

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção**

Dissertação de mestrado

**Planejamento da Otimização Experimental de
Processos Industriais**

Mestranda:

Márcia Elisa Soares Echeveste

Orientador:

José Luís Duarte Ribeiro

Porto Alegre, setembro de 1997

**ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA**

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção**

**PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Márcia Elisa Soares Echeveste

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de
Produção como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Produção

Área de Concentração: Engenharia da Qualidade

Porto Alegre, setembro de 1997

Planejamento da otimização experimental de processos

Márcia Elisa Soares Echeveste

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:

José Luís Duarte Ribeiro
Orientador

Luís Antônio Lindau
Coordenador

Banca examinadora

Antônio Cezar Bornia, Dr.

João Riboldi, Dr.

Gilberto Dias da Cunha, Dr.

Porto Alegre, 19 de setembro de 1997

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. José Luis Duarte Ribeiro, pela sua competência como educador e pesquisador que fizeram com que essa dissertação fosse concluída.

A minha família pelo apoio e incentivo para a realização dos meus estudos, sem a qual não chegaria neste momento da minha carreira profissional.

A todos os meus amigos que compartilharam comigo estes anos de realização da dissertação. Especialmente gostaria de agradecer a amiga e colega Carla S. ten Caten pelo incentivo e a leitura desta dissertação que resultaram em contribuições valiosas. Também ao colega Celso Fritsh pela sua disponibilidade em transmitir seus conhecimentos na área computacional. E, finalmente a amiga Liane Werner, por sua grande amizade que se perpetua desde os tempos de faculdade.

E, por último, agradeço ao Departamento de Estatística pelo incentivo e compreensão durante a execução desta dissertação.

SUMÁRIO

<i>SUMÁRIO</i>	<i>iv</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i>	<i>vii</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>viii</i>
<i>LISTA DE QUADROS</i>	<i>ix</i>
<i>LISTA DE SÍMBOLOS</i>	<i>x</i>
<i>RESUMO</i>	<i>xii</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xiii</i>
<i>CAPÍTULO 1</i>	<i>1</i>
<i>INTRODUÇÃO</i>	<i>1</i>
1.1 <i>COMENTÁRIOS INICIAIS</i>	<i>1</i>
1.2 <i>TEMA</i>	<i>4</i>
1.3 <i>JUSTIFICATIVA</i>	<i>5</i>
1.4 <i>OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO</i>	<i>6</i>
1.5 <i>METODOLOGIA</i>	<i>7</i>
1.6 <i>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO</i>	<i>8</i>
1.7 <i>LIMITAÇÕES DA PESQUISA</i>	<i>9</i>
<i>CAPÍTULO 2</i>	<i>10</i>
<i>PESQUISA DE MERCADO</i>	<i>10</i>
2.1 <i>ETAPAS DA PESQUISA DE MERCADO</i>	<i>12</i>
2.1.1 <i>Reconhecimento e Formulação do Problema</i>	<i>12</i>
2.1.2 <i>Planejamento da Pesquisa</i>	<i>13</i>
2.1.3 <i>Determinação da Metodologia de Pesquisa</i>	<i>14</i>
2.1.4 <i>Execução da Pesquisa</i>	<i>17</i>
2.1.5 <i>Comunicação dos Resultados</i>	<i>17</i>
2.2 <i>CONSTRUÇÃO DO INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS</i>	<i>18</i>
<i>CAPÍTULO 3</i>	<i>22</i>
<i>O PLANEJAMENTO DA QUALIDADE ATRAVÉS DO QFD</i>	<i>22</i>
3.1 <i>O QFD - DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE</i>	<i>23</i>
3.2 <i>A PRIORIZAÇÃO DA QUALIDADE DEMANDADA</i>	<i>30</i>
3.3 <i>A PRIORIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE</i>	<i>36</i>
3.4 <i>AS ETAPAS DO QFD PROPOSTAS POR AKAO</i>	<i>37</i>
3.4.1 <i>Desdobramento da Qualidade Demandada</i>	<i>38</i>
3.4.2 <i>Desdobramento da Características de Qualidade</i>	<i>40</i>
3.4.3 <i>Desdobramento das Tecnologias e Estabelecimento da Qualidade do Produto</i>	<i>43</i>
3.4.4 <i>Desdobramento dos Subsistemas</i>	<i>44</i>
3.4.5 <i>Detalhamento do Produto e Desdobramento da Produção</i>	<i>47</i>
3.4.6 <i>Desdobramento dos Métodos de Manufatura</i>	<i>49</i>
3.4.7 <i>Desdobramento dos Processos</i>	<i>50</i>
3.4.8 <i>Desdobramento para o Fluxo de Controle do Processo</i>	<i>51</i>

CAPÍTULO 4	55
PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROCESSOS	55
4.1 ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE UM EXPERIMENTO	60
4.1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	60
4.1.2 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS RESPOSTA	61
4.1.3 ESCOLHA DOS FATORES CONTROLÁVEIS E DOS RESPECTIVOS NÍVEIS DE VARIAÇÃO	62
4.1.4 ESCOLHA DOS FATORES A SEREM MANTIDOS CONSTANTES	64
4.1.5 ESCOLHA DOS FATORES RUÍDO	64
4.1.6 DETERMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES EXPERIMENTAIS	65
4.1.7 ESCOLHA DO PROJETO EXPERIMENTAL	65
4.1.8 DEFINIÇÃO DA MATRIZ EXPERIMENTAL	71
4.2 EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO	72
4.2.1 VERIFICAÇÃO DO PLANEJAMENTO	72
4.2.2 ANÁLISE DOS DADOS	72
4.2.3 OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO	73
4.2.4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
4.3 OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PRODUTOS E PROCESSOS	73
4.3.1 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA	75
4.3.2 A FUNÇÃO PERDA QUADRÁTICA DE TAGUCHI	76
4.3.4 MÉTODOS PARA OTIMIZAR EXPERIMENTOS DE MÚLTIPLAS VARIÁVEIS RESPOSTA	78
 CAPÍTULO 5	 85
MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS CRÍTICOS E PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL	85
5.1 MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS CRÍTICOS ATRAVÉS DO USO DAS MATRIZES DO QFD	89
5.1.1 DESDOBRAMENTO DA QUALIDADE	89
5.1.2 DESDOBRAMENTO DOS PROCESSOS	93
5.1.3 DIRECIONAMENTO DAS AÇÕES DE MELHORIA	97
5.1.4 PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROCESSO ..	99
5.2 PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO ATRAVÉS DA MATRIZ DE PLANEJAMENTO	99
5.2.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL	103
 CAPÍTULO 6	 117
ESTUDOS DE CASO	117
6.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO AO SETOR CALÇADISTA: QUALIDADE DO COURO	118
6.1.1 DESDOBRAMENTO DA QUALIDADE	119
6.1.2 DESDOBRAMENTO DOS PROCESSOS	126
6.1.3 DIRECIONAMENTO DE AÇÕES	130
6.1.4 PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TOOGLING ..	133
6.1.5 CONCLUSÕES DO PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO DO PROCESSO DE TOOGLING	139
6.2 PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM PROCESSO DE EXPOSIÇÃO DE LENTES DE CONTATO AO ULTRAVIOLETA	140

6.2.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL.....	140
CAPÍTULO 7.....	152
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	152
7.1 CONCLUSÕES.....	152
7.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	155
ANEXO I.....	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Avaliação da satisfação do consumidor - O motorista prático</i>	21
<i>Figura 3.1 - Árvore lógica dos itens da qualidade demandada para a "porta de um automóvel"</i>	27
<i>Figura 3.2 - Identificação das características de qualidade</i>	27
<i>Figura 3.3 - Árvore lógica das características de qualidade</i>	28
<i>Figura 3.4 - Elementos da matriz da qualidade</i>	29
<i>Figura 3.5 - Exemplo de questão de questionário para avaliação de um item da qualidade demandada</i>	35
<i>Figura 3.6 - A matriz da qualidade e a análise de reclamações</i>	42
<i>Figura 3.7 - Desdobramento da qualidade demandada, identificação com as funções e com os componentes dos subsistemas</i>	45
<i>Figura 3.8 - Matriz do desdobramento das partes</i>	49
<i>Figura 4.1 - Projeto composto central para três fatores</i>	70
<i>Figura 4.2 - Superfície resposta de primeira ordem e caminho de máxima inclinação ascendente</i>	76
<i>Figura 5.1 - Método de identificação de processos críticos para a qualidade e planejamento da otimização experimental</i>	86
<i>Figura 5.2 - Etapas do método de identificação e análise dos processos críticos para a qualidade e planejamento de otimização experimental</i>	88
<i>Figura 5.3 - Desenho esquemático da matriz da qualidade</i>	92
<i>Figura 5.4 - Desenho esquemático da matriz dos processos</i>	95
<i>Figura 5.5 - Desenho esquemático da matriz de direcionamento das ações</i>	98
<i>Figura 5.6 - Plataforma de planejamento da otimização experimental de processos</i>	102
<i>Figura 6.1 - Pareto das características de qualidade do couro (parcial)</i>	124
<i>Figura 6.2 - Pareto contendo a priorização dos processos do curtume</i>	128
<i>Figura 6.3 - Identificação do estudo experimental para o processo de exposição ao ultravioleta</i>	142
<i>Figura 6.4 - Qualidade demandada de lentes de contato</i>	142
<i>Figura 6.5 - Identificação das variáveis resposta do processo de exposição ao ultravioleta</i>	143
<i>Figura 6.6 - Descrição dos parâmetros do processo de exposição ao ultravioleta</i>	144
<i>Figura 6.7 - Fatores ruído do processo de exposição ao ultravioleta</i>	145
<i>Figura 6.8 - Interações entre os parâmetros do processo</i>	146
<i>Figura 6.9 - Interações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta</i>	146
<i>Figura 6.10 - Relações entre os fatores ruído e as variáveis resposta</i>	147
<i>Figura 6.11 - Interações entre os parâmetros do processo e os fatores ruído</i>	147
<i>Figura 6.12- Priorização final dos parâmetros do processo de exposição ao ultravioleta</i> ...	148

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1 - A matriz de desdobramento da qualidade.</i>	41
<i>Tabela 3.2 - Desdobramento das funções para uma bomba de óleo.</i>	44
<i>Tabela 3.3 - Características das partes relacionadas com as características do produto final.</i>	48
<i>Tabela 5.1 - Escala de avaliação para os itens da qualidade demandada.</i>	90
<i>Tabela 5.2 - Escala atribuída aos controles atuais</i>	96
<i>Tabela 5.3 - Escala atribuída a frequência de falhas.</i>	97
<i>Tabela 5.4 - Escala atribuída ao direcionamento das ações de melhoria.</i>	99
<i>Tabela 5.5 - Descrição e caracterização das variáveis resposta</i>	103
<i>Tabela 5.6 - Descrição e caracterização dos parâmetros do processo</i>	105
<i>Tabela 5.7 - Descrição dos fatores ruído</i>	106
<i>Tabela 5.8 - Escala utilizada para avaliar a intensidade das relações e interações.</i>	107
<i>Tabela 5.9 - Fatores controláveis a serem incluídos no experimento</i>	114
<i>Tabela 5.10 - Fatores a serem mantidos constantes no experimento</i>	115
<i>Tabela 6.1 - Desdobramento da qualidade demandada para aspectos do calçado relacionados com o couro.</i>	121
<i>Tabela 6.2 - Priorização dos itens da qualidade demandada para aspectos do calçado relacionados com o couro</i>	122
<i>Tabela 6.3 - Desdobramento das características de qualidade referentes ao couro (parcial)</i>	123
<i>Tabela 6.4 - Matriz da qualidade Parcial (qualidade do couro)</i>	125
<i>Tabela 6.5 - Desdobramentos dos Processos do curtume</i>	127
<i>Tabela 6.6 - Matriz dos Processos do Curtume</i>	129
<i>Tabela 6.7 - Processos prioritários e possíveis ações de melhorias (parcial).</i>	132
<i>Tabela 6.8 - Variáveis resposta escolhidas para a otimização experimental</i>	134
<i>Tabela 6.9 - Descrição dos parâmetros do processo</i>	135
<i>Tabela 6.10 - Descrição dos fatores ruído</i>	135
<i>Tabela 6.11 - Fatores controláveis no experimento do toogling</i>	138
<i>Tabela 6.12 - Fatores mantidos constantes no experimento do processo de toggling</i>	138
<i>Tabela 6.13 - Matriz experimental do processo de toogling</i>	139
<i>Tabela 6.14 - Fatores controláveis no experimento de exposição ao ultravioleta</i>	149
<i>Tabela 6.15 - Matriz experimental para o experimento do processo de exposição ao ultravioleta</i>	151

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 5.1 - Submatriz das interações entre os parâmetros do processo.....</i>	<i>108</i>
<i>Quadro 5.2 - Submatriz das relações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta.....</i>	<i>109</i>
<i>Quadro 5.3 - Submatriz das relações entre os fatores ruído e as variáveis resposta.....</i>	<i>110</i>
<i>Quadro 5.4 - Submatriz das interações entre os fatores ruído e os parâmetros do processo.....</i>	<i>111</i>
<i>Quadro 5.5 - Priorização dos parâmetros do processo.</i>	<i>113</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

K	<i>coeficiente de custos, que converte a perda em unidades monetárias;</i>
K_{ij}	<i>coeficiente de perda associado às variáveis resposta i e j;</i>
$\hat{\sigma}_{ij}$	<i>covariância estimada entre Y_i e Y_j ;</i>
c_{qr}	<i>coeficiente de associação entre a variável resposta q e a variável resposta r;</i>
$\hat{\sigma}_i$	<i>desvio-padrão estimado da variável resposta Y_i ;</i>
$FA(x_j)$	<i>facilidade de ajuste do parâmetro do processo j;</i>
I_{ij}	<i>grau de interação entre os parâmetros do processo i e j;</i>
IE_i	<i>grau de importância relativa para a variável resposta i;</i>
G_n	<i>grau atribuído pela equipe a qualidade demandada do nível secundário n;</i>
Q_{mn}	<i>importância da qualidade demandada do nível primário m secundário n;</i>
Q_m	<i>importância da qualidade demandada do nível primário m;</i>
Q_i	<i>importância da qualidade demandada do nível terciário i;</i>
C_j	<i>importância da característica de qualidade j;</i>
P_i	<i>importância da etapa de processo i;</i>
P_i^*	<i>importância corrigida da etapa de processo i;</i>
R_{ij}	<i>intensidade do relacionamento entre a qualidade demandada i e a característica de qualidade j;</i>
PR_{ij}	<i>intensidade do relacionamento entre a etapa de processo i e a característica de qualidade j;</i>
A_i	<i>intensidade dos controles atuais existentes nas etapas do processo i;</i>
F_i	<i>intensidade da frequência de ocorrência de falhas nas etapas do processo i;</i>
$K1(x_j)$	<i>índice que avalia o grau de interação do parâmetro do processo j com os demais;</i>
$K2(x_j)$	<i>índice que avalia o efeito do parâmetro j sobre as variáveis resposta;</i>
$K3(x_j)$	<i>índice que avalia o efeito do parâmetro do processo j sobre os fatores ruído;</i>

IE_i	<i>índice de importância para a variável resposta i;</i>
II_{ij}	<i>índice de interação entre o fator ruído i e o parâmetro do processo j;</i>
IR_i	<i>índice de importância para o fator ruído i;</i>
$PR(x_j)$	<i>índice de priorização do parâmetro do processo j;</i>
\bar{Y}	<i>média estimada da variável resposta Y;</i>
C	<i>número de características de qualidade;</i>
P	<i>número de parâmetros do processo;</i>
Q	<i>número de variáveis resposta;</i>
R	<i>número de fatores ruído;</i>
w_q	<i>peso atribuído a variável resposta q;</i>
w_r	<i>peso atribuído a variável resposta r;</i>
w_j	<i>peso atribuído à variável resposta j;</i>
$L(y)$	<i>perda associada a uma medida y da variável resposta Y (perda para uma unidade produzida);</i>
VR_{ij}	<i>relação entre a variável resposta i e o parâmetro do processo j;</i>
RR_{ij}	<i>relação entre a variável resposta i e o fator de ruído j;</i>
$E(L)$	<i>valor esperado, isto é, a perda média para muitas unidades;</i>
$\hat{\sigma}^2$	<i>variância estimada da variável resposta Y;</i>
y_i	<i>valor específico associado à variável resposta Y_i;</i>
T_i	<i>valor alvo associado à variável resposta i;</i>
$Z(i)$	<i>valor da função objetivo a ser minimizada i refere-se a um certo tratamento;</i>
\hat{y}_j	<i>valores estimados para a média da variável resposta j do tratamento i;</i>
$\hat{\sigma}_{yj}^2$	<i>variância estimada atribuída ao efeito dos fatores não controláveis da variável resposta j no tratamento i;</i>
$\hat{\sigma}_k^2$	<i>variância estimada do fator controlável k, durante a manufatura;</i>

RESUMO

Esta dissertação apresenta uma plataforma para a otimização de processos críticos para a qualidade. A plataforma consiste de uma seqüência de etapas, onde a principal delas é o preenchimento da matriz de planejamento da otimização de processos. Essa matriz tem por objetivo documentar e organizar as informações provenientes da equipe técnica responsável pelo programa de otimização experimental.

A plataforma pode ser utilizada quando a equipe tem conhecimento dos processos críticos que necessitem de otimização experimental. Ou ainda, quando isso não ocorre, pode utilizar o método de identificação de processos críticos também apresentado nesta dissertação.

Esse método parte do conhecimento do corpo técnico e utiliza matrizes para identificar as principais características de qualidade e os processos onde essas características são construídas, os quais devem ser controlados ou otimizados.

A aplicação da plataforma de otimização de processos e do método de identificação de processos críticos é ilustrada através de dois estudos de caso.

ABSTRACT

This master's thesis presents a framework for the optimization of processes that are critical for quality. The framework consists of a series of steps where the main one is the development of a matrix for process optimization planning. The objective of this matrix is to document and organize all the technical information that comes from the team responsible for the experimental optimization program.

The suggested framework may be used when the technical team knows the critical processes to be optimized. Or, when this is not the case, a method for the identification of critical processes, also presented in this thesis, may be employed.

This method starts from the knowledge of the technical team and utilizes matrices to identify the critical quality characteristics and the corresponding processes where they are built. These are the processes to be controlled or optimized.

The application of the framework for process optimization, as well as the application of the method for the identification of critical processes, are illustrated through a couple of case studies.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

A evolução social e tecnológica pela qual a sociedade está passando faz com que haja necessidade de constantes mudanças. As empresas necessitam ser dinâmicas a fim de tornarem-se competitivas e garantirem sua sobrevivência. Uma das bases para a sobrevivência é a qualidade, a qual é um fator indispensável para garantir e manter vantagens competitivas.

Qualidade pode ter significados diferentes. Muitas linhas de pensamento se desenvolveram nos últimos anos. Os principais escritores, como Juran, Deming, Ishikawa, Feigenbaum e Crosby, entre outros, definem qualidade a partir de diferentes enfoques.

