ao uso encontradas por esta teoria. Especificamente, a expressão para o modelo de dois fatores da curva de aprendizagem é dado por:

$$C_{x1x2} = Kc_1x_1^{b1}c_2x_2^{b2} \tag{3.18}$$

3.2.3. Análise econômica de processos de manufatura através das curvas de aprendizagem

Os resultados da análise das curvas de aprendizagem de múltipla variáveis são importantes para vários tipos de análises dentro dos processos de manufatura. A necessidade de melhoria contínua imposta pelas formas atuais da economia global, faz com que haja um grande destaque nos procedimentos de otimização de operações e processos, sendo que esta atividade quase sempre passam pela constante avaliação dos custos de produção, LI & RAJAGOPALAN (1998). Como dito anteriormente, um dos grandes obstáculos da avaliação do desempenho das AMT é a presença de fatores reais e intangíveis, quantitativos e qualitativos na composição dos problemas de análise de custos. As curvas de aprendizagem são uma ferramenta que possibilita, senão a determinação acurada destes fatores, mas pelo menos a visualização do seu comportamento conjunto sobre o processo em discussão.

São claros os benefícios que as curvas de aprendizagem podem trazer a análise dos seguintes problemas:

- Análise de ponto de retorno, SMUNT (1999);

- Decisão entre comprar e fazer;
- Escalas e alocação de mão-de-obra especializada, MALHOTA et al (1992).
- Planejamento da produção TOWILL & CHERRINGTON (1994);e
- Investimentos, NAIM & TOWILL (1993).

3.2.4. Exemplo da influência do aprendizado no desempenho de sistemas de manufatura

ANDRADE (1999) apresentou uma comparação interessante entre os sistema de custo ABC e o sistema de custo tradicional (TC), mostrando que o primeiro tem se apresentado como um modo mais acurado e consistente de realizar a avaliação dos custos de operação de uma companhia. Isto melhora diretamente a qualidade das decisões financeiras de uma empresa, pois no processo de gerenciamento apenas os custos que podem ser controlados são considerados.

A idéia que rege o sistema de custeio tradicional é que os custos diretos, trabalho e materiais diretos, constituem a base para a alocação dos custos indiretos. Normalmente, o custo indireto é calculado multiplicando-se o custo direto por um coeficiente de conversão (mark-up constant). Sendo que o valor deste coeficiente é baseado na experiência dos profissionais envolvidos, o que pode diminuir em maior ou menor grau a confiabilidade das decisões.

Esta forma de custeio era adequada até o advento das AMT e a modificação das condições de competição do mercado por duas razões:

- A fração do custo total de um produto relacionada com os custos diretos era substancialmente maior do que o componente de custo indireto;
- o componente de custo indireto era, e ainda é, inerentemente mais

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

caro de ser determinado do que o componente de custo direto.

Mas nas últimas duas décadas, tornou-se cada vez mais claro que os métodos de TC não eram mais adequados para os modernos ambientes de manufatura. Por causa do grande número de produtos que hoje são produzidos e pela competição crescente entre as companhias, é necessário um método de custeio mais acurado. Os métodos de TC eram úteis e acurados quando as companhias fabricavam poucos produtos e os custos de manufatura indireta eram relativamente insignificantes quando comparados com os custos diretos.

O ABC, descrito no Anexo A é um método baseado no consumo de recursos por atividades que estão envolvidas na fabricação de um determinado produto. Atividades incluem não apenas o processamento, mais o transporte de materiais, inspeções, e todas as outras fases que podem afetar os custos.

Para avaliar as afirmações feitas acima ANDRADE (1999) desenvolveu a discussão de uma estudo de caso, comparando o desempenho dos dois sistemas de custeio no processo de fabricação de dois sólidos prismáticos, denominados de produtos A e B. Os dados utilizados na discussão são apresentados na Tabela 3.1 abaixo. Este caso é apresentado aqui como forma de ilustrar a influência entre o sistema de custeio escolhido e o desempenho econômico de um processo de fabricação.

Tabela 3.1 – Dados de custo para o estudo de caso proposto pos ANDRADE (1999).

Dados de Custo

	Produto A	Produto B
Trabalho Direto (Usinagem), $/min	0,0025	0,0025
Trabalho Indireto (Supervisão), $/min	0,05	0,05
Máquina, $/min	0,5	0,5
Transporte, $/m	2,5	5,0
Matéria-prima, $/m	7,0	3,0
Fator de correção/ajuste	3,0	3,0

Este processo de fabricação envolve quatro tipos de recursos:

- matéria-prima;
- máquina-ferramenta;
- trabalho de usinagem;
- trabalho de supervisão.

Recursos como espaço, manutenção e administração não são incluídos no estudo, com o objetivo de manter o modelo de aprendizagem ABC o mais simples possível. A Figura 3.8 a seguir resume a formação dos direcionadores de custo utilizados.

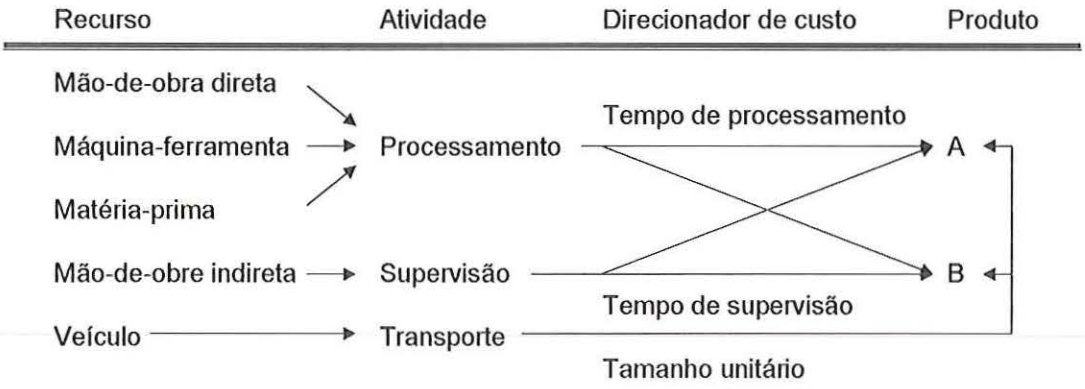

Figura 3.8 – Direcionadores de custo, ANDRADE (1999).

O procedimento para o cálculo dos custos é resumido pelas fórmulas apresentadas na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 – Fórmulas para o cálculo de custos.

Fórmulas utilizadas no cálculo de custos
Custo de matéria-prima (CMP) = custo da barra/m x comprimento da barra
Custo de trabalho direto (CTD) = custo trabalho direto/min x tempo em processo
Custo de trabalho indireto (CTI) = custo trabalho indireto/min x tempo de supervisão
Custo da máquina (CM) = custo da máquina/min x tempo em processo
Custo de transporte (CT) = custo de transporte/m x comprimento da barra
Custo direto (CD) = CMP + CTD
Custo indireto (CI) = CD x fator de ajuste; procedimento tradicional TC
Custo indireto (CI) = CTI + CM + CT; procedimento ABC
Custo Total = CD + CI

Em função dos procedimentos de cálculo foram formados dois modelos de custos para cada produto A e B. Assim, formaram-se os custos através dos procedimentos tradicional e baseado em atividade, resultando em quatro valores para a análise. Estes cálculos foram repetidos por quinze dias, contados a partir do início da produção, levando em conta as taxas de produtividade de 80 unidades diárias para o produto A e 250 para o B.

Este resultados são apresentados nos dois gráficos da Figura 3.9 apresentada a seguir.

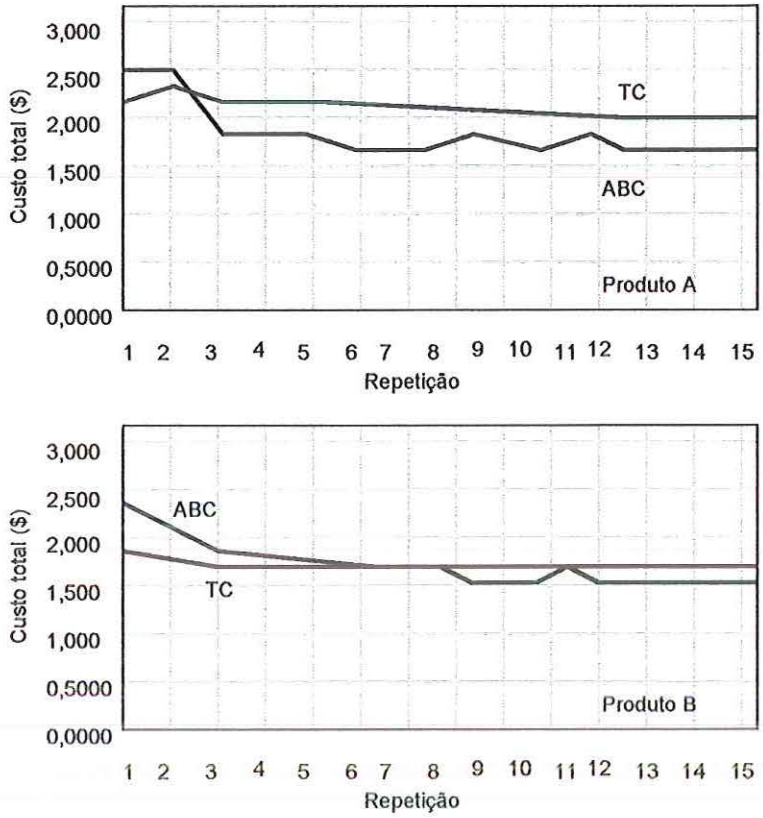

Figura 3.9 – Curvas de aprendizado para os produtos A e B, ANDRADE (1999).

Na Figura 3.9 pode-se observar que para o produto A o custo total no início do aprendizado é maior através do ABC do que pelo TC e conforme o aprendizado começa a se desenvolver o custo ABC começa a diminuir, enquanto que o Tc se mantém praticamente constante. O mesmo padrão se repete para o produto B.

Isto mostra que o aprendizado ocorre no desenvolvimento de processo de fabricação e que o custeio O ABC é capaz de realizar melhores previsões de quando irá ocorrer o aprendizado do que o TC. O custo pelo sistema ABC mostra a variação entre o início e o fim do aprendizado, enquanto que o TC se mantém constante.

Com a conclusão desta revisão sobre os conceitos fundamentais relacionados com a medida de desempenho de investimentos em processos de manufatura, passa-se então, no próximo capítulo a propor um nova metodologia para a seleção de processos de manufatura tendo em vista a integração dos aspectos técnicos e econômicos.

4. A seleção processos de manufatura: proposta de uma metodologia

4.1. Suposições iniciais.

Antes da apresentação da metodologia proposta para a seleção de processos manufatura, vale a pena uma rápida discussão a respeito dos elementos apresentados na revisão bibliográfica do presente trabalho, Capítulos 2 e 3.

No início do Capítulo 2 foram discutidos os elementos que fazem parte de qualquer processo de criação e desenvolvimento de um projeto. Seja este um projeto de arquitetura de um edifício, o processo de criação de uma campanha publicitária ou, no caso do presente trabalho, a escolha da configuração adequada de um sistema de manufatura para um determinado componente metal-mecânico.

Algumas das características apresentadas neste ponto da revisão bibliográfica devem ser ressaltadas:

- Ainda não existe um paradigma totalmente aceito de como se dá o processo de criação e desenvolvimento de um projeto;
- O processo de criação e desenvolvimento de um projeto pode ser dividido em etapas, que não devem ser excluídas e devem ser tratadas sem nenhum preconceito;
- O projeto é essencialmente um ciclo realimentado; e
- O ponto de partida de qualquer projeto é a definição do seus atributos, que deve ser realizada de maneira acurada e pode ser

racionalizada através da metodologia QFD (quality function deployment).

Na continuação do mesmo capítulo, são discutidos os elementos que formam um processo de decisão para a escolha dos atributos de um projeto. Dentro deste assunto alguns pontos também devem ser ressaltados:

- O processo de decisão para a escolha dos atributos de um projeto também é essencialmente um ciclo realimentado;
- Este ciclo, em seu início é composto basicamente por três etapas: a definição dos fatores primários de decisão, a determinação de suas prioridades e a eliminação dos fatores de baixa prioridade;e
- A segunda fase deste ciclo é marcada pela análise de sensibilidade, que realimenta o ciclo de escolha dos atributos de um projeto. Na análise de sensibilidade avalia-se a influência dos fatores primários de decisão sobre o desempenho geral do processo.

E, finalmente, ainda no Capítulo 2 são apresentados os elementos que na prática são considerados na escolha dos processos de manufatura. A escolha destes elementos é fortemente vinculada a obra de JURAN (1992), mas também aparece em outras publicações, como é apresentado neste mesmo trecho da revisão bibliográfica. O objetivo desta parte é mostrar que os passos que já foram dados anteriormente na configuração de outros processos de manufatura, mais precisamente na escolha dos fatores primários de decisão, podem e devem ser aproveitados. A avaliação dos projetos anteriores é parte integrante do ciclo de criação e desenvolvimento de qualquer tipo de projeto.

Assim, o Capítulo 2 mostrou quais os passos que devem ser respeitados na criação e desenvolvimento de um projeto e uma sequência a ser seguida para gerar e escolher os processos de manufatura.

No Capítulo 3, o autor procurou fornecer um enfoque mais comum sobre projetos, que são as formas utilizadas para a avaliação e seu acompanhamento. Como as atividades de manufatura estão fortemente relacionadas com a economia de mercado, a maneira escolhida para a avaliação de seus projetos foi o desempenho financeiro. Já para o acompanhamento dos projetos escolheu-se como ferramenta as curvas de aprendizagem.

Neste capítulo, também, alguns pontos devem ser ressaltados antes do enunciado da metodologia e estes são os seguintes:

- Todos os métodos para a avaliação financeira de projetos de investimentos preocupam-se fundamentalmente com três aspectos: a razão entre entradas e saídas de caixa do investimento, o valor do dinheiro no tempo e o risco evolvido;
- Os índices utilizados para realizar esta avaliação forma criados para funcionar no deliniamento onde há mais de uma alternativa de investimento; e
- O bom funcionamento das curvas de aprendizagem depende do conhecimento anterior acumulado.

Agora, após a apresentação resumida das suposições básicas, será feita a seguir a descrição da metodologia proposta para a seleção e configuração de processos de manufatura, apurada a partir dos pontos discutidos na revisão bibliográfica.

4.2 Enunciado geral

A hipótese básica para o desenvolvimento de uma metodologia para a escolha e configuração de um processo de manufatura é que existem pelo menos duas alternativas para a execução de um mesmo componente e que

os dados pré-existentes a respeito de processos semelhantes são disponíveis e influem na escolha do novo processo. Além disso, um fator de restrição para a tomada de decisão é que a escolha é feita em dois círculos distintos dentro das organizações, primeiro a discussão é realizada dentro das áreas de produção e depois encaminhada para as áreas de administração, geralmente responsáveis pelo gerenciamento dos investimentos.

Assim, a metodologia para escolha de processos de manufatura deve ser configurada para a escolha entre alternativas possíveis e capazes de transmitir as informações necessárias para a decisão aos dois níveis característicos de uma empresa, administração e produção.

Esta metodologia para a escolha e configuração de processos de manufatura foi divida em três fases:

- Primeira: a avaliação geral;
- Segunda: os testes de laboratório; e
- Terceira: e avaliação da manufatura.

O detalhamento destas três fases é apresentado nos itens a seguir.

4.3 Avaliação geral.

O ciclo que a fase de avaliação geral deve seguir é apresentado na forma de um fluxograma na Figura 4.1 a seguir. A discussão que o acompanha segue exatamente os seus passos.

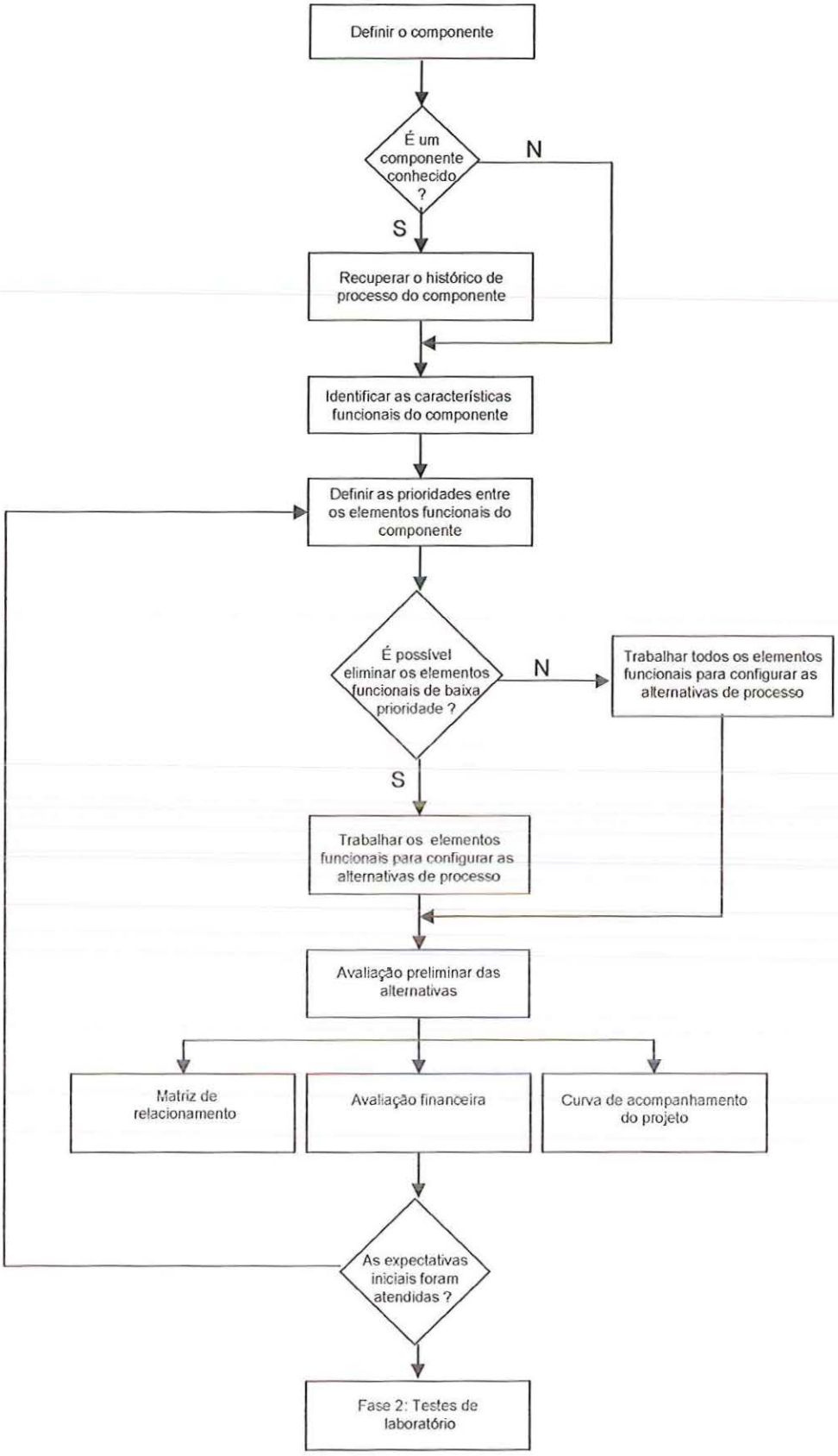

Figura 4.1 – Fase 1: avaliação geral.

Como foi escrito anteriormente, para iniciar a configuração de um processo de manufatura é necessário determinar claramente quais são as características funcionais do componente a ser fabricado. Esta atividade, na maioria das vezes, se inicia através da análise do desenho de processo deste componente, onde deve-se ter a preocupação de responder as seguintes questões:

a) Qual é a função do componente dentro do conjunto onde será montado?
b) Este componente é constituído apenas por superfícies prismáticas ou é um sólido de revolução?
c) Quais são as superfícies que tornam o componente funcional dentro do conjunto em que este será montado?
d) Quais são as tolerâncias dimensionais, de forma e posição que tornam o componente funcional?
e) Quais são as superfícies de referência para estas tolerâncias?
f) Quais são os valores de rugosidade que devem ser respeitados para que o componente seja funcional?
g) Existem requisitos estéticos que se confundem com as demais características funcionais do componente?
h) Quais são as características dos materiais que são utilizados na fabricação dos componentes, com relação as suas características de usinagem?

Embora a sequência de questões apresentada acima seja essencial para o desenvolvimento de um processo, não há a necessidade de ser realizada por profissionais experientes, ou de se recorrer a uma base específica de conhecimento.

Já o próximo passo, dentro da fase de avaliação geral, deve ser realizado por profissionais experientes e, se houver disponibilidade, deve-se recorrer a uma base de conhecimento específica. Este passo é a

determinação das prioridades entre as características funcionais do componente.

Neste ponto abre-se espaço para o conhecimento acumulado de maneira informal dentro das organizações onde o projeto está sendo avaliado. Este procedimento é saudável, desde que não seja influenciado pela força política de seus participantes, prevalecendo o peso das opiniões pessoais no lugar do conhecimento vindo da experiência real de anos de trabalho.

Neste momento, são observados de maneira geral os elementos que formam este componente, mas ainda não como realizar o relacionamento com as características operacionais do processo. Não haveria consistência deste procedimento, dentro da presente metodologia, pois as alternativas de processos ainda não foram escolhidas.

A questão que deve ser respondida a seguir, a partir dos dois conjuntos de informações que foram estabelecidos nos passos anteriores, é se algum dos elementos funcionais especificados pode ser descartado da análise. Esta decisão deve ser tomada certificando-se que não haja prejuízo no desempenho do componente dentro do conjunto em que será montado. Se não houver consenso neste ponto, todos os elementos funcionais devem ser observados na escolha do processo de fabricação.

O objetivo desta avaliação é de possibilitar uma racionalização no número de alternativas que podem ser utilizadas na escolha do processo de fabricação.

O passo seguinte é definir as alternativas de processos de fabricação que podem atender, em um primeiro momento, as necessidades do componente em questão.

De posse da lista de alternativas de processos de fabricação devem ser feitas as análises preliminares, estabelecendo-se as metas de capabilidade para o processo, o levantamento inicial dos custos de usinagem e a referente análise de investimento e, finalmente, os parâmetros das curvas de aprendizagem que serão montadas para acompanhar a

implantação do processo, nas fases de testes de laboratórios e implantação de manufatura.

4.3.1. Avaliação preliminar das alternativas de processo

A avaliação preliminar das alternativas de processo em análise é feita em três níveis, que são apresentados a seguir.

Determinação das metas de qualidade

O estabelecimento das metas de qualidade para as alternativas de processo é feita com base nas discussões realizadas anteriormente sobre o desenho de processo do componente a ser manufaturado ou, se for o caso, pelos valores estipulados pelo cliente.

O objetivo fundamental desta etapa é de estabelecer a relação entre as características funcionais do componente, suas prioridades e as características operacionais das alternativas de processo levantadas nas fases anteriores.

Este trabalho é feito através da construção de uma matriz de relacionamento, utilizando como guia de procedimento a sequência estabelecida pelo QFD. A forma geral desta tabela é apresentada na Figura 4.2 a seguir.

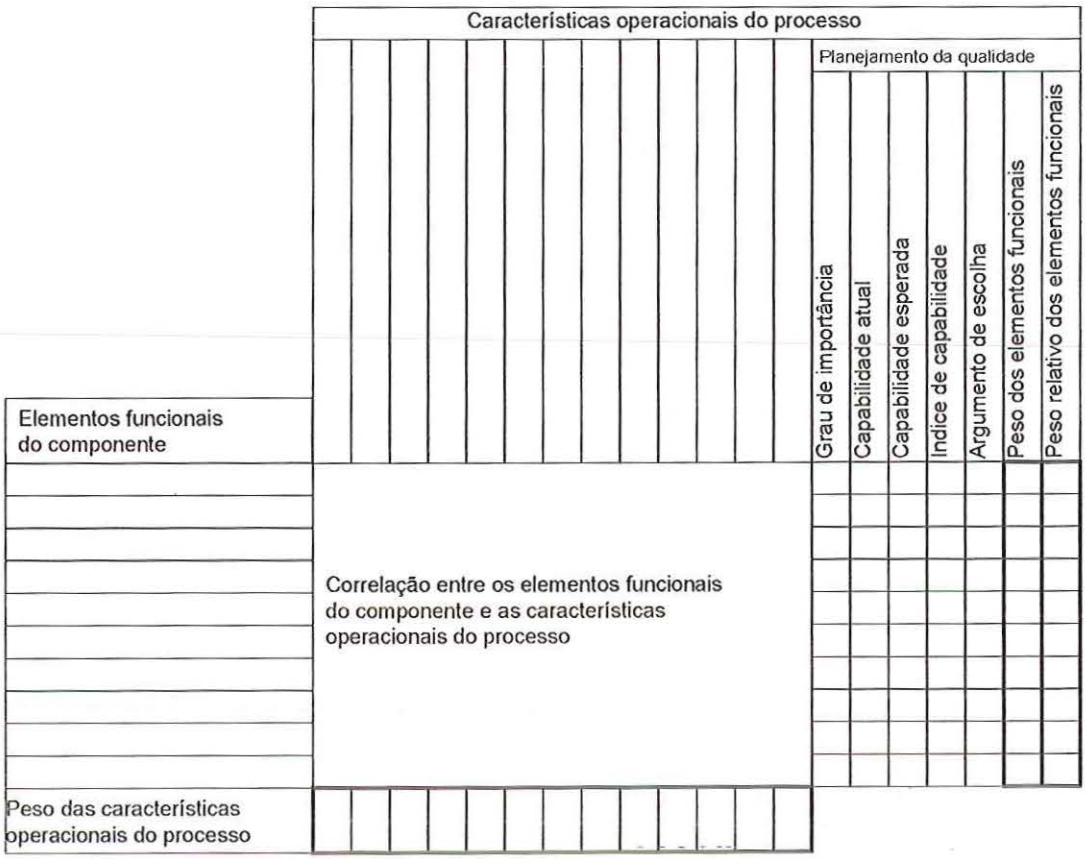

Figura 4.2 – Matriz de relacionamento das metas da qualidade.

Para a construção da matriz de relacionamento entre as características funcionais do componentes e as características operacionais do processo, o primeiro passo é executar o *planejamento da qualidade*. O resultado do planejamento da qualidade são o *peso* e o *peso relativo* de cada um dos elementos funcionais do componente.