A partir da década de 30, qualidade passou a ser vista como produzir algo “sem defeitos”. Com o desenvolvimento do controle de qualidade, um produto era considerado de boa qualidade se as características que determinavam seu desempenho estavam sendo produzidas dentro das especificações.

Phadke (1989) relatou que no Japão, após a segunda guerra mundial, a qualidade era resultante de uma boa matéria-prima, da qualidade dos equipamentos e da habilidade dos engenheiros.

Atualmente, está surgindo a qualidade voltada ao consumidor e à sociedade como um todo. Para Hohn (apud Foo e Hosseini, 1995, p. 705) “Nos anos 90, o diferenciador chave entre as companhias de sucesso e os seus competidores será a qualidade, não o preço”. Segundo Foo e Hosseini (1995), embora um produto seja projetado e produzido pela empresa, são os consumidores que ultimamente determinam o sucesso ou fracasso de um produto.

Neste contexto, Mizuno e Akao (1994) introduziram o termo "A nova era da qualidade". Na nova era há uma mudança do foco no consumidor para o foco na sociedade. Isto é, a preocupação em manufaturar produtos que não prejudiquem terceiros ou esgotem fontes de recursos naturais. Se ocorrem danos ao meio-ambiente, a responsabilidade estende-se à sociedade. Na nova era da qualidade há também a preocupação com a globalização da qualidade, no sentido de atender um mercado estrangeiro diversificado e complexo e a mudanças radicais na qualidade demandada pelo cliente.

Mizuno e Akao (1994) diz que o alto nível de qualidade dos produtos japoneses é resultado dos esforços de cada companhia. Contudo, na nova era da qualidade, as atividades de controle de qualidade convencionais podem ser inadequadas. Verificar se os produtos estão sendo feitos conforme padrões é importante, mas mais importante é saber que tipo de produto deverá ser feito.

Para Mizuno e Akao (1994), tornam-se importante as atividades relacionadas com a *garantia da qualidade*. Estas atividades são mais do que a detecção de defeitos, elas devem estar voltadas para a prevenção da ocorrência de defeitos. Isto é, o planejamento da qualidade é uma fase crítica anterior à manufatura. Além disso, as atividades de *garantia da qualidade* envolvem as questões de confiabilidade do produto. Com isso, a *garantia da qualidade* é o meio de reunir as exigências da nova era da qualidade, pois é capaz de resolver problemas para o qual o controle de qualidade convencional não é adequado.

A mudança de visão do controle de qualidade convencional para o controle de qualidade total fez com que as companhias necessitassem tomar suas decisões baseadas nos desejos e opiniões dos consumidores e na sociedade como um todo. Muitos programas de qualidade foram implantados como um meio de estabelecer a ligação entre o cliente e a empresa. Contudo, muitas empresas não obtiveram sucesso.

Para Foo e Hosseini (1995), existem razões que explicam o fracasso da relação empresa - cliente:

1. A falta de uma estrutura focada no consumidor para auxiliar na identificação de critérios de qualidade essenciais para o sucesso da companhia.
2. A incapacidade de manter uma comunicação entre o consumidor e as áreas funcionais dentro da companhia. E ainda, a dificuldade de atribuir responsabilidades para determinadas áreas e assegurar a implementação dos programas com sucesso.

Segundo Gopalakrishnan, McIntyre e Sprague (1992) implementar programas de melhoria de qualidade voltados para os consumidores geram problemas para muitas organizações. É freqüentemente difícil determinar onde começar e o que é necessário para obter essas melhorias. Quem é o consumidor e qual é o produto? Poucas são as publicações e procedimentos genéricos para iniciantes. Muitos problemas podem surgir entre a ligação fornecedor - consumidor. Por exemplo: como obter uma medida de desempenho para as operações atuais? Qual a situação atual da empresa? Como determinar procedimentos de medida e controle do processo? O que e como medir?

Foo e Hosseini (1995) propõem um procedimento para a análise do afastamento cliente-empresa através de um "Modelo de Percentual da Lacuna". Estas lacunas referem-se às diferenças de percepção entre o consumidor e o marketing e podem impedir que os consumidores percebam a qualidade oferecida e ainda o fabricante pode não saber o que o cliente realmente quer. Por isso, a necessidade de ouvir a voz do consumidor e traduzi-la adequadamente por todo o ciclo de desenvolvimento do produto.

Para Kasper e Lemmink (1989), é essencial para a empresa saber como o consumidor percebe a qualidade oferecida e, ainda, saber se estas percepções vão ao encontro da visão que a companhia tem da percepção do consumidor. Se as duas percepções coincidem, a companhia tem completamente traduzidas as necessidades do consumidor nos produtos oferecidos.

Os japoneses desenvolveram, então, métodos eficientes para diminuir o tempo de planejamento de produtos e traçar um caminho entre os desejos do consumidor e o produto final, entre os quais cita-se o QFD (*Quality Function Deployment* ou Desdobramento da Função de Qualidade). Para Fortuna (1988), o QFD é um meio sistemático de assegurar que aquilo que o consumidor ou o mercado exige será trasladado em exigências técnicas e em ações importantes em cada estágio de desenvolvimento do produto.

Desta forma, o desenvolvimento de um produto ou processo é feito de tal forma a aperfeiçoar as características de desempenho do produto de acordo com as necessidades e expectativas do consumidor.

Assim, um aspecto chave para a qualidade é produzir produtos com características de qualidade tão próximas quanto possível de seus valores alvos, ou seja, dos valores que os clientes demandam.

Esta visão de qualidade foi difundida por Genichi Taguchi, um engenheiro japonês que tem atuado em melhorias de qualidade e produtividade dos produtos e

processos japoneses. Para Taguchi (Byrne e Taguchi, 1987, p. 19): “A qualidade de um produto é a mínima perda imposta à sociedade, desde o momento em que o produto é entregue ao mercado”.

A partir deste conceito, desenvolver produtos com características de desempenho próximas de um valor alvo exige que os engenheiros pesquisem e busquem um maior conhecimento do processo. Um meio de obter este conhecimento está no emprego de técnicas estatísticas.

Mais especificamente, melhorias no processo poderão ser obtidas pela experimentação e otimização do processo. A experimentação conduz a um melhor conhecimento dos efeitos dos parâmetros do processo sobre as características de qualidade. O próximo passo é a otimização, que é definir o ajuste dos parâmetros do processo que proporcionariam o melhor desempenho das múltiplas características de interesse do consumidor e do engenheiro.

Experimentação e otimização são tópicos fundamentais à Engenharia de Qualidade, pois permitem a realização de experimentos com o objetivo de alcançar ou se aproximar dos valores desejados das diversas características de desempenho consideradas importantes. Isso garantirá uma qualidade final que atenda melhor às exigências do consumidor, incluindo avaliações associadas à redução de custo.

1.2 TEMA

Melhorias no processo podem ser obtidas pela experimentação e otimização do processo. Porém, a grande dificuldade está em planejar eficientemente um experimento. Isto exige conhecimento mercadológico, conhecimento estatístico e conhecimento técnico sobre o que será estudado. Resgatar e verbalizar o conhecimento técnico junto à equipe fará com que se chegue a um projeto mais eficiente do ponto de vista teórico e prático.

A literatura discute o emprego de técnicas estatísticas na experimentação. Programas computacionais foram desenvolvidos a fim de auxiliarem na execução de cálculos estatísticos, porém a fase de planejamento da otimização é uma habilidade pouco

difundida. É dada ênfase à sua importância, contudo raros autores discutem *como* executar o planejamento da otimização.

Tendo em vista o exposto acima, o tema desta dissertação é o planejamento da otimização de um produto ou processo, visto tratar-se de um passo fundamental para o sucesso das atividades de melhoria.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o foco da qualidade centrado nas expectativas do consumidor, há uma preocupação por parte das indústrias por melhorias contínuas que atendam a estas exigências. Essas melhorias podem ser obtidas com o estudo de características consideradas importantes do ponto de vista do consumidor.

Estudos de otimização experimental baseados em técnicas estatísticas podem ser usados na melhoria de qualidade e produtividade. As técnicas estatísticas permitem estudar os efeitos de muitos fatores que interferem num determinado processo. O uso de projeto de experimentos é particularmente recomendado no estudo de problemas complexos que envolvem processos industriais com numerosos fatores controláveis.

Freqüentemente, em problemas que envolvem um grande número de variáveis inter-relacionadas há uma dificuldade por parte da equipe em definir as características de qualidade e, após, as variáveis resposta e os parâmetros do processo a serem incluídos em um experimento de otimização. A escolha correta das variáveis resposta e fatores controláveis é fundamental para o sucesso do esforço de otimização.

Para Hahn (1977) a escolha de um projeto experimental apropriado é mais importante que uma análise estatística sofisticada. Resultados de experimentos bem planejados são freqüentemente evidentes numa simples análise gráfica. No entanto, a melhor análise estatística não pode salvar um programa experimental mal planejado.

Hahn (1984) complementa que o melhor modo de comunicação entre o experimentador e o estatístico deve ser uma discussão face-a-face. Contudo, o experimentador deve também ser encorajado a documentar toda a informação que é possível obter antecipadamente.

A documentação levará o experimentador a questionar sobre os aspectos fundamentais do experimento, antes de sua execução. Estes aspectos ajudarão a estruturar o problema, identificando pontos importantes, restrições práticas e suposições estatísticas para estruturar e validar a coleta de dados. Mesmo uma equipe composta por - engenheiros, estatísticos, pesquisadores - pode encontrar dificuldade para estabelecer esses pontos básicos, havendo, portanto, necessidade de um procedimento estruturado para organizar e mapear as informações relevantes para o delineamento experimental, como a definição das características de qualidade, das variáveis resposta, dos parâmetros do processo e das suas possíveis interações.

Dada a dificuldade para planejar a otimização de processos e a pouca discussão do assunto na literatura atual, justifica-se o estudo deste tema.

1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Considerando a importância de planejar um experimento e conduzir eficientemente a otimização de um processo, esta dissertação tem como objetivo principal apresentar uma plataforma para o planejamento da otimização de produtos ou processos.

Esta plataforma de planejamento constitui-se de uma seqüência de procedimentos propostos pela presente dissertação, cuja principal contribuição é a proposta de uma matriz de planejamento da otimização de processo. Essa matriz auxiliará o estudo de problemas complexos que envolvam muitas variáveis, no sentido de trazer à tona o conhecimento disperso dos engenheiros, utilizando este conhecimento para melhor planejar a otimização do processo.

Como objetivo secundário descreve-se um método de identificação de processos críticos para a qualidade que segue a estrutura do QFD (Desdobramento da Função Qualidade). Esse método aponta os processos onde a melhoria de qualidade pode ser obtida pela otimização do processo.

1.5 METODOLOGIA

Após uma discussão do problema e a definição do escopo da pesquisa, foram estabelecidas algumas etapas para atingir os objetivos propostos.

Inicialmente, discutiram-se as linhas gerais de um método de identificação de processos críticos que levasse em conta problemas práticos de otimização de processo em indústrias. Procurou-se estabelecer um caminho que guiasse o levantamento das informações mercadológicas e técnicas essenciais para o planejamento da otimização do processo. Baseado neste esboço, estabeleceram-se algumas etapas para atingir os objetivos propostos.

Considerando as linhas gerais do método proposto, realizou-se uma revisão bibliográfica que enfoca três assuntos principais: (i) Pesquisa de mercado; (ii) QFD - Desdobramento da função qualidade e (iii) Planejamento de experimentos com objetivo de otimizar um processo.

Na discussão dos assuntos citados acima, a leitura bibliográfica foi direcionada aos aspectos considerados chaves para o método proposto.

A partir do embasamento teórico, propôs-se, inicialmente, uma seqüência de procedimentos que pretende guiar o planejamento da otimização de um processo. A esta seqüência de procedimentos deu-se o nome de “Plataforma de planejamento da otimização experimental”.

Com base em estudos de caso práticos, realizaram-se as modificações necessárias para adaptar os procedimentos de forma a abranger uma gama variada de problemas que necessitem do estudo de otimização experimental.

Após a observação das dificuldades e necessidades encontradas por diferentes empresas quanto ao planejamento da otimização experimental, foi elaborada uma versão final do método de identificação de processos críticos e planejamento da otimização. Este método sinaliza o caminho a ser percorrido para melhoria de qualidade e produtividade através da otimização de processos.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está subdividida em sete capítulos, discriminados a seguir:

O *capítulo 1* apresenta os comentários iniciais, o tema, a justificativa, os objetivos, a metodologia, a estrutura da pesquisa, bem como suas limitações.

O *capítulo 2* constitui-se de uma revisão bibliográfica de Pesquisa de Mercado, onde são discutidos alguns aspectos gerais da Pesquisa de Mercado, com ênfase no planejamento de uma pesquisa para obtenção e avaliação de dados provenientes do consumidor.

O *capítulo 3* refere-se ao QFD - Desdobramento da Função Qualidade. É apresentada uma discussão das fases iniciais de obtenção e priorização de informações do cliente. Neste capítulo são apresentados as etapas de desdobramento da função qualidade propostas por Mizuno e Akao (1994). Além disso, dentro das etapas propostas por Mizuno e Akao localiza-se onde seria pertinente o uso da matriz de planejamento da otimização de processo.

O *capítulo 4* traz uma revisão bibliográfica a respeito de Projeto de Experimentos, com ênfase nas fases de planejamento. Neste capítulo são apresentadas etapas de planejamento da otimização, conforme propostas de diferentes autores.

O *capítulo 5* descreve o método de identificação de processos críticos e planejamento da otimização experimental proposto nesta dissertação. O cerne deste método é a matriz de planejamento da otimização de processos.

O *capítulo 6* relata a aplicação do método de identificação de processos críticos e planejamento da otimização experimental a dois estudos de caso com a discussão e a aplicação das etapas descritas no capítulo 5. Um dos estudos de caso é ilustrado por um programa computacional desenvolvido para facilitar a construção da matriz de planejamento e a realização dos cálculos necessários.

O *capítulo 7* apresenta as considerações finais e sugestões para futuras pesquisas.

1.7 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A partir da definição dos objetivos, estabeleceu-se as limitações da pesquisa, não sendo do escopo dessa dissertação os pontos relacionados abaixo:

- O presente trabalho sugere um método de identificação de processos críticos e planejamento da otimização experimental mais abrangente possível. No entanto, este método não pretende ser rígido. Para casos mais específicos, por exemplo, otimização de misturas ou experimentos seqüenciais, outras técnicas podem ser utilizadas e novas etapas poderão ser necessárias.

- A identificação dos processos críticos e das características de qualidade a serem estudados pode ser realizada por várias maneiras. Nesta dissertação, sugere-se que as mesmas sejam determinadas por uma seqüência estruturada baseada nas matrizes do QFD. Novamente, há outras técnicas que podem ser utilizadas.

- Nas etapas do QFD, o foco é dado para a etapa inicial, de obtenção de dados do cliente e de atribuição de prioridades, e nas etapas que necessitem de otimização experimental. As demais etapas são somente apresentadas. Além disso, boa parte da apresentação está restrita à proposta de Mizuno e Akao (1994).

- É dada ênfase à fase de planejamento de um experimento. As fases posteriores de análise e otimização serão apresentadas na revisão bibliográfica através da aplicação de métodos multivariados, não incluindo uma discussão detalhada de tais métodos.

CAPÍTULO 2

PESQUISA DE MERCADO

A era da produção em massa exigia que se produzisse um só tipo de produto e que se tentasse ajustá-lo aos desejos de todos consumidores, independente da variedade dos segmentos de mercado. Nesta fase, o foco era o de mudar as atitudes em relação aos produtos fabricados e não o de criar, antes de mais nada, produtos desejados.

Nas últimas décadas, a ênfase do marketing está orientada para o consumidor. Assim, as pesquisas de mercado vêm sendo utilizadas com o objetivo de encontrar e explorar novos mercados, testando meios de estimular os desejos dos clientes.

Para Kotler (1981) o conceito de marketing começa com as necessidades dos clientes atuais e potenciais da empresa. É a orientação para o cliente, isto é, o cliente como chave das metas organizacionais.

Um produto que não vise atender às necessidades dos consumidores pode ter sido resultado de um bom projeto e um bom processo, porém, quando lançado no mercado, poderá não ser comprado. Segundo Campos (1992), baixos índices de defeitos e especificações obedecidas integralmente não garantem, por si só, qualidade. Pois, pode-se ter um processo perfeito, fazendo um produto sem defeitos com especificações que não atendam às necessidades dos clientes. Um produto ou serviço precisa satisfazer às expectativas do consumidor.

Enquanto que estratégias mudam de companhia para companhia, no desenvolvimento de novos produtos é comum estabelecer prioridades. Um novo produto deve reunir qualidade e exigências de custo do mercado. Daí a importância do levantamento das características de qualidade relevantes para os consumidores atuais, consumidores em potencial e o mercado-alvo para decidir o quê e como será feito.

A pesquisa de mercado tem um papel importante na identificação de atributos de qualidade desejados pelo consumidor. Essa fase de identificação é considerada crítica, pois os dados coletados servirão de ponto de partida para o desdobramento da qualidade e identificação dos processos críticos de manufatura e, conseqüentemente, contribuirão para a qualidade do produto final.

O objetivo é saber quem são os compradores potenciais, os fatores que influenciam na escolha de diferentes produtores, suas preferências e assim por diante.

Método científico e o processo de pesquisa

Para que um conhecimento seja científico, é preciso identificar as operações mentais e as técnicas que possibilitam a sua verificação, ou seja, determinar o método que possibilitou chegar a esse conhecimento. Para Gil (1989, p. 27): “Pode-se definir o método científico como o conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento”.

Para Boyd e Westafall (1973), o método científico compreende:

- (i) *A objetividade do investigador*: O cientista precisa basear seus julgamentos em fatos, não em noções preconcebidas, afirmações autoritárias ou intuitivas;
- (ii) *Precisão de Medida*: O método científico busca a medida mais precisa possível; e
- (iii) *Natureza de contínua e exaustiva investigação*: O método científico não despreza dados em conflito ou a busca de uma prova adicional que pode servir de alicerce ou confundir a informação existente.

Porém, em pesquisa mercadológica, há uma dificuldade em adaptar o método científico, uma vez que se trata com a complexidade dos seres humanos que agem de acordo com a sua própria vontade.

Como atitudes das pessoas mudam freqüentemente, torna-se difícil realizar uma previsão mercadológica. E ainda há uma dificuldade em se obter medidas precisas, pois a maioria das informações obtidas são por entrevistas, que é um processo subjetivo.

Assim sendo, para conduzir uma pesquisa de mercado deve-se estar atento aos possíveis erros durante todo o processo de obtenção da informação: da coleta à análise

de dados. Por esta razão, algumas etapas foram propostas para guiar o andamento de uma pesquisa. Essas etapas estão descritas sucintamente no item a seguir.

2.1 ETAPAS DA PESQUISA DE MERCADO

Pesquisa de marketing é uma análise sistemática, objetiva e aprofundada de um assunto ou problema, destinada a resultar em uma descoberta de informações ou princípios. Para Mattar (1993a) pesquisa de marketing e pesquisa de mercado têm conotações diferentes. Segundo o autor a primeira é mais abrangente e se destina a qualquer tipo de pesquisa que diz respeito à atividade de marketing na empresa, enquanto que a segunda restringe o seu foco ao mercado da empresa. Nesta dissertação as etapas propostas por Mattar são direcionadas à Pesquisa de mercado. Este autor estabelece o seguinte:

Etapa 1: Reconhecimento e formulação de um problema de pesquisa;

Etapa 2: Planejamento da pesquisa;

Etapa 3: Coleta de dados;

Etapa 4: Processamento, análise e interpretação.

Etapa 5: Comunicação dos resultados.

2.1.1 Reconhecimento e Formulação do Problema

O problema deve ser amplamente discutido pela equipe responsável pela pesquisa. A formulação do problema envolve:

- conversa com especialistas;
- consulta de livros;
- reuniões com grupos de consumidores;
- registros (livros, revistas, jornais, artigos científicos, etc.)

2.1.2 Planejamento da Pesquisa

(a) Definição dos objetivos da pesquisa:

Com a definição clara dos problemas de pesquisa, os objetivos devem ser estabelecidos a fim de que os resultados da pesquisa contribuam para solução do problema. Conforme Mattar (1993, v.1, p. 63): “A definição do objetivo da pesquisa deve estar perfeitamente amarrada à solução do problema de pesquisa”. Além disso, devem ser levados em consideração no seu estabelecimento: o tempo disponível, os recursos disponíveis (físicos, humanos, financeiros, tecnológicos), acessibilidade aos detentores dos dados, disponibilidade de meios de captação de dados, entre outros.

A pesquisa poderá ter objetivos principais que dizem respeito aos objetivos relacionados ao problema de pesquisa e objetivos secundários que se pode obter aproveitando os recursos da pesquisa, mesmo que não sejam a preocupação principal do estudo.

Inicialmente, é fornecido à equipe um resumo que se refere a informações fornecidas pelo patrocinador, do qual o pesquisador deve ter conhecimento para definição do problema de pesquisa. O resumo inclui, por exemplo: descrição do produto ou serviço, descrição do problema de marketing, descrição do público-alvo e dos concorrentes, descrição das áreas geográficas de mercado atingidas pelo produto; regiões conhecidas para compra do produto ou serviço e ainda resultados de pesquisas anteriores realizadas sobre o mesmo tema.

Ao iniciar o processo de pesquisa, deve-se ter um bom planejamento, isto é, deve estar claro onde se quer chegar com a pesquisa.

(b) Estabelecimento das questões de pesquisa:

Questões de pesquisa são indagações amplas que, para serem respondidas, necessitam de um conjunto de perguntas específicas no questionário. Por exemplo:

1. Quem são os consumidores do meu produto?

Perguntas específicas sobre sexo, idade, escolaridade, classe social, estilo de vida, local de moradia, etc.

2. Quais são os hábitos de compra dos consumidores?

O que compram? Quando compram? Onde compram? Frequência com que compram? Quantidade que compram? Como pagam?

(c) Determinação das fontes de dados:

Numa classificação geral existem dois tipos de fontes de busca de informação:

- **Fontes primárias:** São dados brutos que nunca foram coletados, como: consumidores, telespectadores, intermediários, leitores, entre outros.
- **Fontes Secundárias:** Com a definição dos dados que precisam ser coletados, primeiramente busca-se a informação disponível para consulta com dados que já foram coletados. Estas fontes podem ser banco de dados da empresa, catálogos, registros em órgãos governamentais, entre outros.

2.1.3 Determinação da Metodologia de Pesquisa

(a) Determinação do tipo de pesquisa

Segundo Mattar (1993a), existem três tipos de pesquisa: pesquisa exploratória, pesquisa descritiva e pesquisa causal.

Antes de começar qualquer estudo, o pesquisador deve ter uma idéia sobre o problema. O estudo exploratório facilita a compreensão do problema, o planejamento da coleta de dados, a escolha da amostra e a definição da população. A pesquisa exploratória

inclui a busca de informações secundárias, a interrogação de especialistas e a análise de situações análogas.

Os estudos descritivos descrevem características de um determinado mercado em potencial para caracterizar uma população (por exemplo, perfil do consumidor) e, finalmente, a pesquisa causal refere-se ao estudo da natureza das relações existentes entre causas e efeitos previstos.

(b) Determinação do método e da técnica de coleta de dados

O método e a técnica utilizados podem ser um ou uma combinação dentre os seguintes:

- levantamentos bibliográficos;
- levantamentos documentais;
- estatísticas publicadas;
- entrevistas com especialistas;
- entrevistas focalizadas de grupo (pesquisa de motivação);
- observação;
- entrevistas pessoais, entrevistas por telefone, questionário pelo correio;
- questionários distribuídos pessoalmente;
- estudos em laboratório, estudo de casos.

A construção de um questionário como meio de coleta de dados será discutida no item 2.2.

(c) Determinação da população da pesquisa, do tamanho de amostra e do processo de amostragem

O tamanho da amostra depende de características básicas da população, do tipo de informação exigida na pesquisa e do custo envolvido.

Chisnall (1973) diz que o sucesso de uma pesquisa de mercado depende da qualidade da amostragem. Segundo o autor, a exata definição da população é o primeiro passo a ser estabelecido. Características gerais como área geográfica e área técnica de interesse fazem parte da definição da população. Com a delimitação da população, os segmentos do mercado serão identificados e a amostra deverá cobrir estes segmentos.

O próximo passo é a estratificação da população. A estratificação ou divisão da população pesquisada em grupos é feita pela identificação de características relevantes para uma determinada pesquisa. Trabalhando com grupos menores (estratos), forma-se uma subpopulação homogênea onde a amostra é construída gradualmente. As características significativas de uma população deveriam ser representadas em vários estratos que forneceriam uma amostra grande o suficiente para permitir a validação na interpretação dos resultados. No entanto, calcular o tamanho da amostra é um processo complexo. A adequação da amostra depende muito mais da própria característica da pesquisa do que de qualquer relação direta com o tamanho da população pesquisada. Cada pesquisa tem exigências individuais que devem ser cuidadosamente avaliadas e discutidas. Quando há informações numéricas referentes à variabilidade, é possível calcular matematicamente o tamanho da amostra correspondente a um determinado grau de precisão.

(d) Planejamento da coleta de dados:

O planejamento da coleta de dados dependerá do instrumento a ser utilizado na fase de coleta. Contudo, qualquer que seja o método empregado, o planejamento constitui-se de quatro aspectos importantes: cronograma de atividades, orçamento de despesas, recursos humanos e controle da coleta (ver Mattar, 1993b).

(e) Previsão do processamento e análise dos dados

A análise deve ser previamente discutida, para que a forma de coleta de dados traga resposta aos problemas de pesquisa.

Dois tipos básicos de análises poderão ser realizadas: descrição de dados e inferências a partir dos dados. A escolha de um método descritivo ou inferencial depende dos objetivos e da forma de coleta dos dados.

(f) Planejamento da organização, cronograma e orçamento da pesquisa

A equipe de pesquisa deve atribuir responsabilidades, definindo coordenação, cargos e funções. Um cronograma deve ser elaborado com as etapas, fases e passos da pesquisa. Cada etapa deve ter o início e o término. Baseado nestas definições será estabelecido o orçamento com custos, técnicas, materiais, processamento, etc.

O processo de pesquisa não é linear. Isto significa que as etapas anteriores ao planejamento podem sofrer alterações, dependendo das dificuldades encontradas nas etapas posteriores.

2.1.4 Execução da Pesquisa

A execução da pesquisa pode ser subdividida em duas atividades: a coleta de dados e a fase de processamento, análise e interpretação. A coleta de dados é uma etapa crítica, pois está sujeita a erros de condução do instrumento de coleta de dados e atrasos no cronograma de pesquisa. Por esta razão, esta atividade exige supervisão e controle rígidos sobre os aspectos discutidos na fase de planejamento da pesquisa.

Por sua vez, a fase de processamento, análise e interpretação exige a transformação dos dados em informações úteis a respeito do problema levantado. Tal análise deverá ter como suporte técnicas estatísticas.

2.1.5 Comunicação dos Resultados

Conforme Mattar (1993b), esta fase compreende a apresentação escrita e verbal dos resultados da pesquisa. Os resultados deverão ser documentados de forma a servirem de subsídio para a tomada de decisão.

A comunicação dos resultados compreende também as sugestões e recomendações de ações pertinentes para a solução do problema que surgiram em função dos resultados encontrados.

2.2 CONSTRUÇÃO DO INSTRUMENTO DE COLETA DE DADOS

Glushkovsky et alii (1995) dizem que questionários são comumente usados para coletar dados por diferentes razões, tais como: conhecer a opinião das pessoas, determinar a necessidade dos consumidores ou identificar as necessidades dos empregados.

Segundo os autores, tipicamente, três campos de conhecimento são necessários quando se planeja um questionário: o conhecimento científico, a ciência estatística e o assunto a ser investigado. Para garantir a qualidade dos resultados, a implementação e o processo de análise devem ser considerados durante o projeto.

Conforme Mattar (1993b), o questionário é formado por cinco partes: (1) dados de identificação; (2) solicitação para cooperação; (3) instruções para sua utilização; (4) perguntas, questões e forma de registrar as respostas; (5) dados para classificar sócio-economicamente o respondente.

Na construção de um instrumento de dados são de grande valor a sensibilidade e a experiência. Além disso, é necessário sujeitar o questionário à avaliação e sugestão de outros indivíduos até que não haja problemas de estrutura e interpretação.

O projeto de construção de um instrumento de coleta de dados deve estar relacionado aos objetivos de pesquisa. Deve-se observar como as questões estão formuladas, evitando-se o uso de linguagem técnica, gíria ou termos ambíguos que possam confundir a compreensão dos pesquisados.

A seqüência de questões deve ser elaborada de forma lógica e estruturada a fim de não confundir e também não influenciar o pesquisado.

Para realização de um questionário torna-se útil uma pesquisa exploratória com o levantamento das características consideradas relevantes. Este levantamento poderá ser realizado junto a um grupo focalizado de principais clientes, fornecedores ou clientes em potencial. Ou, ainda, poderá ser realizado um levantamento com questões amplas a serem respondidas por uma amostra de tamanho arbitrário.

Os resultados da pesquisa exploratória contribuirão para elaboração do questionário, bem como das possíveis alternativas para as perguntas fechadas.

O questionário não deve ser extenso, as perguntas devem ser objetivas e neutras. Após ter construído a primeira versão, procede-se a revisão junto à equipe de pesquisa. Em seguida, é realizado o pré-teste do instrumento. O pré-teste verifica a compreensão dos respondentes, a seqüência de perguntas, se as alternativas de respostas das perguntas estão completas.

Glushkovsky et alii (1995) desenvolveram um estudo de elaboração do questionário para a Indústria de telecomunicação e Eletrônica Telrad em Lod, Israel. Segundo os autores, muitos questionários fracassavam pois não atendiam aos seus objetivos de pesquisa. Havia uma incompatibilidade entre as necessidades da equipe de engenharia e a capacidade dos consumidores em usar termos técnicos nas respostas. Por esta razão foi desenvolvida uma metodologia composta por três etapas: (1) planejamento; (2) teste-piloto e (3) implementação.

A fase de *planejamento* inicia com a definição e análise do problema. O problema deve ser previamente definido e explicitado para que os dados possam ser coletados e analisados posteriormente. A proposta desta etapa é dividir o problema em fatores importantes, que são os objetivos do questionário.

Os objetivos são elementos do problema para o qual o questionário pretende encontrar respostas. Para relacionar as questões aos objetivos de engenharia, os autores utilizaram matrizes que relacionavam estes dois itens. Essas matrizes seguem a estrutura do QFD - Desdobramento da Função Qualidade (ver capítulo 3 desta dissertação).

Também são discutidos diferentes aspectos dos questionários, como clareza das questões e escolha da escala utilizada para responder as questões.

A fase 2, *teste piloto* ou “pré-teste” é realizada para verificar as questões e, se necessário, ajustes são feitos.

A fase 3 é a *implementação*, onde a análise estatística e a metodologia do QFD foram utilizados para checar a qualidade e validar os resultados. Para dados qualitativos, é realizada uma análise do texto.

Havener (1993) desenvolveu uma pesquisa sobre a qualidade demandada de consumidores de automóveis que será descrita a seguir, pois é um exemplo das complexidades comuns ao problema da pesquisa de mercado. Inicialmente, uma pesquisa exploratória foi realizada, uma equipe composta de 10 elementos entrevistou uma dezena de pessoas, perguntando a eles o que é mais importante a respeito do carro que eles

dirigem. Cada entrevistado identificou 10 atributos desejados. Então, os atributos foram combinados, pela ordem de importância dada a cada item e pela frequência da resposta, produzindo uma lista de prioridades do que o consumidor deseja.

Através da pesquisa exploratória foram identificadas duas categorias que dividiram a população em dois grandes segmentos: motoristas práticos e motoristas que preferem desempenho no automóvel. Neste caso, existem grupos de consumidores que diferem significativamente no que diz respeito às suas expectativas. O discriminador essencial para identificar os diferentes segmentos do mercado é o principal motivo pela qual o automóvel é utilizado.

Posteriormente, de posse da lista de qualidade demandada, uma nova pesquisa é feita e a equipe entrevista estes dois segmentos de consumidores separadamente a respeito de suas importâncias relativas. Primeiro, os motoristas são questionados a respeito das características do veículo que eles consideram importantes em diferentes situações, tais como: viagens, passeios curtos (*shopping*, supermercado) e passeios mais longos. Isto é avaliado ainda em duas estações: inverno e verão.

Os itens da qualidade demandada foram avaliados numa escala de 1 (completa insatisfação) a 5 (completa satisfação) e foram comparados os resultados entre os dois tipos de motoristas identificados. A figura 2.1 apresenta os resultados da avaliação do consumidor “prático”.

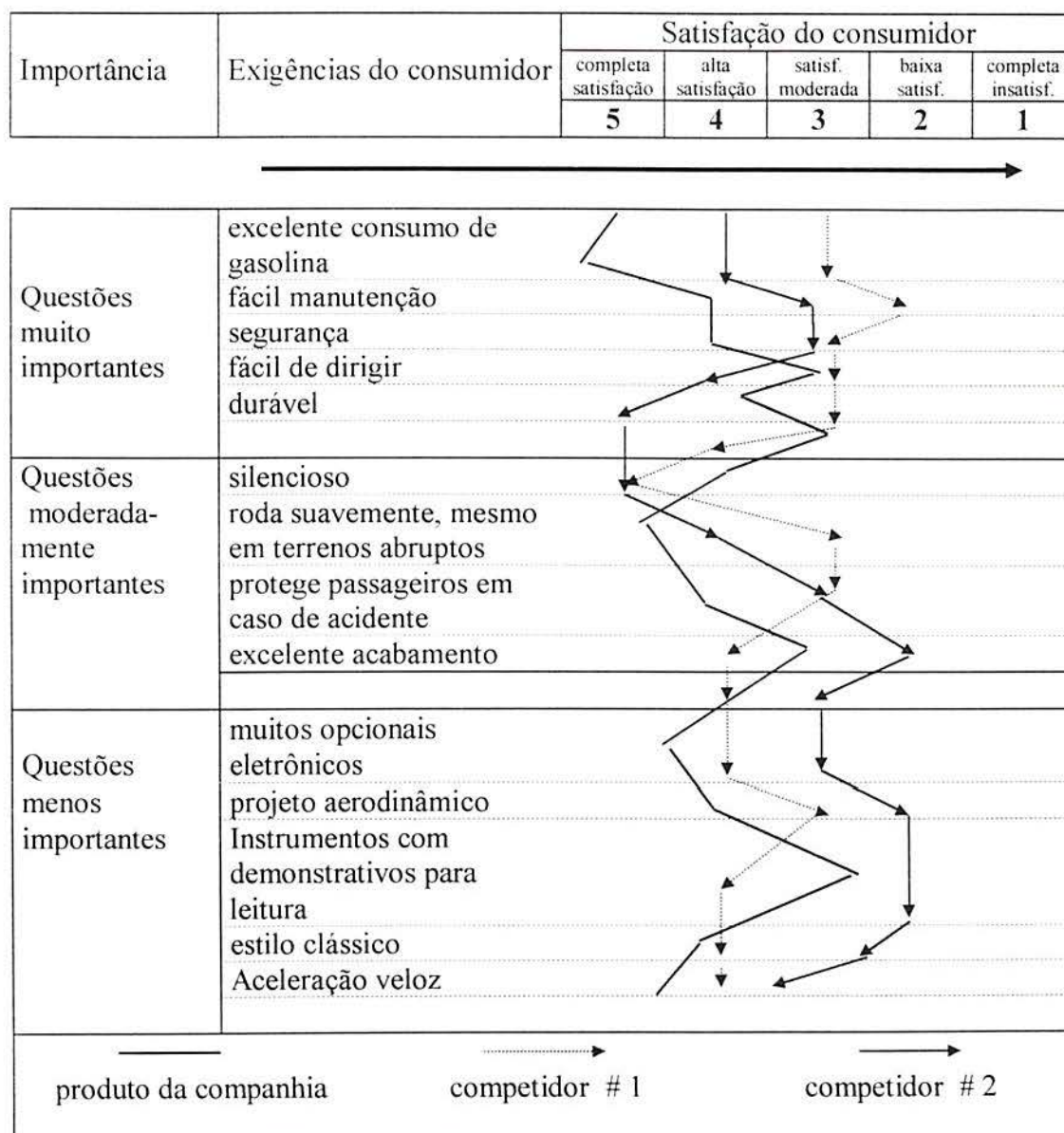


Figura 2.1 - Avaliação da satisfação do consumidor - O motorista prático
 Fonte: Havener, 1993, p. 44.

CAPÍTULO 3

O PLANEJAMENTO DA QUALIDADE ATRAVÉS DO QFD

Qualidade, falando genericamente, é a capacidade de um produto responder à demanda de um consumidor ou mercado. O desdobramento da função qualidade é um método para realizar o planejamento da qualidade.

Segundo Mizuno e Akao (1994), planejar é determinar o que fazer e projetar é decidir como será feito. Para planejar deve-se ter um entendimento acurado de quais qualidades os consumidores demandam do produto.

O desdobramento da função qualidade é um método originado no Japão para desenvolvimento de produtos. O QFD teve início por volta de 1965-1967 por Yoji Akao e Katsuyoshi Ishihara. Para promover o gerenciamento da qualidade total, eles desenvolveram o que foi definido por “Quality Function Deployment”, isto é, Desdobramento da Função Qualidade.

Mais tarde, a Toyota Motors utilizou tabelas para ilustrar as tarefas de qualidade. Segundo Mizuno e Akao (1994) um problema era a incapacidade de se ter uma visualização clara das atividades exigidas para garantir a qualidade. Por esta razão, a tabela identificou as tarefas críticas para a garantia da qualidade nas fases de planejamento, projeto, construção de protótipo, preparação do protótipo e produção.