No *planejamento da qualidade*, deve-se primeiro estabelecer o *grau de importância* de cada elemento funcional do componente. A escala utilizada para isto é a seguinte:

- 1 = esta característica não influi absolutamente nada no desempenho funcional do componente.
- 2 = esta característica não influi no desempenho funcional do componente.

- 3 = esta característica tanto faz no desempenho funcional do componente.
- 4 = esta característica influi no desempenho funcional do componente.
- 5 = esta característica influi bastante no desempenho funcional do componente.

Na fase de *avaliação geral*, este procedimento é a primeira tentativa de estabelecer as prioridades entre os elementos funcionais do processo, para a decisão da escolha da melhor alternativa de processo. Neste ponto, praticamente traduz-se a opinião dos participantes do processo de projeto em índices.

Continuando com o *planejamento da qualidade*, deve-se fazer a seguir *análise comparativa*, onde a *capabilidade esperada* é comparada com a *capabilidade atual*, que é a capacidade dos processos em análise. Para facilitar a leitura da matriz de relacionamento são utilizados cinco valores de índices de CpK para se expressar a capabilidade. Estes valores são os seguintes:

- 1 = capabilidade péssima (CpK menor do que 0,67).
- 2 = capabilidade ruim (CpK entre 0,67 e 1,00).
- 3 = capabilidade aceitável (CpK entre 1,00 e 1,33).
- 4 = capabilidade boa (Cpk entre 1,33 e 1,64).
- 5 = capabilidade excelente (CpK acima de 1,64).

E o *índice de capabilidade* é a razão entre a *capacidade esperada* e a *capacidade atual*.

O último valor a ser estabelecido, antes do cálculo dos pesos é o do argumento de escolha. Os valores que podem ser estabelecidos para o argumento de escolha são representados graficamente. Isto acontece, novamente, com a intenção de facilitar a leitura da matriz de relacionamento pelo usuário. Estes valores são os seguintes:

- ◯ Argumento de escolha normal = 1,2.
- ◉ Argumento de escolha importante = 1,5.

A escolha dos valores dos *argumentos de escolha* é subjetiva e depende da opinião do analista responsável pelo processo. Deve ser utilizado com sabedoria pois é um elemento que pode modificar significativamente o conjunto de valores que serão utilizados como base para a tomada de decisão, na escolha das alternativas de processo. É especialmente nestes pontos, onde há grande subjetividade e possibilidade de opinião, que o ciclo de projeto deve ser realimentado.

Finalmente, para a conclusão do planejamento da qualidade são calculados os pesos. O *peso* de cada elemento funcional do componente é calculado através do produto de três dos seus respectivos itens do *planejamento da qualidade*, que são o *grau de importância*, o *índice capabilidade* e o *argumento de escolha*. Já o *peso relativo* para cada um dos elementos funcionais do componente é calculado através da razão entre o peso do elemento funcional e o somatório de todos os *pesos* dos elementos funcionais.

Assim, começa-se a estabelecer para o usuário quais são as prioridades dos elementos funcionais do componente, quando se planeja a sua manufatura.

Ainda, na fase de *avaliação geral*, deve-se completar a matriz de relacionamento entre os elementos funcionais do componente e as características operacionais do processo. Isto é feito estabelecendo-se a correlação entre estes dois componentes da matriz de relacionamento. E, mais uma vez, para facilitar a leitura da tabela pelo usuário os valores de correlação são expressos graficamente, através dos seguintes símbolos:

- ◉ Possui correlação forte = 3,0.
- ◯ Possui correlação = 2,0.
- △ É possível que haja correlação = 1,0

E para finalizar a tabela de relacionamento, nesta fase, são calculados os pesos de cada característica operacional do processo. Estes pesos são o somatório do produto entre o peso de cada um dos elementos funcionais pela razão entre o índice de correlação e o somatório dos índices de correlação daquele elemento funcional.

Desta maneira, começa-se a delinear para o usuário a influência de cada característica operacional do processo sobre a manufatura do componente e os seus elementos funcionais.

Na fase de *avaliação geral*, as informações contidas na tabela de relacionamento entre os elementos funcionais do processo e as características operacionais do processo ainda possuem forte subjetividade. No entanto, estas informações são importantes no planejamento da próxima fase, *testes de laboratório*, que irá avaliar os valores de capabilidade estipulados na fase anterior e a sensibilidade dos elementos funcionais à variação das características operacionais do processo.

Avaliação financeira

A avaliação financeira é, como foi discutido anteriormente, parte integrante e essencial do processo de criação, desenvolvimento e implantação de projetos, que estejam inseridos dentro das mais diversas áreas da moderna economia de mercado.

A álgebra da sistemática desenvolvida para esta tarefa não pode ser considerada complexa, no entanto, esta facilidade de cálculo contrasta com a dificuldade em se realizar a interpretação dos valores obtidos dentro do contexto de cada empresa. Realizar esta interpretação não faz parte dos objetivos da metodologia, que está sendo apresentada aqui, mas apenas fornecer de maneira acurada os elementos necessários para padronizar a linguagem entre os setores administrativos e de produção das empresas envolvidas.

Invariavelmente, o primeiro passo para a realização de qualquer análise financeira é o estabelecimento do fluxo de caixa do investimento. Em

função, da configuração sugerida pela presente metodologia para as curvas de aprendizagem que serão utilizadas para o acompanhamento da implantação do projeto, o fluxo de caixa deverá ser montado apresentando, em cada momento, os valores de saída e entrada de caixa e, não o fluxo de caixa líquido mais utilizado pelos setores administrativos das empresas.

O próximo passo a escolha da taxa mínima de atratividade (TMA) para o investimento. A TMA é a taxa de juros que será utilizada nas operações de atualização de capital, capitalização e descapitalização, dentro do fluxo de caixa do investimento. Esta taxa deve refletir a situação atual da empresa, com a relação as suas necessidades de retorno de investimento, levando em conta principalmente a sua eficiência operacional global e o seu custo de capital. Como foi discutido anteriormente, a função da TMA não é de refletir o risco do investimento. O risco está relacionado com a probabilidade de ocorrência dos valores futuros do fluxo de caixa do investimento.

O procedimento adequado para se tratar o risco de um investimento é o levantamento dos valores prováveis dentro do fluxo de caixa, tanto entradas quanto saídas, juntamente com as suas probabilidades. A média ponderada dos valores de entrada e saída de caixa são utilizadas no cálculo dos indicadores financeiros de desempenho de investimento, como o VPL, e o desvio-padrão serve como comparativo do risco de investimento, com outros projetos já estabelecidos ou que estão sendo, também, avaliados.

Caracteristicamente, devido ao histórico da relação entre montadoras de automóveis e grandes indústrias de autopeças, o risco envolvido com a atividade de manufatura de componentes mecânicos para a indústria automobilística é baixo. Sendo que a determinação dos valores de entrada e saída de caixa podem ser determinados utilizando os valores esperados de produção e as equações de custo de usinagem, que são apresentadas no Anexo A do presente trabalho.

Na presente metodologia os índices que serão utilizados para a avaliação financeira do investimento são dois: o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR). Preferencialmente, o VPL será utilizado no

lugar da TIR, pois, como já foi discutido anteriormente, este não sofre a influência dos valores iniciais e a sua interpretação é muito mais simples do que o da TIR. A TIR deverá ser utilizada nas situações onde se deve comparar o desempenho de investimento que ocorreram em momentos muito distantes no tempo, ou alternativas de investimento em moedas diferentes.

O VPL será utilizado de maneiras diferentes na curva de acompanhamento da implantação de manufatura, que serão apresentadas no item a seguir.

Novamente, na fase de avaliação geral os valores obtidos na avaliação financeira, assim como na matriz de relacionamento, sofrem influência subjetiva e devem ser realimentados na fase posterior de testes de laboratório.

Curvas de acompanhamento do projeto de investimento

O fluxo de caixa estabelecido no item anterior e a definição da taxa mínima de atratividade fornecem as informações necessárias para a construção das curvas de acompanhamento do projeto de investimento.

A idéia do aprendizado deve ser inserida na construção destas curvas, mas isto pode ser realizado de maneiras diferentes. O usuário pode optar em utilizar um modelo pronto para a curva de aprendizagem, adotando-se um valor conhecido para a taxa percentual de aprendizagem (p). Como por exemplo p=0,30, onde se espera um aumento de 30% de produtividade cada vez que o número de unidades produzidas dobra. Ou ainda, o usuário pode optar em realizar a avaliação dos parâmetros de um modelo de curva de aprendizagem na fase de testes de laboratório ou no início da implantação da manufatura.

Como discutido anteriormente, a maioria das aplicações em manufatura das curvas de aprendizagem utiliza a equação de custo médio, mas na presente metodologia isto não irá ocorrer tão diretamente. Aqui a

avaliação do custo de manufatura irá ocorrer de maneira indireta, juntamente com o valor inicial do investimento, pois o gráfico de acompanhamento do projeto de investimento será formado por três curvas onde serão apresentados os valores presentes do investimento, da produção e do rédito.

A forma geral deste gráfico é apresentado na Figura 4.3 a seguir, juntamente com os seus principais parâmetros.

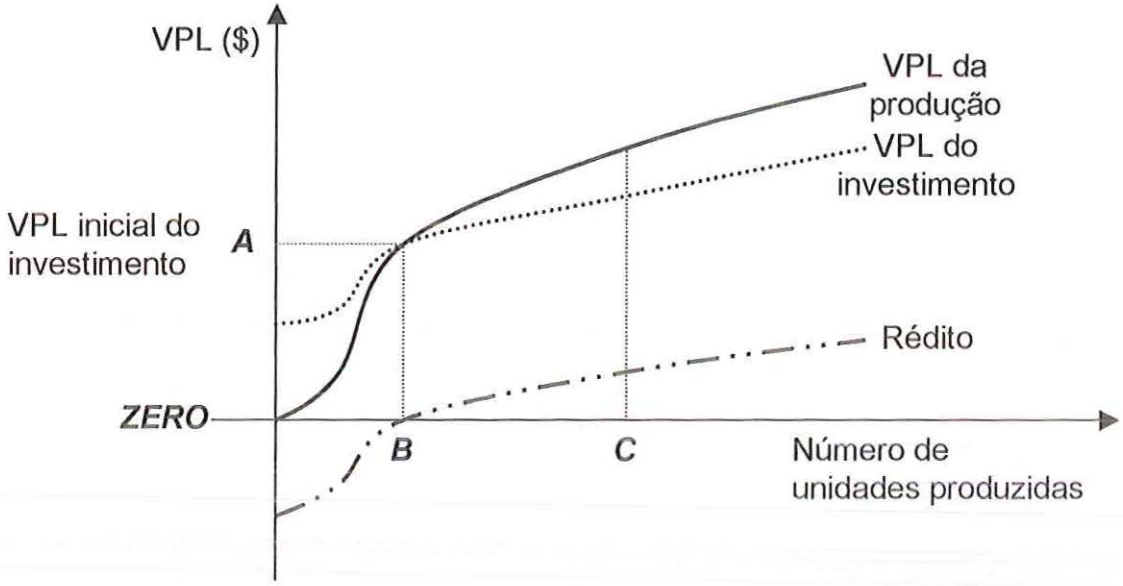

Figura 4.3 – Gráfico de acompanhamento do projeto de investimento.

Os pontos do gráfico a serem utilizados como referência para o acompanhamento das duas fases seguintes são:

- ***Curva de VPL do investimento***: esta curva mostra para cada nível acumulado de produção o montante de capital investido corrigido, indicando claramente o quanto deverá ser investido para se atingir um determinado número de unidades produzidas. Os valores que formam esta curva complementam a informação fornecida pelo montante investimento inicial, na decisão de investimento e ajudam na atualização da TMA. Os valores

considerados para a formação desta curva são positivos, para facilitar a comparação gráfica com os valores arrecadados com o volume de produção.

- ***Curva de VPL da produção***: esta curva mostra para cada nível acumulado de produção o montante da receita arrecadada com a venda dos componentes produzidos. Os valores que formam esta curva também complementam a informação fornecida pelo montante do investimento inicial, na decisão de investimento e ajudam na atualização da TMA.

- ***Curva de Rédito***: neste caso o que está sendo chamado de rédito é a diferença entre o VPL do investimento e o VPL da produção, para um mesmo nível acumulado de produção. A função da curva de rédito é indicar de maneira imediata o nível de produção a partir do qual começara a haver lucro e de quanto será este valor.

- ***Ponto A***: representa o valor do investimento inicial. Este valor é essencial na decisão de investimento, pois é o primeiro quantificador a ser utilizado na decisão de investir e influi diretamente no cálculo do custo capital a ser utilizado e, consequentemente, na definição do valor da taxa mínima de atratividade.

- ***Ponto B***: representa o nível de produção que deve ser atingido para que o VPL do investimento iguale o VPL da produção. Esta informação permite ao usuário determinar o instante em que o investimento corrigido monetariamente será pago. Este indicador é semelhante ao prazo de retorno de investimento, discutido anteriormente, no que diz respeito à quantificação do risco. Quanto mais distante do zero estiver o ponto B, maior o risco do projeto em questão.

- ***Ponto C***: é o nível de produção a partir do qual a inclinação das três curvas de VPL se torna constante. Este ponto indica a estabilização do fluxo de caixa, onde as saídas de caixa estão relacionadas apenas com a manutenção geral do funcionamento do processo e deixam de haver ganhos significativos de produtividade, a partir do mesmo investimento.

A forma com que o gráfico de acompanhamento de investimento foi montado na Figura 4.3 pode duas gerar suposições que não são necessariamente verdadeiras. Primeiro, nada obriga que o ponto C ocorra antes do ponto B e, segundo, o ponto C pode não estar localizado no mesmo nível acumulado de produção para as três curvas de VPL.

O VPL acumulado foi escolhido como parâmetro para acompanhamento do projeto de investimento por um motivo. Para que o usuário, durante a implantação de investimento, tenha sempre a informação acurada dos montantes envolvidos no projeto. E, desta maneira, tenha informações acuradas para a decisão de realizar, ou não, um investimento complementar.

Assim, finaliza-se a fase de avaliação geral do investimento. E o resultado desta é resumido no formulário apresentado na Figura 4.4, da página seguinte. Neste formulário são expressos para o usuário os três elementos que fazem parte da avaliação geral, para cada opção de processo em análise: a avaliação funcional do componente, a matriz de relacionamento entre os elementos funcionais do componente e as características operacionais do processo e o gráfico de acompanhamento do projeto de investimento.

Com a visualização dos formulários os usuários da metodologia já podem ter uma primeira impressão sobre cada uma das opções de investimento.

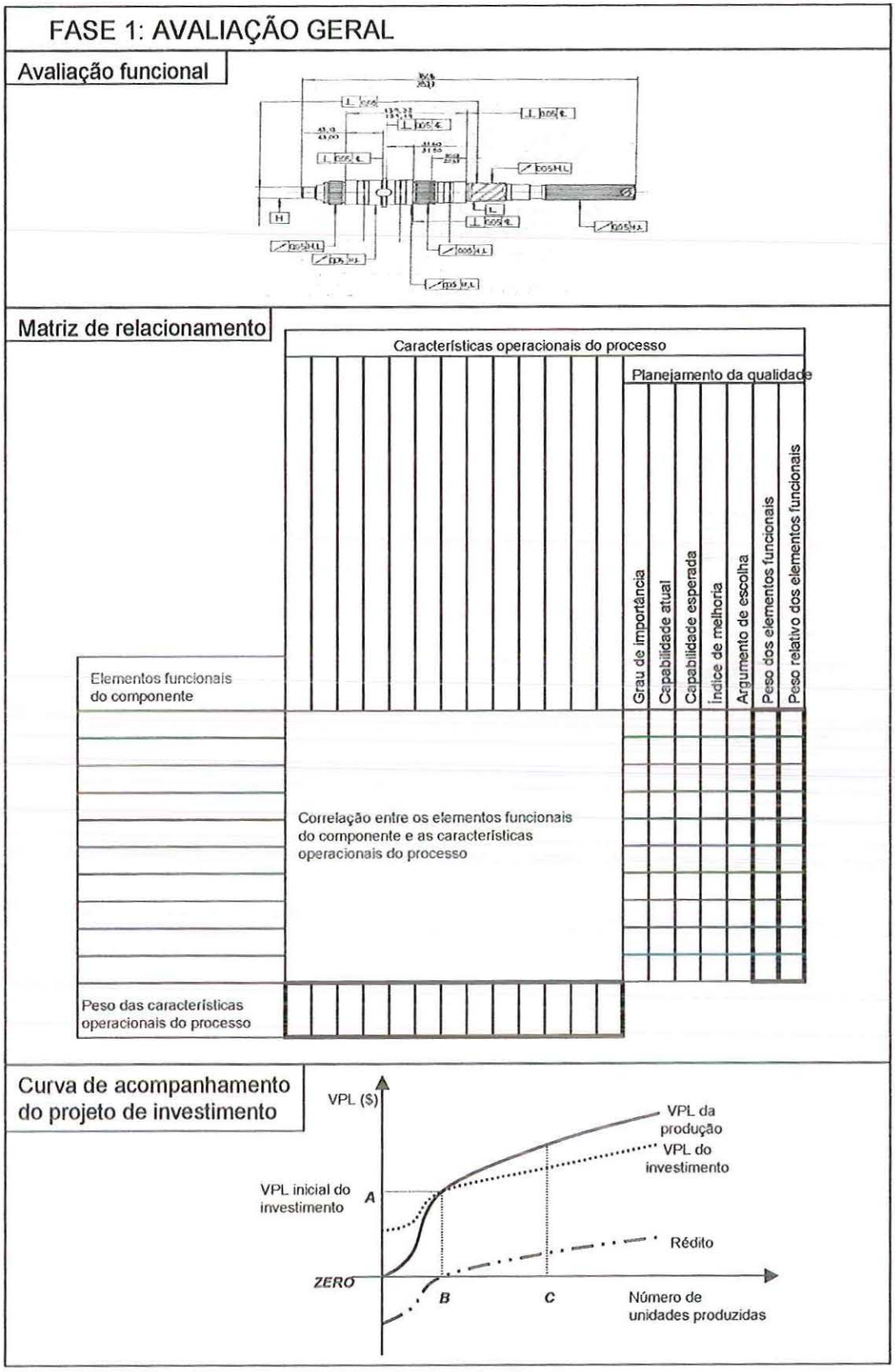

Figura 4.4 – Folha de resumo da fase de avaliação geral.

4.4. Testes de laboratório

A fase anterior, de *avaliação geral*, teve como objetivo delinear a forma básica das alternativas de processo que estão em julgamento. A fase seguinte, que foi denominada de testes de laboratório, tem por função testar rapidamente estes processos, de maneira a melhorar a precisão das conclusões obtidas na fase anterior.

Muitas vezes os testes de laboratório serão realizados em protótipos diferentes do componente real que será manufaturado. Esta será uma opção de grande utilidade quando se estiver julgando alternativas de processo de produtos que ainda não estão em fabricação, ou quando os processos em discussão serão inseridos como operações no processo de fabricação de um determinado componente.

Assim o primeiro passo desta fase deve ser o projeto e a construção do protótipo do componente que será utilizado nos testes de laboratório. Este passo é realimentado pela fase anterior, pela *definição das prioridades entre os elementos funcionais*. Sendo que estas informações podem ser recuperadas rapidamente através da consulta das tabelas de relacionamento.

Antes da implementação dos testes, deve-se obrigatoriamente avaliar o protótipo, certificando se os elementos funcionais de maior prioridade do componente estão adequadamente representados. Se, após esta avaliação, as prioridades dos elementos funcionais foram atendidas deve-se passar para a próxima etapa, que é a *avaliação das alternativas de processo*, senão, a fase de projeto e construção do protótipo deve ser retomada.

A etapa de *avaliação das alternativas de processo* é composta por duas outras etapas: os *testes de desempenho* e a *qualificação do processo*.

Os *testes de desempenho* são planejados a partir das alternativas de processo configuradas na fase anterior, após a definição dos elementos funcionais prioritários do componente que será manufaturado. Nesta etapa, é recomendável que se procure explorar ao máximo as características dos processos que estão sendo avaliados, procurando estabelecer condições

operacionais que exijam o máximo e também as condições usualmente estabelecidas, como garantia de funcionamento dos processos. A orientação para isto pode vir dos fabricantes dos equipamentos e ferramentas que estão sendo avaliadas, de bases de dados específicas disponíveis nos grandes centros de pesquisa e na experiência acumulada dentro da empresa.

Os elementos que devem ter o comportamento acompanhado nos testes de laboratório são os mesmos que foram definidos na fase de *avaliação geral*. Por exemplo, em um eixo de transmissão de automóvel um elemento funcional muito importante é a rugosidade superficial e que deverá ser acompanhada na realização dos testes de laboratório.

Após a realização dos *testes de desempenho*, a próxima etapa é a *qualificação do processo*. Nesta etapa é feita a classificação dos resultados de cada condição operacional utilizada nos testes de desempenho. Isto é feito a partir das faixas de CpK estipuladas na construção das tabelas de relacionamento, comparando a variação das tolerâncias dos elementos funcionais com a classe da capabilidade esperada.

Esta etapa é especialmente importante para os processo que constituem as operações de usinagem, onde o fator vida de ferramenta pode ser ponto crucial no desempenho. Nestes casos, a *qualificação do processo* irá determinar intervalos de classe para a vida de ferramenta, em relação as classes esperadas de capabilidade. Estabelecendo, assim, o intervalo de classe de vida de ferramenta que melhor atende as expectativas da alternativa de processo que está sendo avaliada.

A qualificação do processo alimenta a etapa seguinte, análise de falhas. Se o processo não conseguiu atingir as faixas de capabilidade esperadas, primeiro o procedimento de testes deve ser reavaliado. Mas se a falha no atendimento destas expectativas não estava no procedimento dos testes, deve-se retrabalhar o ciclo a partir da *etapa de projeto e construção do protótipo de teste*, no sentido de identificar a corrigir as falhas.

No entanto, se a falha continuar a persistir o ciclo deve ser realimentado na fase anterior, na etapa onde foram configuradas as

alternativas de processo ou, se ainda for o caso, na etapa de identificação das características funcionais do componente. Mas, se mesmo assim, o processo não conseguir obter a sua qualificação, este provavelmente não é adequado às necessidades do usuário.

O número de iterações do ciclo de projeto, estabelecido pela metodologia, que deve ser realizado em cada caso é uma decisão que depende do contexto de cada empresa e de responsabilidade dos encarregados gerais do projeto.

Se o projeto conseguiu se qualificar, então, a próxima etapa é *a revisão técnica e gerencial*. Para a sua realização deverão ser recalculados os fluxos de caixa de cada investimento, as curvas de aprendizagem e os gráficos de acompanhamento do projeto de investimento. Tudo isso, agora alimentado pelas informações obtidas nos *testes de desempenho* e dos parâmetros estabelecidos na *qualificação dos processos*.

Em muitos casos não será possível construir o gráfico de acompanhamento do projeto de investimento completamente, pois dados como a receita serão difíceis de se determinar. Quando isto ocorrer a revisão técnica deverá ser feita utilizando-se apenas os valores de custo disponíveis, construindo um gráfico de acompanhamento de projeto de investimento mais simples, mas ainda eficiente quando o objetivo é a comparação em entre alternativas de processos de fabricação.

Se o processo não conseguiu atender os requisitos técnicos e gerenciais, estabelecidos pelo usuário, o ciclo deve ser realimentado como na etapa anterior. Primeiro, dentro da própria fase de *testes de laboratório* e depois, se for necessário, na fase anterior de *avaliação geral*. Mas se o projeto for aprovado, deve-se seguir para a fase seguinte da metodologia, que é denominada de *implantação da manufatura*.

A Figura 4.5, na página seguinte, apresenta esquematicamente o ciclo da fase discutida aqui, denominada de *testes de laboratório*.

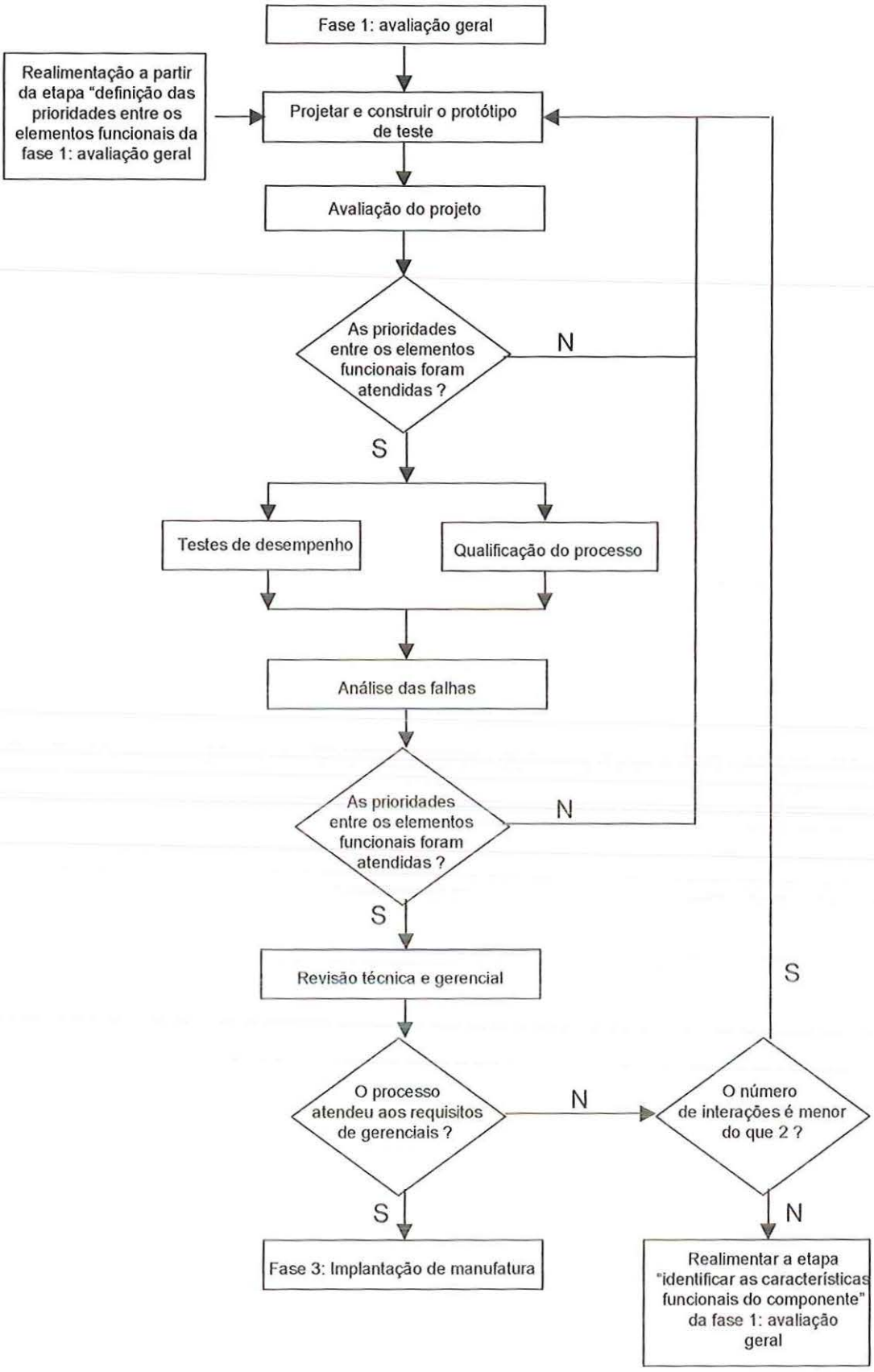

Figura 4.5 – Fase de testes de laboratório.