Para Mizuno e Akao (1994) o gerenciamento entre departamentos iniciou com a tabela de atividades de garantia da qualidade. Nesta tabela, itens de garantia foram relacionados com qualidade, operações de garantia, indivíduos responsáveis e assim por diante. A tabela não era propriamente uma matriz de QFD, mas era uma representação do gerenciamento interfuncional, tornando possível a visualização de cada fase das atividades entre departamentos.

Em 1972, o grupo Mitsubishi foi o primeiro a utilizar a matriz da qualidade. O objetivo era representar as atividades críticas relacionadas à qualidade do produto, demonstrando as atividades de gerenciamento da qualidade total. Esse grupo comercializava barcos e não estava contente em fabricar produtos sofisticados a um alto custo. O que faltava era um consenso sobre o que era qualidade em um barco.

Assim, concluem Mizuno e Akao (1993), é necessário tornar claro o que significa qualidade em um barco, como esta qualidade poderia ser alcançada e quais são as funções de seus mecanismos e componentes.

Neste caso, o desdobramento da qualidade é uma ferramenta poderosa. A idéia do gráfico de desdobramento da qualidade ou matriz da qualidade foi evoluindo então, de acordo com as necessidades de cada companhia.

Também em 1972, Yoji Akao discutiu o sistema de desdobramento da qualidade em 17 etapas que foram desdobradas na forma de gráficos ou matrizes de qualidade.

King (1987) afirma que nos anos 70 e 80, os japoneses desenvolveram mais matrizes e melhoraram a comunicação entre os departamentos de projeto e manufatura. Matrizes foram incluídas para melhor considerar a função do produto, modos potenciais de falha, novas tecnologias, análise sistemática de gargalos de engenharia e redução de custo.

Shaik (1989) diz que o sucesso da aplicação do QFD tem sido documentado na literatura, especialmente pela companhia Toyota Motors. Para o autor, companhias que desenvolveram seus produtos em harmonia com o mercado e os consumidores têm tido muito sucesso.

3.1 O QFD - DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE

“Definimos o QFD como um meio de converter a demanda dos consumidores em características de qualidade e desenvolvemos um projeto de qualidade para o produto final pelo desenvolvimento sistemático das relações entre a demanda e essas características, iniciando com a qualidade de cada componente e estendendo o desdobramento da qualidade de cada parte do processo. A qualidade total do produto será formada por esta cadeia de relações”. (Akao, 1990, p. 5).

O QFD no sentido amplo é um termo geral que significa “desdobramento da qualidade através do desdobramento das funções de qualidade”. Embora os dois termos estejam inter-relacionados, existe uma diferença entre eles. O desdobramento da qualidade refere-se à conversão da qualidade demandada em requisitos técnicos ou características de qualidade, enquanto que o desdobramento da função qualidade refere-se ao desdobramento das características em partes ou funções. Nesta dissertação, utilizaremos um termo único, de desdobramento da função qualidade, sem fazer tal distinção.

O QFD pode ser definido como um sistema para projetar um produto ou serviço baseado na demanda do consumidor e envolve todos os membros da organização.

Para Bob King e L. P. Sullivan (apud Maddux, Amos e Wyskida,1991) o QFD translada as exigências dos consumidores em requisitos técnicos apropriados para cada estágio de desenvolvimento do produto e ciclo de produção.

Segundo Eureka e Ryan (1993), as necessidades dos clientes podem facilmente sofrer distorções na interpretação durante o complicado ciclo de desenvolvimento do produto. Desta forma, é preciso um mecanismo que considere a “voz do consumidor” durante todas as fases de desenvolvimento do produto ou das etapas do processo. Este mecanismo é o QFD.

Ainda para Eureka e Ryan (1993), o QFD não só enfatiza a atenção dada às necessidades do cliente, como também fornece um mecanismo de seleção das áreas alvo, onde vantagens competitivas podem ajudar a melhorar a posição no mercado.

Smock (apud Eureka e Ryan,1993) dizem que o QFD irá apontar as áreas onde é necessário um trabalho analítico posterior, o que resulta numa análise que enfoca o entendimento das necessidades do cliente. Esta é a mudança mais importante. O QFD mostra o caminho de aplicação de ferramentas de análise importantes, tais como projeto de experimentos.

Para Daetz (1989), o QFD é uma abordagem desenvolvida pelos japoneses para garantir que a voz do consumidor seja considerada e transmitida através de todas as fases: do esboço do produto, ao marketing e distribuição.

Segundo Daetz (1989), no desenvolvimento de um produto, os japoneses têm mostrado que eles estão determinados a:

1. Coletar informações a respeito das necessidades dos consumidores, competidores e tecnologia;

2. Organizar e transformar essas informações para que elas possam ser entendidas e usadas por pessoas de várias áreas funcionais e;

3. Estabelecer a comunicação e informação interfuncional em toda a organização.

Neste contexto, o QFD é uma importante ferramenta de planejamento que leva aos participantes um procedimento de padronização e documentação de informações por meio de matrizes.

As matrizes e a integração de pessoas ajudam a:

- (i) preservar o conhecimento técnico;
- (ii) transferir o conhecimento para novos empregados; e
- (iii) facilitar a comunicação entre departamentos.

O QFD propicia o trabalho num ambiente de engenharia simultânea, isto é, equipes multidisciplinares de todas as áreas envolvidas com o desenvolvimento do produto buscam atingir objetivos comuns de diminuição de custos, melhoria de qualidade e redução de tempo de ciclo.

Segundo Norman Morrell (apud O' Neal e Lafiei, 1992), o QFD é uma excelente ferramenta de planejamento e um veículo através do qual temos pessoas trabalhando juntas como uma equipe para atingir metas comuns.

Para Fortuna (1988) a disciplina e estrutura do QFD evitam que haja diferenças na interpretação entre grupos funcionais. Os documentos visuais podem ser facilmente interpretados pela equipe.

Mizuno e Akao (1994) relatam que para os departamentos de uma companhia, as funções divididas entre eles são esclarecidas quando as relações são demonstradas a partir de um desdobramento das funções de qualidade para as atividades de garantia de qualidade. Através do desdobramento da qualidade são estudadas também as inter-relações das atividades dentro de departamentos com múltiplas responsabilidades.

A informação proveniente dos consumidores a respeito da qualidade que eles desejam no produto deve ser analisada sistematicamente e pode ser útil para o desenvolvimento de produtos. Isso porque através de suas matrizes, o QFD oferece uma maneira estruturada e lógica de planejar o produto, a manufatura e o controle de qualidade.

As funções de qualidade desdobradas no QFD não são simplesmente atividades de engenharia: outras atividades devem ser consideradas, tais como a fase de vendas (pós-manufatura) e a fase de serviços. Por exemplo, pesquisa de mercado para desenvolvimento de novos produtos e problemas de vendas poderão ser analisados integralmente utilizando a estrutura do QFD.

A Qualidade demandada

Itens da qualidade demandada são todos os atributos ou informações provenientes dos consumidores referentes à qualidade que eles desejam no produto. Entende-se por consumidores não somente os usuários do produto final mas, por exemplo, clientes internos de um processo subsequente, ou um revendedor.

Os itens exigidos pelos consumidores podem ser itens vagos, como por exemplo: “confortável” ou , no caso de um cliente interno: “peça bem acabada”. Esses itens devem ser analisados sistematicamente e convertidos em informações que devem ser usadas no desdobramento da qualidade.

A qualidade demandada pode ser obtida via pesquisa de mercado, com a elaboração de um levantamento inicial que trará à tona os itens exigidos pelo consumidor. Outras maneiras poderão ser utilizadas tais como: análise de *benchmarking* (comparação com um referencial de excelência), pesquisa junto a principais clientes e fornecedores, análise de reclamações, entre outras. A qualidade demandada também pode ser obtida levando em conta outros aspectos ou ainda a combinação dessas diferentes fontes, dependendo do objetivo e do tipo de estudo.

A lista de itens de qualidade demandada levantada pode ser organizada através de um agrupamento de itens por meio de um diagrama de afinidades. Ainda, quando necessário, os itens demandados pelos consumidores poderão ser organizados em uma árvore lógica, desdobrados em itens de primeiro, segundo e terceiro nível de detalhe.

Hauser e Clausing (1988) exemplificaram o desdobramento da qualidade demandada através de uma árvore lógica da qualidade demandada do produto “porta de um automóvel”.



Figura 3.1 - Árvore lógica dos itens da qualidade demandada para a “porta de um automóvel”. Fonte: Hauser e Clausing, 1988, p. 65.

Características de Qualidade

As características de qualidade são variáveis que podem fornecer uma medida referente a uma qualidade demandada. Quando uma qualidade demandada tem múltiplas características de qualidade, estas poderão ser desdobradas numa tabela de desdobramento das características de qualidade.

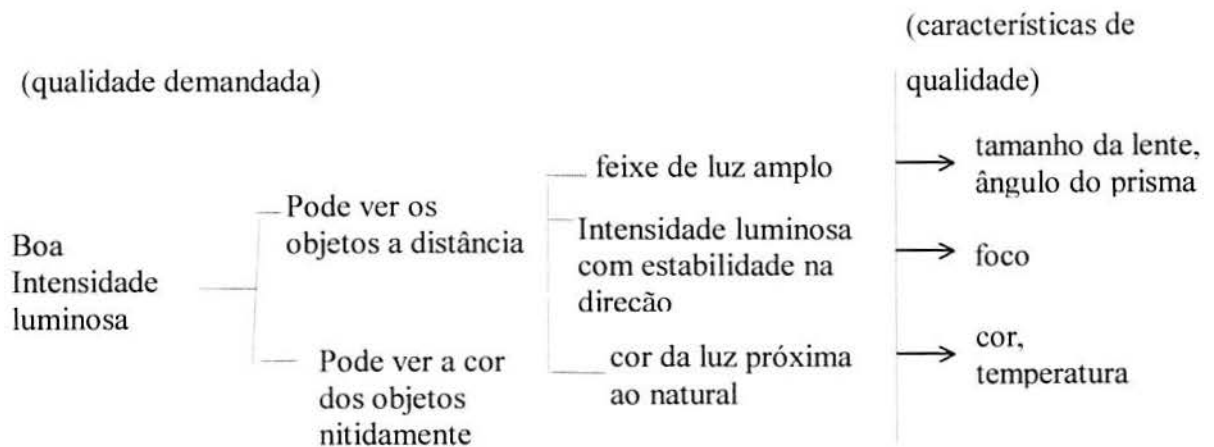


Figura 3.2 - Identificação das características de qualidade para um farol de automóvel. Fonte: Mizuno e Akao, 1994, p. 60.

Características de qualidade	Primário	Distribuição do fluxo					Segurança	
	Secundário	Valor da distribuição			Fluxo da luz		foco automático	
	Terciário	Tamanho da lente	ângulo do feixe de luz	ângulo do foco	transmissividade	fator de reflexão	ângulo de redundância	(itens adicionais)

Figura 3.3 - Árvore lógica das características de qualidade. Fonte: Mizuno e Akao, 1994, p. 60.

A matriz de desdobramento da qualidade

A matriz de desdobramento da qualidade ou simplesmente matriz da qualidade varia de acordo com sua finalidade e uso. Basicamente, esta matriz mostra a relação entre a qualidade demandada e os requisitos técnicos para obtê-la (ver figura 3.4).

Mizuno e Akao (1994) definem a matriz da qualidade como uma matriz bidimensional que relaciona o desdobramento da qualidade demandada e as características de qualidade. Tal relação fornece um meio de medir as necessidades dos consumidores que foram desdobradas a partir de sua própria linguagem e de definir quais limites de desempenho, expressos numericamente, que deveriam ser estabelecidos para satisfazer estas necessidades. Em outras palavras, dados verbais (a qualidade demandada) listados pelos consumidores são transformados em medidas preferencialmente quantitativas (características de qualidade). Cada característica de qualidade corresponderá a um intervalo de variação que é estabelecido de acordo com os desejos do cliente. Posteriormente, este intervalo poderá ser confrontado com o que a companhia exerce nas condições atuais.

Normalmente, a companhia é avaliada, levando-se em conta: (i) uma análise comparativa entre os itens da qualidade demandada, (ii) a frequência das reclamações, (iii) estratégias gerenciais ou outros elementos que poderão ser incluídos, dependendo do tipo de estudo e dos objetivos traçados.

A intensidade das relações entre a qualidade demandada e as características de qualidade são geralmente representadas pela seguinte escala: **1** ou o símbolo Δ para uma relação fraca, **3** ou o símbolo **O** para relação moderada e **9** ou Θ para uma relação forte.

A matriz da qualidade pode ser representada de várias formas, uma vez que possui uma estrutura flexível aplicável em diversas situações. Exemplificando, Maddux,

Amos e Wyskida (1991) aplicaram a estrutura do QFD como ferramenta de planejamento estratégico para projetos ou produtos intangíveis. Ribeiro (1994) aplicou matriz da qualidade para análise de fornecedores; Ribeiro e Echeveste (1994) aplicaram a matriz da qualidade para planejar um experimento estatístico. Ribeiro e Ferreira (1995) aplicaram a estrutura do QFD para o estudo de um processo de modernização da biblioteca de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Glushkovsky et alii (1995) utilizaram o gráfico da qualidade ou matriz da qualidade para o estudo do relacionamento entre os objetivos de uma pesquisa e as questões de um questionário. Mota (1996) aplicou um modelo conceitual de QFD para serviços num sistema hospitalar.

A estrutura de matrizes do QFD, pelo seu caráter flexível, permite aplicação a diversos objetivos e áreas. O estudo desta ferramenta de planejamento encontra-se em fase de desenvolvimento e muitas outras aplicações podem ainda ser facilitadas quando monitoradas pelo QFD.

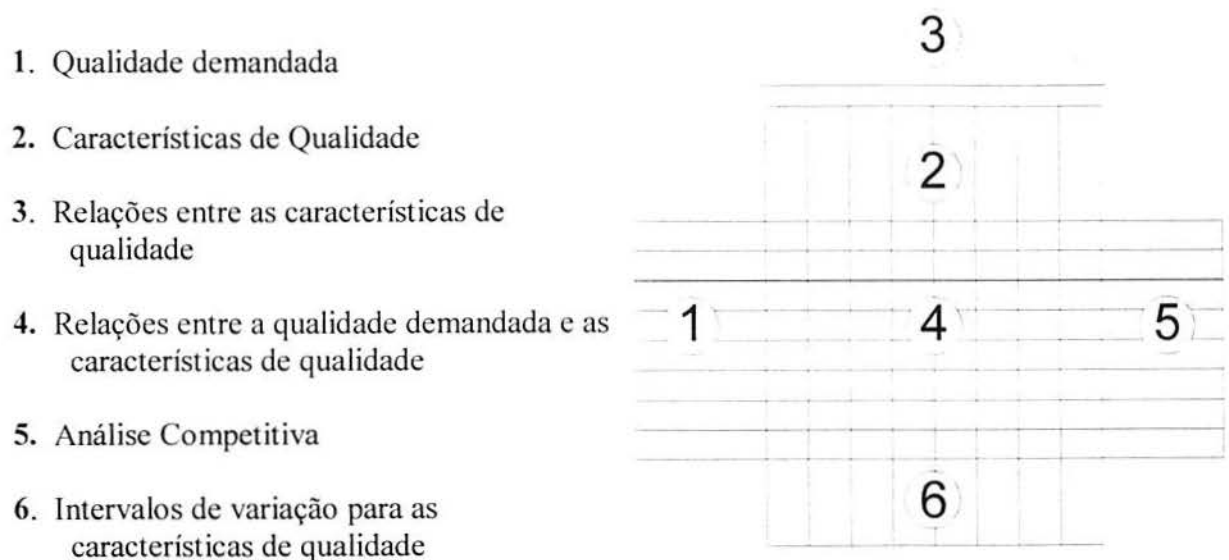


Figura 3.4 - Elementos da matriz da qualidade

Mizuno e Akao (1994) argumentam que, da maneira que as companhias conduzem sua tecnologia de engenharia, não é evidente as relações entre as características de qualidade do produto e seus mecanismos, componentes e partes. Por exemplo, uma máquina industrial tem um problema de “ruído”. Qual parte está causando o ruído? Quais partes necessitam de melhoria a fim de reduzir o ruído? Medidas corretivas não poderão ser tomadas sem um meio sistemático para avaliar tais relações.

3.2 A PRIORIZAÇÃO DA QUALIDADE DEMANDADA

Durante as fases de planejamento e definição das especificações, as políticas de qualidade e os alvos de qualidade são estabelecidos. A partir deste momento, são determinados os pontos de venda, que podem ser usados como vantagem competitiva.

Segundo Mizuno e Akao (1994), uma vez que as necessidades dos consumidores serão o ponto de partida para todas estas atividades, a tabela de desdobramento da qualidade demandada tem como base essas necessidades. O desdobramento da qualidade demandada irá direcionar as decisões a respeito de qual tecnologia, quais investimentos de capital, quais estratégias de marketing e quais decisões devem ser tomadas. Neste momento, a situação atual da companhia é avaliada. Uma maneira de efetuar essa avaliação é através do peso atribuído à importância relativa de cada item exigido pelo consumidor na tabela de desdobramento da qualidade demandada.

A priorização é um dos aspectos mais importantes da estrutura do QFD. Nesta etapa inicial, a priorização da qualidade demandada refere-se ao grau de importância relativa de determinado item da qualidade demandada.

Yoji Akao alerta que essa fase pode ser crucial para o desdobramento da qualidade. Com base nisso, Mizuno e Akao (1994) forneceram um guia para métodos de priorização adaptados ao desdobramento da qualidade demandada. Esse guia considera:

(1) O desempenho da companhia, considerando a demanda do consumidor no início do desdobramento da qualidade demandada.

(2) O estabelecimento de pontos para melhoria que a companhia visa, a partir da avaliação de seu desempenho. A partir disso, a companhia poderá estabelecer suas políticas, alvos para a qualidade e estratégias de melhoria.

Alguns autores já discutiram meios diferenciados de atribuição de pesos à qualidade demandada. Essa atribuição é de carácter subjetivo e depende basicamente dos critérios julgados importantes pela equipe. Não há, dessa forma, um critério único consolidado na literatura.

Atribuição de pesos à qualidade demandada

Akao (1990) propôs o uso de questionários para investigar o grau de importância de várias qualidades demandadas para um determinado produto.

Um levantamento inicial fornece os itens da qualidade demandada que são desdobrados até o segundo nível de detalhe. De posse desse levantamento, as questões do questionário fechado são baseadas no segundo nível de detalhe. O consumidor avalia os itens da qualidade demandada segundo uma escala ordinal de 1 (pouco importante) a 5 (muito importante).

No questionário, também são consideradas outras características dos entrevistados como idade, sexo, e fatores sócio-econômicos. Para Akao, a frequência com que uma determinada qualidade demandada é mencionada pode ser indício do seu grau de importância para os consumidores.

Simultaneamente, o questionário compara, para cada item de qualidade demandada, a situação da companhia junto aos concorrentes. Itens onde a pontuação da companhia está abaixo de uma situação ideal ou abaixo da pontuação dada ao concorrente merecem atenção especial. Pontos com a situação inversa são considerados vantagens competitivas. Um exemplo de uma questão do questionário aparece na figura 3.5. O questionário fornece o grau de importância de cada item da qualidade demandada (A). Outros elementos são considerados para a priorização final desses itens, conforme explicação a seguir.