4.5. Avaliação da manufatura

A última fase da metodologia para a escolha e configuração de um processo de manufatura é denominada de implantação de manufatura. O seu objetivo é de delinear os passos que deverão ser tomados para a escolha levando em conta as características relativas à implantação das alternativas de processo mais adequadas.

O primeiro passo é o *desenvolvimento do plano de manufatura*, que nada mais é do que a folha de resumo da fase de avaliação geral, só que agora recalculada com os dados acumulados e as análises realizadas na fase de *testes de laboratório*. Os planos de manufatura devem ser construídos para todas as alternativas de processo eleitas na fase anterior para continuar com a avaliação.

É claro que haverá casos onde o desempenho das alternativas de processo é tão diferente que apenas uma será escolhida, mas também irão acontecer casos onde o desempenho das alternativas de processo é tão semelhante, na fase de *testes de laboratório*, que a avaliação comparativa deve continuar em situações o mais perto possível da análise de características relativas à implantação final do processo,

Os dois passos seguintes, *teste do plano de manufatura e teste de qualidade do componente*, devem ser realizados em conjunto. As alternativa de processo escolhidas devem ser testadas na mesma posição onde serão inseridas no processo de fabricação do componentes em questão. Ou seja, os testes de desempenho deverão ser realizados agora com o mesmo material em processo que irá ser trabalhado e o resultado deverá inserido na operação seguinte.

As metas de qualidade serão atendidas se o processo conseguir manter a sua qualificação, obtida na fase de testes de laboratório, com o material vindo de sua operação anterior e, ao mesmo tempo o seu resultado deve possibilitar a qualificação do processo responsável pela operação posterior. Se as metas de qualidade não forem atendidas, em ambos os casos, o ciclo deverá ser realimentado e o desenvolvimento do plano de

manufatura deve ser repensado. Se o número de iterações deste ciclo superar o limite estabelecido pela equipe de projetos o ciclo deverá ser realimentado na fase anterior, em seu início, ou seja, na etapa de *projeto e construção do protótipo de teste*.

A realização desta fase parece, em um primeiro momento, complicada. Na avaliação das alternativas de processo é necessário testá-las em condições quase reais de trabalho? Ou ainda, para decidir qual alternativa de processo utilizar deve-se implantar todas e daí tomar a decisão de qual utilizar?

Não é esta a idéia que o autor deseja passar. O teste das alternativas de processo, no nível que foi sugerido nesta fase da metodologia, podem ser realizados em processos de fabricação já instalados de outros componentes, ou ainda, nas instalações dos fabricantes de máquinas-ferramenta que colaboram com o projeto. A dificuldade em se realizar esta fase da metodologia aumenta em função do grau de inovação do componente que está sendo testado. Se o componente for totalmente inovador, a decisão de escolha deverá ser tomada apenas com base nos dados obtidos com os testes de laboratório.

Dentre os parâmetros estabelecidos pela presente metodologia para a avaliação de alternativas de processo, um é fundamental para o grau de acerto das decisões que serão tomadas a partir destes valores. Este parâmetro é a aprendizagem, que deverá ser cuidadosamente observada durante o teste de manufatura. A sua aceleração, ou redução, podem trazer mudanças significativas no desempenho do processo, principalmente com relação ao montante do investimento inicial. Assim, as curvas de aprendizagem e os seus exponentes devem ser previstos ou monitorados e, se necessário, devem ser recalculados.

A Figura 4.6 mostra de maneira esquemática a sequência de passos da fase de *avaliação de manufatura*.

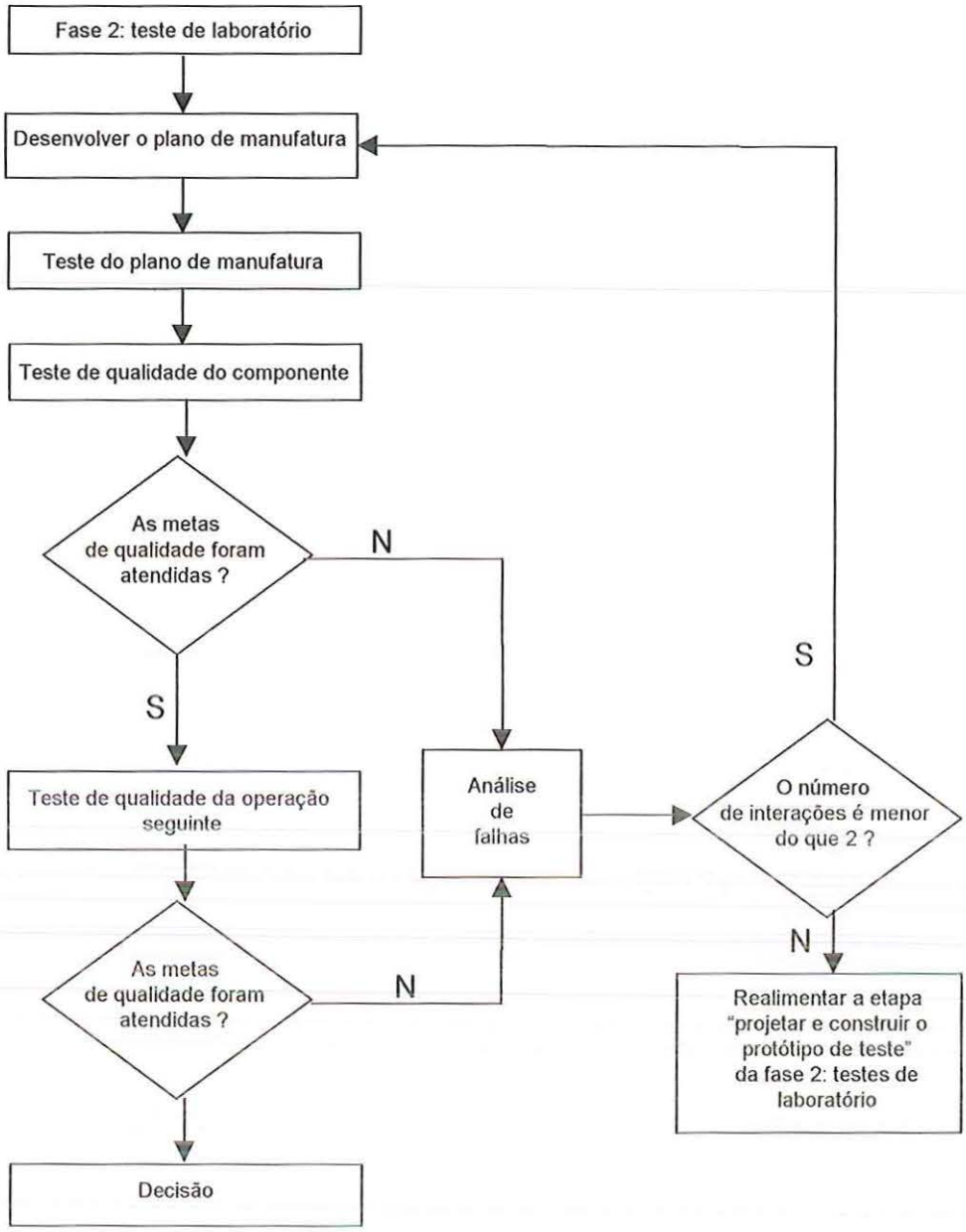

Figura 4.6 – Fase de avaliação de manufatura.

O resultado final desta fase é o aprimoramento da folha de resumo apresentada na Figura 4.4. Com base nestas folhas o usuário será capaz de realizar sua decisão, pois tem, de forma conjunta um resumo de aspectos técnicos e financeiros sobre cada alternativa de processo.

A partir daqui o usuário poderá decidir com base no seu bom senso, ou, no caso de dúvidas, usando qualquer técnica de decisão multifatores

existente e apresentada no Capítulo 2, qual a melhor opção para ser implementada definitivamente.

Com a implantação, deve-se continuar monitorando as curvas de aprendizagem com o objetivo de avaliar, tanto o grau de acerto na previsão, como o desempenho real do investimento efetuado.

5. Caso de estudo

Neste capítulo será feita a aplicação da metodologia proposta, no Capítulo 4, para a configuração e avaliação de operações de manufatura em um caso de estudo.

Com isto o autor pretende discutir em detalhes esta metodologia em situações reais de pesquisa de manufatura e da indústria de manufatura de componentes metal-mecânicos. E, além disso, demonstrar a importância dos resultados obtidos através de sua aplicação.

O caso de estudo é apresentado nos itens a seguir.

5.1. Avaliação dos processos de retificação e torneamento duro na manufatura de eixos de transmissão de automóvel

A partir da década de 90, com a popularização das ferramentas de corte feitas com os chamados supermateriais (como CBN e diamante), uma questão tem sido apresentada constantemente pela mídia especializada e, também, nos encontros científicos da área de fabricação mecânica. Esta questão é: *o torneamento duro pode substituir as operações de retificação ?*

Esta questão, quando apresentada de forma indiscriminada, gera a impressão de que o processo denominado de torneamento duro irá tornar obsoletas todas as operação de fabricação que são hoje realizadas através dos processos de retificação. Quando, na verdade, esta indagação deve ser discutida em cada caso de aplicação, de maneira abrangente e procurando responder todas as dúvidas a respeito do desempenho técnico, de qualidade e financeiro das duas alternativas de processo.

O caso de estudo que está sendo apresentado agora é justamente um exemplo deste problema.

Talvez, um dos exemplos que melhor caracterize o trabalho da indústria de manufatura de componentes metal-mecânicos seja o processo de fabricação de um eixo. E, por este motivo, para este caso de estudo se escolheu avaliar duas alternativas de processo para a fabricação de um eixo principal de transmissão de automóvel. As características gerais deste tipo de componente são muito bem conhecidas e estão a disposição nos textos básicos de fabricação mecânica, como AGOSTINHO et al. (1988). A Figura 5.1 mostra de maneira esquemática um exemplo deste tipo de componente.

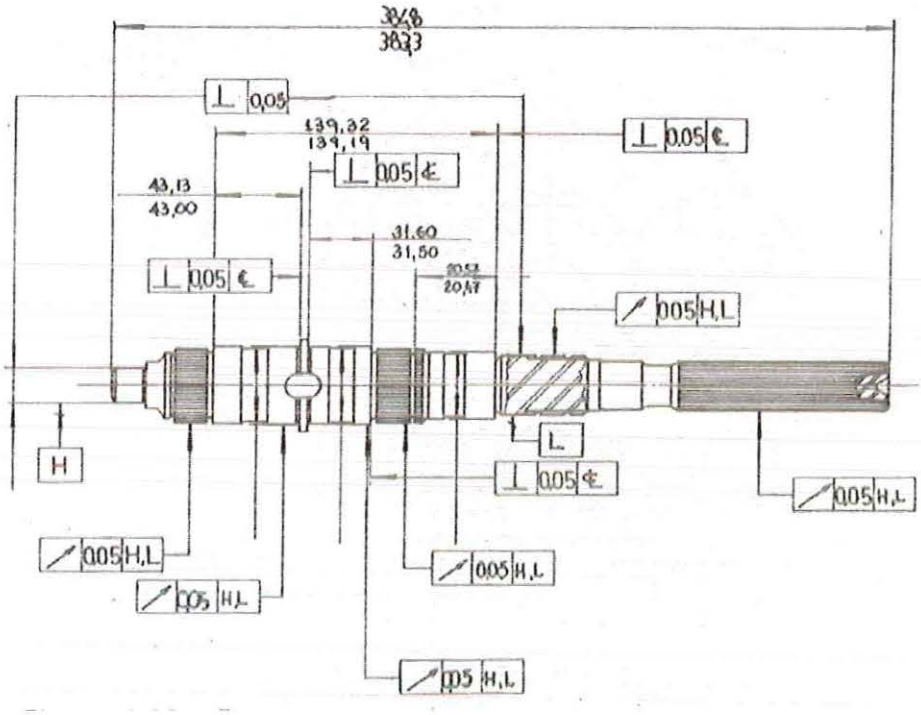

Figura 5.1 – Exemplo geral de um eixo principal de transmissão de automóvel, AGOSTINHO et al. (1988).

Os processos que estarão em discussão aqui serão responsáveis pela geração da forma final de um dos colos deste eixo, após a operação de tratamento térmico.

Para isto serão consideradas duas alternativas, de antemão, capazes de realizar o trabalho. A primeira, estabelecida como sendo a alternativa tradicional, que é a retificação e a segunda, como a alternativa inovadora, o torneamento duro.

A avaliação destas duas alternativas será feita a seguir, de acordo com a metodologia proposta no Capítulo 4 em suas três fases.

5.1.1. Fase 1: avaliação geral do componente e das alternativas de processo

Como apresentado na descrição da metodologia, a fase de avaliação geral se inicia através da realização de uma discussão específica, a respeito do componente que irá ser manufaturado. Esta discussão deve apresentar como resultado a identificação das características funcionais do componente e a definição das prioridades entre estas.

Se o componente que está sendo analisado for conhecido, deve-se obrigatoriamente recuperar o seu histórico de processo, procurando destacar os seus pontos fortes e fracos. No entanto, se o componente não for conhecido, ou não houver histórico do processo disponível, então, deve-se recorrer à experiência dos indivíduos que fazem parte da equipe de projeto. Estes indivíduos devem buscar, dentro do limite do razoável, dados de processos semelhantes observados no passado.

Para a identificação correta dos elementos funcionais do componente, algumas de suas características chave deverão ser identificadas. Para isto, a metodologia indica a procura da resposta para as seguintes questões:

a) Qual é a função do componente dentro do conjunto onde será montado ?

Tradicionalmente a função do eixo principal de transmissão de um automóvel é de transmitir e regular o torque do movimento disponível no volante do motor, para o diferencial do veículo.

Para cumprir esta função este eixo é escalonado em uma série de assentos (colos), onde recebe o ajuste de engrenagens de dentes helicoidais e retos, anéis de sincronização, chavetas, mancais de rolamento e, ainda, o entalhe de dentes retos. Todo este conjunto será submetido a esforços dinâmicos radiais e axiais, de longa e curta duração. Ou seja, este é um componente mecânico, que montado em seu conjunto, sofre severa solicitação de cargas dinâmicas e ao mesmo tempo é um dos elementos que garante a segurança do usuário do veículo.

Assim, fica claro que além do atendimento às dimensões do projeto e suas tolerâncias, o processo responsável pela sua fabricação também deve se preocupar com a sua integridade.

b) Este componente é constituído apenas por superfícies prismáticas ou é um sólido de revolução ?

O eixo principal da transmissão de um automóvel é basicamente um sólido de revolução, mas em alguns dos seus colos são talhados dentes retos de engrenagem e rasgos de chaveta.

Todos os seus colos possuem tolerâncias dimensionais consideradas apertadas para a fabricação através dos processos comuns de usinagem (ISO IT8/IT9), o que gera a necessidade de um bom acabamento superficial. E, em função de suas características de trabalho, tratados termicamente para aumentar a resistência mecânica e ao desgaste. Tudo isto, para que este possa resistir aos esforços transmitidos por suas engrenagens e por aquelas que lhe são acopladas.

A discussão a respeito da adequação das duas alternativas de processo de fabricação é feita em relação à geração dos colos onde serão acoplados os mancais de rolamento e, não naqueles onde os dentes de engrenagens serão entalhados.

Assim, neste momento os processos de torneamento e retificação se mostram igualmente capazes de realizar a fabricação deste componente.

c) Quais são as superfícies que tornam o componente funcional dentro do conjunto em que será montado ?

Novamente este exemplo se mostra especial. Todas as superfícies do componente são usinadas, com os requisitos dimensionais e acabamento citados acima. Ou seja, todas as suas superfícies são funcionais.

Isto gera uma restrição que deve ser observada na escolha da alternativa de processo de fabricação mais adequada. Será favorecida a alternativa que causar a menor interferência (danos) às superfícies já usinadas.

d) Quais são as tolerâncias dimensionais, de forma e posição que tornam o componente funcional ?

Para o controle dimensional deste tipo de componente o nível de qualidade dimensional adequado é o ISO IT 8. As principais tolerâncias de forma e posição são o batimento radial (0,05 mm) e o perpendicularismo (0,05 mm), como indicado na Figura 5.1.

A unidade de rugosidade superficial adequada para este caso é o Ra CLA ("center line avarege"), em torno de 1,5 μm.

e) Quais são as superfícies de referência para estas tolerâncias ?

A superfície de referência para o batimento radial são os colos que servem de assento para os mancais de rolamento, identificados na Figura 5.1 como as superfícies H e L.

Já o elemento associado ao paralelismo é a linha de centro do eixo, ou LC, como também indica a Figura 5.1.

f) Quais são os valores de rugosidade que devem ser respeitados para que o componente seja funcional ?

Como dito no item d) acima, o valor adequado de rugosidade para este tipo de eixo é de aproximadamente 1,5 μm Ra. E o Ra é a unidade adequada para expressar este acabamento superficial pois representa o valor médio das amplitudes dos picos de rugosidade, o que é suficiente para as superfícies de ajuste.

Além disso, em função do tipo de esforço que este componente é submetido, não se pode admitir a apresentação de marcas de queima de usinagem, ou trincas, em suas superfícies.

g) Existem requisitos estéticos que se confundem com as demais características funcionais do componente ?

Uma vez que todas as superfícies deste componente são usinadas, não há nenhum requisito estético que possa ser confundido com os elementos funcionais do componente.

h) Quais são as características dos materiais que são utilizados na fabricação do componente, com as suas características de usinagem ?

O componente em questão é fabricado com apenas um material, aço. E o aço de especificação comercial mais próximo do aço especial utilizado em sua fabricação é o SAE 4340. Mas a usinagem deve ser feita após o tratamento térmico de têmpera, fazendo com que a sua dureza se eleve para 51 HRc.

Para as operações de retificação este aço, com a dureza especificada, não pode ser considerado um material difícil de retificar, OLIVEIRA (1988). No entanto, para o torneamento há severas restrições ao uso de ferramentas de metal-duro. O recomendado pelos fabricantes de

ferramentas de usinagem é o uso de incertos cerâmicos ou de CBN (nitreto cúbico de boro).

A partir do questionamento realizado acima, o próximo passo, dentro da metodologia estabelecida, é definir quais são as prioridades entre os elementos funcionais e, se há algum dos elementos funcionais que pode ser descartado, na avaliação preliminar das alternativas de processos de fabricação.

À primeira vista, parece impossível estabelecer as prioridades entre os elementos funcionais do componente e, se forem observadas apenas estes elementos esta tarefa se torna realmente impossível. Para realizar esta tarefa é importante não esquecer que esta é uma atividade de projeto, como qualquer outra, e que a solução das restrições parciais encontradas no seu desenvolvimento estão no domínio de sua própria estrutura. Ou seja, a criação e desenvolvimento de um projeto é essencialmente um ciclo realimentado e as soluções do projeto são obtidas quando este ciclo funciona.

Quais são as informações disponíveis até o momento ? São duas: as alternativas de processo em julgamento e as características funcionais do componente. Ao se analisar estas duas informações ao mesmo tempo começam a aparecer algumas restrições, que são a chave para o estabelecimento das prioridades.

Nos processos de torneamento o ponto crítico mais característico é o desgaste da ferramentas de corte. A consequência imediata deste desgaste é a deterioração do acabamento superficial da peça que está sendo torneada, seguida da diminuição da acuracidade e precisão dimensional. No entanto é muito difícil que as tolerâncias dimensionais e de acabamento resistam a um desgaste de ferramenta que possa afetar significativamente as tolerâncias de forma e posição.

Assim, as prioridades entre os elementos funcionais do eixo principal de transmissão, com relação ao processo de torneamento, seriam primeiro o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais e, depois, as de

tolerâncias de forma e posição. Estas últimas, após uma análise mais acurada, nas fases posteriores da metodologia, talvez possam ser descartadas. Mas com as informações acumuladas até o momento este procedimento pode ser desastroso.

Já para o processo de retificação a restrição mais conhecida é a taxa de remoção de material e, consequentemente, os tempos de processo envolvidos. A necessidade de diminuir os tempos em processo fará com que o usuário procure maximizar a taxa de remoção de material e a consequência direta disso irá na direção da deterioração da integridade superficial (aparecimento de marcas de queima) e do acabamento. Os esforços relacionados com altas taxas de remoção de material podem exceder os limites de deformação do sistema máquina-peça, que são compensados no tempo de *"spark-out"* (centelhamento), atingindo diretamente a acuracidade dimensional e as tolerâncias de forma e posição.

Desta maneira, diferentemente do processo de torneamento, a prioridade entre os elementos funcionais do componente possui apenas dois níveis e nenhum destes elementos parece, até o momento, poder ser descartado.

Seguindo a metodologia, e como não foi possível descartar nenhum dos elementos funcionais identificados do componente, é a avaliação preliminar das alternativas de processo.

A avaliação preliminar das alternativas de processo é composta por três etapas:

- A construção da matriz de relacionamento entre os elementos funcionais do componente e as características operacionais do processo;

- A estimativa dos custos e receitas envolvidas e a elaboração da avaliação financeira preliminar; e

- A construção do gráfico de acompanhamento do projeto de investimento.

Cada uma destas etapas deverá ser realizada para cada umas das alternativas de processos de fabricação que estão sendo avaliadas. E, ainda, é importante destacar que na fase atual, *avaliação geral,* os parâmetros estabelecidos não são paradigmas comprovados e sim, apenas, estimativas influenciadas pela experiência dos indivíduos envolvidos no projeto. Estes parâmetros deverão ser reavaliados, a partir das informações obtidas na fase seguinte, *testes de laboratório*, onde passarão a ter maior relevância na decisão de escolha do processo de fabricação mais adequado.

A seguir são construídas e apresentadas, respectivamente, nas Figuras 5.2 e 5.3 as tabelas de relacionamento para os processos de torneamento e retificação, seguindo os critérios estabelecidos no Capítulo 4.

Tabelas de relacionamento

A primeira tabela de relacionamento a ser construída estabelece a correlação entre as características operacionais gerais do processo de torneamento e as prioridades dos elementos funcionais do componente que está sendo avaliado.

O levantamento dos elementos funcionais do componente, e as suas prioridades com relação à alternativa de processo torneamento, foi realizado na etapa anterior e são apresentados na primeira coluna da tabela. Os valores dos graus de importância foram atribuídos com a intenção de traduzir as prioridades entre os elementos funcionais, de acordo com os parâmetros estabelecidos no Capítulo 4.

Como esta é a primeira iteração do ciclo de projeto, o valor definido para a faixa de valores da capabilidade atual procura mostrar que a priori os processos devem ser capazes, mas ainda necessitam de ajuste para serem aceitos (CpK entre 1,0 e 1,33). O valor estipulado para a capabilidade

esperada define a faixa de valores de capabilidade (CpK entre 1,33 e 1,66) usualmente exigida pela indústria de automóveis.

O índice de melhoria é calculado a partir dos valores da capabilidade atual e a capabilidade esperada, como indicado na metodologia geral do QFD e na descrição da metodologia no Capítulo 4.

Ainda dentro da análise denominada de planejamento da qualidade, o próximo valor a ser estipulado é o argumento de escolha. Basicamente, este valor serve para confirmar a opinião do usuário, sobre a influência do elemento funcional que esta sendo analisado na decisão da escolha da alternativa de processo de fabricação mais adequada. Os valores que podem ser atribuídos a este índice também foram estipulados no Capítulo 4.

O planejamento da qualidade termina com o cálculo dos pesos e dos pesos relativos dos elementos funcionais. Estes dois valores são a primeira iteração do processo de projeto na busca dos valores absolutos para as prioridades dos elementos funcionais do componente que está sendo analisado.

Observando-se as tabelas das Figuras 5.2 e 5.3 tem-se que a maior concentração dos pesos ficou com as características integridade superficial e variação dimensional, com 0,27. É claro que esta primeira iteração sofre forte influência da opinião a respeito do processo dos indivíduos que fazem parte da elaboração do projeto. Esta influência pode ser reduzida significativamente se as etapas concluídas até o momento forem realizadas independentes pelos participantes, que depois deverão reunir e discutir os seus resultados individuais.

Após a etapa de planejamento da qualidade é que se começa a estabelecer a correlação entre os elementos funcionais do componente e as características operacionais do processo. O primeiro passo nesta direção é listar as características operacionais do processo que estão mais possivelmente relacionadas com a obtenção das metas de qualidade definidas na etapa de planejamento da qualidade. Esta lista é apresentada nas colunas verticais delimitadas nas tabelas das Figuras 5.2 e 5.3 pelo *título "características operacionais do processo"*.

A correlação é estabelecida entre as linhas e as colunas da tabela de relacionamento, utilizando-se marcadores gráficos que indicam o grau de correlação. E, novamente, esta atribuição é feita através da opinião do usuário.

Os valores de cada marcador e o procedimento para o cálculo do peso das características operacionais do processo foram apresentados no Capítulo 4.

Através da observação dos valores obtidos e mostrados na tabela da Figura 5.2, tem-se que a característica operacional que possui maior correlação com os elementos funcionais do componente é o sistema de fixação da peça, com peso relativo de 0,24.

A Figura 5.3 mostra a matriz de relacionamento entre as características operacionais do processo de retificação e os seus elementos funcionais.

As prioridades entre os elementos funcionais são então estabelecidas e no planejamento da qualidade os pesos destes mesmos elementos são determinados. A integridade e a variação aparecem com o maior peso relativo, ambos com 0,27.