A priorização final de cada item da qualidade demandada (A_w) é calculada a partir do produto do grau de importância (A), da taxa de melhoria (B) e da avaliação dos pontos de venda da companhia em relação aos concorrentes ou em relação a uma meta planejada (C).

O grau de importância (A) é dado através dos resultados do questionário por uma escala de 1 a 5, onde 1 (muito pior que o concorrente ou uma meta planejada) e 5 (muito melhor que o concorrente ou uma meta planejada.).

A taxa de melhoria (B) é calculada pelo quociente da “companhia hoje”(N) pelo escore de “companhia planejada”(P). Isto é:

$$B = \frac{P}{N} \quad (3.1)$$

A avaliação dos pontos de venda (C) é realizada de acordo com uma escala onde 1,5 representa um ponto de venda muito importante, 1,2 representa moderadamente importante e o valor 1.0 é atribuído aos demais itens.

Assim sendo, a importância de cada qualidade demandada é dada por:

$$A_w = A \times B \times C \quad (3.2)$$

O peso da qualidade demandada é um percentual calculado a partir do peso absoluto (A_w).

Maddux, Amos e Wyskida (1991) aplicaram a estrutura do QFD como ferramenta do planejamento estratégico na Divisão de Engenharia de Produção (PED) da *U.S. Army Missile Command* (MICOM). A ponderação da qualidade demandada seguiu uma estrutura baseada na proposta por Mizuno e Akao descrita acima.

Segundo Maddux, Amos e Wyskida, o QFD pode ser usado na formulação de estratégias para o gerenciamento de projetos. Combinando o conhecimento qualitativo da equipe e o conhecimento do mercado-alvo, a equipe é capaz de quantificar esse conhecimento e dessa forma justificar uma decisão tomada.

Atribuindo pesos à qualidade demandada com o uso do AHP

Armacost et alii (1994) aplicaram a metodologia do QFD para resgatar as exigências do consumidor num estudo de painel de parede de casas industrializadas nos EUA. Neste estudo, o AHP (Analytic Hierarchy Process ou Processo Analítico Hierárquico) foi aplicado para determinar as prioridades das exigências do consumidor em relação aos atributos pertencentes à estrutura externa de painel de parede. O AHP forneceu, desta forma as prioridades das exigências dos consumidores como entrada na matriz do QFD.

Um grupo focalizado constituído de arquitetos, construtores, produtores, investidores financeiros, entre outros, utilizou um questionário para obter a importância relativa dos itens da qualidade demanda do produto em questão.

O AHP é uma técnica de decisão particularmente útil para avaliar alternativas de multicritérios envolvendo aspectos subjetivos e intangíveis. O passo essencial da aplicação do AHP envolve a decomposição de um problema de decisão geral em um modelo hierárquico apresentando subproblemas que podem mais facilmente ser compreendidos e avaliados. Prioridades são atribuídas aos elementos de cada nível de decisão hierárquica. Através destas prioridades é possível determinar um valor global para as alternativas de decisão.

No AHP, para estimar a importância relativa, compara-se o elemento de um nível com o elemento imediatamente precedente (de nível mais alto).

Os entrevistados expressam suas preferências entre opções como igualmente, moderadamente, fortemente, muito fortemente e extremamente preferido. Estas preferências são representadas por uma escala de 1, 3, 5, 7 ou 9, respectivamente, podendo ser atribuídos valores intermediários.

Cada comparação pareada representa uma estimativa da relação das prioridades ou pesos dos elementos comparados. A média geométrica de todas as respostas para cada par de comparação é calculada, e a comparação resultante da matriz constitui-se de médias geométricas. As prioridades são estimadas usando o método de autovetores desenvolvido por Saaty (1980).

Os resultados das prioridades representam a intenção do decisor em seu julgamento e a preferência entre as alternativas. O julgamento final dos indivíduos é realizado através da média geométrica de todas as respostas.

Método para distribuição de pontos para várias demandas no desdobramento da qualidade demandada

Este método foi desenvolvido por Kamisawa e Akao (Mizuno e Akao, 1994). Os pontos são alocados entre várias demandas. Escores de demandas de mais alto nível são alocadas seqüencialmente até as demandas de nível mais baixo. Primeiramente, 100 pontos são distribuídos para os itens primários da qualidade demandada. Da mesma forma, são distribuídos 100 pontos para os itens de qualidade secundários e terciários da qualidade demandada. O peso final de um item secundário leva em conta a importância relativa do item primário ao qual pertence.

Por exemplo, supondo que um item primário tem 30% da importância global para a qualidade do produto e esse item primário subdivide-se em 3 itens secundários com importância relativa 10%, 20% e 70% respectivamente, os pesos finais seriam: 30% de 10 = 3, 30% de 20=6 e 30% de 70 = 21. Procede-se da mesma forma para a avaliação dos itens terciários. Para distribuição dos pesos iniciais, considera-se o peso dado pelo consumidor para cada item primário da qualidade demandada. Para determinar os pesos nos níveis desdobrados, a equipe se baseará em aspectos relevantes. Mizuno e Akao propõem a avaliação de circunstâncias atuais segundo quatro aspectos:

(1) O nível de desempenho do competidor: Através de dados de catálogos, jornais, questionários e outros.

(2) Reclamações dos consumidores: dados de relatórios de serviços, relatórios de reclamações, etc.

(3) Habilidades técnicas: dados que relatam a análise de falha, experiência da firma com dados do projeto, processo de capacidade, recursos humanos, equipamentos, etc.

(4) Custo e Distribuição: dados a respeito de qual o custo das várias demandas e quantos dias serão exigidos para atendê-las.

Mizuno e Akao (1994) sugerem um escore de avaliação que abrange os quatro aspectos citados acima. Os autores propõem uma avaliação conciliatória a partir de um escore que classifica a empresa segundo uma escala pré-definida.

A avaliação conciliatória leva em conta três elementos: qualidade, custo e distribuição (vendas). Um exemplo desenvolvido pelos autores foi realizado para avaliar fornecedores externos (ver Mizuno e Akao, 1994).

Este questionário constitui-se de dois tipos de questões. Por favor, responda ambas ao mesmo tempo.

Questão I: Os itens listados abaixo permitem avaliar um item da qualidade demandada. Na coluna I, marque de acordo com a intensidade da influência deste item no produto global.

Questão II. Quem faz o produto que você está usando atualmente? Preencha o nome do fabricante no campo abaixo. Na coluna II, avalie cada item comparando os fabricantes.

Companhia A : Nome do fabricante ()

Companhia B : Nome do fabricante ()

Companhia C : Nome do fabricante ()

COLUNA I						COLUNA II					
Item	Não é importante	Pouca importância	Alguma importância	Importante	Muito importante	Muito Ruim	Ruim	Regular	Bom	Muito Bom	
	Boa visibilidade sob condições adversas	1	2	3	4	5	A	1	2	3	4
						B	1	2	3	4	5
						C	1	2	3	4	5

Figura 3.5 - Exemplo de questão de questionário para avaliação de um item da qualidade demandada. Fonte: Mizuno e Akao, 1994, p. 83.

3.3 A PRIORIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE

O cálculo da priorização das características de qualidade depende basicamente dos critérios julgados importantes pela equipe. Assim, um índice poderá ser elaborado a partir de uma combinação desses critérios.

Na priorização das características de qualidade, são consideradas fundamentalmente, o peso atribuído à qualidade demandada e as relações entre a qualidade demandada e as características de qualidade. Demais critérios poderão ser incluídos dependendo do objetivo do estudo.

Wasserman (1993) aplicou a casa de qualidade relacionando a qualidade demandada pelo consumidor com as características de projeto. Baseado nos resultados de um levantamento do mercado, obteve-se a qualidade demandada avaliada pelo índice D_i . E para cada qualidade demandada, a equipe técnica identificou as características de projeto para atender àquelas necessidades.

A taxa de importância das características de projeto (W'_j) é dada por:

$$W'_j = \sum_{i=1}^m D_i \cdot R_{ij} \quad (3.3)$$

Onde:

m número de itens de qualidade demandada

D_i grau de importância da qualidade demandada

R_{ij} intensidade da relação entre a qualidade demandada i e a característica de qualidade j . A escala usada foi 9, 3 e 1 para relação forte, moderada e fraca respectivamente

Segundo Wasserman, a meta do planejamento da qualidade é maximizar a satisfação do consumidor. Contudo, considerações do mercado limitam o número e a extensão de possíveis características do produto que podem ser incorporadas. Projetistas de produto necessitam de conhecimento para fazerem uma seleção de características de projeto que resultam num alto nível de satisfação do consumidor. Devido à complexidade do processo decisório, a equipe técnica freqüentemente recorrerá a procedimentos de pesquisas ocasionais (*ad-hoc*) para ajudar no processo de decisão. Para o autor, este procedimento não é suficiente, necessitando de uma abordagem mais formal, para avaliar a

questão de custos associados à escolha de uma determinada alternativa. Neste contexto, uma estrutura de programação linear é introduzida para utilizar a informação proveniente das matrizes do QFD e ajudar a equipe a selecionar as características do produto.

Um modelo de programação linear foi proposto por Wasserman (1993) para ajudar o corpo técnico a selecionar um *mix* de características que resultam num alto nível de satisfação do consumidor. A função objetivo proposta é um modelo linear que constitui-se dos graus de importância da qualidade demandada D'_i e uma variável de decisão X_j , para $j= 1, 2, \dots, n$. A variável de decisão X_j tomará como base uma escala percentual, onde $X_j=100$ significa que o objetivo desejado está completamente atendido.

Assim, a função objetivo é dada por:

$$Z = \max\{W_1X_1 \cdot W_2X_2 \cdot \dots \cdot W_nX_n\} \quad (3.4)$$

Os custos foram considerados através de uma restrição linear onde os coeficientes de custo C_i , para $i=1, 2, \dots, n$ representam o aumento incremental no custo unitário associado a uma mudança em X_j . Assim, a restrição é dada por:

$$C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \leq B \quad (3.5)$$

onde B é o máximo de custo unitário incremental desejado.

O autor introduziu um modelo de priorização das características de qualidade do produto que considera a questão de custos. Outras restrições poderiam ser consideradas, tais como restrições organizacionais e governamentais. Neste caso, o modelo teria termos adicionais que representariam essas restrições.

3.4 AS ETAPAS DO QFD PROPOSTAS POR AKAO

Um produto na manufatura envolve uma diversificação de setores especializados como projeto, materiais, produção, controle de qualidade, etc. O resultado

depende da união de vários fatores, tais como custo, atendimento, especificações e melhorias. São setores e interesses diferenciados.

As inter-relações entre eles não são sempre entendidas. As etapas de desdobramento da qualidade irão elucidar a complexidade das inter-relações entre interesses, setores e áreas diferentes que incidem diretamente na qualidade do produto final.

Mizuno e Akao (1994) propôs 27 etapas que sistematizam a identificação de processos, partes críticas, equipamentos e responsáveis pela qualidade de um produto manufaturado. Estudando as relações existentes é possível tomar decisões de maneira lógica e sistemática. As 27 etapas contemplam a identificação do mercado, as características do produto, controle e planejamento do processo, análise competitiva, análise de custos, estabelecimento de padrões, avaliação de protótipo, revisão de projeto, avaliação conjunta com fornecedores, entre outros.

O objetivo, segundo Akao, é converter as demandas dos consumidores em características de qualidade e desenvolver um projeto de qualidade para o produto final.

Para garantir a qualidade de novos produtos, a partir da qualidade demandada pelo consumidor, esses itens são convertidos em elementos - sempre que possível- mensuráveis, as "características de qualidade". A pergunta seria o que fazer para obter estas características?

As etapas propostas por Akao direcionarão os objetivos iniciais até o produto final. Nelas, alvos de qualidade são estabelecidos, pontos de venda e pontos fracos são identificados.

3.4.1 Desdobramento da Qualidade Demandada

Etapa 1: *Definição do produto*

A definição do produto determina o tipo de produto que será produzido, levando em conta a demanda do mercado, a capacidade tecnológica da empresa, diretrizes e estratégias a médio e longo prazo.

Etapa 2: *Coleta de dados do mercado e construção da tabela de desdobramento da qualidade demandada*

Nesta etapa é identificado o tipo de usuário e a função esperada do produto (o que o produto faz). Akao recomenda o uso da análise de valor relacionando as funções do produto a um verbo mais adjetivo, expressando o que o consumidor diz, usando frases e desdobrando-as.

As preferências do usuário são dados qualitativos a serem desdobrados, partindo de expressões orais até chegarmos a um nível de detalhe que poderá ser desdobrado em níveis primário, secundário e terciário. Os itens poderão ser agrupados, então, através de um diagrama de afinidades.

Para Akao, o desdobramento da qualidade demandada é definido como uma combinação das demandas de qualidade dos consumidores, nas suas próprias palavras.

Assim, para entender o ponto de vista do consumidor é necessário, primeiro, identificar os consumidores. Os consumidores definirão diferentes demandas de qualidade e pesos diferentes para estas qualidades demandadas. O desdobramento da qualidade demandada deverá relatar como o consumidor pensa.

Etapa 3: *Análise de competitividade e definição dos pontos fortes de Marketing*

Uma lista dos itens da qualidade demandada é confrontada item a item, com a concorrência utilizando um gráfico posicionado à direita da matriz. Pontos que estão abaixo da concorrência merecem atenção especial, e aqueles que estão acima da concorrência representam uma vantagem competitiva.

Face à análise de competitividade, a equipe de engenharia pode melhorar a posição da própria empresa.

3.4.2 Desdobramento das Características de Qualidade

Etapa 4: *Construção da tabela de desdobramento das características de qualidade*

Os itens da qualidade demandada são transformados em características de qualidade mensuráveis através da tabela de desdobramento das características de qualidade.

As características de qualidade são agrupadas por afinidade e pode-se construir uma árvore lógica com o desdobramento nos níveis primário, secundário e terciário.

Etapa 5: *Análise competitiva das características de qualidade e confiabilidade*

As características de qualidade são comparadas com a concorrência. Para os produtos existentes são calculados média, desvio-padrão, especificação atual, índice de capacidade, etc.

Etapa 6: *Construção da matriz de desdobramento da qualidade*

A matriz da qualidade será uma combinação da tabela de desdobramento de qualidade (etapa 2) e a tabela de desdobramento das características de qualidade (etapa 4) em uma matriz onde são atribuídos símbolos de acordo com a intensidade das relações. A tabela 3.1 apresenta um exemplo de matriz da qualidade.

Tabela 3.1 - A matriz de desdobramento da qualidade. Fonte: Mizuno e Akao, 1994, p. 62.

Características de qualidade	FLUXO										Segurança
	Distribuição do FLUXO			Intensidade do Fluxo				VIDA ÚTIL			
	Ângulo do prisma	Tamanho da lente	Foco	Voltagem	Transm.	Fator de Reflexão	Isolamento	Resist. Filamento	ângulo p/ veículo		
Lâmpada com brilho forte	Δ		O								
Faixa Amplo			θ								θ
Estabil.direcional				θ							
Luz sem dispersão	Δ	Δ									
Luz baixa c/suficiente brilho				θ	O						
Faixa Amplo à distância	O		O								θ
Boa lumin. com chuva											
Sincronia c/ a direção				Δ		Δ					

Especificações									

Δ = Relação Fraca

O = Relação Moderada

θ = Relação Forte

Etapa 7: Análise de reclamações

Dados sobre reclamações referentes a produto similares que estão no mercado podem ser incorporados à matriz. As reclamações são associadas aos itens da qualidade demandada em forma de um gráfico de barras ao lado direito da casa de qualidade.

Os itens da tabela de desdobramento da qualidade demandada estão, em geral, associados a defeitos em potencial ou reclamações.

A lista de reclamações pode também ser considerada uma lista de antecipação de problemas. Um gráfico de Pareto pode ser realizado demonstrando a priorização dos itens da qualidade demandada associados à lista de reclamações (ver figura 3.6).

A análise de reclamações é importante na medida que investiga itens da qualidade demandada e características de qualidade identificando oportunidades de novos desenvolvimentos e melhorias, estabelecendo o que é crítico e o que pode ser considerado "não-crítico".

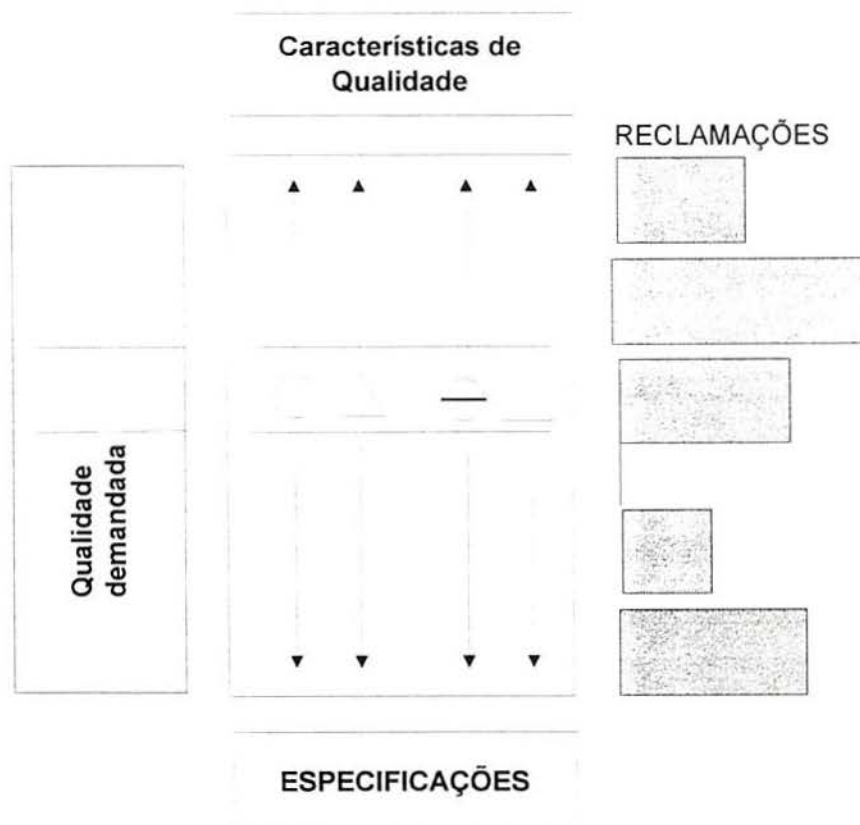


Figura 3.6 - A matriz da qualidade e a análise de reclamações. Fonte: Ribeiro, 1994, p. 21.

Etapa 8: *Estabelecimento da qualidade planejada*

Nesta etapa são definidas as especificações para as características de qualidade, as quais podem ser comparadas com as especificações dos produtos de competidores ao nível de qualidade estabelecido, ou qualidade planejada.

A definição das especificações é feita para cada característica de qualidade, considerando ainda a capacidade do processo em atender às especificações, o registro das reclamações e o padrão já utilizado pela empresa.