A seguir são estabelecidos os valores de correlação entre os dois componentes da tabela, sendo que a correlação mais forte aparece na característica operacional *tempo de "sparkout"*, com peso relativo de 0,16, seguida pelo *sistema de fixação*, com 0,11.

O objetivo destas tabelas é ajudar o usuário a definir as suas prioridades no momento da configuração do processo e ao mesmo tempo orientá-lo com relação aos elementos de maior sensibilidade às variações das condições operacionais do processo, nas fases posteriores da metodologia.

Elementos funcionais do componente	Características operacionais do processo													Planejamento da qualidade						
	Sistema de torneamento	Sistema de fixação	Tipo de ferramenta	Vida da ferramenta	Tipo de refrigeração	Sistema de refrigeração	Velocidade de corte	Sistema de carga e descarga	Sistema de correção dimensional					Grau de importância	Capabilidade atual	Capabilidade esperada	Índice de melhoria	Argumento de escolha	Peso dos elementos funcionais	Peso relativo dos elementos funcionais
Acabamento superficial		△	○	◉	◉	◉	○							5	3	4	1,33	1,5	10,00	0,27
Variação dimensional		△							◉					5	3	4	1,33	1,5	10,00	0,27
Batimento radial		◉						△						3	3	4	1,33	1,0	4,00	0,11
Perpendicularismo à LC		◉						△						3	3	4	1,33	1,5	6,00	0,16
Integridade superficial		△	○	◉	◉	◉	○							4	3	4	1,33	1,2	6,40	0,18
Peso das características operacionais do processo	9,53	2,25	6,10	5,19	5,19	2,25	3,17	2,73												
Peso relativo das caract. op. do processo	0,24	0,06	0,17	0,14	0,14	0,06	0,09	0,07												

Figura 5.2 - Tabela de relacionamento para o processo de torneamento duro

Elementos funcionais do componente	Características operacionais do processo													Planejamento da qualidade						
	Sistema de retificação	Sistema de fixação	Tipo de rebolo	Dressagem	Tipo de refrigeração	Sistema de refrigeração	Taxa de remoção de material	Tempo de "sparkout"	Sistema de carga e descarga	Sistema de detecção de contato				Grau de importância	Capabilidade atual	Capabilidade esperada	Índice de melhoria	Argumento de escolha	Peso dos elementos funcionais	Peso relativo dos elementos funcionais
Acabamento superficial			●	●	○	○	●	●						5	3	4	1,33	1,5	10,00	0,27
Variação dimensional	○	○						●	●					5	3	4	1,33	1,5	10,00	0,27
Batimento radial	●	●						○	○					3	3	4	1,33	1,0	4,00	0,11
Perpendicularismo à LC	●	●						○	○					3	3	4	1,33	1,5	6,00	0,16
Integridade superficial			●	●	●	●	●	○	○					4	3	4	1,33	1,2	6,40	0,18
Peso das características operacionais do processo	3,90	3,90	3,64	3,64	3,01	3,01	3,05	5,73	4,44	2,07										
Peso relativo das caract. op. do processo	0,11	0,11	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,16	0,12	0,06										

Figura 5.3 - Tabela de relacionamento para o processo de retificação

Estimativas de custo e avaliação financeira preliminar

Como foi discutido anteriormente, tradicionalmente, a avaliação financeira de um projeto de investimentos passa por três etapas básicas: montagem do fluxo de caixa, o cálculo dos índices de desempenho e a interpretação, dentro do contexto de cada empresa, destes valores.

Um fluxo de caixa mostra, no horizonte financeiro estabelecido para o investimento, os valores correspondentes às suas entradas e saídas de caixa. As entradas de caixa são diretamente proporcionais ao nível de demanda, ou à capacidade produtiva. Já as saídas de caixa sofrem a influência de um número maior de fatores, que de maneira mais, ou menos, significativa formam o custo de operação.

Assim, para a avaliação financeira de um projeto de investimento é primordial a formação das equações de custos envolvidas na operação do investimento.

Existe um grande número de equações gerais para a avaliação dos custos envolvidos nas operações de usinagem dos metais, sendo que COELHO (1999) e SOARES FILHO (1999) fazem uma revisão muito ampla para os processos de torneamento e retificação. No entanto, uma das hipóteses inicias levantadas pelo presente trabalho é a necessidade de se melhorar a comunicação entre os setores administrativos e de produção, envolvidos no desenvolvimento de uma determinada operação de usinagem, ou processo de manufatura. Desta maneira, o equacionamento geral escolhido para os custos de usinagem deve cumprir este objetivo.

Entre todos os modelos avaliados o que melhor expressa esta idéia é o que é apresentado por KALPAKJIAN (1991), que é detalhado no Anexo A e discutido rapidamente a seguir.

O custo de produção de um determinado componente mecânico pode ser dividido em quatro componentes distintos: usinagem, preparação (*"setup"*), ferramenta e carga e descarga. A equação abaixo mostra esta afirmação.

$$Cp = Cm + Cs + Ct + Cl \quad (5.1)$$

Dentro das organizações fabris a componente do custo de produção (*Cp*) mais difícil de se determinar é o custo de preparação (*Cs*) e além disso depende das características gerencias de cada fábrica, tornando pouco prático a comparação destes custo entre duas unidades ou, ainda, desnecessária para determinar a eficiência de um processo de fabricação. Assim, a equação geral pode ser simplificada eliminando-se esta componente, quando o objetivo é comparar a eficiência de várias alternativas de processo de fabricação. A literatura especializada está repleta de exemplos de melhoria no tempo de preparação, nos mais diversos tipos de projeto, SHINGO (1991).

Ainda, na mesma linha de raciocínio os custos de carga e descarga (*Cl*) também podem ser excluídos do equacionamento geral, reduzindo a equação inicial a apenas dois componentes, que refletem apenas o desempenho operacional de cada alternativa de processo, sem o ruído do desempenho gerencial de cada empresa.

$$Cp = Cm + Ct \quad (5.2)$$

O custo de usinagem (*Cm*), conforme estabelecido por KALPAKJIAN (1991), é calculado através dos mesmos fatores, tanto para os processos de torneamento quanto para os processos de retificação. O custo de usinagem é dado por:

$$Cm = Tm.(Lm+Bm) \quad (5.3)$$

onde *Tm* é o tempo de usinagem, *Lm* é o valor da mão-de-obra direta envolvida e *Bm* são todos os outros elementos de custo relacionados com a operação do processo (encargos, mão-de-obra indireta, manutenção do equipamento e depreciação).

Novamente, o objetivo desta metodologia é comparar o desempenho de cada uma das alternativas de processo escolhidas e não a eficiência gerencial das empresas envolvidas. Assim, elementos que caracterizam esta condição devem ser eliminados. Desta maneira, a quantidade de mão-de-obra indireta deve ser desconsiderada.

Outro fator, que pode causar muito ruído na avaliação do real desempenho econômico de um processo de fabricação é a depreciação dos bens de capital envolvidos. Na legislação brasileira, a depreciação é uma vantagem fiscal que reduz a base tributável da receita de um investimento e que contabilmente é considerada como saída de caixa. Mas na realidade não é um valor financeiro que é desembolsado ao final de cada período de capitalização do investimento. Assim, é incoerente estipular o seu impacto sobre o desempenho de uma alternativa de processo de fabricação, pois é um custo que na realidade não acontece e a gestão do seu montante é uma das tarefas gerenciais mais complicadas.

Desta maneira, os custos associados (*Bm*) ficam reduzidos, na presente avaliação, aos custos envolvidos com a manutenção.

Para KALPAKJIAN (1991) o custo de ferramenta para uma operação de torneamento é dado por:

$$Ct = Np^{-1}.[\ Tc.(Lm + Bm) + Tg.(Lg + Bg) + Dc] \qquad (5.4)$$

onde *Np* é o número de peças usinadas por aresta de corte; *Tc* é o tempo de usinagem (min); *Tg, Lg* e *Bg* são o tempo e os custos envolvidos com a reafição da ferramenta; e *Dc* é a depreciação da ferramenta.

Como a alternativa de processo que está sendo avaliada utiliza ferramentas intercambiáveis a equação acima não se mostra adequada e deve ser reestruturada. Com este tipo de ferramenta não há reafiação mas sim troca da ferramenta pelo próprio operador, sendo que qualquer outro custo associado deve ser descartado como discutido anteriormente. A depreciação da ferramenta (*Dc*) deve ser considerada como o custo da

ferramenta e do seu suporte por peça e adicionado ao custo de ferramenta, assim como, o custo da ferramenta. Desta maneira, a equação (5.4) fica:

$$Ct_{torneamento\ com\ insertos} = Np^{-1}.[\ Cf + Tc.(Lm + Bm)] + Dc \qquad (5.5)$$

onde *Tg* passa a ser agora o tempo de troca de ferramenta, *Dc* o custo de porta ferramenta por peça, *Cf* o custo da ferramenta.

Na literatura os textos que tratam do equacionamento do custo de ferramenta para as operações de retificação utilizam formas muito distintas das apresentadas por KALPAKJIAN (1991), como pode ser observado no texto de COELHO (1999). No entanto, para respeitar a hipótese inicial a presente análise procurará utilizar esta mesma forma de equacionamento. O custo de ferramenta envolvido em uma operação de retificação é dado pela equação abaixo:

$$Ct_{retificação} = Nd^{-1}.[Td.(Lm + Bm) + Dd] \qquad (5.6)$$

onde *Nd* é o número de peças por dressagem; *Td* é o tempo de dressagem (min) e *Dd* é o custo do rebolo por dressagem.

Neste momento, é necessário que se efetue a descrição básica das alternativas de processo que serão analisadas, pois só com estas informações será possível completar as equações de custo.

Como dito anteriormente são duas as alternativas de processo que estão sendo avaliadas: o processo de torneamento duro e a retificação tradicional.

Para o torneamento duro a principal característica do processo é a ferramenta de corte, que será um inserto de CBN. Esta característica restringe os tipos de tornos que poderão ser utilizados e define as condições de usinagem que determinam o tempo de usinagem. Sendo que as condições de usinagem podem ser encontradas facilmente nos catálogos dos fabricantes destas ferramentas.

Já para o processo de retificação são duas as características que ajudam a definir as condições de usinagem e, consequentemente, os tempos de usinagem: as dimensões do rebolo e as condições de dressagem. Uma característica importante das operações de usinagem é que, ao contrário do torneamento, a documentação é informal e não é encontrada facilmente nos catálogos dos fabricantes de ferramentas abrasivas.

A planilha do anexo C mostra detalhadamente os valores escolhidos e o cálculo dos dois fatores de custos, *Cm* e *Ct*, para o cálculo do custo por peça *Cp*.

Para a operação de torneamento em questão o valor da *avaliação geral* para o *Cp* foi de R$ 1,23 por peça, enquanto que para a retificação foi de R$ 0,33 por peça. Vale a pena reafirmar que nesta fase, *avaliação geral*, não se deve gastar muito tempo na obtenção de valores acurados para os elementos individuais que formam o *Cp*, pois estes serão apenas direcionadores que serão utilizados no delineamento da fase seguinte da metodologia, *testes de laboratório*. É nesta fase que os valores menos confiáveis serão avaliados com maior atenção como, por exemplo, se número de dreassagens que o rebolo irá suportar será mesmo de 3.000, por exemplo.

Para o cálculo das saídas dos fluxos de caixa, das alternativas de investimento que estão sendo avaliadas, ainda é necessário que se conheça o volume de produção do componente que irá ser fabricado. Por questão de respeito às necessidades do parceiro do grupo de pesquisa, em que este trabalho foi realizado, e que é o fabricante do eixo de transmissão de automóvel que está sendo discutido, não é possível revelar o volume de produção real deste componente. Para isto será utilizado um volume de produção, comum a muitos modelos de automóvel fabricados no Brasil, que é de 100.000 unidades anuais, IPEA (2001).

Na construção do horizonte financeiro do fluxo de caixa serão realizadas algumas simplificações, mas que podem ser alteradas facilmente, em função das necessidades do usuário. Primeiro, não será considerado um

tempo de carência para a implantação do sistema de manufatura, que será utilizado para realizar qualquer um dos dois processos em questão. Ou seja, o pagamento do investimento inicial será realizado no mesmo momento em que se inicia a produção. E segundo, os volumes de produção serão distribuídos igualmente ao longo dos períodos de capitalização.

A taxa mínima de atratividade (TMA) escolhida para o presente caso de estudo é de 6% ao ano. Este valor é baseado nos valores que hoje o BNDES, Banco Nacional de Desenvolvimento Social, cobra para em alguns dos seus programas específicos de financiamento de bens de capital, BNDES (2001).

Como este caso de estudo se refere apenas a fabricação de duas superfícies (colos) do eixo de transmissão de um automóvel, não é possível avaliar a receita relacionada com a sua produção. Assim, a avaliação financeira será feita apenas em relação à distribuição dos custos. Os valores de VPL serão calculados na etapa a seguir, para a construção das curvas de acompanhamento de investimento.

Curvas de acompanhamento de investimento

As curvas de acompanhamento de investimento são construídas levando-se em conta um fator muito importante na produção seriada de componentes de mecânicos: a aprendizagem.

Este fenômeno tem sido discutido desde a década de quarenta, como foi apresentado no Capítulo 3 do presente trabalho, e hoje é aceito como parte integrante da implantação de qualquer sistema de manufatura. Sendo que há uma grande variedade de modelos comprovados para gerenciar como este acontece.

O modelo mais utilizado é o modelo de logarítmico-linear de custo linear e total, para a produção de um determinado componente, e é estabelecido pela seguinte relação:

$$C_x = C_1 x^b \tag{5.7}$$

onde C_x é o custo acumulado na produção de x unidades; C_1 é o custo de produção da primeira unidade; x é o número de unidades produzidas e b é o expoente da curva de aprendizagem.

Outras relações fundamentais para a rápida aplicação das curvas de aprendizagem são as seguintes:

$$b = (\log p)/(\log 2) \tag{5.8}$$

onde p é o coeficiente de percentual de aprendizagem, ou seja, para um aumento de 10% na produtividade cada vez que o volume produzido dobra o valor de p será de 0,90; e

$$b = (\log C_{x2} - \log C_{x1}) / (\log {}_{x1} - \log {}_{x2}) \tag{5.9}$$

onde C_{x1} é o custo de produção em $x1$ e C_{x2} é custo de produção em $x2$.

No caso que se está discutindo o valor de custo conhecido é o Cp, que é o custo unitário de fabricação que acontece quando todos os elementos que compõem o processo estão funcionando como esperado, ou seja, quando o espaço de variações é restrito e há pouca, ou nenhuma, ocorrência de erros. Em outras palavras, quando a aprendizagem acabou, ou é pouco significativa com relação aos valores e tempos envolvidos. Assim, no modelo acima os valores de Cp correspondem aos valores de C_{x2}, que será estabelecido como custo alvo para o final de um ano de produção, ou seja, após a produção de 100.000 unidades.

Os valores mais comuns encontrados para o coeficiente percentual de aprendizagem p variam de 0,70 a 0,90. Sendo que 0,70 é o caso em que há a utilização intensiva de mão-de-obra em manufatura, como a montagem de aviões. No caso em questão o valor escolhido será conservador, apenas de 0,90, uma vez que os processos não se caracterizam pela utilização de mão-de-obra intensiva, YELLE (1979).

A curva de aprendizagem para o processo de torneamento, sob as condições de usinagem que deram origem ao custo *Cp* de R$ 1,23 é apresentada na Figura 5.4 a seguir.

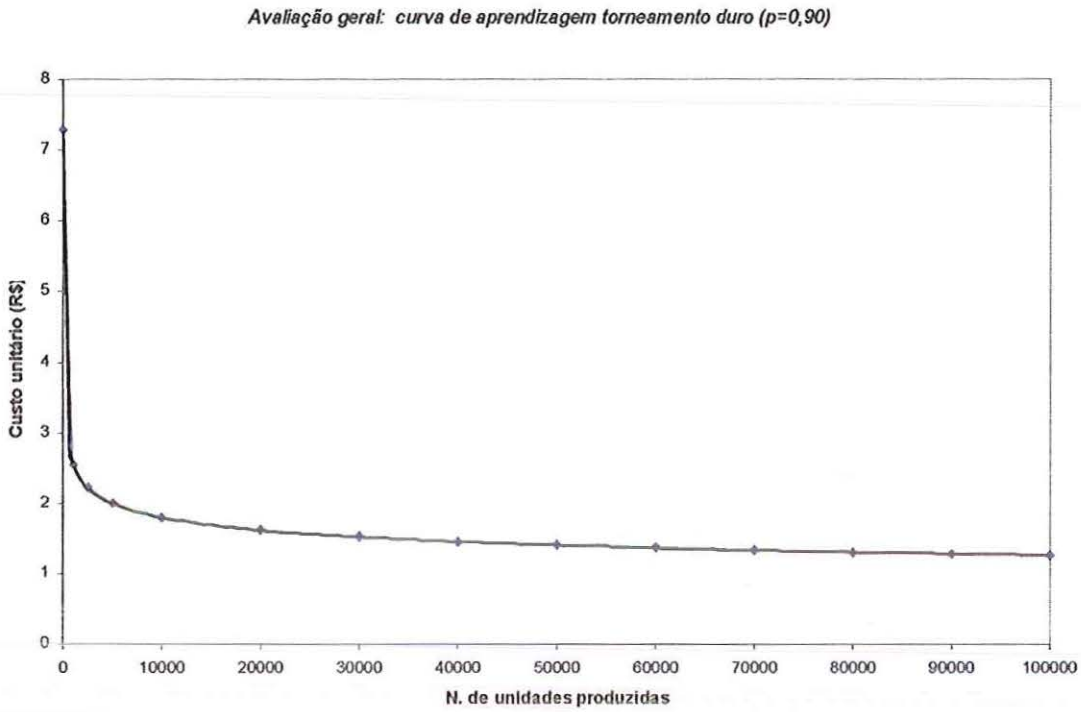

Figura 5.4 – Curva de aprendizagem para a alternativa de processo torneamento duro, p = 0,90.

Como pontos principais do gráfico da Figura 5.4 devem ser destacados o custo esperado para a produção da primeira unidade que é de R$ 7,28 que, no entanto, diminui rapidamente. Para o primeiro mês, ou seja, para as primeiras 10.000 unidades produzidas o custo médio unitário seria de R$ 1,79. Além disso, percebe-se que a redução do custo, em função da aprendizagem, torna-se quase constante a partir do terceiro mês (variação menor do que 10% entre dois períodos consecutivos).

A Figura 5.5 mostra agora a curva de aprendizagem para o processo de retificação, segundo as condições de usinagem que deram origem ao custo *Cp* de R$ 0,33.

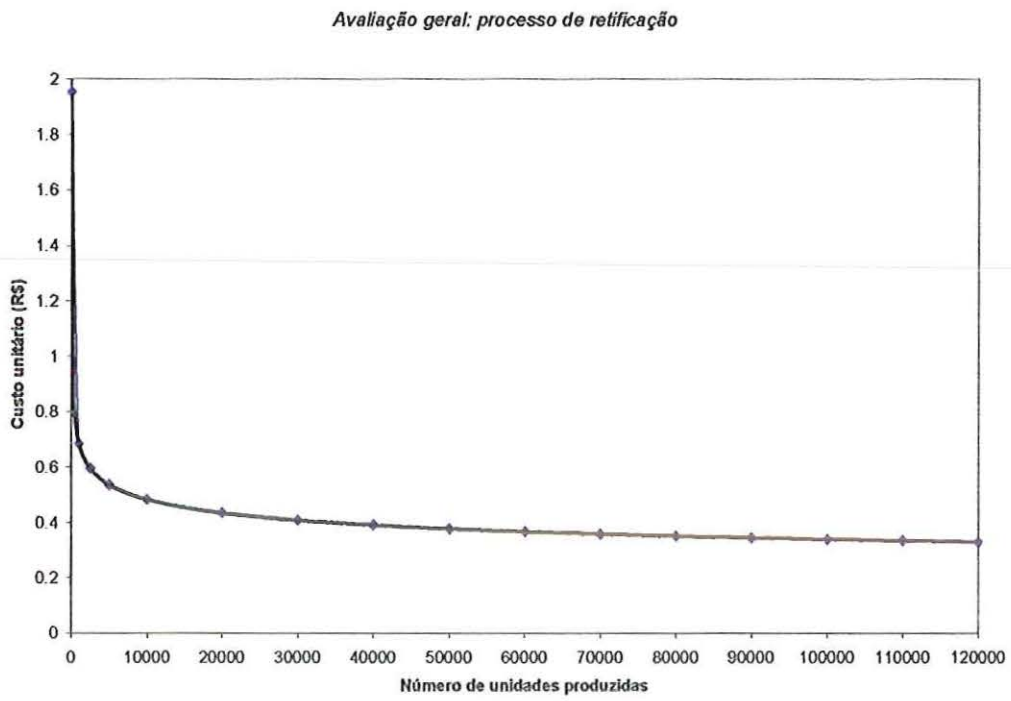

Figura 5.5 - Curva de aprendizagem para a alternativa de processo retificação, p = 0,90.

Da mesma forma que a curva de aprendizagem o valor esperado para o custo da primeira unidade produzida (R$ 1,95) e a sua redução acelerada mesmo no primeiro mês, para R$ 0,48, são pontos característicos desta análise. A estabilização da curva acontece também a partir do terceiro.

Em seguida são calculadas as curvas de VPL acumulado para os dois processos. O gráfico da Figura 5.6 mostra a curva do VPL acumulado para o processo de torneamento duro, considerando como valor de investimento inicial, o custo acumulado para a produção das primeiras trinta mil unidades. Pois é a partir deste ponto que se espera que a produção comece a acontecer de maneira estável.

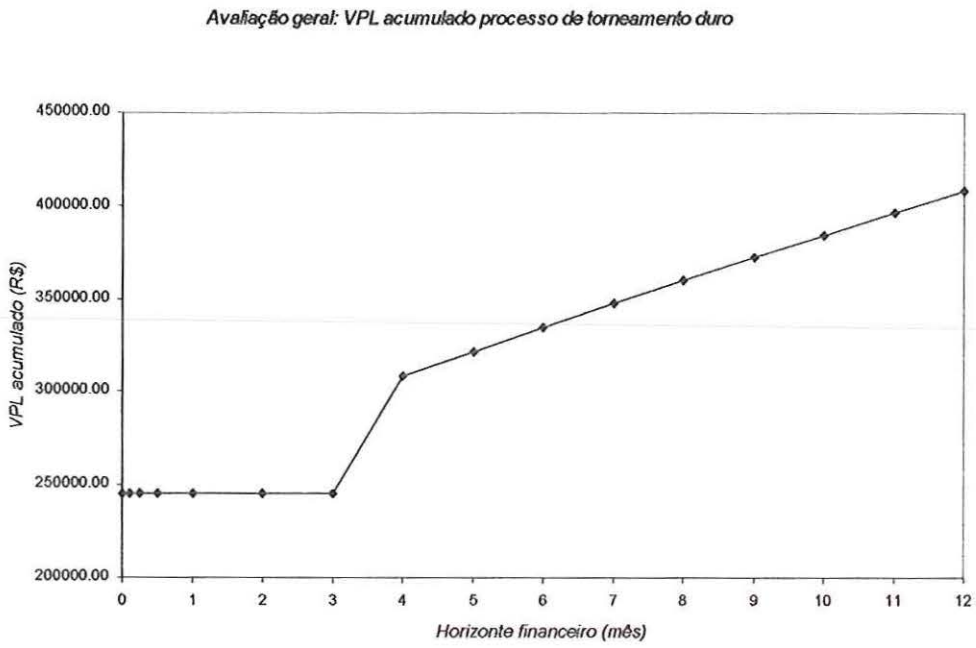

Figura 5.6 – Gráfico do VPL acumulado para o investimento no processo de torneamento duro.

Na observação da curva de VPL da Figura 5.6 o elemento que mais chama a atenção é o degrau que aparece entre o terceiro e o quarto período. Esta forma foi gerada em função da suposição de que o investimento inicial para a implantação de um processo de fabricação é composto por dois fatores: os equipamentos básicos (por exemplo, a máquina-ferramenta) e o volume de produção até que se alcance a estabilidade na curva de aprendizagem. E que a partir da estabilidade este valor financeiro deve ser corrigido monetariamente, ajudando a refletir os riscos relacionados com o investimento. Ou seja, o degrau é o resultado da adição ao investimento inicial do valor da correção monetária aplicada ao período de estabilização.

Como foi visto na revisão bibliográfica do presente trabalho, o investimento inicial é um dos pontos mais importantes na avaliação estratégica da decisão de um investimento. Este degrau ressalta para a equipe de projeto que o investimento inicial esta relacionado também com o

desempenho de aprendizagem do processo escolhido e que a organização deverá ponderar este intervalo na sua decisão final.

O valor fundamental para a construção do gráfico da Figura 5.6 é o valor do investimento inicial no processo de torneamento duro. Na fase de avaliação geral este investimento foi estimado como sendo de R$ 245.555,55, obtido através dos seguintes valores:

- Torno (velocidade de corte constante de 180 m/min): R$ 200.000,00;
- Insertos CBN (750 unidades para o torneamento das 30.000 primeiras unidades): R$ 75.000,00 (R$ 100,00 por unidade).
- Suporte de ferramentas (1 para cada 10.000 peças torneadas): R$ 3.000,00; e
- Custo acumulado para o torneamento 30.000 primeiras unidades: R$ 45.555,55.

O gráfico da Figura 5.7 mostra a curva do VPL acumulado para o processo de retificação, considerando também como componente do valor de investimento inicial, o custo acumulado para a produção das primeiras trinta mil unidades. Pois é a partir deste ponto que se espera que a produção comece a acontecer de maneira estável.