Etapa 9: *Avaliação para decisões no desenvolvimento do produto:*

Antes das atividades de projeto iniciarem, é verificada a adequabilidade da concepção do projeto. Isso é feito por um levantamento interno considerando fatores que envolvem políticas e estratégias da empresa, tendências de preferência dos consumidores, nível tecnológico, rede de distribuição de vendas, entre outros.

3.4.3 Desdobramento das Tecnologias e Estabelecimento da Qualidade do Produto**Etapa 10: *Construção da matriz de desdobramento das funções***

A partir do conhecimento das demandas do produto final e das características apropriadas, esta etapa auxilia na escolha da tecnologia a ser utilizada a fim de cumprir a demanda. O objetivo desta etapa é associar a cada item da qualidade uma ou mais funções que o cliente espera que o produto satisfaça.

Como o desdobramento da qualidade demandada é a transformação da linguagem dos usuários, algumas vezes isso não representa uma função do produto, por esta razão, estas funções são desdobradas em níveis de detalhe primário, secundário e terciário baseado na qualidade demandada, conforme exemplo apresentado na tabela 3.2.

As funções podem ser cruzadas com os itens da qualidade demandada e com os itens dos subsistemas (ver figura 3.7).

Tabela 3.2 - Desdobramento das funções para uma bomba de óleo. Fonte: Ribeiro, 1994, p. 23.

Primária	Secundária	Terciária
Produzir energia	Circular o óleo	Executar a entrada de óleo
		Executar a saída de óleo
	Produzir pressão	Criar a pressão de óleo
		Evitar vazamento interno
		Evitar vazamento externo
Evitar aquecimento	Assegurar o giro livre	Não deformar sob pressão
		Não deformar por temperatura
		Não empenar
	Providenciar Lubrificação	Criar o filme de óleo
		Manter o filme de óleo
		Renovar o filme de óleo
		Proteger contra contaminação

3.4.4 Desdobramento dos Subsistemas

Etapa 11: *Construção da matriz de desdobramento dos subsistemas*

Em geral, um produto é composto de vários subsistemas, componentes e detalhes das partes, cada um com suas próprias características de qualidade.

A matriz de desdobramento dos subsistemas torna visível a inter-relação dos componentes dos subsistemas com as características de qualidade e com as funções que o produto deve desempenhar.

A tabela de desdobramento do subsistema pode ser organizada em forma de uma árvore. Quando a árvore deste subsistema for muito extensa, o desdobramento pode

parar no quarto ou quinto nível de detalhe. Neste caso, os desdobramentos adicionais poderão ser guardados em arquivos separados.

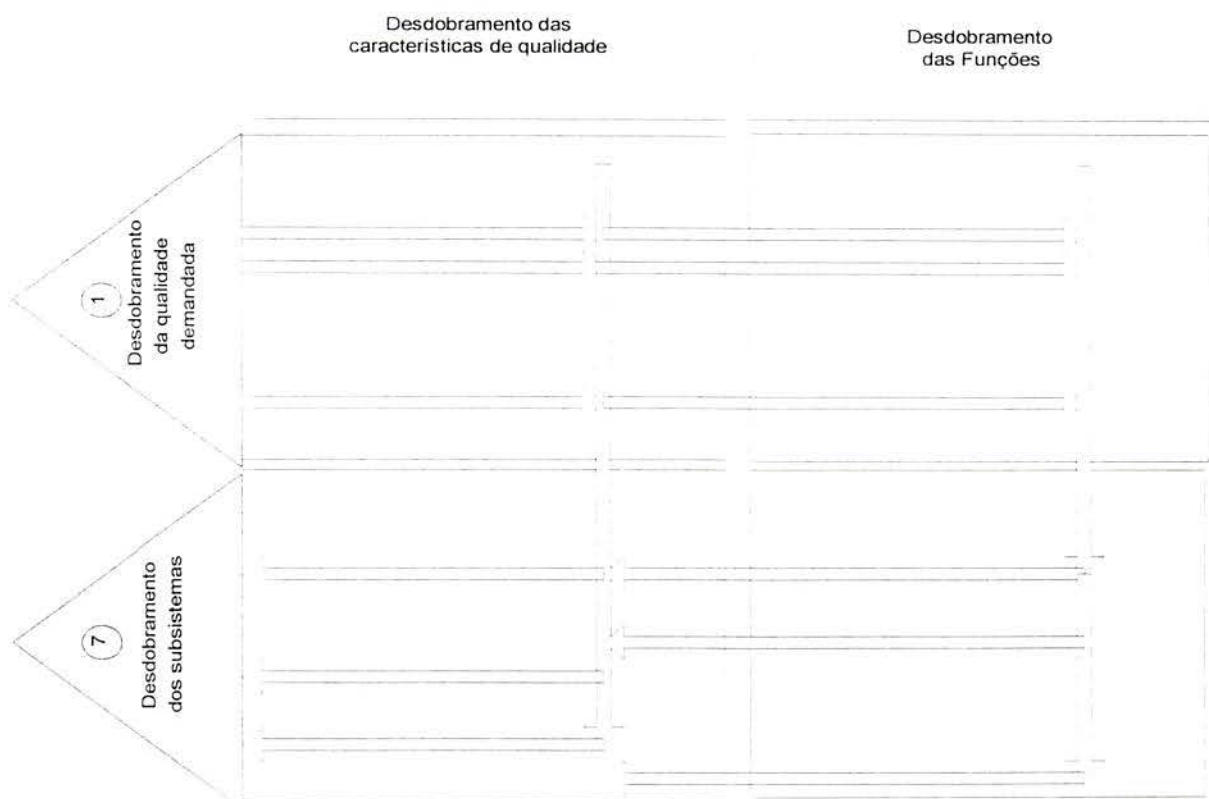


Figura 3.7 - Desdobramento da qualidade demandada, identificação com as funções e com os componentes dos subsistemas. Fonte: Mizuno e Akao, 1994, p. 68.

Etapa 12: *Análise de reclamações, características de qualidade e confiabilidade*

A frequência de reclamações que foi associada aos itens da qualidade demandada na etapa 7 é também associada aos componentes dos subsistemas.

As especificações das características de qualidade são comparadas com o desempenho do processo de manufatura atual. Nesta etapa estima-se o índice de capacidade.

No desenvolvimento da confiabilidade e dos subsistemas pode-se usar o FMEA (Análise de Efeitos e Modo de Falhas) e o FTA (Análise de Árvore de Falhas). Baseado em tais análises pode-se dar maior atenção a itens vitais, concentrando esforços nestes itens.

Etapa 13: *Estabelecimento da qualidade do produto e definição das partes críticas*

Nesta etapa, onde são compatibilizadas as avaliações, pesquisas e discussões anteriores é avaliada a qualidade planejada na etapa 8.

Esta etapa considera: a capacidade do processo, os custos de manufatura, os novos investimentos, a qualidade do projeto, do produto final e dos subsistemas e ainda as características de qualidade das partes dos componentes.

Considerando os estudos realizados na etapa 12, as partes críticas para a segurança são identificadas com um (S) e as partes críticas para a função com um (F) (partes que podem causar uma parada no funcionamento).

Também são identificadas para avaliação de melhorias partes na qual a capacidade do processo é insuficiente ou aquelas com baixa confiabilidade.

Etapa 14: *Melhorias através de Engenharia de Valor e FMEA*

Diante da análise de custos dos componentes feita na etapa 13, as partes que têm um alto custo e aquelas que têm uma considerável diferença entre o custo ideal e o custo estimado e portanto alto potencial para reduzir custos, devem receber atenção especial da engenharia.

Para identificar as características que poderão ser usadas para reduzir custo e aumentar a qualidade dos produtos, recomenda-se o uso de projeto de experimentos, investigando as características de qualidade que reduzirão custos com a otimização dos processos

As partes identificadas como críticas para segurança (S) e as partes críticas para funcionalidade (F) com alta taxa de reclamação são submetidas ao FMEA e FTA.

A equipe deve desenvolver um programa para revisão e pesquisa e intensificar o intercâmbio com os fornecedores para que revisem os componentes pelos quais são responsáveis.

A equipe deve concentrar esforços para custo, segurança e funcionalidade.

Etapa 15: *Estabelecimento de itens de avaliação da qualidade*

Os itens de avaliação de qualidade que asseguram a qualidade do produto e os métodos de teste devem ser baseados na tabela de desdobramento da qualidade demandada e na matriz de desdobramento das funções de qualidade. Isso garantirá que os itens de avaliação de qualidade relacionados reflitam a voz do cliente.

Etapa 16: *Revisão do projeto*

Com o projeto já concluído, as etapas anteriores devem ser revistas e modificações devem ser feitas, caso haja necessidade. Os fornecedores poderão discutir o projeto básico. As mudanças feitas nesta fase irão impedir problemas futuros, reduzindo custos maiores de retrabalho.

3.4.5 Detalhamento do Produto e Desdobramento da Produção

Etapa 17: *Construção da tabela de desdobramento das partes*

Nesta etapa prepara-se a tabela de desdobramento das partes para componentes unitários que foram desdobrados em subsistemas descritos na etapa 11. A seguir, são priorizados os componentes unitários assinalados com (S) ou (F) na etapa 13. O trabalho poderá ser dividido em equipes responsabilizando grupos para cada componente unitário.

O objetivo principal desta tabela é relacionar as características de qualidade da parte com o produto final (tabela 3.3). Deve estar claro como cada parte se relaciona com as

características do produto final. A qualidade do produto final é transformada em qualidade das partes.

Caso necessário, a tabela de desdobramento das partes pode ser analisada em maior detalhe através de uma matriz da qualidade. A matriz da qualidade permite que os pontos críticos para a garantia da qualidade do projeto sejam passados para conhecimento da fase de produção.

Tabela 3.3 - Características das partes relacionadas com as características do produto final.
Fonte: Ribeiro, 1994, p. 30.

No.	Parte	Característica de Qualidade da parte	Característica de Qualidade do produto final
121	Bulbo	Espessura do material Dimensão e forma	Transmissividade Volume do bulbo
122	Filamento	Localização do filamento primário Localização do filamento	Ângulo entre filamento primário e secundário Intensidade da fonte de luz
123	Base metal	Adesão ao vidro Dimensão e forma	Isolamento do gás Ajuste ao soquete

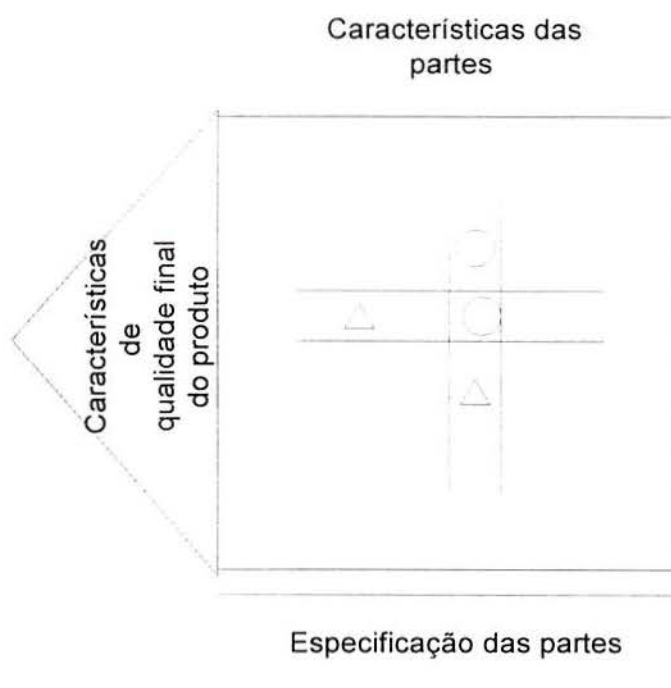


Figura 3.8 - Matriz do desdobramento das partes. Fonte:Ribeiro, 1994, p. 30.

3.4.6 Desdobramento dos Métodos de Manufatura

Etapa 18: *Pesquisa e desdobramento dos métodos de manufatura*

Uma das mais importantes atividades de preparação da fase de produção é a pesquisa de métodos de manufatura. Os desdobramentos realizados nas etapas anteriores direcionarão a escolha dos métodos. A escolha dos métodos de manufatura dependerá dos níveis que se espera atender das características de qualidade, levando em conta qualidade, produtividade e custo.

O exame da capacidade do processo em atender às especificações é uma questão importante nesta etapa. O tempo de *setup*, a facilidade de operação e a capacidade da linha também são aspectos importantes a serem considerados para selecionar o método mais adequado.

3.4.7 Desdobramento dos Processos

Etapa 19: *Desdobramento para pontos de controle do processo - Elaboração da matriz de planejamento do controle de qualidade do processo.*

O objetivo central desta etapa é determinar quais são os pontos de controle para o produto final ou subsistema.

A qualidade demandada pelo cliente já foi desdobrada em características de qualidade das partes individuais. Nesta etapa, as características são vinculadas com pontos de controle do processo.

Um meio de determinar os pontos de controle é considerar quais características de qualidade do produto final ou das partes individuais serão afetadas se ocorrer algum problema no processo.

Muitas vezes a equipe não tem uma visão clara de quais e como os parâmetros do processo interferem nas características das partes. Neste caso, é recomendável o uso de projeto de experimentos. Para planejar eficientemente um experimento, recomenda-se a plataforma de planejamento da otimização do processo proposta no capítulo 5 desta dissertação.

Etapa 20: *Estabelecimento dos padrões de qualidade, padrões de operação e padrões de inspeção*

O desdobramento das partes estabelece as características de qualidade das partes individuais.

O estabelecimento dos padrões de qualidade são definidos a partir do histórico da capacidade do processo, dos resultados dos estudos de melhorias e dos investimentos previstos.

Para os itens de avaliação da qualidade determinados na etapa 15, são estabelecidos padrões de operação e inspeção. Os padrões de operação e inspeção são preparados de forma a atingir os padrões de qualidade planejados

Etapa 21: *Revisão do projeto e avaliação do protótipo*

Esta é a etapa final do detalhamento do produto, onde é efetuada a revisão crítica do projeto. Isto inclui uma análise qualitativa intensiva dos resultados dos testes dos protótipos, conduzidos de modo a reproduzir a forma como o produto será usado no mercado pelos próprios clientes.

Nesta fase, uma lista de defeitos pode ser feita, e podem ser revistas algumas informações de qualidade em contraponto com as já determinadas, atualizando, desta forma, o sistema.

3.4.8 Desdobramento para o Fluxo de Controle do Processo

(Desdobramento para o chão de fábrica)

Etapa 22: *Elaboração da matriz de controle de qualidade do processo*

A partir da matriz de planejamento do controle de processo é elaborada a matriz de controle de qualidade do processo. Nessa matriz serão estabelecidos padrões de controle específico para serem utilizados no chão de fábrica.

Para pontos de controle específicos (itens de inspeção e itens de controle), é preciso especificar quem deverá tomar as amostras, como estas deverão ser coletadas, qual o método de medição, qual o tamanho da amostra, como os resultados serão registrados e quais os responsáveis por ações corretivas.

As pessoas envolvidas com as atividades do chão de fábrica devem garantir a qualidade do produto. As reuniões do Círculo de Controle de Qualidade (CCQ) podem ser utilizadas para discutir melhorias no processo.

O resultado dessa discussão deve ser implementado no chão de fábrica, consolidando os objetivos de qualidade da cadeia de processos.

Etapa 23: *Adição de pontos de controle do processo via desdobramento inverso das funções*

No QFD o desdobramento é efetuado de "cima para baixo", isto é, do cliente ao chão de fábrica. Desta forma, as pessoas envolvidas deverão analisar criticamente o sistema que está sendo implantado.

Os operadores e chefes de setor devem opinar sobre a eficácia dos pontos de controle, da amostragem e do método de inspeção, verificando se os pontos de controle são suficientes ou supérfluos.

Num processo de manufatura, muitas pessoas constroem um produto; é importante que os operadores tenham responsabilidade sobre o item todo, tendo conhecimento sobre as características de qualidade da parte de sua responsabilidade e como elas estão relacionadas com o produto final.

Os operadores devem ter claro as funções de cada parte e as características de qualidade definidas a partir dos usuários a fim de garantir a qualidade do produto final.

Etapa 24: *Gerenciando por prioridades*

No QFD, é importante estabelecer a priorização dos pontos vitais. A priorização deve ser aplicada na maioria das etapas e, se possível, deve ser baseada em análises estatísticas.

É preciso cuidados no gerenciamento dos itens marcados com (S) referindo-se a partes críticas para segurança e (F) nas partes críticas para funcionalidade. Estas partes devem ser incluídas no projeto, e, se possível, devem ser anotadas quais características de qualidade do produto final são afetadas.

Dependendo do caso, estudos de confiabilidade ou otimizações experimentais devem ser realizados a fim de permitir estabelecer ajustes e controles mais eficientes. A plataforma de planejamento da otimização experimental, apresentada no capítulo 5, pode ser utilizada nesta etapa.

As partes marcadas com (S) e (F) na etapa 13 devem ter um controle especial. Estas partes tendem a aumentar os custos de manufatura. Contudo, quando analisadas conjuntamente com partes não críticas em geral há alternativas de redução de custo sem comprometimento da qualidade.

Etapa 25: *Desdobramento de fornecedores externos*

Muitas companhias recebem matéria prima e componentes de fornecedores externos, assim estabelecer bons sistemas de qualidade dentro da própria companhia pode não ser suficiente para a garantia da qualidade.

A matriz dos processos irá vincular a qualidade do produto final com as matérias primas e partes que vêm dos fornecedores.

Essa matriz esclarece os processos dos fornecedores, devendo ser preenchida em conjunto pela equipe de desenvolvimento e o fornecedor em questão.

Seria aconselhável um conhecimento de QFD por parte dos fornecedores, já que a matriz deve ser completamente entendida por eles.

Etapa 26: *Análise ativa de causa e efeito*

Para a fabricação do produto, nas fases iniciais é relativamente fácil identificar a relação entre os parâmetros do processo e as características de qualidade de interesse.

Contudo, considerando todas os processos de processos de manufatura, torna mais difícil identificar os fatores responsáveis por algum problema de qualidade.

Essas relações poderão ser esclarecidas através do projeto de experimentos que identificarão quais parâmetros do processo têm efeito significativo sobre as características de qualidade. Posteriormente, estudos de otimização podem ser realizados a fim de encontrar a melhor combinação dos níveis dos parâmetros de processo que atendem aos alvos desejados das características de qualidade estudadas.

Estes estudos podem ser planejados de maneira eficiente pela plataforma de otimização do processo detalhada no capítulo 5 desta dissertação. A plataforma de planejamento da otimização do processo é utilizada em experimentos complexos que envolvem muitos parâmetros de processos associados com características críticas. Um dos principais objetivos é a priorização dos parâmetros do processo a serem incluídos no estudo, levando em conta a opinião dos engenheiros.

Etapa 27: *Retro-alimentação para alterações no produto ou desenvolvimento de nova geração de produtos*

As empresas devem desenvolver um banco de dados, com seu próprio sistema de informação de qualidade. As reclamações e os defeitos de vários processos devem ser incorporados e remetidos ao departamento de origem. Essas informações devem ser retro-alimentadas ao conjunto de matrizes do QFD, de forma a atualizar o sistema e impulsionar alterações no produto.