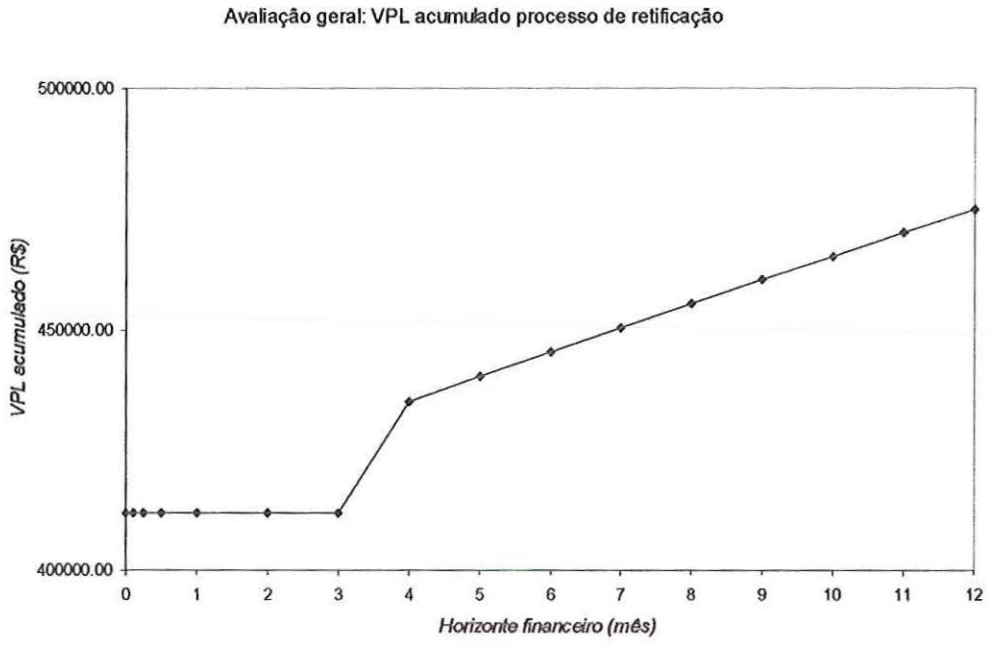

Figura 5.7 - Gráfico do VPL acumulado para o investimento no processo de retificação.

O valor fundamental para a construção do gráfico da Figura 5.7 é o valor do investimento inicial no processo de torneamento duro. Na fase de avaliação geral este investimento foi estimado como sendo de R$ 411.851.85, obtido através dos seguintes valores:

- Retificadora cilíndrica: R$ 400.000,00;
- Rebolos de óxido de alumínio: R$ 1.000,00 (3.000 dressagens por rebolo).
- Custo acumulado para a retificação das 30.000 primeiras unidades: R$ 11.851,85

O último passo, dentro da fase de avaliação geral, é a verificação das expectativas iniciais. Esta última avaliação é dependente do contexto de

cada empresa, o quê traz uma grande dispersão quando se compara a decisão tomada empresa por empresa.

No entanto, os elementos básicos para quantificar estas decisões foram estimados através das tabelas de relacionamento entre os elementos funcionais do componente e as características operacionais das alternativas de processo e pelos gráficos de acompanhamento do projeto de investimento (curvas de aprendizagem e de VPL acumulado).

Se na primeira *avaliação geral* as expectativas não foram atendidas o ciclo deve ser realimentado na etapa de definição das prioridades entre os elementos funcionais do componente. E todo os outros passos do ciclo devem ser realizados novamente.

Mas se as expectativas iniciais forem atendidas é necessário passar para a próxima fase da metodologia que são os *testes de laboratório*.

5.1.2. Fase 2: testes de laboratório das alternativas de processo selecionadas

A primeira etapa da fase de testes de laboratório é o projeto e a construção do protótipo de teste.

No presente caso de estudo, cujo objetivo principal é determinar a melhor alternativa de processo de fabricação para a manufatura dos colos denominados de H e L, como pode ser visto na Figura 5.1, a sugestão para o protótipo que será utilizado nos testes de laboratório é apresentada na Figura 5.8 a seguir.

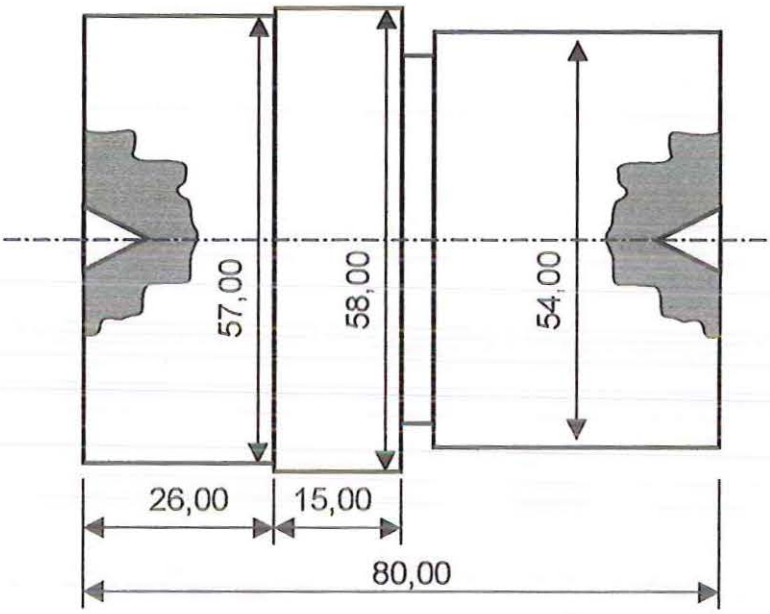

Figura 5.8 – Protótipo do eixo de transmissão.

O material escolhido para a sua fabricação é o SAE 4340, tratado termicamente através do processo de têmpera em óleo, sem alívio de tensões, e com dureza de 51 HRc. Sendo que a dureza se manteve constante mesmo com a retirada de uma camada de 0,5 mm de profundidade.

O diâmetro de fixação escolhido foi o de 57,00 mm, que foi retificado para garantir a concentricidade entre o centro da peça e o seu diâmetro

externo. Mesmo assim, durante a fixação no torno (placa de três castanhas) foi verificado se a peça estava centrada corretamente e apenas em algumas peças foram necessários pequenos ajustes.

Antes da realização de qualquer um dos ensaios o diâmetro de 54,00 mm foi usinado, para garantir a uniformidade deste diâmetro ao longo de todo o comprimento de corte no torneamento e, na retificação, para a retirada de qualquer crosta excessivamente dura, que poderia danificar a superfície de corte do rebolo. Esta limpeza foi realizada utilizando-se insertos de cerâmica. Desta forma foi simulada a influência das operações anteriores de pré-acabamento.

Os elementos funcionais do protótipo que foram escolhidos para monitorar o fim de vida das ferramentas, determinando o número de peças por aresta de corte (Np) e o número de peças por dressagem (Nd), são três. E foram determinados a partir da *etapa definição das prioridades entre os elementos funcionais*, da fase de *avaliação geral*, sendo que estas informações podem ser visualizadas rapidamente nas tabelas de relacionamento. Estes elementos são:

- Rugosidade superficial: sendo o valor limite estabelecido para o fim de vida das ferramentas é de 1,2 μm, em função da qualidade dimensional e da função do componente.

- Variação dimensional: para este elemento o valor limite é de 46 μm, que é a variação admissível para dimensões a partir de 50,00 mm para a qualidade dimensional ISO IT 8.

- Circularidade: o desempenho dos processos de fabricação mecânica na obtenção da circularidade sofre influência determinante do sistema de fixação e posicionamento da peça. Nas primeiras iterações da fase de *testes de laboratório* não é recomendável a construção de dispositivos de fixação especiais, mas sim a utilização dos sistemas já presentes nas máquinas-

ferramenta onde os testes serão realizados. A primeira sequência de testes será realizada utilizando-se o sistema de placa com três castanhas e, assim, a variação permissível de circularidade para diâmetros de 50,00 a 120,00 mm é 0,008 mm.

Como foi dito anteriormente o protótipo estará simulando os colos denominados por H e L, na Figura 5.1, que são as superfícies de referência para a tolerância de batida radial para todos os outros colos do eixo. Sendo H e L superfícies de referência para a tolerância de batida radial, o valor dos seus erros compostos não pode ultrapassar 10% o valor da tolerância de batida radial, AGOSTINHO (1988). Assim, o critério de fim de vida de ferramenta para a circularidade da peça também será de 0,005 mm.

Desta maneira são especificadas as formas básicas do protótipo para os testes laboratório, bem como os critérios que irão determinar o fim de vida das ferramentas utilizadas.

Considerando que esta especificação atendeu as prioridades entre os elementos funcionais, o próximo passo dentro da metodologia é a *avaliação do desempenho das alternativas de processo*. Esta etapa é realizada em três ações: os *testes de desempenho*, a *avaliação do processo* e a sua qualificação.

A seguir são apresentados o resultados obtidos nesta etapa para os processos de torneamento duro e retificação, a obtenção destes valores foi realizada juntamente com o desenvolvimento do trabalho de SOARES FILHO (1999).

Avaliação de desempenho do processo de torneamento duro

A avaliação de desempenho do processo de torneamento duro foi realizada utilizando-se a seguinte configuração básica de máquina e ferramentas:

- Máquina-ferramenta: torno cnc marca INDEX, modelo GU600;

- Ferramenta: inserto brazado de CBN de geometria SNGN 12 04 08, marca SANDVIK; e
- Suporte de ferramenta: geometria CSSNL 2525 M12-IC, marca SANDVIK;
- Refrigeração: os ensaios de torneamento foram realizados sem refrigeração.

Foram adotadas agora seis condições de usinagem distintas, ao contrário da fase de avaliação geral, onde as estimativas foram realizadas utilizando-se apenas uma condição de usinagem. Sendo que o sobremetal de usinagem para todas estas condições foi de 0,5 mm, tornando esta etapa do processo de fabricação do eixo de transmissão uma operação de acabamento. Estas condições são apresentadas na Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 – Condições de usinagem para os testes de avaliação de desempenho do processo de torneamento duro.

Condição	*Velocidade de corte [m/min]*	*Avanço [mm/volta]*	*Profundidade de corte [mm]*	*Comprimento Usinado [mm]*
1	180	0,08	0,50	35
2	150	0,08	0,50	35
3	180	0,08	0,25	35
4	150	0,08	0,25	35
5	200	0,08	0,10	35
6	500	0,08	0,10	35

Os resultados obtidos nos testes de desempenho são apresentados, em relação aos elementos previamente definidos e as metas de capabilidade estabelecidas na fase de avaliação geral, durante a construção das tabelas de relacionamento, são apresentados a seguir.

Para o torneamento o desempenho das seis condições de usinagem, com relação à variação dimensional, é apresentado na Tabela 5.2 abaixo.

Tabela 5.2 – Faixas de CpK para a variação dimensional, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para o torneamento duro.

	Número de peças usinadas			
Condição	*5*	*10*	*15*	*20*
1	5	5	4	3
2	5	4	4	3
3	5	4	1	2
4	5	4	3	3
5	5	4	3	3
6	5	3	1	1

A partir da tabela de relacionamento para o processo de torneamento duro, Figura 5.2, e dos resultados apresentados nos testes de desempenho, conclui-se que as vidas de ferramentas que poderão atender as metas de qualidade esperadas são: 15 peças por aresta para as condições 1 e 2 de usinagem, 10 peças por aresta para as condições de usinagem 3,4 e 5 e 5 peças por aresta para a condição de usinagem 6.

Vale a pena ressaltar que os parâmetros utilizados na condição de usinagem 6 estão fora dos valores recomendados pelos fabricantes de ferramentas, e só foi estipulada como referencial de comportamento para as medidas que estão sendo efetuadas (variação dimensional, rugosidade e circularidade.

Com relação à rugosidade superficial a qualificação do processo de torneamento duro é apresentada na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 – Faixas de CpK para a rugosidade superficial, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para o torneamento duro.

	Número de peças usinadas			
Condição	*5*	*10*	*15*	*20*
1	4	4	4	4
2	4	4	4	4
3	4	4	4	4
4	4	4	4	4
5	4	4	4	4
6	4	4	3	2

A partir da tabela de relacionamento para o processo de torneamento duro, Figura 5.2, e dos resultados apresentados nos testes de desempenho, com relação `a rugosidade superficial, conclui-se que as vidas de ferramentas que poderão atender as metas de qualidade esperadas para a rugosidade são: 20 peças por aresta para as condições de 1 a 5, 10 peças por aresta para a condição de usinagem 6.

Com relação à circularidade percebeu-se que para todas as condições de usinagem, esta se manteve sempre no patamar de 1,7 μm com variação máxima de 1μm, para mais e para menos. Isto a classifica no nível 5 de qualidade esperada, para 20 peças por aresta em todas condições de usinagem estipuladas para a avaliação do processo de torneamento duro. Ou seja, a circularidade, como era esperado a partir da avaliação geral não é um item determinante da vida da ferramenta, para este caso de estudo, e, consequentemente, da escolha da alternativa de processo mais adequada.

Avaliação de desempenho do processo de retificação

A avaliação de desempenho do processo de retificação foi realizada utilizando-se a seguinte configuração básica de máquina e ferramentas:

- Máquina-ferramenta: retificadora cilíndrica cnc, marca ZEMA ZSELICS, modelo G800;
- Rebolo de abrasivo convencional: especificação AA 80 G 6V, rebolo "mole";
- Rebolo de abrasivo convencional: especificação AA 80 R 6V, rebolo "duro"; e
- Dressador tipo fliese: largura de atuação (bd) entre 0,70 e 0,80 mm.

Foram adotadas duas condições de usinagem distintas, ao contrário da fase de avaliação geral, onde as estimativas foram realizadas utilizando-se apenas uma condição de usinagem. O sobremetal diametral utilizado em todos os testes foi de 0,5 mm, tornando esta operação de acabamento. Estas condições são apresentadas na Tabela 5.4 abaixo.

Tabela 5.4 - Condições de usinagem para os testes de avaliação de desempenho do processo de retificação.

	Condição	
	1	2
Dureza do rebolo	R	G
Avanço do rebolo F [mm/min]	0,5	0,5
Sobremetal diametral [mm]	0,5	0,5
Grau de recobrimento de dressagem Ud	5,0	5,0
Tempo de "sparkout" [s]	10,0	4,00
Rotação da peça [rpm]	70	70
Rotação do rebolo [rpm]	1750	1750

Os resultados obtidos nos testes de desempenho são apresentados, em relação aos elementos previamente definidos e as metas de capabilidade estabelecidas na fase de avaliação geral, durante a construção das tabelas de relacionamento, são apresentados a seguir.

Para a retificação o desempenho das duas condições de usinagem, com relação à variação dimensional, é apresentado na Tabela 5.5 abaixo.

Tabela 5.5 – Faixas de CpK para a variação dimensional, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para a retificação.

	Número de peças usinadas				
Condição	10	20	30	40	50
1	5	4	4	3	
2	5	4	4	4	3

A partir da tabela de relacionamento para o processo de retificação, Figura 5.3, e dos resultados apresentados nos testes de desempenho, conclui-se que as vidas de ferramentas que poderão atender as metas de qualidade esperadas para a variação dimensional são: 30 peças por dressagem para a condição 1 e 40 peças por dressagem para a condição 2.

Com relação à rugosidade superficial a qualificação do processo de retificação é apresentada na Tabela 5.6 a seguir.

Tabela 5.6 – Faixas de CpK para a rugosidade superficial, em função do número de peças usinadas, para as condições de usinagem estabelecidas para a retificação.

	Número de peças usinadas				
Condição	10	20	30	40	50
1	4	4	4	4	4
2	4	4	4	2	

A partir da tabela de relacionamento para o processo de retificação, Figura 5.3, e dos resultados apresentados nos testes de desempenho, conclui-se que as vidas de ferramentas que poderão atender as metas de qualidade esperadas para a rugosidade superficial são: 30 peças por dressagem para a condição 1 e 50 peças por dressagem para a condição 2.

O comportamento da circularidade, como já era esperado, foi o mesmo observado nos testes para a avaliação do torneamento duro.

Com os parâmetros de desempenho para os dois processos foram recalculados os custos relacionados com as operações. Estes resultados são apresentados na Tabela 5.7 a seguir.

Tabela 5.7 – Componentes de custos calculados a partir dos resultados de desempenho.

Torneamento duro			
Condição de usinagem	Cm (R$)	Ct (R$)	Cp (R$)
1	0,19	4,36	4,55
2	0,22	4,36	4,59
3	0,37	6,05	6,42
4	0,45	6,05	6,49
5	0,84	6,05	6,88
6	0,33	11,09	11,43
Retificação			
Condição de usinagem	Cm (R$)	Ct (R$)	Cp (R$)
1	0,33	0,02	0,32
2	0,27	0,02	0,29

Os valores estabelecidos na Tabela 5.7permite a realimentação dos valores que formaram as curvas de aprendizagem e de acompanhamento do projeto de investimento, construídas na fase anterior.

Nas Figuras 5.9 e 5.10 são apresentadas as curvas de aprendizagem e de acompanhamento de investimento, obtidas para o processo de torneamento duro.

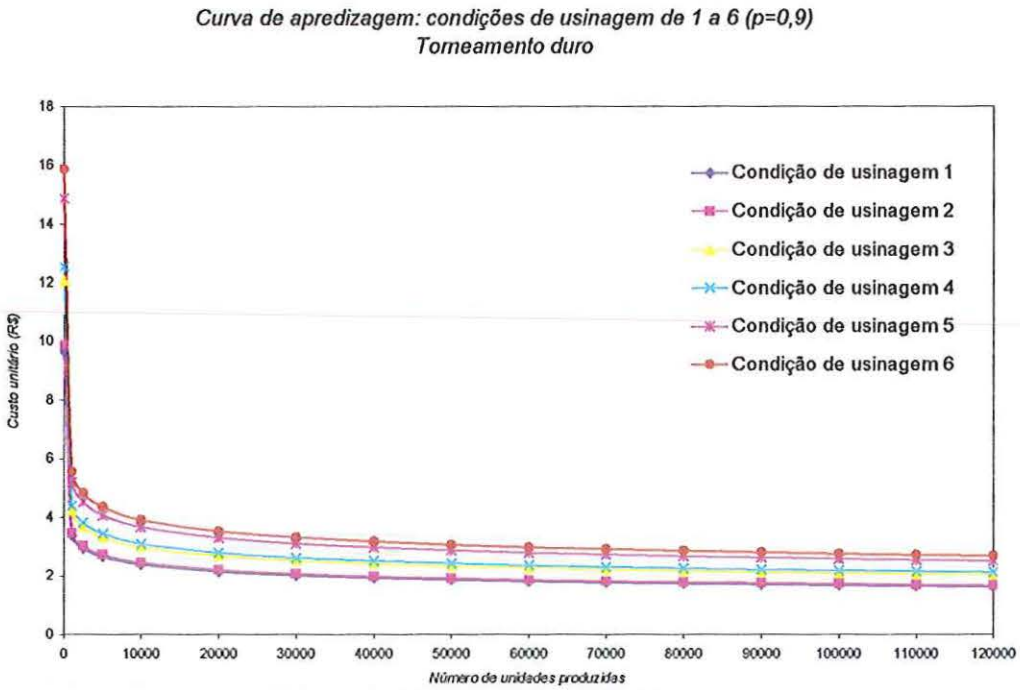

Figura 5.9 – Curvas de aprendizagem para as condições de usinagem do processo de torneamento duro.

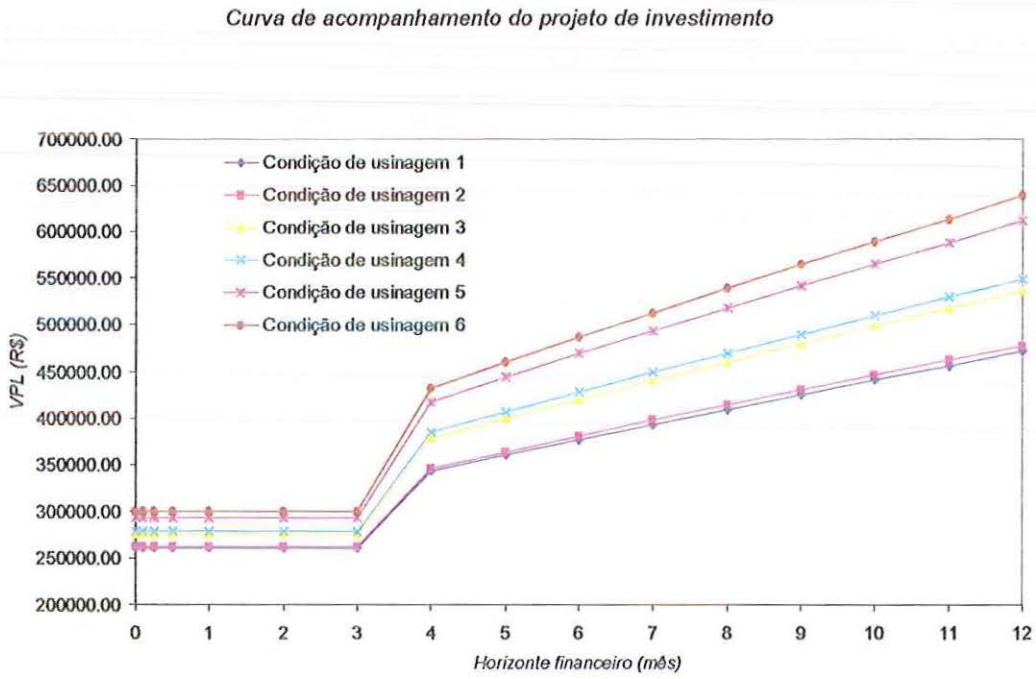

Figura 5.10 - Curvas de acompanhamento de investimento as condições de usinagem do processo de torneamento duro.

As curvas apresentadas nas Figuras 5.9 e 5.10 mostram rapidamente que o desempenho do processo de torneamento duro pode ser divido em dois grupos. O primeiro formado pelas condições de usinagem 1 e 2 e o segundo formado pelas condições de usinagem de 3 a 5.

O desempenho de aprendizagem das condições 1 e 2 são semelhantes as demais condições de usinagem. Com relação aos montantes investidos as condições 1 e 2 são menores do que as demais. Mas a condição 1 possui um montante de investimento inicial menor do que a condição 2.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram as mesmas curvas, só que para as duas condições de usinagem utilizadas no testes de desempenho do processo de retificação.

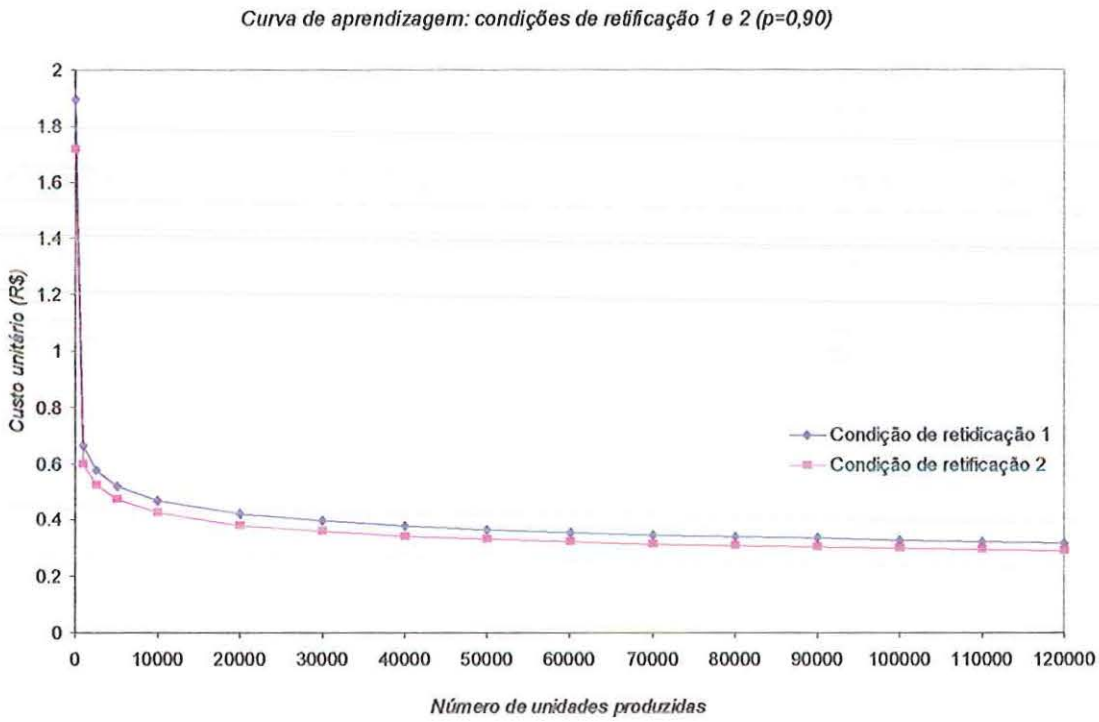

Figura 5.11 - Curvas de aprendizagem para as condições de usinagem do processo de retificação.

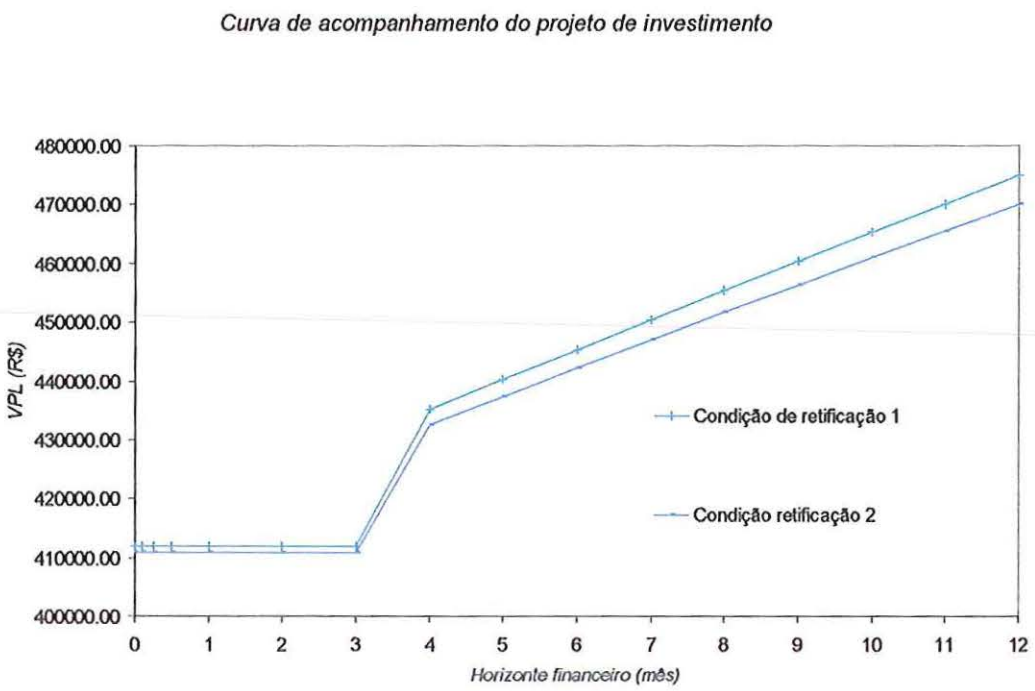

Figura 5.12 - Curvas de acompanhamento de investimento as condições de usinagem do processo de retificação.

A comparação das duas condição de retificação, através da observação das Figuras 5.11 e 5.12, mostra um desempenho econômico quase idêntico.

Quando a comparação é feita entre os dois processos observa-se que o comportamento da condição de usinagem de torneamento de melhor desempenho é significativamente inferior ao comportamento das duas condições de retificação.

Esta comparação é apresentada nas Figuras 5.13 e 5.14, onde as curvas de aprendizagem e de acompanhamento do projeto de investimento para todas as condições de usinagem, para as duas alternativas de processo que estão sendo avaliadas.

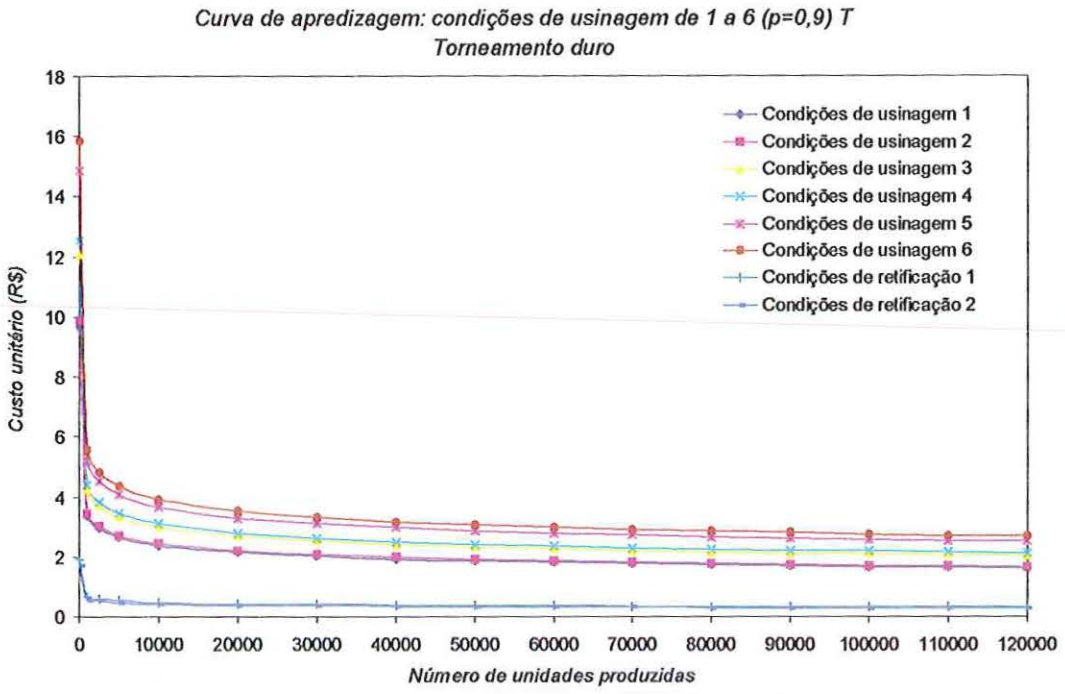

Figura 5.13 – Curva de aprendizagem paras as condições de usinagem dos processos de torneamento duro e retificação.

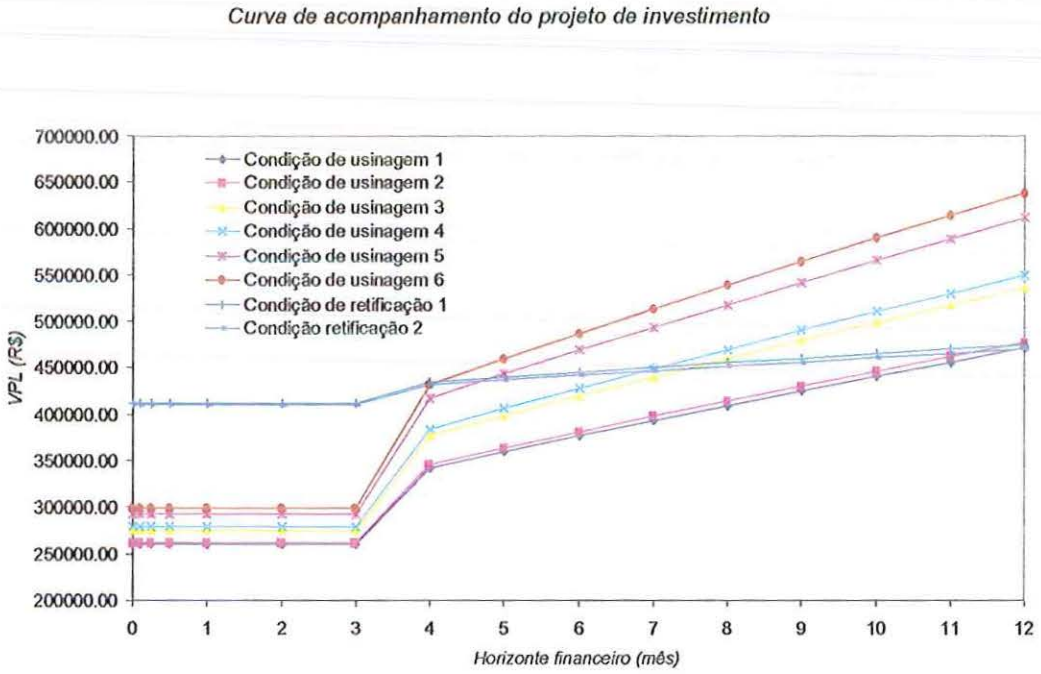

Figura 5.14 – Curvas de acompanhamento do projeto de investimento para os processos de torneamento duro e retificação.

A análise dos componentes de custo, que estão resumidos na Tabela 5.7, mostra que todas as alternativas avaliadas sofrem forte influência dos elementos que formam o investimento inicial.

Assim, na próxima fase de desenvolvimento da metodologia, denominada de avaliação de manufatura, os elementos que geram esta diferença devem ser monitorados com cuidado.

5.1.3. Fase 3: Avaliação de manufatura das alternativas de processo selecionadas.

O primeiro passo na fase de *avaliação de manufatura* é a reconstrução das tabelas de relacionamento, para as alternativas de processo que continuarão sendo avaliadas.

Neste caso de estudo decidiu-se continuar com a avaliação dos dois processos, torneamento duro e retificação. A justificativa para isto está na observação das curvas de acompanhamento de investimento, onde pode-se perceber que os montantes do investimento inicial são diferentes, mas ao longo do primeiro ano os montantes vão se igualando, com a tendência dos processos de retificação reduzirem o seu VPL nos anos seguintes.

A condição de usinagem que deixa mais próximo o desempenho econômico do processo de torneamento duro com o da retificação é a que foi denominada de 1. Já para a retificação, o desempenho econômico e a qualificação do processo foi quase que idêntica para as duas condições de trabalho testadas. Desta maneira, as tabelas de relacionamento serão recalculadas para a condição 1, tanto para o torneamento duro quanto para a retificação.

Estas tabelas são apresentadas na Figura 5.15, para o torneamento duro na condição 1, e na Figura 5.16, para a retificação na condição 1.

O desempenho do processo de torneamento duro, na fase *de testes de laboratório*, modificou os pesos das caraterísticas operacionais de processo estabelecidas inicialmente na fase de *avaliação geral* e apresentada na Figura 5.2. No entanto, as prioridades não foram

modificadas, continuando a ressaltar a importância do sistema de fixação, da vida da ferramenta e das características de refrigeração.

Nas duas etapas posteriores desta fase, *teste do plano de manufatura e de qualidade do componente*, estes são os elementos que devem ser monitorados com maior cuidado e onde, preferencialmente, estarão as soluções dos problemas encontrados nesta fase.

Elementos funcionais do componente	Características operacionais do processo													Planejamento da qualidade						
	Sistema de torneamento	Sistema de fixação	Tipo de ferramenta	Vida da ferramenta	Tipo de refrigeração	Sistema de refrigeração	Velocidade de corte	Sistema de carga e descarga	Sistema de correção dimensional					Grau de importância	Capabilidade atual	Capabilidade esperada	Índice de melhoria	Argumento de escolha	Peso dos elementos funcionais	Peso relativo dos elementos funcionais
Acabamento superficial		△	○	◉	◉	◉	○							5	4	4	1,00	1,5	7.5	0,30
Variação dimensional		△							◉					5	4	4	1,00	1,5	7.5	0,30
Batimento radial		◉						△						3	5	4	0.88	1,0	2,4	0,10
Perpendicularismo à LC		◉						△						3	5	4	0.88	1,5	3,6	0,14
Integridade superficial		△	○	◉	◉	◉	○							4	5	4	0.88	1,2	3,84	0,15
Peso das características operacionais do processo	5,96	1,55	4,37	3,69	3,69	1,55	2,00	2,05												
Peso relativo das caract. op. do processo	0,24	0,06	0,18	0,15	0,15	0,06	0,08	0,08												

Figura 5.15 - Tabela de relacionamento para o processo de torneamento duro

Elementos funcionais do componente	Características operacionais do processo													Planejamento da qualidade						
	Sistema de retificação	Sistema de fixação	Tipo de rebolo	Dressagem	Tipo de refrigeração	Sistema de refrigeração	Taxa de remoção de material	Tempo de "sparkout"	Sistema de carga e descarga	Sistema de detecção de contato				Grau de importância	Capabilidade atual	Capabilidade esperada	Índice de melhoria	Argumento de escolha	Peso dos elementos funcionais	Peso relativo dos elementos funcionais
Acabamento superficial			●	●	○	○	●	●						5	4	4	1,00	1,5	7,5	0,32
Variação dimensional	○	○						●	●					5	4	4	1,00	1,5	7,5	0,32
Batimento radial	●	●						○	○					3	5	4	0,88	1,0	2,4	0,10
Perpendicularismo à LC	●	●						○	○					3	5	4	0,88	1,5	2,4	0,10
Integridade superficial			●	●	●	●	●	○	○					4	5	4	0,88	1,2	3,84	0,16
Peso das características operacionais do processo	2,04	2,04	2,73	2,73	2,26	2,26	2,29	3,61	2,64	1,04										
Peso relativo das caract. op. do processo	0,09	0,09	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10	0,15	0,11	0,04										

Figura 5.16 - Tabela de relacionamento para o processo de retificação

Este comportamento não se repete para a retificação. Na tabela de relacionamento da Figura 5.3 pode-se observar que a característica operacional do processo que possui o maior peso é o tempo de "sparkout" e as demais possuem pesos semelhantes. Os resultados obtidos na fase de teste de laboratório modificaram estes valores, de tal maneira que as diferenças entre os pesos das características operacionais não pode mais ser considerada significativa.

Isto reforça a idéia de que nos processo de usinagem com ferramentas de geometria não definida é mais difícil de se estabelecer um comportamento determinístico, do que os processo de usinagem com ferramentas de geometria definida, como são, respectivamente, a retificação e o torneamento.

Em uma definição mais simples, isto é o mesmo que afirmar que o processo de retificação é mais difícil de ser compreendido do que o processo de torneamento.

Assim, o ponto chave na fase de implantação de manufatura para o processo de retificação é o monitoramento da aprendizagem, que em função das observações realizadas até o momento tem uma boa probabilidade de ser menor do que a do processo de torneamento. Se este fato ocorrer o ciclo deve ser realimentado e as curvas de aprendizagem devem ser recalculadas, bem como os seus resultados derivados (fluxo de caixa e gráfico de acompanhamento do projeto de investimento).

As novas tabelas de relacionamento devem ser utilizadas em conjunto com os gráficos de acompanhamento do projeto de investimento. Estes gráficos são apresentados em conjunto na Figura 5.17, apresentada a seguir.

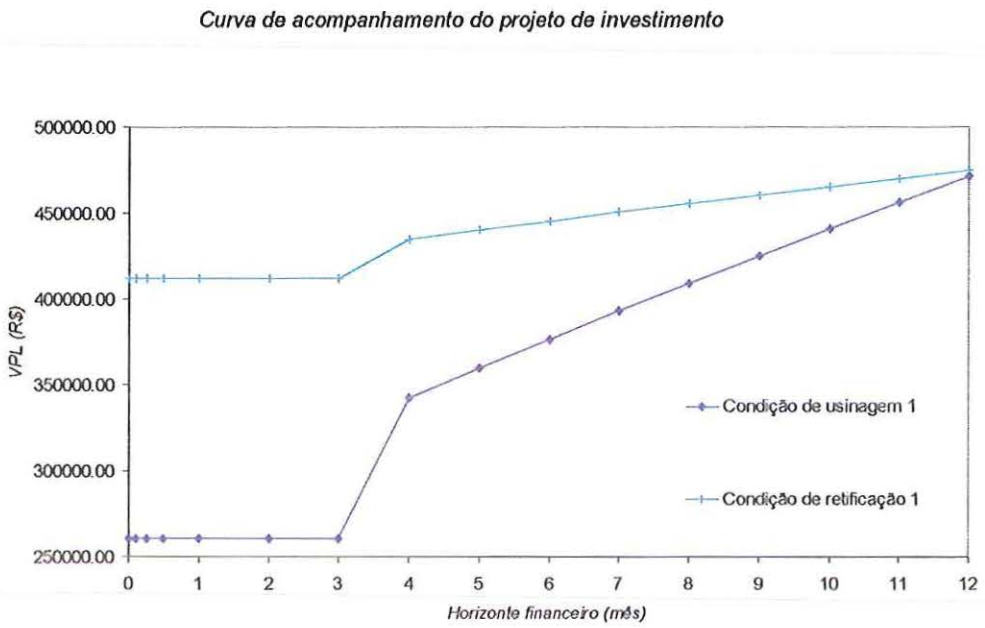

Figura 5.17 – Gráfico de acompanhamento do projeto de investimento para o processo de torneamento, condição 1, e retificação, condição 1.

O monitoramento do desempenho dos processos nesta fase serve para realimentar estas curvas, avaliando os parâmetros utilizados em sua construção e, consequentemente, os montantes financeiros estabelecidos que deverão ser utilizados na decisão final.

Se forem atendidas as metas de qualidade para a operação e a aprendizagem se desenvolver como esperado, os processos devem ser aprovados e a decisão da escolha final deverá ocorrer em função do contexto de cada empresa.

Por exemplo, uma empresa que trabalha tradicionalmente com processo de retificação esta deve optar por continuar com este processo.

Para exemplificar o processo de tomada de decisão, para a escolha da melhor alternativa de processo de fabricação, foi estipulada uma receita de R$ 5,00 por unidade produzida. Os valores acumulados desta receita são apresentados juntamente com os valores que formaram o gráfico da Figura 5.17, no gráfico da Figura 5.18.

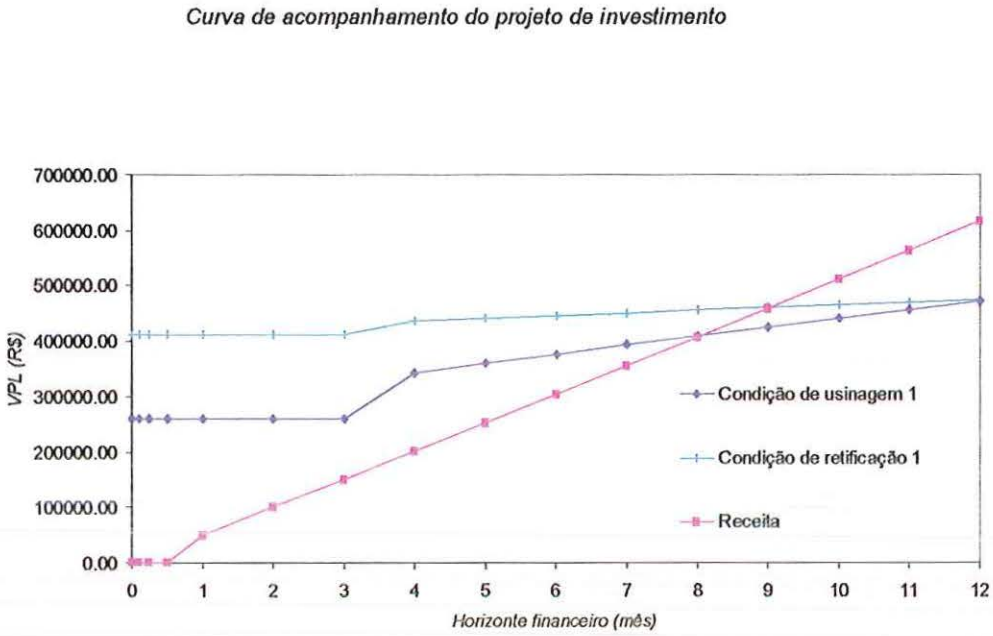

Figura 5.18 – Gráfico de acompanhamento do projeto de investimento para o processo de torneamento, condição 1, e retificação, condição 1, juntamente com o valor acumulado de receita (R$ 5,00/peça).

A curva de receita no gráfico foi constituída através do valor obtido de receita em cada período mais a soma corrigida, período a período, do montante de receita acumulado até o período anterior. Ou seja, é o valor acumulado da receita corrigido em função do número de períodos de capitalização a partir do início da fase de *avaliação de manufatura*.

Observando o gráfico de acompanhamento de projeto de investimento da Figura 5.18 pode-se chegar a conclusão de que, se não houver restrição com relação ao investimento inicial, a melhor alternativa entre os processos analisados é a retificação. Pois após a estabilização do processo (terceiro

mês) o incremento do seu VPL é bem menor do que o do torneamento duro na condição 1. Sendo que o VPL da receita se iguala ao VPL do investimento da retificação no nono mês, ou seja, apenas um mês após em relação ao torneamento.

As folhas de resumo seriam constituídas pelas tabelas de relacionamento das características de processo e componente, das Figuras 5.15 e 5.16, e o gráfico de acompanhamento do projeto de investimento da Figura 5.18.

A seguir são apresentadas as conclusões do presente trabalho.

6.Conclusões

As seguintes conclusões podem ser definidas a partir da pesquisa desenvolvida no presente trabalho:

- O processo de decisão na definição da configuração de sistemas de manufatura é muito complexo e envolve aspectos tecnológicos, financeiros, características da empresa que pretende utiliza-los, além de influências externas e de mercado.

- Devido à complexidade do processo de definição de um sistema de manufatura, há a necessidade de uma metodologia que oriente o usuário no processo decisório, considerando todos os aspectos mais relevantes.

- Com base na revisão bibliográfica, foi possível identificar os principais aspectos que devem ser considerados no processo decisório relativo à seleção de um sistema de manufatura, que podem ser divididos em aspectos tecnológicos e financeiros.

- Os principais aspectos tecnológicos que devem ser considerados em uma metodologia incluem: priorização de elementos funcionais do produto, viabilidade do processo de fabricação, capacidade de obter os requisitos de qualidade, custos tecnológicos e experiências anteriores. Os principais aspectos econômicos incluem: análise estratégica e financeira de investimentos, pay-back, fluxo de caixa,

investimentos iniciais, índices de avaliação de investimentos e curvas de aprendizagem.

- As etapas genéricas que fazem parte do processo de criação e desenvolvimento de um projeto qualquer, também são adequadas ao projeto e seleção de sistemas de manufatura. Nelas deve haver a inclusão de pontos pré-definidos de realimentação para que o processo não se perca.

- No âmbito do presente trabalho, foi possível agregar todos os principais aspectos em uma metodologia que permite a orientação no processo de avaliação comparativa e seleção de investimentos em sistemas de manufatura. O método proposto é bem definido e guia o usuário nas etapas necessárias à organização das principais informações relativas ao processo decisório.

- O resultado da metodologia proposta é uma folha resumo que agrega todos os principais parâmetros necessários para a decisão. Em função das disponibilidades financeiras da empresas usuária e das prioridades relacionadas à qualidade de cada uma das possibilidades, o usuário da metodologia pode, de maneira mais segura e abrangente selecionar o sistema ideal.

- Foram propostas análises de curvas de valor presente líquido que representam, ao longo do tempo, o montante financeiro associado à possível implantação dos sistemas de manufatura. Tais curvas são estimadas em uma avaliação preliminar com o objetivo de sanear o processo. Com a etapa de testes experimentais é possível melhorar a precisão destas estimativas. A partir das curvas é possível verificar parâmetros importantes no processo decisório, como investimento inicial, período de pay-back, entre ourtros.

- O sistema proposto facilita a análise conjunta de aspectos tecnológicos e administrativos no processo decisório, unificando-os na análise, de forma a se obter um resultado que satisfaça a ambos.

- A curva de aprendizagem é considerada na metodologia e se mostra como elemento muito importante no processo de decisão. É a partir dela que as características temporais do investimento vão ser definidas, oferecendo elementos relacionados ao fluxo de caixa. Estes elementos podem ser fundamentais no processo de decisão.

- O caso de estudo foi aplicado e sua apresentação ajuda no entendimento da metodologia e mostra como as diversas características do processo podem ser consideradas.

- Mais especificamente, conclui-se pelo caso apresentado que operações de retificação, nas condições propostas, podem ser muito mais competitivas desde que o investimento inicial não seja um limitante do processo de decisão.

Trabalhos futuros podem ser efetuados com o objetivo de aprimorar a presente metodologia. Estes podem ser:

- Testar a metodologia proposta em outros casos reais e acompanhar a sua implantação, verificando a confiabilidade do método e seus eventuais pontos fracos.

- Fazer levantamento apurado das características das curvas de aprendizagem para processos metalmecânicos. Este estudo consideraria as diversas tecnologias de usinagem hoje disponíveis.

- Promover a discussão e a divulgação dos modelos adotados na metodologia perante as indústrias de manufatura visando seu

aperfeiçoamento, complementação e também sua consagração como padrão para este tipo de decisão.

ANEXO A

Formação dos custos em processos de fabricação mecânica e seus principais fatores de influência

a) Definições gerais de custos

Os elementos apresentados a seguir são as definições básicas dos elementos básicos, que formam o custo dos processos de fabricação mecânica. O objetivo desta colocação é de esclarecer o significado de termos comuns na avaliação de financeira de projetos, mas que as vezes são mau entendidos nas áreas de manufatura.

Para ROSS et al. (2000) e GITMAN (1997):

Custos fixos.

Um custo fixo é qualquer despesa que permanece constante, independente do nível de produção. Embora nenhum custo seja verdadeiramente fixo, há muitas que despesas permanecem praticamente fixas para uma larga faixa de saídas. Exemplos típicos custos fixos incluem aluguéis, impostos de propriedade, a maioria dos tipos de ação, pagamento de seguros e salários da alta gerência, todos os quais iguais, quer a firma produza uma ou 10.000 unidades.

Custos variáveis

Os custos variáveis são despesas que flutuam diretamente com as mudanças nos níveis de produção. Por exemplo, para limpar um quarto de hotel necessita-se de uma quantidade específica de material (sabão, xampu, toalhas limpas, etc) e mão-de-obra. O custo incremental desses materiais e da mão-de-obra pode ser isolado e atribuído a cada quarto de hotel que é

limpo. Tipicamente, esses custos são diretamente proporcionais às das tarefas, ou seja, limpar dois quartos de hotéis custa exatamente duas vezes o valor para limpar um quarto.

Custos perdidos

Os custos perdidos são despesas que foram previamente incorridas ou investimentos que não possuem nenhum valor de resgate; portanto, não devem ser levados em conta quando estamos considerando investimentos alternativos.

Os custos perdidos podem ainda ser custos correntes que são essencialmente fixos, tais como o aluguel de um prédio que foi arrendado por um longo prazo. Por exemplo, suponha que uma firma que produz sorvete ocupe um prédio alugado e esteja pretendendo fazer refresco de frutas no mesmo local. Se a companhia decide entrar com a produção de refresco de frutas, seus custos contábeis irão ratear parte das despesas em aluguel para a nova operação. Contudo, o aluguel do prédio permanece inalterado e, portanto, não é uma despesa relevante a ser considerada na tomada de decisão. O aluguel está incorrido; ou seja, continua a existir e não muda a sua quantia, independente da decisão.

Custo de oportunidade

Custos de oportunidade representam os benefícios passados, ou suas vantagens perdidas, resultantes da escolha de uma alternativa no lugar de outra que poderia fornecer um retorno financeiro maior. Por exemplo, suponha que uma firma possua $100.000 para investir, e são apresentadas duas alternativas com riscos comparáveis, cada uma necessitando um investimento de $100.000. O Investimento A irá obter um lucro líquido de $25.000; o Investimento B irá obter um lucro líquido de $23.000. O investimento A é claramente a melhor escolha, com um retorno líquido

de $25.000. Se a empresa decide investir em B no lugar de A, os custos de oportunidade associados a B serão de $2.000.

Custos evitáveis

Custos evitáveis incluem qualquer despesa que não é incorrida se um investimento é feito, mas que deve ser incorrida caso o investimento não seja feito. Suponha que uma companhia possua um torno para metal que não apresenta nenhuma condição de trabalho, sendo que ela precisa ter um torno operando. Como o torno deve ser consertado ou substituído, os custos com o conserto são evitáveis caso um novo torno seja comprado. Os custos evitáveis reduzem o custo de um novo investimento porque eles não são incorridos, caso o investimento seja feito. Custos evitáveis são um exemplo de como é possível "economizar" dinheiro gastando dinheiro.

Custos "out-of-pocket".

Os custos *"out-of-pocket"* são as despesas reais incorridas por uma firma que são tipicamente relacionadas com a escolha de uma alternativa em particular. Por exemplo, se uma companhia está pensando em transformar um depósito em espaço para escritórios, então os custos *"out-of-pocket"* em relação a este espaço (que é o aluguel caso o prédio seja arrendado, ou a amortização caso o prédio seja comprado) seriam zero. Entretanto, poderão haver despesas *"out-of-pocket"* com relação a reformas, à compra de equipamentos, e a outros itens que poderão ser comprados para transformar esse espaço em escritórios. Assim, os custos *"out-of-pocket"* representam o caixa atual que deixa a empresa.

Custo de capital

O custo do capital é geralmente expresso como um custo percentual em

base anual. A determinação da porcentagem anual a ser utilizada é dependente das condições financeiras da companhia. Os cenários básicos para a determinação do custo de capital são os três apresentados a seguir.