Pode-se realizar pesquisa para avaliar o grau de satisfação do usuário a respeito do produto que ele recebe. O sistema de desdobramento da qualidade deve ser aperfeiçoado gradativamente através de revisões. Esta é uma tarefa contínua, uma vez que os avanços tecnológicos criam novas demandas e vice-versa.

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PROCESSOS

O objetivo final da otimização experimental de um processo é identificar o ajuste dos parâmetros do processo que garantem maior qualidade, maior produtividade e menor custo do processo. Para a correta identificação desse ajuste ótimo, é necessário planejar a coleta de dados.

Muitas vezes num experimento, os dados são coletados e as conclusões são estabelecidas sem consideração de como estes dados foram obtidos. Um procedimento de coleta mal realizado pode levar a um desperdício financeiro e a resultados muitas vezes distorcidos da realidade. Desta forma, planejar um experimento envolve definir os dados que serão coletados, a fim de dar suporte às conclusões que serão obtidas.

Montgomery (1991) diz que o método de coleta de dados pode afetar as conclusões de um experimento. As atividades de planejamento que antecedem a experimentação são críticas para o sucesso do programa experimental.

A experimentação é parte de um processo científico e um meio de aprender a respeito de como se comportam sistemas e processos. No entanto, os livros que enfocam este assunto raramente ensinam como *planejar* a otimização.

Uma equipe de engenheiros, estatísticos e pessoas envolvidas no processo deveriam ser chamadas para discutir e planejar a otimização, unindo conceitos estatísticos e técnicos. Em geral, os engenheiros têm suposições sobre o processo que serão utilizadas na fase de planejamento. Com a opinião dos engenheiros ou especialistas, muitos aspectos devem ser discutidos previamente, tais como: Quantos dados serão coletados? Quais variáveis serão estudadas? Qual a sistemática de ensaios? A escolha do modelo experimental depende destes aspectos.

Montgomery (1991) listou algumas questões importantes a serem discutidas no planejamento de um experimento:

- 1- Quais fatores podem afetar as características de qualidade estudadas?
- 2- Existem outros fatores que podem afetar as características de qualidade estudadas?
- 3- Para cada tratamento, quantas repetições deveriam ser realizadas?
- 4- Como as unidades a serem estudadas deveriam ser atribuídas para cada tratamento?
- 5- Qual o método de análise dos dados a ser adotado?
- 6- Qual a diferença esperada para as médias observadas no valor das características de qualidade medidas entre dois tratamentos diferentes?

Essas questões devem ser respondidas antes da realização do experimento. Os resultados finais também dependem da amplitude de variação dos fatores estudados e da maneira pela qual os dados são coletados.

Hicks (1964) enfatizou três fases importantes do projeto: o experimento, o projeto e a análise.

O experimento

Inclui uma declaração do problema a ser resolvido. É importante que venham à tona os pontos de vista sobre o que o experimento pretende fazer. A definição cuidadosa do problema é um meio de chegar-se à solução.

Também deve ser feita uma escolha cuidadosa das características de qualidade que serão investigadas no experimento. Elas são mensuráveis? Elas podem ser medidas com acurácia pelo instrumento disponível? Se elas não são mensuráveis, que tipo de resposta pode ser esperada? Que tipo de distribuição é razoável esperar-se de cada característica de qualidade?

É também necessário definir quais parâmetros do processo que podem afetar as variáveis resposta. Esses parâmetros podem ser controlados e assumir certos níveis especificados ou podem ser deixados de fora através de um processo de aleatorização?

Além disso, outras considerações podem ser feitas: Os níveis podem ser fixados em determinadas condições? Podem ser variados quantitativamente? ou qualitativamente? Essas considerações ajudam a definir o experimento.

O projeto

Considerações importantes sobre a coleta de dados deveriam ser discutidas; por exemplo, qual o tamanho da diferença que é detectada apesar da presença da variabilidade, e qual o tamanho da amostra a ser tomada para um determinado experimento. Na prática, o tamanho da amostra é arbitrário e dependerá das restrições experimentais, do tipo de projeto escolhido e dos recursos disponíveis para pesquisa.

A ordem dos ensaios na realização do experimento deve ser a mais aleatória possível. A aleatorização na ordem dos ensaios tenderá a distribuir o efeito dos fatores não controláveis. Assim, como pode ser feita a aleatorização? Como serão testadas as unidades?

Decididas as rodadas, escolhe-se qual o modelo matemático que será utilizado para descrever o experimento. Este modelo deve mostrar as variáveis resposta como função de todos os fatores que serão estudados e também de restrições impostas ao experimento devido ao método de aleatorização.

A análise

Esta etapa final inclui o procedimento de coleta de dados e a elaboração de testes estatísticos a serem utilizados para tomar decisões. As decisões devem ser tomadas estatisticamente e sempre que possível deve-se utilizar análises gráficas para facilitar a compreensão do sistema em estudo.

As três fases do experimento propostas por Hicks (1964) são:

O experimento

- 1- definir o problema;
- 2- escolher as variáveis resposta;
- 3- selecionar os fatores controláveis a serem variados;
- 4- escolher os níveis dos fatores (quantitativos ou qualitativos, fixos ou aleatórios);

O Projeto

- 1- número de observações a serem realizadas;
- 2- ordem da experimentação;
- 3- método de aleatorização utilizado;
- 4- modelo matemático que descreve o experimento;

A análise

- 1- coletar e processar dados;
- 2- realizar testes estatísticos;
- 3- interpretar os resultados;

Um experimento bem planejado é realizado para reunir objetivos específicos e satisfazer restrições práticas.

Um programa experimental exige conhecimento do processo, dos fatores importantes, das amplitudes de variação dos fatores, do número apropriado de níveis a serem utilizados e das unidades apropriadas para medir as variáveis resposta. Geralmente não se sabe perfeitamente a resposta para essas questões, mas elas são esclarecidas ao longo das investigações.

Montgomery (1991) relata que, para o uso da abordagem estatística, ao projetar e analisar um experimento, é necessário previamente possuir uma idéia do que será estudado, como os dados serão coletados e um mínimo entendimento qualitativo de como os dados serão analisados.

Montgomery (1991) e Coleman e Montgomery (1993) propuseram as seguintes etapas para planejar eficientemente um programa que vise a otimização experimental:

Planejamento

- 1- reconhecimento e definição do problema;
- 2- seleção das variáveis resposta;
- 3- escolha dos fatores controláveis e dos respectivos níveis de variação;
- 4- escolha dos fatores a serem mantidos constantes;
- 5- identificação dos fatores ruído;
- 6- determinação das restrições experimentais;
- 7- escolha do projeto experimental:
 - ordem dos ensaios;
 - número de tratamentos;
 - número de repetições por tratamento;
- 8- definição da matriz experimental;

Execução do experimento

- 1- verificação do planejamento;
- 2- coleta dos dados;
- 3- análise dos dados;
- 4- otimização dos parâmetros do processo;
- 5- conclusões e recomendações.

Os procedimentos sugeridos por Hicks (1964) e Montgomery (1991) são similares. Pelo fato de Montgomery ter descrito as etapas de maneira mais completa, optou-se por discutir o assunto seguindo as etapas sugeridas por este autor.

4.1 ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE UM EXPERIMENTO

4.1.1 Definição do Problema

O reconhecimento e estabelecimento do problema não é tarefa fácil. É necessário discutir os objetivos do experimento. Nesta fase é importante a reunião de uma equipe de pesquisadores que envolva pessoas que tenham um conhecimento sobre o processo e, se necessário, estatísticos, gerência, consumidores, operadores, etc.

Uma clara definição do problema contribui substancialmente para um melhor entendimento do sistema e para a solução final.

Coleman e Montgomery (1993) relatam que durante o reconhecimento e formulação do problema é importante o envolvimento da equipe, integrando conhecimentos teóricos e práticos. A definição dos objetivos deve basear-se em informação de experimentos prévios, coleta de dados observacionais, leis físicas e a opinião de especialistas. Tais informações estabelecem um contexto para o experimentador entender claramente que novo conhecimento pode ser ganho e motiva a discussão a respeito dos resultados prévios. Isso aumenta o conhecimento do grupo e colabora para que se alcance mais rapidamente um consenso. Além disso, também contribui para descobrir regiões experimentais de interesse particular e outras que poderiam ser ignoradas.

Coleman e Montgomery (1993) consideram que o conhecimento empírico da equipe deve ser o ponto de partida para planejar o estudo experimental. Mesmo incertas, as tentativas de prever o resultado do experimento antes deste ser rodado podem favorecer a integração da equipe e frequentemente levam à revisão da escolha dos níveis dos fatores. Muitas falhas em experimentos industriais residem na má definição dos fatores controláveis e de um planejamento deficiente. É importante aliar, desta forma, o conhecimento teórico ao conhecimento prático. Frequentemente, o recurso usado é variar um fator controlável e deixar os demais constantes. Comprovadamente este é um erro comum que distorce os resultados, pois ignora as interações entre os fatores controláveis existentes.

4.1.2 Seleção das Variáveis Resposta

As variáveis resposta ou variáveis dependentes são as características de qualidade que serão estudadas no experimento.

Para selecionar uma variável resposta, o experimentador deve se certificar que esta variável realmente fornece uma informação útil a respeito do processo sob estudo.

Coleman e Montgomery (1993) estabeleceram alguns critérios para escolha das variáveis resposta:

- a variável resposta deve refletir, com máxima fidedignidade, a qualidade de interesse para a unidade experimental;
- deve ter uma unidade de medida apropriada;
- deve estar associada a um valor alvo ou a uma condição desejável (que motive o experimentador). Desta maneira, uma comparação pode ser usada para originar “medidas de desempenho” dos resultados da variável resposta. Por exemplo, a diferença absoluta das médias e o desvio-padrão das diferenças são medidas de desempenho para muitas condições experimentais;
- é preferível utilizar ensaios não destrutivos e não prejudiciais, assim repetições podem ser realizadas e o erro experimental pode ser quantificado;
- não deve estar próxima dos limites naturais. Caso contrário, a variável não discriminará bem.

Blake et alii (1994) relatam que o conhecimento científico e de engenharia deve ser usado quando selecionamos uma variável resposta. Estes autores sugerem algumas diretrizes para seleção destas variáveis:

- iniciar a escolha considerando a demanda de qualidade dos consumidores;
- escolher uma variável resposta contínua, sempre que possível. As variáveis contínuas têm mais informação que as variáveis ordinais e binárias;
- encontrar uma variável resposta que seja fácil de medir. O sistema de medida deve ser preciso, acurado e estável;

- selecionar uma variável resposta que descreva uma função da engenharia do subsistema ou processo. Para sistemas mais complexos, tentar subdividi-los em subsistemas e considerar um experimento para cada função crítica.

Blake et alii (1994) consideram que a escolha de uma boa variável resposta inicia com uma meta econômica ou de engenharia. Em seguida, é preciso identificar os mecanismos fundamentais e as leis físicas que afetam essas metas. Assim, a escolha das variáveis resposta deverá aumentar o entendimento destes mecanismos e de suas propriedades físicas.

As variáveis resposta devem ser, ainda, completas, práticas e fundamentais. Coleman e Montgomery (1993) consideram completas as variáveis resposta que fornecem toda a informação necessária para o entendimento dos mecanismos físicos básicos que refletem as metas econômicas e de engenharia. A variável resposta é prática se é fácil de ser medida; é fundamental se é independente de outras variáveis. Por exemplo, para o estudo de barras de sabão, o peso é uma variável que pode depender da maneira de fazer o corte. Neste caso, seria melhor utilizar como variável resposta o peso específico, que se constitui em uma variável fundamental.

4.1.3 Escolha dos Fatores Controláveis e dos Respectivos Níveis de Variação

Os fatores controláveis são aqueles parâmetros do processo que a equipe investigará no experimento. Em modelos matemáticos, os fatores controláveis serão também chamados de variáveis independentes.

O experimentador deve escolher os fatores para variar no experimento e seus respectivos intervalos de variação, especificando os níveis em que as rodadas serão realizadas. Deve também determinar como estes fatores serão controlados e como eles serão medidos.

Conforme Hahn (1977), uma parte importante do planejamento de um programa experimental é identificar os fatores que afetam a resposta e decidir o que fazer a respeito deles. A decisão de como escolher estes fatores pode ser feita conjuntamente com o experimentador e o estatístico. Contudo, a responsabilidade pela identificação dos

fatores é do experimentador porque, em geral, esta decisão envolve um compromisso entre informação, custo e tempo.

A maneira pela qual são medidos os fatores controláveis deve ser previamente discutida. Para Hahn (1977), é importante um procedimento padrão para medir cada fator. Este procedimento deve ser preestabelecido e documentado. Particularmente, quando uma variável é ordinal, um padrão deve ser discutido inicialmente, principalmente se os julgamentos são realizados por diferentes observadores.

Intervalo de investigação e níveis dos fatores controláveis

O experimentador deve decidir a região de interesse de cada fator (que é a amplitude na qual cada fator será variado) e em quantos níveis as rodadas serão realizadas. Para responder essas questões, é necessário conhecimento do processo.

Segundo Hahn (1977), um número mínimo de condições ou níveis de um fator controlável é determinado de acordo com o modelo escolhido. Quando se supõe uma relação linear entre o fator e a variável resposta, são suficientes dois níveis. Para uma relação quadrática, são necessários no mínimo três níveis.

Quanto à amplitude de variação, esta deverá ser definida pelos engenheiros, respeitando os limites operacionais. Conforme Coleman e Montgomery (1993), o experimentador deve selecionar uma amplitude grande o suficiente para produzir um efeito observável e para cobrir uma boa proporção da amplitude total de operação.

Para Hahn (1977), restringindo os limites dos fatores controláveis, reduz-se o tamanho e a complexidade do experimento, porém se limita o escopo da inferência dos resultados obtidos.

Interação entre os fatores controláveis

Dois ou mais fatores interagem um com o outro quando o efeito de um deles sobre a variável resposta depende das condições do outro fator.

Para Hahn (1977), o conhecimento sobre a possibilidade de interação entre os fatores é uma informação importante. Tal conhecimento, por exemplo, poderá auxiliar na definição de quais tratamentos irão em cada bloco

Além disso, a interação é uma informação útil a ser discutida antes da realização do experimento, pois identificam quais efeitos podem ou não ser confundidos.

4.1.4 Escolha dos Fatores a Serem Mantidos Constantes

Os fatores constantes são parâmetros do processo que a equipe deseja manter fixos no experimento. Segundo Caten (1995), os fatores a serem mantidos constantes são aqueles parâmetros do processo que podem ser controlados, mas que possivelmente não tenham efeito significativo sobre a resposta ou cujos efeitos já sejam conhecidos. O experimentador deve estabelecer um mecanismo para tornar estes fatores constantes durante a experimentação.

4.1.5 Escolha dos Fatores Ruído

Processos variam com o tempo, uma vez que equipamentos e processos estão sujeitos a efeitos de contaminação, oxidação, umidade, etc. Ou seja, há fatores que não podem ser controlados ou que a equipe não deseja controlar. Estes fatores são chamados fatores ruído.

Os fatores ruído diferem dos fatores mantidos constantes, pois não podem ser fixados deliberadamente a determinados níveis para todas as unidades experimentais. Conforme Coleman e Montgomery (1993) alguns podem ser medidos e monitorados, pelo menos para garantir que estejam dentro de certos limites, outros devem ser avaliados subjetivamente por especialistas.

A aleatorização, blocagem, análise de covariância e análise estratificada reduzem o impacto dos fatores ruído.

4.1.6 Determinação das Restrições Experimentais

Box et alii (apud Coleman e Montgomery, 1993, p. 10) ressaltaram: “A Atenção à detalhes pode determinar o sucesso ou falha de um experimento”. As restrições práticas devem ser amplamente discutidas pela equipe, uma vez que uma simples restrição desconhecida pode invalidar um projeto experimental.

As restrições experimentais podem impedir a aleatorização completa do experimento. Definições como o tipo de projeto a ser executado, bem como o número possível de ensaios dependem do conhecimento dessas restrições. Mais uma vez, conhecimentos práticos e teóricos serão necessários para identificar as restrições.

4.1.7 Escolha do Projeto Experimental

Se os passos anteriores são executados corretamente, este passo é relativamente fácil. A escolha do projeto envolve a consideração do tamanho de amostra (número de repetições), a seleção adequada de fatores e a determinação de bloquear ou outras restrições envolvidas.

Para um experimento ter validade científica, devem ser empregados métodos estatísticos que estruturam a coleta de dados, validando as conclusões obtidas.

Existem três princípios básicos num experimento: replicação, aleatorização e blocagem. A replicação permite ao experimentador obter uma estimativa do erro experimental. Esta estimativa torna-se a unidade base de medida para determinar se as diferenças observadas entre os tratamentos são estatisticamente significativas.

A aleatorização, conforme Hahn (1977), é a atribuição de forma aleatória dos tratamentos às unidades, da ordem nas rodadas dos testes e na realização das medidas, entre outros. Segundo Ribeiro (1996), a aleatorização da seqüência de ensaios assegura que as respostas estarão livres de qualquer viés. Quando a aleatorização não é empregada, corre-se o risco de coletar dados viciados, que podem mascarar a análise de algum fator. Muitos métodos estatísticos exigem que os erros das observações sejam independentes e identicamente distribuídos. A aleatorização valida a primeira suposição.

Blocagem, por sua vez, é uma técnica utilizada para aumentar a precisão de um experimento. Um bloco representa um conjunto de condições relativamente

homogêneas dentro das quais diferentes condições dos fatores controláveis são comparadas. Para Hahn (1977), a principal razão de rodar um experimento em blocos é assegurar que o efeito de um fator externo não contamine a avaliação dos fatores controláveis do experimento. Além disso, blocagem permite que o efeito da variável blocada seja removido do erro experimental.

4.1.7.1 Principais projetos experimentais

a) Blocos Aleatorizados

Este projeto remove a variabilidade devido ao efeito do bloco, a fim de diminuir o erro experimental. A variabilidade é removida pelo conhecimento e controle de alguns fatores externos.

Montgomery (1991) argumenta que projetos em blocos completos aleatorizados são amplamente utilizados e facilmente implementados na prática. Unidades de equipamentos de teste ou maquinaria são freqüentemente diferentes em suas características operacionais e são um típico fator de blocagem. Além destes, lotes de matéria-prima, operadores e tempo são geralmente fontes de variabilidade num experimento que muitas vezes pode ser controlado através de blocagem.

Quenouille (1953) ressalta que, nestes projetos, é fácil lidar com parcelas perdidas e outras complicações experimentais que podem ser ajustadas. Para estes projetos, pode ser usado qualquer número de repetições e qualquer número de tratamentos.

b) Projetos fatoriais

Projetos fatoriais são experimentos que envolvem dois ou mais fatores. Um projeto fatorial completo é aquele onde são estudadas todas as combinações dos níveis de todos fatores investigados.