Se uma companhia precisa pedir um empréstimo do dinheiro necessário para pagar o projeto que está sendo considerado, então o custo do capital é o custo do dinheiro emprestado. Por outro lado, se a companhia possui um caixa alto, então o custo do capital é o juro perdido em notas de curto prazo, tais como certificados de depósitos onde o dinheiro poderia ser investido de outra maneira. Finalmente, se a firma possui uma quantia limitada de caixa e possui a oportunidade de investi-lo em um entre vários projetos, então o custo do capital é o custo de oportunidade de renunciar aos outros projetos. Grandes corporações, normalmente, calculam uma média ponderada das três abordagens enquanto levam em consideração, ao mesmo tempo, o retorno esperado sobre investimentos dos proprietários da empresa.

Custeio baseado em atividades.

Segundo DAVIS (2001) para que se possa determinar os custos totais envolvidos para fazer um produto ou prestar um serviço, algum método para alocação de custos indiretos deve ser aplicado.

A abordagem tradicional tem sido alocar os custos indiretos em bases de dólares ou horas de mão-de-obra direta. O rateio dos custos indiretos pode ser estabelecido pela divisão dos custos indiretos totais, estimados pelo orçamento total de horas mão-de-obra direta. O problema desta abordagem é que a mão-de-obra direta, como porcentagem do custo total, tem caído drasticamente nas últimas décadas, especialmente em empresas de manufatura. Em muitas empresas, por exemplo, a introdução da tecnologia de manufatura avançada e outras melhorias na produtividade têm levado a mão-de-obra direta a tornar-se menos de 10% do custo total de fabricação. Como resultado, taxas de custos indiretos de 600% ou até iguais a 1.000% são encontradas em algumas das principais plantas

automatizadas, segundo LIBERTORE (1990) apud DAVIS (2001)

Esta tradicional prática contábil de alocação de custos indiretos à mão-de-obra direta pode levar a decisões questionáveis de investimentos; por exemplo, processos automatizados podem ser escolhidos em lugar de processos com mão-de-obra intensiva, baseado na comparação dos custos projetados. Infelizmente, os custos indiretos não desaparecem quando o equipamento é instalado, e os custos globais podem, na verdade ser menores com a utilização de mão-de-obra intensiva. Isso ainda pode levar a um desperdício de esforço, visto que uma desordenada quantia de tempo é gasta rastreando informações sobre transações de mão-de-obra direta, sendo que ela é responsável por apenas 4% dos custos totais de produção, segundo JOHNSON & KAPLAN (1987) apud DAVIS (2001).

A técnica de *custeio baseado em atividades* foi desenvolvida para aliviar estes problemas, aperfeiçoando o processo de alocação do custos indiretos para refletir mais diretamente as atuais proporções de custos indiretos, consumidos pelas atividades produtivas. Fatores causais, conhecidos como direcionadores de custos, são identificados e utilizados como uma média para a alocação dos custos indiretos. Esses fatores podem incluir máquinas-hora, camas ocupadas, tempo de computador, horas de vôo ou milhas dirigidas. E claro que a precisão da alocação dos custos indiretos depende da seleção adequada dos direcionadores de custos.

O custeio baseado em atividades envolve dois estágios no processo de alocação. O primeiro atribui os custos indiretos aos custos de grupos de atividades. Esses grupos representam atividades tais como realização de *setup* em máquinas, emissão de ordens de compras e inspeção de lotes. No segundo estágio, os custos são atribuídos às atividades baseadas no número ou quantidades de atividades relacionadas ao grupo, necessárias para a sua realização.

Conforme definido anteriormente, o custeio baseado em atividades, supera os problemas de distorção dos custos, criando um grupo de custos para cada atividade ou transação que pode ser identificada como um direcionador de custo, e pela atribuição de custos indiretos aos produtos ou

às tarefas na base do número de atividades separadas, necessárias para a sua realização. Deste modo, na situação anterior, o produto de baixo volume poderia ter associado a maior parte dos custos com *setup* de máquinas, ordens de compras e inspeção de qualidade, mostrando assim, um alto custo unitário comparado com outros produtos.

Finalmente, o custeio baseado em atividades é, algumas vezes, chamado de custeio por transações. Este enfoque transacional salienta mais uma grande vantagem que ele apresenta sobre os outros métodos de custeio; ou seja, ela melhora a rastreabilidade dos custos indiretos, resultando em dados de custos unitários mais precisos os para administradores.

b) Análise de Ponto de Equilíbrio

Segundo WOILER & MATHIAS (1996), a análise de ponto de equilíbrio pode vista sob duas perspectivas diferentes. Pela visão geral da companhia, a análise ponto de equilíbrio normalmente refere-se à determinação do volume de negócios que a companhia deve realizar para se equilibrar, ou seja, não ter nem lucro nem perdas. O ponto de equilíbrio, neste caso, é onde as receitas e os custos são iguais. A análise equilíbrio em uma perspectiva puramente operacional normalmente foca na escolha entre processos. Nesse caso, o equilíbrio implica que os dois processos possuem custos iguais para níveis específicos de volume, sendo mais uma vez referido como o ponto equilíbrio. Nos itens a seguir serão abordados estes dois tipos de análise de ponto de equilíbrio, aplicando um modelo linear simples utilizando apenas custos fixos e variáveis.

Receitas versus custos

O objetivo da análise do ponto de equilíbrio é determinar qual o volume de negócios que uma companhia deve realizar para igualar os seus

custos e receitas. O volume pode ser definido em unidades monetárias ou em unidade de produtos; no entanto, o último é mais fácil ser visualizado dentro da perspectiva operacional.

Para o desenvolvimento de um modelo linear são necessários os seguintes pressupostos básicos:

- O preço de venda por unidade é constante. Em outras palavras, existe um preço de venda para uma unidade, sem nenhum tipo de compensação ou desconto para quantidade ou prazos especiais normalmente dados aos maiores clientes.

- Os custos variáveis por unidade permanecem constantes. Aqui, o custo para produzir cada unidade permanece o mesmo dentro da faixa de volume. (consequentemente, não há nenhuma compensação para economia de escala.) Visto que os custos variáveis referem-se ao material e à mão-de-obra direta necessários para a produção de cada unidade, os custos unitários adicionais do tipo horas extras, bonificação do segundo turno ou subcontratação serão, portanto, desconsideradas.

- Os custos fixos permanecem constantes. Dentro da faixa de volume de interesse os custos fixos das operações não variam, independente do volume produzido. Conforme definido anteriormente, estes custos fixos normalmente incluem aluguel, seguro e impostos sobre as instalações, os salários da alta gerência e as outras despesas indiretas.

Desta maneira o ponto de equilíbrio poderá ser calculado pela seguinte relação:

$$X = \frac{CF}{PV - CV} \qquad (A.1)$$

onde,

X é o volume de produção para o ponto de equilíbrio;

CV é o custo variável por unidade;

CF é o custo fixo por unidade; e

PV é o preço de venda.

A Figura A.1 abaixo ilustra a relação entre estas quantidades e o ponto de equilíbrio.

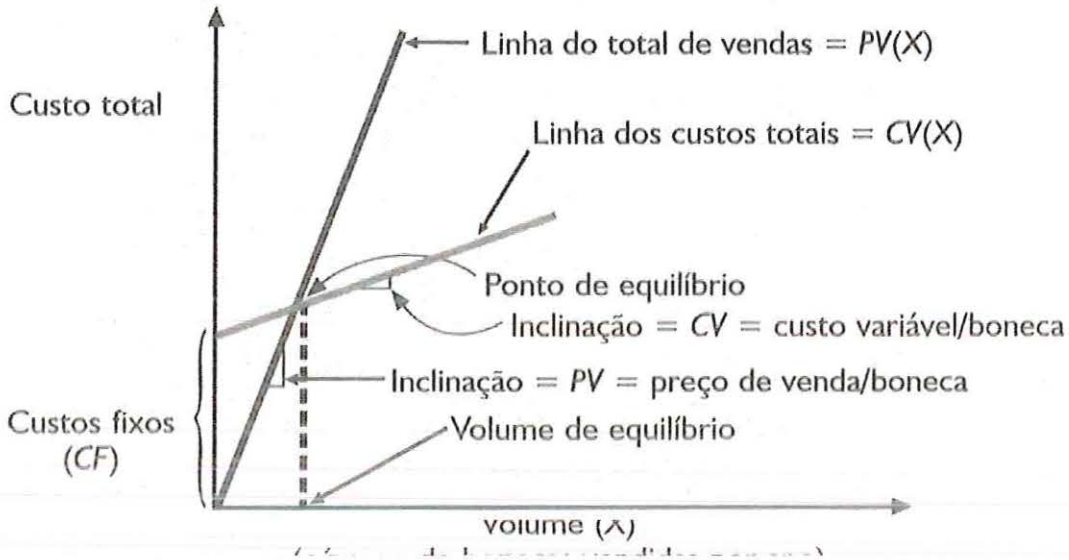

Figura A.1 – Análise de ponto de equilíbrio através da comparação de custos e receitas, DAVIS (2001).

Escolha de processos

A análise de ponto de equilíbrio pode ainda ser utilizada para a escolha entre processos alternativos que podem ser utilizados por uma companhia. Mais uma vez, deve-se supor que os custos variáveis por unidade e os custos fixos dentro de uma faixa de volume que está sendo considerada permanecem constantes. As vendas não são consideradas nesta análise, que visa identificar os pontos de equilíbrio. (Embora o nível previsto de vendas seja um fator definitivo na escolha do processo a ser utilizado.) Aqui, define-se o ponto de equilíbrio como sendo o volume no qual os processos

serão indiferentes em relação aos custos.

c) Obsolescência, Depreciação e Impostos

Quando uma firma investe em um recurso de produção rentável, a sua vida útil é estimada. Para fins de contabilidade, há uma depreciação deste recurso neste período. Supõe-se que o recurso irá desenvolver sua função durante este tempo e então será considerado *obsoleto* ou gasto, sendo necessária uma substituição. Entretanto, esta previsão de vida do recurso raramente coincide com a realidade.

Para ilustrar esta situação, supunha que é comprada uma máquina com uma vida produtiva esperada de 10 anos. Se alguma vez, durante esses 10 anos de uso, uma nova máquina for desenvolvida, que possa desenvolver a mesma tarefa de uma maneira mais eficiente e econômica, a máquina antiga passa a ser obsoleta. O fato de estar gasta ou não torna-se irrelevante.

A *vida econômica* de um equipamento é o período em que ele apresenta o melhor método para desenvolver suas tarefas. Quando um novo método superior é desenvolvido, o valor atual do equipamento existente pode passar a ser significativamente menor que o valor contábil estabelecido para uma máquina (ou seja, o valor restante oficial).

A *depreciação* é um método para alocar o custo do capital de um equipamento ao longo de mais de um período de tempo (geralmente anual). O valor de qualquer bem de capital — prédios, maquinário, e assim por diante — decresce, conforme sua vida útil vai passando.

Os procedimentos de depreciação podem não refletir o verdadeiro valor de um recurso em algum ponto de sua vida, porque a obsolescência muitas vezes, pode resultar em uma grande diferença entre o valor real do recurso e seu valor contábil. Além disso, como as taxas de depreciação afetam os impostos, uma firma pode escolher um método particular de depreciação dentre as várias alternativas que estão disponíveis, levando mais em consideração seu efeito sobre impostos do que sua habilidade em fazer com

o que o valor contábil de um recurso reflita seu verdadeiro valor de revenda.

São os cinco métodos de depreciação normalmente utilizados, segundo WOILER & MATHIAS (1996):

Tipos de depreciação

- *Método da linha reta.* Com este método, o valor de um recurso é reduzido em quantias uniformes anuais durante sua vida útil estimada. A fórmula geral de depreciação em linha reta é:

  Depreciação anual = (Custos – Valor residual) / Vida útil estimada

- *Método da Soma dos Dígitos dos Anos (SDA).* O propósito do método, SDA, é reduzir rapidamente o valor contábil de um bem no primeiro ano de sua vida, reduzindo-o a cada ano, tendo assim uma taxa mais baixa em seu último ano. Isto é feito tanto por motivos de impostos como para refletir mais acuradamente o valor de um recurso. Para ilustrar, suponha que a vida útil estimada de um equipamento seja cinco anos. Neste caso, a soma dos dígitos dos anos será 1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15. Logo, o recurso é depreciado por 5 ÷ 15 (ou 33%) após o primeiro ano, 4 ÷ 15 (ou 26,7%) após o segundo ano, e assim por diante, até 1 ÷ 15 (ou 6,7% no último ano).

- *Método do saldo decrescente.* Este método também é utilizado para depreciações aceleradas. O valor do recurso é decrescido a cada ano por uma redução percentual constante do seu valor contábil. A taxa de porcentagem selecionada é, muitas vezes, aquela que apenas reduz o valor contábil para o valor residual no final da vida estimada do recurso. Em nenhum caso, o recurso deverá ser reduzido abaixo do seu valor residual estimado.

- *Método do duplo saldo decrescente.* Mais uma vez, por vantagem

tributária, o método do duplo saldo decrescente propõe uma depreciação inicial maior na vida econômica de um recurso. O método do saldo decrescente usa uma porcentagem durante a vida de um item igual a duas vezes a taxa de linha reta, porém aplica essa taxa ao custo original não-depreciado. Esse método é idêntico ao método do saldo decrescente, sendo que o termo duplo significa duplicar a taxa de linha reta. Deste modo, um equipamento com uma expectativa de vida de 10 anos poderia ter uma taxa de depreciação em linha reta de 10% ao ano e uma taxa de duplo saldo decrescente (aplicados a quantias não depreciáveis) de 20% ao ano. (Em algum ponto, normalmente próximo ao final da vida esperada do equipamento, muda-se para depreciação em linha reta).

- *Método da depreciação por uso.* Este método se propõe a depreciar um investimento de capital proporcionalmente ao seu uso. É aplicável, por exemplo, a uma máquina que realiza, muitas vezes, a mesma operação. A vida desta máquina não será estimada em anos, mas sim no número total de operações que se espera que ela desenvolva, antes de desgastar. Suponha que uma prensa de estamparia possua uma vida estimada de 1 milhão de estampagens e custa $100.000. O débito de depreciação por estampagem é então $100.000 ÷ 1.000.000, ou $0,10. O método da depreciação por uso é uma tentativa de alocar os débitos das depreciação em proporção à utilização real, e por meio disso ajustar mais acuradamente as despesa com o valor de produção. Adicionalmente, como o valor de revenda de uma máquina está relacionado à sua vida produtiva contínua, espera-se que, com esse método, o valo contábil fique mais próximo ao valor de revenda.

d) O efeito dos impostos

Para DAVIS (2001), as taxas de impostos e os métodos de aplicá-las mudam ocasionalmente. Quando analistas avaliam uma proposta de investimento, as considerações de impostos, muitas vezes, passam a ser o fator decisivo, visto que as despesas com depreciação afetam diretamente a renda tributável e, portanto, o lucro. A habilidade de debitar a depreciação nos anos iniciais fornece uma fonte adicional de fundos para investimentos.

e) Equações de Custo para as Operações de Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida

Conforme dito anteriormente, as equações de custo de usinagem utilizadas no presente trabalho foram enunciadas por KALPAKJIAN (1991) e são agora detalhadas.

Além das considerações técnicas, o resultado econômico dos processos de usinagem dos metais é muito importante. Na usinagem de um determinado componente, deve-se determinar os parâmetros que irão fornecer o mínimo custo por peça ou a máxima taxa de produção.

De maneira geral, o custo total por peça é composto por quatro itens:

$$C_p = C_m + C_s + C_l + C_t \qquad \text{(A.2)}$$

onde C_p é o custo por peça; C_m é o custo de usinagem; C_s é o custo de preparação (set up) para a usinagem, como a montagem das ferramentas e dispositivos de fixação; C_l é o custo de carga e descarga e operação da máquina; e C_t é o custo de ferramentas, que inclui a troca de ferramentas, reafiação e depreciação.

O custo de usinagem é dado por:

$$C_m = T_m(L_m + B_m) \tag{A.3}$$

onde T_m é o tempo de usinagem por peça; L_m é o custo de mão-de-obra do profissional de máquina por hora; e B_m são os encargos que incidem sobre a máquina, ou custos indiretos, como depreciação, manutenção, mão-de-obra indireta, etc..

O custo de preparação, C_s, é determinado em função das características de cada empresa. O custo de carga e descarga é calculado a partir dos seguintes parâmetros:

$$C_l = T_l(L_m + B_m) \tag{A.4}$$

onde T_l é o tempo utilizado na carga e descarga das peças, ajustes da máquina e outros.

O custo de ferramentas é dado por:

$$C_t = \frac{1}{N_p}[T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c] \tag{A.5}$$

onde N_p é o número de peças usinadas por aresta de corte da ferramenta; T_c é o tempo requerido para trocar a ferramenta; T_g é o tempo utilizado para reafiar a ferramenta, quando for o caso; L_g e B_g, são respectivamente, os custos de mão-de-obra direta e indireta relacionados com a reafiação de ferramentas; D_c é a depreciação da ferramenta.

O tempo necessário para a produção de cada peça é dado por:

$$T_p = T_l + T_m + \frac{T_c}{N_p} \tag{A.6}$$

onde Tm deve ser determinado para cada tipo de operação. Por

exemplo, para uma operação de torneamento, o tempo de usinagem será dado por:

$$Tm = \frac{L}{fN} = \frac{\pi LD}{fV} \tag{A.7}$$

onde L é o comprimento usinado; f é o avanço, N é a rotação da peça (RPM), D é o diâmetro da peça, e V é a velocidade de corte.

A partir da equação de vida de ferramenta, tem-se:

$$VT^n = C \tag{A.8}$$

ou,

$$T = (\frac{C}{V})^{\frac{1}{n}} \tag{A.9}$$

onde T é o tempo, em minutos, necessário para que o desgaste de flanco atinja uma determinada dimensão, depois da qual a ferramenta deve ser trocada. O número de peças produzidas por ferramenta pode-se ser, assim, calculado simplesmente por:

$$N_p = \frac{T}{T_m} \tag{A.10}$$

A combinação das Equações (A.8), (A.9) e (A.10) leva a:

$$N_p = \frac{fC^{\frac{1}{n}}}{\pi LDV^{(\frac{1}{n})-1}} \tag{A.11}$$

Agora, pode-se definir o custo por peça Cp da Equação (A.2), em termos de diversas variáveis. Para calcular a velocidade ótima de corte e também a vida ótima da ferramenta, para o mínimo custo, deve-se diferenciar Cp em relação a V e igualar a expressão a zero. Tem-se, então:

$$\frac{\partial C_p}{\partial V} = 0 \qquad \text{(A.12)}$$

e a velocidade ótima de corte V_0 em relação ao custo será dada por:

$$V_0 = \frac{C(L_m + B_m)^n}{\{[1/n - 1][T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c]\}^n} \qquad \text{(A.13)}$$

e a vida ótima da ferramenta T_0 será dada por:

$$T_0 = [(1/n) - 1]\frac{T_c(L_m + B_m) + T_g(L_g + B_g) + D_c}{L_m + B_m} \qquad \text{(A.14)}$$

Para calcular a velocidade de corte ótima e também a vida ótima da ferramenta para a máxima taxa de produção, deve-se diferenciar T_p em relação a V e igualar a equação a zero. Tem-se, então:

$$\frac{\partial T}{\partial V} = 0 \qquad \text{(A.15)}$$

assim, a velocidade ótima de corte V_0 em relação à taxa de produção será calculada através de:

$$V_0 = \frac{C}{\{[(1/n) - 1]T_c\}^n} \qquad \text{(A.16)}$$

e a vida ótima da ferramenta T_0 será dada por:

$$T_0 = [(1/n) - 1]T_c \qquad \text{(A.17)}$$

O custo de uma peça usinada também depende do acabamento superficial e dimensional requerido; o custo de usinagem cresce significativamente com o aumento da qualidade de acabamento.

Esta análise indica a importância de se identificar todos os parâmetros relevantes em uma operação de usinagem, determinando os vários fatores de custo, obtendo as curvas relevantes de vida das ferramentas para cada operação em questão, e medidas acuradas dos vários intervalos de tempo relacionados com a operação das máquinas-ferramenta.

ANEXO B

Capacidade do processo

A capacidade de um processo para prover produtos divide-se em duas capacidades distintas:

a) A capacidade para realizar as metas da qualidade do produto, ou sua capacidade física.
b) A capacidade inerente de reproduzir os seus resultados com consistência, geralmente chamada apenas de capacidade de processo, ou capabilidade.

Índices de desempenho de processo.

Os índices de desempenho de processo devem de preferência combinar os dois conceitos de capacidade, exatidão e precisão, em um único valor e a sua observação deve ser feita através das ferramentas consagradas do CEP – Controle Estatístico de Processo, que irão realizar esta avaliação através de dados obtidos sob condições operacionais.

A medida mais usada para avaliar a capacidade de um processo é a sua variabilidade, sendo o desvio-padrão (σ) a forma mais comum de medida. A variação total do processo, ou seja, $\pm 3\sigma$ em torno da medida nominal, representada pela média (μ), na indústria automotiva não deve exceder 0,75 da distância entre os limites de tolerância (amplitude da tolerância) especificados no projeto de um item de fabricação. Anunciada ao contrário, a regra exige que a relação entre e amplitude de tolerância e a variação do processo seja no mínimo 1,33. Esta relação, às vezes, é chamada de índice de capacidade de processo.

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

As medidas de capacidade de um processo de fabricação são todas baseadas na observação de sua variabilidade, em relação à parâmetros de controle pré-estabelecidos. Esta observação pode ser melhor entendida através definição dos cinco índices de capacidade mais utilizados na indústria automobilística, que são: Cp, CPU, CPL, k e Cpk, MESSINA (1987).

A vantagem do uso dos índices de capacidade de processos é que estes podem utilizados para sumarizar dados a respeito de um processo de fabricação de uma maneira bastante concisa. Os índices de capacidade de processos podem ser inseridos na linguagem de uma empresa e podem ser utilizados por todos para entender facilmente como é o desempenho de um determinado processo de fabricação.

O primeiro índice de capacidade de processo a ser avaliado é o Cp. Este índice pode ser entendido como uma medida do potencial de um processo, KANE (1986). Este é o índice de capacidade de processos mais utilizado, mede a relação entre a variação permitida de um processo, muito conhecida como tolerância natural (NT) e usualmente determinada como 6σ, e a variação entre os limites superiores (USL) e inferiores (LSL) especificados. O *Cp* é definido pela seguinte relação:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} = \frac{USL - LSL}{NT} \qquad \text{(B.1)}$$

A Figura B.1 a seguir mostra a relação entre diversos valores de Cp e os limites de especificação, em termos de porcentagem da especificação. Nesta figura, pode-se observar que conforme o Cp varia de 1 para 2, a variabilidade do processo é reduzida. Esta ilustração tende a indicar que o Cp = 1,00 pode ser utilizado como o mínimo valor aceitável. No entanto, na prática, o valor de Cp = 1,33 é normalmente recomendado. A razão para isto é que usualmente o valor de Cp é calculado sobre um conjunto pequeno de dados a respeito do processo em avaliação (em torno de 20 a 30 conjuntos

de dados) e que não podem levar em consideração os fatores que podem afetar o desempenho do processo ao longo de um grande período de operação. Assim, vários autores como JURAN (1992) e KANE (1986) recomendam o valor de Cp = 1,33 como o mínimo valor aceitável para a capacidade de um processo, em estudo realizados em curtos períodos de tempo, com o objetivo de salvaguardar as decisões de gerentes de manufatura.

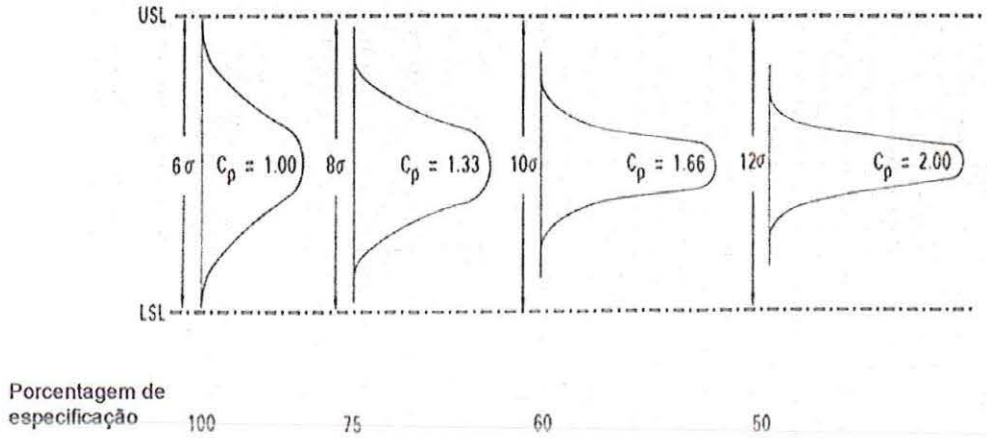

Figura B.1 – As relações entre o índice de capacidade de processo Cp e os limites especificados de um processo, KANE (1986).

Os métodos básicos de controle estatístico de processo mostram que é necessário, para o controle de um processo de fabricação, determinar a variabilidade e centralizar o processo. O índice de potencial do processo Cp apenas avalia a variabilidade de um processo (6σ) e ignora a sua centralização em relação aos limites especificados. É possível que um alto valor de Cp, que poderia indicar claramente um processo capaz, pode resultar em uma grande quantidade de produtos fora da especificação apenas colocando a média próxima de um dos limitas de especificados para o produto. KANE (1986) define os índices de capacidade de processo CPU, CPL e Cpk como sendo medidas do desempenho do processo, uma vez que

estes consideram a variabilidade e a centralidade dos dados. O CPU e o CPL relacionam o desempenho do processo respectivamente, com os seus limites superior e inferior. Já o Cpk, relaciona o desempenho do processo com o limite especificado mais próximo. Estes índices são definidos pelas relações apresentadas a seguir:

$$CPU = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \tag{B.2}$$

$$CPL = \frac{\mu - LSL}{3\sigma} \tag{B.3}$$

Quando o CPU ou o CPL forem menores do que 1, isto indicará que um certa porcentagem dos produtos excedeu o limite superior ou inferior especificado, respectivamente. Se o CPU ou o CPL forem no mínimo iguais a unidade, os produtos estarão entre os limites especificados.

O valor do Cpk é calculado como:

$$C_{pk} = \frac{z_{\min}}{3} \text{ ou } C_{pk} = \min(CPU, CPL) \tag{B.4}$$

onde

$$z_{\min} = \min\left[\frac{USL - \mu}{\sigma}, \frac{LSL - \mu}{\sigma}\right] \tag{B.5}$$

o Cpk apresenta a distância escalar entre a média (μ) do processo e o limite especificado mais próximo.

O último índice de capacidade citado é o fator k. Este índice é utilizado para quantificar o quanto um processo está fora de centro. Este é definido segundo a seguinte relação:

$$k = \frac{|m - \mu|}{(USL - LSL)/2} \qquad \text{(B.6)}$$

onde $m = (USL - LSL)/2$ é a linha de centro do campo de especificações e $0 \leq k \leq 1$.

A condição ótima para o processo ocorre quando k = 0, ou seja, a média do processo está sobre μ.

Nas definições apresentadas considerou-se que $LSL \leq \mu \leq USL$ e que a média do processo (μ) e o seu desvio-padrão (σ) são perfeitamente conhecidos. Se a média e o desvio-padrão forem apenas estimadas a partir de dados amostrais a respeito do desempenho de um processo de fabricação (média amostral $\bar{x}$ e desvio-padrão amostral s), então, os índices de capacidade de processo também serão apenas estimativas ($\hat{C}_p, C\hat{P}L, C\hat{P}U, \hat{C}_{pk}$ e $\hat{k}$).

A equação a seguir relaciona o desempenho do processo Cpk e o potencial do processo Cp:

$$C_{pk} = C_p(1 - k) \qquad \text{(B.7)}$$

A partir desta equação pode-se perceber que apenas quando o processo estiver sobre a linha de centro dos limites de especificação é que o Cp será igual ao Cpk. E em qualquer outra situação o Cpk será menor do que o Cp.

O estudo da capacidade de processos de fabricação.

A seguir apresenta-se um exemplo geral de estudo da capacidade de processos de fabricação, segundo MESSINA (1987).

"Um gerente de manufatura deseja determinar a capacidade de um

processo em uma linha de fabricação, no qual o principal parâmetro é a largura de uma abertura. As especificações para a abertura na peça em questão são 0,7 ± 0,1. Como dados o gerente utilizou amostras com cinco unidades produzidas, coletadas aleatoriamente, durante 20 dias de produção".

A Tabela B.1, a seguir, mostra os resultados obtidos.

Tabela B.1 – Estudo da capacidade de processo segundo o exemplo de MESSINA (1987).

	Número da observação						
Dia	1	2	3	4	5	$\overline{X}$	R
1	0.65	0.70	0.65	0.65	0.85	0.85	0.20
2	0.75	0.85	0.75	0.85	0.65	0.65	0.20
3	0.75	0.75	0.80	0.70	0.75	0.76	0.10
4	0.60	0.70	0.70	0.75	0.65	0.68	0.15
5	0.70	0.75	0.65	0.85	0.80	0.75	0.20
6	0.60	0.70	0.80	0.75	0.70	0.71	0.20
7	0.75	0.80	0.65	0.75	0.75	0.74	0.15
8	0.60	0.70	0.80	0.75	0.75	0.72	0.20
9	0.65	0.75	0.85	0.85	0.75	0.78	0.20
10	0.60	0.75	0.60	0.80	0.60	0.67	0.20
11	0.80	0.70	0.85	0.65	0.70	0.75	0.20
12	0.85	0.70	0.85	0.65	0.70	0.76	0.20
13	0.70	0.80	0.75	0.75	0.70	0.72	0.05
14	0.65	0.70	0.85	0.75	0.60	0.71	0.25
15	0.75	0.70	0.75	0.80	0.65	0.75	0.15
16	0.75	0.65	0.85	0.70	0.80	0.76	0.15
17	0.75	0.80	0.60	0.70	0.60	0.67	0.15
18	0.65	0.65	0.85	0.65	0.70	0.70	0.20
19	0.60	0.75	0.65	0.65	0.75	0.69	0.20
20	0.80	0.70	0.70	0.65	0.65	0.70	0.15
						$\overline{\overline{X}} = 0.7245$	$\overline{R} = 0.173$

A partir dos resultado obtidos e apresentado na Tabela B.1, foram construídas cartas de controle de processo para $\overline{X}$ e R, com o objetivo de responder a questão se o processo estava sob controle. Os valores de $\overline{\overline{X}}$ e de $\overline{R}$ para os dados da Tabela B.1 são 0,7245 e 0,173, respectivamente. O limites de controle podem ser calculados a partir das seguintes relações:

$$UCL_{\overline{X}} = \overline{\overline{x}} + A_2\overline{R} = 0.7245 + (0.577)(0.173) = 0.824$$

$$UCL_{\overline{X}} = \overline{\overline{x}} - A_2\overline{R} = 0.7245 - (0.577)(0.173) = 0.624$$

$$UCL_R = D_4\overline{R} = (2.11)(0.173) = 0.365$$

$$LCL_R = D_3\overline{R} = (0)(0.173) = 0$$

onde A_2 é o fator de limite de controle para a carta de controle das médias e D_3 e D_4 são fatores de limite de controle para a construção de cartas de controle de campo.

A Figura B.2 a seguir mostra as cartas $\overline{\overline{X}}$ e $\overline{R}$ correspondente aos dados da Tabela B.1 e mostram que o processo em estudo está sob controle estatístico.

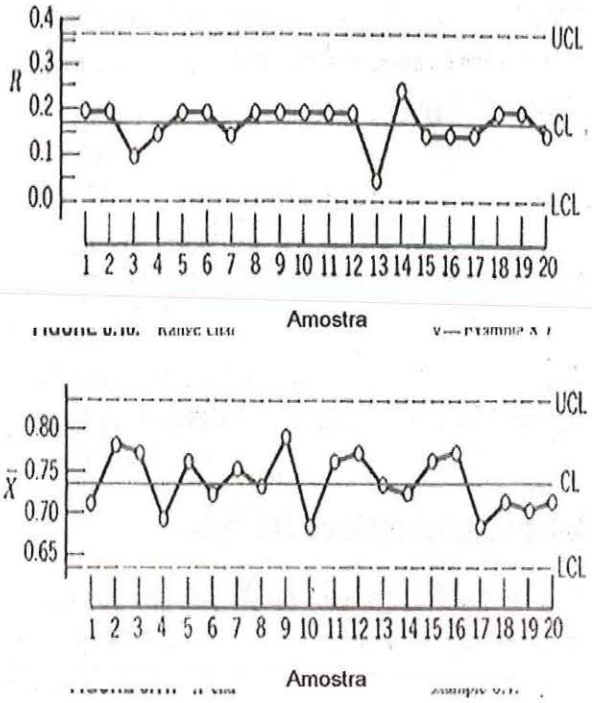

Figura B.2 – Cartas de controle de $\overline{\overline{X}}$ e de $\overline{R}$.

A próxima questão a ser respondida é se o processo é ou não capaz? E para isto deve-se calcular os índices de capacidade de processo, preferencialmente o Cp que indica o potencial do processo e o Cpk que fornece o desempenho do processo.

Se o Cp = Cpk, então, o processo está centrado e se o Cpk $\leq$ Cp, então, o processo estará se deslocando do centro. Seja z_{min} = min{(USL - $\overline{\overline{X}}$)/σ;($\overline{\overline{X}}$ - LSL)/σ}. Então Cpk = z_{min}/3.

Em função das especificações iniciais do processo 0.7 $\pm$ 0.1, tem-se que a variabilidade permitida para o processo é de 0.2. Dos dados da Tabela B.1 pode-se estimar o valor de σ utilizando a relação $\overline{R}$/d2, onde d2 é o fator de linha central para a construção de cartas de controle de campo. Assim, $\hat{\sigma}$ = 0,173/2,33 e o $\hat{C}_{pk} = 0{,}449[0{,}2/6(0{,}0742)]$, indicando que o processo de fabricação em questão não é capaz. A Figura B.3 abaixo ilustra esquematicamente o que está acontecendo com a capabilidade deste processo.

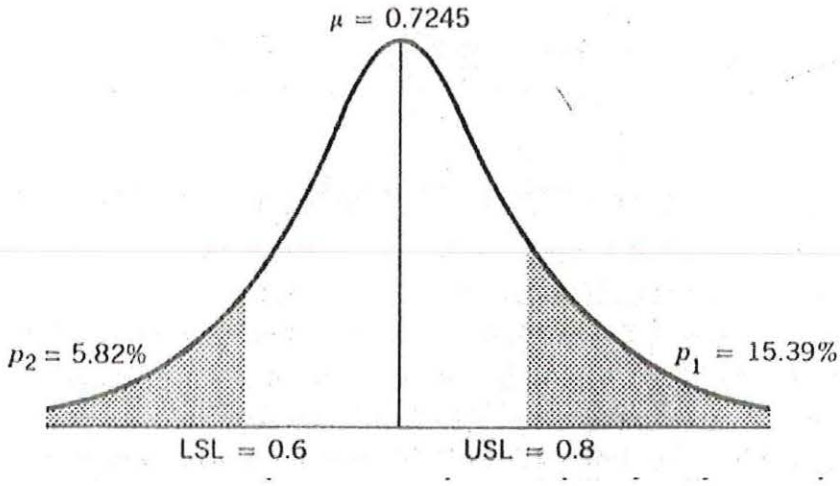

Figura B.3 – Representação esquemática do estudo de capacidade do processo.

O valor do Cpk será dado por $C_{pk} = \frac{(USL - X)}{3\sigma} = \frac{0{,}8 - 0{,}7245}{3(0{,}0742)} = 0{,}339$, uma vez que a média do processo está mais perto do UCL.

Além destes dois índices, pode-se calcular a quantidade de material fora de conformidade que o processo irá gerar, através de uma transformação normal simples tem-se, para os limites inferior e superior da curva normal-padrão os seguintes valores:

$$z_1 = \frac{0{,}8 - 0{,}7245}{0{,}0742} = 1{,}02 \text{ e}$$

$$z_2 = \frac{0{,}6 - 0{,}7245}{0{,}0742} = -1{,}67$$

que correspondem às proporções de 15,39%(p1) e 5,82%(p2), mostradas na Figura B.3 acima. A soma destas duas proporções é de 21,21% e significa a porcentagem de refugos esperada para este processo.

ANEXO C

Parâmetros utilizados nos cálculos de custo das alternativas de processo.

Tabela C.1 – Parâmetros utlizados nos cálculos de custo das alternativas de processo.

	Torneamento						Retificação	
Parâmetro	1	2	3	4	5	6	1	2
vida legal (anos)	10	10	10	10	10	10	10	10
vida legal (minutos)	1267200	1267200	1267200	1267200	1267200	1267200	1267200	1267200
horas de trabalho (mês)	176	176	176	176	176	176	176	176
Lm = piso salarial / número de minutos trabalhados	600	600	600	600	600	600	600	600
Bm = valor inicial do bem de capital / vida legal (min)								
Tm torneamento = (sm/ap) .pi . L . D / f . V.1000 (min)	0.41	0.49	0.82	0.99	1.85	0.74	0.74	0.74
Comprimento usinado L (min)	35	35	35	35	35	35	35	35
Avanço f (mm/volta)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Diâmetro D (mm)	54	54	54	54	54	54	54	54
Velocidade de corte V (m/min)	180	150	180	150	200	500	500	500
Sobremetal sm (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Profundidade de corte ap (mm)	0.5	0.5	0.25	0.25	0.1	0.1	0.1	0.1
Tm retificação = (sm / f) . tempo "sparkout"	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.07
Sobremetal sm (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
avanço f (mm/min)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
tempo de "sparkout" (min)	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.07

Torneamento

Ct = (1/Np)* [Cf + Tc*(Lm+Bm)] + Dc	1.45	1.45	1.67	1.67	1.67	2.34	11.09	11.09
Número de peças usinados por aresta de corte Np	15	15	10	10	10	5	5	5
Tempo de troca da ferramenta Tc (min)	1	1	1	1	1	1	1	1
Custo do porta-feramenta por peça Dc = custo / vida	1	1	1	1	1	1	1	1
Custo do porta-ferramenta (R$)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Vida porta-ferramenta	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Custo ferramenta/aresta Cf (R$)	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	6.25	50	50
Custo total da ferramenta (R$)	50	50	50	50	50	50	400	400
Número de arestas por ferramenta	8	8	8	8	8	8	8	8
Retificação								
Ct = (1/Nd)*[Td.(Lm + Bm) + Dd]	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Número de peças usinadas por dressagem Nd	20	20	20	20	20	30	30	30
Tempo de dressagem (min)	1	1	1	1	1	1	1	1
Custo do rebolo por dressagem Dd =custo / número de dressagens	0.33							
		0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Custo do rebolo (R$)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Número de dressagens = raio útil do rebolo / ad	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Raio útil do rebolo = (Di-Df)/2	150	150	150	150	150	150	150	150
Diâmetro inicial do rebolo (mm)	600	600	600	600	600	600	600	600
Diâmetro final do rebolo (mm)	300	300	300	300	300	300	300	300
Profundidade de dressagem ad (mm)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

Bibliografia citada.

ABERNATHY, W.J.; WAYNE, K. (1974). Limits of the learning curve. Harvard Bussiness Review, v.52, p.109-119, Sep.-Oct.

ABREU, F. S. (1997). QFD – Desdobramento da função da qualidade – estruturando a satisfação do cliente. *Revista de Administração de Empresas Fundação Getúlio Vargas São Paulo*, v. 37, n.2, p.47-55, Abr./Jun.

AKAO, Y. (1990). *Quality function deployment – integrating customer requirements into product design*. Cambridge. Productivity Press.

AKAO, Y. (1996). *Introdução ao desdobramento da qualidade*, v.1. Belo Horizonte. QFCO.

ANDRADE, M.C. et. al. (1999). Activity-based costing for production learning. *International Journal of Production Economics*, v.62, n.3, p.175-180, Sept.

ARBEL, A.; TONG, R.M. (1982). On the generation of alternatives in decision analysis problems, v.33, p.377-387.

ARONSON, R.B. (1999). Grinding-pro roundtable. *Manufacturing Engineering*, v.123, n.3, p. 48-61, Sept.

ASSAF NETO, A. (2000). *Matemática financeira e suas aplicações*. 5.ed. São Paulo, Atlas.

BADIRU, A.B. (1992). Multivariate learning curve model for manufacturing economic analysis. In: PARSAEI, H.R.; MITAL, A., ed. *Economics of advanced manufacturing systems*. London, Chapman & Hall. Cap. 9, p.141-162.

BAHRAMI, A.; DAGLI, C.H. (1994). Design science. In: DAGLI, C.H. & KUSIAK, A., ed. *Intelligent systems in design and manufacturing*. New York, ASME PRESS. Cap. 1, p.7-25.

BALAKSHIN, B. (1983). *Fundamentos de engenharia de fabricação mecânica*. Cap. 1,Trad. por Henrique Rozenfeld. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BALOFF, N. (1966). Starups in machine-intensive systems. *The Journal of Industrial Engineering*, v.12, n.1, p.25-32.

BEISCHEL, M.E.; SMITH, K.R. (1991). Linking the shop floor to the top floor. *Management Accounting*, p.25-29, October.

BODILY, S.E. (1981). When should you go to court? *Harvard Business Review*, p.103-113, may-june.

BOWEN, H.K.; CLARK, K.B.; HOLLOWAY, C.A.; WHEELWRIGHT, S.T. (1994). Development projects: the engine of renewal. *Harvard Business Review,* september-october.

BROWN, R.V. (1970). Do managers find decision theory useful? ?. *Harvard Business Review,* p.78-88, may-june.

BRUNS, J.H. (1970). Forecasting the cost of redesign. *Machine Design*, p.113-115, March 5.

CARLSON, J.G.H. (1973). Cubic learning curves: a precision tool for labor estimating. *Manufacturing Engineering and Management*, v.71, n.5, p.22-25.

CHENG, L.C. et al. (1995). *QFD – planejamento da qualidade*. Belo Horizonte. QFCO.

COELHO, R.T. (1999). *Otimização de sobremetal para torneamento e retificação cilíndrica de peças forjadas*. São Carlos. 156p. Tese (Livre Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CONWAY, R.W.; SCHULTZ, A.JR. (1966). The manufacturing progress function. *Journal of Industrial Engineering*, v.10, n.1, p.39-53, January-February.

CONLEY, P. (1970). Experience curves as a planning tool. *IEEE Spectrum*, v.7, n.6, p.63-68.

COYNE, R. (1988). Logic models of design. London. Pitman.

DAVIS, M.M.; AQUILANO, N.J.; CHASE, R.B. (2001). *Fundamentos da administração da produção*. Porto Alegre. Bookman.

DEMING, W.E. (1990). *Qualidade: A revolução da administração*. São Paulo, Saraiva.

DIXON, J.R. (1987). On research methodology towards scientific theory of enginnering design. *AI EDAM*, v.1, n.3, p.145-157.

D'OUVILLE, E.; WILLIS, T.H.; HUSTON, C.R. (1998). Traditional versus JIT production systems: a cost comparision model. *Production Planning & Control*, vol.9, n.5, p.457-464.

DUVURU, S.; STEPHNOPOULS, G., LOGCHER, R. (1989). Knowledge-based system applications in engineering design: research at MIT. *AI Magazine*, v.10, n.3, p.79-96.

ERHORN, C.; STARK, J. (1994). *Competing by design – creating value and market advantage in new product development*. Essex Junction. OMNEQ.

ERMER, D.S. (1997). A century of optimizing machining operations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.119, p.817-822, November.

FAYOL, H. (1968). Administração industrial e geral. 7. ed. São Paulo. Editora Atlas.

FALCONI, V.F. (1989). *Gerência da qualidade total*. Belo Horizonte. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – Fundação Christiano Ottoni.

FALCONI, V.F. (1991). *Controle da qualidade total (no estilo japonês)*. Belo Horizonte. QFCO.

FEIGENBAUM, A. V. (1991). *Total quality control*. New York, McGraw-Hill.

FELDMANN, K.; ROTTBAUR, H; ROTH, N. (1996). Relevance os assembly in global manufacturing. *Annals of the CIRP*, vol.45, n.2, p.545-552.

FERRARESI, D. (1977). *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, v.1.

FLEURY, M.T.L. (1993). Cultura da qualidade e mudança organizacional. *Revista de Administração de Empresas da FGV,* v.33, n.2, p.26-34.

FREEDMAN, D.H. (1992). Is management still a science?. *Harvard Business*

Review, p.26-38, november-december.

GALBRAITH, J.K. (1982). *A era da incerteza*. 3. Ed. São Paulo. Livraria Pioneira Editora.

GALASNE, A.; FENSTERSEIFER, J.E.; LAMB,R. (1999*). Decisões de investimentos da empresa*, São Paulo, Atlas.

GARVIN, D.A. (1992). *Gerenciando a qualidade*. Rio de Janeiro. Qualitymark.

GITMAN, L.J. (1997). *Princípios de administração financeira*. 7.ed. São Paulo, Harbra.

GORCZYCA, F.E. (1987). *Application of the metal cutting theory*. Industrial Press, New York.

HAUSER, J.R; CLAUSING, D. (1995). The house of quality. In: CLARK, K.B.; WHEELWRIGHT, S.C., ed. *The product development challeng*. Boston, Harvard Business Review Book. Parte 5, Cap.1, p.299-315.

HELSFERT, E.A. (2000). *Técnicas de análise financeira*. Porto Alegre. Bookman.

HIRSCHMANN, W.B. (1964). The learning curve. *Chemical Engineering*, v.71, n.7, p.95-100, March.

ISHIKAWA, K. (1993). *Controle de qualidade total à maneira japonesa*. Rio de Janeiro. Ed. Campos.

JABER, M.Y.; BONNEY, M. (1999). The economic manufacture/order quntity (EMQ/EOQ) and the learning curve: past, present, and future. *International*

Journal of Production Economics, vol.59, .93-102.

JOIA, L.A. (2001). Medindo o capital intelectual. *Revista de Administração de Empresas*, vol. 41, n.2, p.54-63, Abr/Jun.

JONES, C.J. (1992). *Design methods*. New York. John Wiley & Sons.

JONES, R.E.; DECKRO, R.F. (1993). The social psychology of project management conflict, *European Journal of Operational Research,* v.64, p.216-228.

JURAN, J,M. (1992). *A qualidade desde o projeto*. 2.ed. Trad. por Nivaldo Montigelli Júnior. São Paulo. Livraria Pioneira Editora.

KALPAKJIAN, S. (1991). *Manufacturing processes for engineering materials*. 2.ed. New York. Addison-Wesley Publishing Company.

KANE, V.E. (1986). Process capability indices. *Journal of Quality Technology*, vol.18, n. 1, p.41-52.

KAPLAN, R.S. (1984). Yesterday's accounting undermines production. *Harvard Business Review*, p.95-101, July-August.

KEGG, R.L. (1983). Industrial problems in grinding. In: Annals of the CIRP, v.32, n.2, p.559-561.

KNECHT, G.R. (1974). Costing and technological growth. *Operational Research Quartely*, v.25, n.3, p.487-491.

KUHN, T.S. (2000). *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo. Editora Perspectiva.

KORHONEN, P.; MOSKOWITZ, H.; WALLENIUS, J. (1992). Multiple criteria decision support – A review. *Eupopean Journal of Operational Research*, v.63, p.361-375.

LI, G.; RAJAGOPLAN,S. (1998). Process improvement, quality, and learning effects (part1). *Management Science*, v.44, n.1, p.1517-1532, November.

LUCKMAN, J. (1967). An approach to the management design. Operational Research Quartely, v.18, n.4, p.345-358.

MAGEE, J.F. (1964). Decision trees for decision making. *Harvard Business Review,* p.126-138, July-August.

MAHONEY, R.M. (1997). High-mix low-volume manufacutring. New Jersey. Prentice Hall PTR.

MALHOTRA, M.K.; FRY, T.D.; KHER, H.V.; DONOHUE, J.M. (1992). The impact of learning and labor attrition on worker flexibility in dual resource constrained job shops. *Decision Sciences*, v.24, n.3, p.641-663.

MATHER, H.F. (1984). The case for skimpy inventories. *Harvard Business Review,* p.40-48, January-February.

MATTOS, A.C.M. (1989). Análise de sensibilidade. *Revista de Administração de Empresas da FGV*, v.29, n.1, p.85-91.

MAXIMIANO, A.C.A. (1997). *Administração de projetos*. São Paulo. Atlas.

MESSINA, W. (1987). *Statistical quality control for manufacturing managers.* New York. John Wiley & Sons.

MILLER, J.G.; VOLLMANN, T.E. (1985). The hiden factory. *Harvard*

Business Review, p.142-150, September-October.

NAIM, M.M.; TOWILL, D.R. (1993). Modelling and forecasting industrial innovatiion via the transfer function S-shaped learning curve. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.8, p.329-343.

NIEBEL, B.W.; DRAPER, A.B.; WYSK, R.A. (1989). *Modern manufacturing process engineering*. New York. McGraw-Hill International Editions.

NOVASKI, O. (1989). *Determinação das condições econômicas de usinagem através de parâmetros obtidos na empresa*. Campinas. 103p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade de Campinas.

NOVASKI, O. (1991). *Custos de usinagem*. Campinas.

OHNO, T. (1997). O sistema Toyota de produção além da produção em larga escala. São Paulo. Artes Médicas.

OLIVEIRA, J.A.N. (1982). Engenharia econômica: uma abordagem às decisões de investimento, São Paulo, McGraw-Hill

OLIVEIRA, J.F.G. (1989). *Tópicos avançados sobre o processo de retificação*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/Apostila/.

PFEFFER, J. & SUTTON, R.I. (1999). Knowing what to do is not enough – turning knowledge into action. California Management Review, vol. 42, n.1, Fall.

PRIMROSE, P.L. (1991). *Investiment in manufacturing technology*. London.

Chapman & Hall.

ROJO, F.J.G. (1998). Qualidade total: uma nova era para os supermercados. *Revista de Administração de Empresas da FGV*, v.38, n.4, p.26-36, out./dez.

ROSS, S.A.; WESTERFIELD, R.W.; JORDAN, B.D. (2000). *Princípios de administração financeira*, São Paulo, Atlas.

SHINGO, S. (1996). *O sistema Toyota de produção do ponto de vista da engenharia de produção*. São Paulo. Artes Médicas.

SKINNER, W. (1986). The productivity paradox. *Harvard Businees Review*, p.55-59, July-August.

SMUNT, T.L. (1999). Log-linear and non-log-linear learning curve models for production research and cost estimation. *Int. Journal of Production Research*, vol.37,n.17, p.3901-3911.

SOARES FILHO, J.C. (1999). *Influência do sobremetal para a escolha da operação ideal de usinagem: torneamento x retificação.*. São Carlos. 91p. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. (1999). *Decisões financeiras e análise de investimentos*. São Paulo. Atlas.

SUH, N.P.; BELL, A.C.; GROSSARD, D.C. (1978). On an axiomatic approach to manufacturing systems. *Journal of Engineering for Industry*, v.100, n.2, p.127-130.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E.; HSIANG, T. (1990). Taguchi – Engenharia da qualidade em sistemas de produção. São Paulo. McGraw-Hill.

TOWILL, D.R.; CHERRINGTON, J.E. (1994). Learning curve models for predicting the performance of AMT. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.9, p.195-203.

ULVILA, J.W.; BROW, R.V. (1982). Decision analysis comes of age. *Harvad Business Revies,* september-october.

VERGARA, S. C.; BRANCO, P.D. (2001). Empresa humanizada: a organização necessária. *Revista de Administração de Empresas da FGV,* v.41, n.2, p.20-30.

WATSON, S.R.; BROWN, R.V. (1978). The valuation of decision analysis. *J.R. Statist. Soc. Ser. A.,* v.141, n.1, p.69-78.

WEBER, M.; BORCHERDING, K. (1993). Behavioral influences on weight judments in multiattribute decision making. *European Journal of operational Research*, v.67, p.1-12.

WERKEMA, M.C.C. (1995). Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos, vol. 2. Belo Horizonte. QFCO.

WOILER,S.; MATHIAS, W.F. (1996). Projetos: planejamento, elaboração e análise. São Paulo. Editora Atlas.

WOODGATE, R.W. (1991). *Managing the manufacturing process.* John Willey & Sons, New York.

WHITELEY, R. (1992). *A empresa totalmente voltada para o cliente.* São Paulo. Editora Campus.

YELLE, L.E. (1979). The learning curve: historical review and comprehensive

survey. *Decision Sciences*, v.10, n.2, p. 302-328.

YUEJIN, Z.; CHUAH, K.B. (1999). The strategic issues in implementation of CIM technology in PRC/HK enterprises. *The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.15, p.-514-521.