Uma das vantagens dos projetos fatoriais é que eles permitem investigar possíveis interações entre os fatores.

c) Projetos fatoriais 2^k

Um projeto 2^k é um experimento fatorial com k fatores a dois níveis. Conforme Montgomery (1991), os projetos 2^k são particularmente úteis em estágios iniciais de programas experimentais quando existem muitos fatores a serem investigados.

Como existem somente dois níveis de cada fator, deve-se assumir que a resposta é aproximadamente linear na amplitude dos níveis dos fatores escolhidos. No entanto, quando existe dúvidas a respeito da suposição de linearidade, o fatorial 2^k poderá ser ampliado para detectar o efeito de uma curvatura com a adição de pontos centrais. A ampliação consiste em replicar n rodadas com todos os fatores em seus níveis centrais.

Uma questão importante dos fatoriais 2^k ocorre quando, por motivos de limitações de recursos, o experimentador realiza somente uma replicação, e portanto, não será possível uma estimativa independente do erro. Uma alternativa para estimar o erro de um fatorial não replicado é assumir como erro as interações de ordem mais alta.

d) Projeto fatorial fracionado

Um projeto fatorial fracionado é freqüentemente utilizado quando há um grande número de combinações de níveis dos fatores e não é possível rodar todas estas combinações. Desta forma, é selecionada apenas uma fração para ser rodada.

O projeto fracionado é viável quando se está estudando 5 ou mais fatores. Quando há muitos fatores a serem investigados, a sua aplicação é fortemente recomendada pois leva a uma grande economia na experimentação.

e) Projetos fatoriais confundidos em blocos

Há muitas situações onde é impossível conduzir uma repetição completa de um projeto fatorial em condições homogêneas, sendo necessária a divisão do experimento em blocos, onde o bloco pode ser um dia, um lote homogêneo de matéria prima, um laboratório, e assim por diante. Para dividir o experimento em blocos, é necessário confundir o efeito do bloco com algum efeito, ou seja, alguma informação ficará

sacrificada. Sendo assim é melhor confundir o bloco com o efeito de interação de ordem mais alta, pois esse efeito raramente será significativo.

f) Quadrados-latinos

São projetos experimentais onde cada nível de um fator é combinado somente uma vez com cada nível de dois outros fatores. São considerados projetos econômicos, pois exigem poucas rodadas, no entanto, não permitem o estudo de interações.

Para Montgomery (1991), o projeto quadrado latino é utilizado para eliminar as diferenças de duas fontes de variabilidade, pois os quadrados latinos sistematicamente permitem blocagem em duas direções. Assim sendo, as linhas e colunas representam duas restrições de aleatorização.

Projetos deste tipo são possíveis quando o número de níveis de ambas as restrições é igual ao número de níveis do fator principal. Em geral, um quadrado latino de p fatores a p níveis (um quadrado latino $p \times p$) é um quadrado contendo p linhas e p colunas.

g) Projetos de parcela subdividida

São projetos experimentais no qual o efeito principal é confundido em blocos devido a dificuldades na execução de um experimento completamente aleatorizado. Eles representam um compromisso entre a eficiência estatística e as possibilidades práticas.

Segundo Montgomery(1991) os projetos de parcela subdividida são resultados de projetos de blocos aleatorizados onde não é possível proceder uma aleatorização completa (ver Box, et alii, 1978 e Montgomery, 1991).

h) Projetos de superfície resposta

Conforme Hahn (1977), são projetos indicados para experimentos multifatoriais com variáveis independentes quantitativas. A relação entre as variáveis independentes e a variável resposta é ajustada usando técnicas de análise de regressão.

Projetos de superfície resposta incluem o projeto composto ortogonal e os projetos rotacionais.

O conceito de uma superfície resposta envolve uma variável dependente (Y), chamada de variável resposta e muitas variáveis independentes (x_1, x_2, \dots, x_k). Se todas as variáveis são mensuráveis, a superfície resposta pode ser expressa como:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4.1)$$

Hicks (1964) exemplifica: Considerando duas variáveis independentes, tais como X_1 temperatura e X_2 tempo e uma variável dependente, por exemplo o rendimento (Y) de um processo químico, uma superfície é plotada em três dimensões, com X_1 na abscissa, X_2 na ordenada e Y é plotado perpendicular ao plano X_1X_2 . Se os valores de X_1X_2 que produzissem o mesmo valor de Y fossem conectados, forma-se uma figura com uma série de linhas de iguais rendimentos (linhas de contorno).

i) Projetos Compostos centrais

Conforme Myers (1971) os projetos compostos centrais são projetos fatoriais de primeira ordem acrescidos de pontos centrais que permitem a estimação de coeficientes de uma superfície de segunda ordem. Isto porque, para o ajuste de uma superfície resposta de segunda ordem no mínimo três níveis são exigidos para estimar os coeficientes do modelo.

Quando existem vários fatores, por exemplo, 3 fatores, o modelo para a variável resposta pode ser aproximado por um plano ou um hiperplano, da forma:

$$Y = B_0x_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + B_3x_3 + \varepsilon \quad (4.2)$$

Para uma superfície de primeira ordem, no mínimo quatro pontos devem ser tomados para estimar os quatro coeficientes B_i . Considerando que há três fatores envolvidos, considera-se um fatorial 2^3 . Como este projeto tem oito condições experimentais nos vértices, esses oito pontos serão suficientes para estimar os coeficientes B_i .

Se o plano não fornecer um bom ajuste, um modelo de segunda ordem pode ser ajustado. Para o caso de dois fatores, a superfície resposta tem a forma:

$$Y = B_0x_0 + B_1x_1 + B_{11}x_1^2 + B_{12}x_1x_2 + B_{22}x_2^2 + \varepsilon \quad (4.3)$$

Um projeto simples para este modelo seria um pentágono (cinco pontos) mais pontos centrais. Segundo Hicks (1964), estes projetos são simplificados quando são rotacionais. Um projeto é dito rotacional quando tem igual poder de predição em todas as direções definidas a partir de um ponto central e na qual todos os pontos experimentais são equidistantes de um ponto central.

Um fatorial 2^3 com pontos ao longo dos eixos dos fatores tem $8+6 = 14$ pontos e mais um ponto central totalizando 15 pontos. Este projeto é chamado projeto composto central de segunda ordem (conforme figura 4.1).

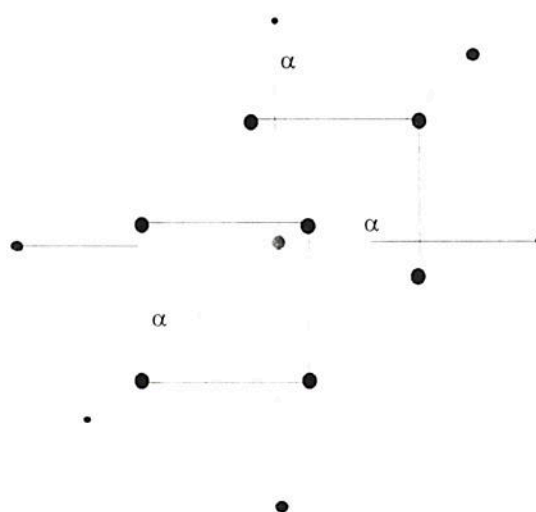


Figura 4.1 - Projeto composto central para três fatores

Em escala codificada, as coordenadas dos 8 pontos do cubo são $(\pm 1, \pm 1, \pm 1)$, para avaliar efeitos quadráticos são acrescentados os pontos ao longo dos eixos dos fatores $(\pm\alpha, 0, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0)$ e $(0, 0, \pm\alpha)$. O valor de α pode ser calculado de tal forma que o projeto seja ortogonal ou rotacional.

Myers (1971) diz que o projeto composto central fornece ao experimentador uma certa flexibilidade para escolha do valor de α , dependendo das propriedades desejadas. Quando é desejado ortogonalidade, o valor de α deve ser escolhido de tal forma que a distância (α) do ponto central a cada um dos pontos axiais seja tal que todos os efeitos e interações estimados no modelo de segunda ordem sejam ortogonais. Para isso, a distância α é dada pela seguinte expressão (Riboldi e Nascimento, 1994):

$$\alpha = \left\{ \frac{\left[(F + T)^{1/2} - F^{1/2} \right]^2 F}{4n_2} \right\}^{1/4} \quad (4.4)$$

onde F é o número de pontos do fatorial (por exemplo, $F=2^k$ se é utilizado um fatorial completo) e $T= 2K+n_2$, isto é, o número de pontos adicionais num projeto composto central, incluindo os pontos centrais (n_2). E, além disso, $F+T=N$, onde N é o número total de pontos.

Para que o projeto composto central seja rotacional, o valor de α escolhido dependerá do número de pontos na parte fatorial, assim:

$$\alpha = (F)^{1/4} \quad (4.5)$$

4.1.8 Definição da Matriz Experimental

A matriz experimental refere-se aos tratamentos utilizados, à ordem dos ensaios e ao número de repetições. A definição da matriz dependerá do projeto experimental escolhido e das restrições práticas discutidas nas etapas anteriores.

A matriz experimental discriminará completamente o experimento. Cada linha representa um ensaio a ser realizado. Assim, em cada linha haverá a definição dos níveis em que devem ser fixados os fatores controláveis para o ensaio em questão.

A matriz será útil também para verificar a ortogonalidade. Para um experimento ser ortogonal, a matriz de correlação dos fatores controláveis deve ser a matriz identidade.

4.2 EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO

4.2.1 Verificação do Planejamento

Quando o experimento é rodado, é essencial um processo cuidadoso para garantir que os ensaios ocorram de acordo com o planejado. Erros nos procedimentos experimentais neste estágio podem invalidar o experimento.

Os procedimentos para documentar o registro dos dados devem ser claros e discutidos previamente. Além do registro dos valores medidos, as condições experimentais devem ser registradas.

Hahn (1977) prescreveu que os valores de quaisquer outras variáveis que podem afetar a variável resposta deveriam também ser registrados. Por exemplo, embora não se possa controlar a umidade do ambiente, se este fator pode afetar os resultados, ele deveria ser medido. Variações nos fatores a serem mantidos constantes, ou outros eventos não planejados deveriam ser também registrados. Tais valores são chamados de “covariáveis” e podem ser quantificados dentro da análise estatística, reduzindo o erro experimental.

4.2.2 Análise dos Dados

Métodos estatísticos não podem provar que o fator ou os fatores tenham um efeito particular. Contudo, eles fornecem estimativas e intervalos de confiança para os parâmetros de interesse.

Em outras palavras, métodos estatísticos não permitem que uma hipótese seja provada inequivocamente, mas eles permitem medir a probabilidade de erro na conclusão a um nível de significância estabelecido.

Quenouille (1953) argumenta que o uso de um projeto experimental adequado, resultante de um planejamento estatístico, não necessariamente removerá qualquer incerteza, mas capacitará o pesquisador a determinar um valor e um intervalo de confiança para os resultados. A aplicação de métodos estatísticos ajuda a avaliar a reprodutibilidade dos resultados. Não somente os efeitos são estimados em experimentos

bem planejados, mas também limites podem ser encontrados dentro dos quais, com uma certa probabilidade, devem estar os verdadeiros valores dos efeitos.

É importante ressaltar que as conclusões limitam-se à região de inferência (ou intervalo de variação) dos fatores controláveis investigados no experimento.

4.2.3 Otimização dos Parâmetros do Processo

O projeto de experimentos irá indicar quais fatores controláveis têm efeito significativo na variável resposta.

Montgomery (1991) relata que, num experimento de caracterização, o interesse está em determinar quais fatores do processo afetam a variável resposta. A lógica do próximo passo é a otimização, que é determinar a região dos fatores controláveis que conduz à melhor resposta possível. Esta etapa será discutida no item 4.3.

4.2.4 Conclusões e Recomendações

Uma vez que os dados tenham sido analisados, o experimentador deve ter conclusões práticas a respeito dos resultados e recomendações referentes às ações a serem tomadas na seqüência. Métodos gráficos são úteis neste estágio. Experimentos de rodadas de confirmação devem ser realizados para validar as conclusões do experimento.

Durante todo o processo, é importante manter em mente que experimentação é uma parte importante do entendimento do processo, onde se formulam hipóteses a respeito do sistema. Novas hipóteses podem ser formuladas tomando como base os resultados dos experimentos.

4.3 OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE PRODUTOS E PROCESSOS

A otimização consiste em encontrar o ajuste dos fatores controláveis, que conduzirá a resposta aos melhores valores possíveis. Frequentemente, existe o interesse

em aproximar o valor (médio) das variáveis resposta de seus respectivos alvos e, simultaneamente, minimizar a variabilidade presente nas variáveis resposta.

Taguchi (apud Myers, Khuri e Vining, 1992) criou o termo de “projeto de parâmetro robusto”, que estuda o efeito dos fatores controláveis sob os fatores ruído. O objetivo é encontrar o ajuste dos fatores controláveis que torna o produto menos sensível aos fatores ruído (que representam as fontes de variabilidade).

A abordagem de Taguchi (apud Myers, Khuri e Vining, 1992) leva a medidas de desempenho que combinam a resposta média e a variabilidade. Os projetos empregados estão baseados em arranjos ortogonais: um arranjo “interno” que estabelece os níveis dos fatores controláveis e um arranjo “externo” para os fatores ruído. Sob certas suposições, a heterogeneidade do processo é resultado de uma interação entre fatores controláveis e fatores ruído. Taguchi sugere que a medida de desempenho atribuída a cada ponto de projeto do arranjo interno seja sintetizada num critério chamado razão sinal-ruído. A razão sinal-ruído é expressa pela relação entre a média (sinal) e o desvio-padrão (ruído). A forma desta relação depende dos objetivos do experimentador quanto a uma determinada variável resposta. Por exemplo, para o caso onde o objetivo é “valor alvo é melhor”, a razão sinal-ruído (numa transformação logarítmica) é dada por:

$$S/N = +10 \log \sum_{i=1}^n \left[\frac{\bar{Y}}{S} \right] \quad (4.6)$$

Onde \bar{Y} é a resposta média e S é o desvio-padrão estimado para a respectiva variável resposta e tratamento.

O uso da razão sinal-ruído tem sido criticado por diversos autores. (Ver Ribeiro e Elsayed, 1993; Myers, Khuri e Vining, 1992). Muitos autores têm proposto alternativas à abordagem de Taguchi. Algumas destas alternativas realçam o uso de procedimentos de metodologia de superfície de resposta (MSR), onde a modelagem da média e da variância são consideradas separadamente. O uso da MSR produz resultados mais eficazes que a razão sinal-ruído. Esta metodologia será apresentada a seguir.

4.3.1 Metodologia de Superfície de Resposta

Segundo Montgomery (1991), a metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas úteis para modelagem e análise de problemas na qual a resposta de interesse é influenciada por muitos fatores (variáveis independentes) e o objetivo é otimizar esta resposta.

Na maioria dos problemas de metodologia de superfície de resposta, a forma da relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. O primeiro passo da MSR é encontrar uma aproximação para a verdadeira relação funcional entre Y e o conjunto de variáveis independentes. Geralmente, um polinômio de baixa ordem é aplicado a uma região das variáveis independentes, e a aproximação é feita por um modelo de primeira ordem. Se existe uma curvatura no sistema, um polinômio de grau maior é ajustado, tal como o modelo de segunda ordem. O método de mínimos quadrados é utilizado para estimar os coeficientes do modelo polinomial.

O objetivo da metodologia de superfície de resposta é determinar as condições ótimas de um sistema ou determinar uma região do espaço dos fatores na qual as especificações de operação são satisfeitas.

O Método de Steepest Ascent ou método de máxima inclinação ascendente

Conforme Montgomery (1991), o método de máxima inclinação ascendente é utilizado para mover o experimento seqüencialmente ao longo do caminho de “subida mais rápida”, que é a direção que promove um incremento máximo na resposta. Se o objetivo é minimizar, o método é chamado de máxima inclinação descendente.

Neste método, a direção na qual a variável resposta aumenta mais rapidamente é perpendicular às linhas de isovalores da superfície resposta ajustada. Segundo Riboldi e Nascimento (1994), em geral, toma-se como caminho de máxima inclinação ascendente a linha a partir do centro da região de interesse que é perpendicular às linhas de isovalores da superfície ajustada (ver figura 4.2). Os passos ao longo do caminho são proporcionais aos coeficientes de regressão B_i . O tamanho do passo é determinado pelo experimentador baseado no seu conhecimento e em outras restrições práticas.

Experimentos são conduzidos ao longo do caminho especificado até que nenhum incremento na resposta seja observado, o que indicaria a vizinhança do ótimo.

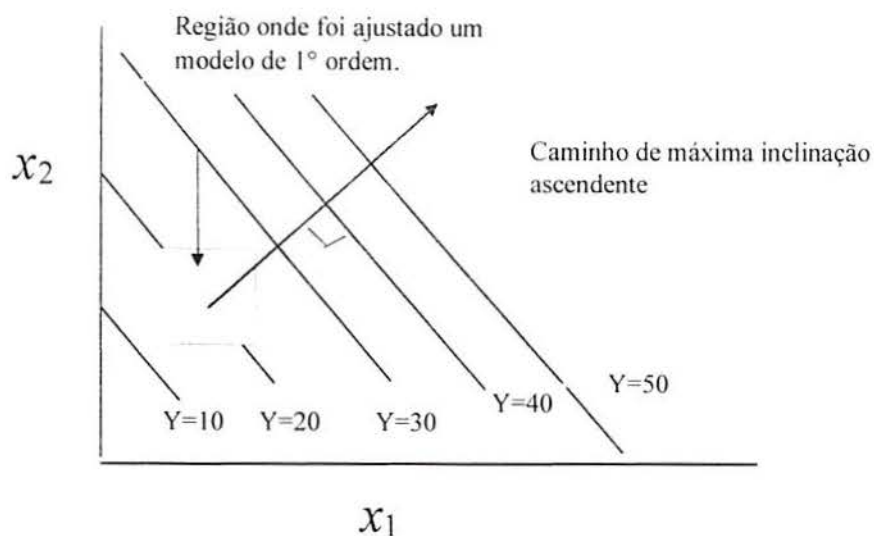


Figura 4.2 – Superfície de resposta de primeira ordem e caminho de máxima inclinação ascendente. Fonte: Montgomery, 1991, p. 524.

Para proceder a otimização, alguns autores utilizaram como funções objetivo a serem otimizadas, versões multivariadas da função perda quadrática de Taguchi, que será discutida a seguir.

4.3.2 A função Perda Quadrática de Taguchi

Segundo Taguchi (apud Byrne e Taguchi, 1987), a perda ocorre não somente quando alguma característica funcional do produto está fora das especificações, mas também quando esta característica está desviada do valor-alvo. O objetivo é reduzir a variabilidade em torno de um valor alvo ou “target”. A função perda quadrática proposta por Taguchi penaliza mesmo as pequenas distâncias do valor alvo e não somente quando um valor da característica encontra-se fora dos limites de especificação. Isso é facilmente observado através da expressão da função perda quadrática (ver, por exemplo, Montgomery, 1991; Ross, 1988 e Phadke, 1989).

A função perda quadrática é dada por:

$$L(y) = K(y - T)^2 \quad (4.7)$$

E o valor esperado da perda é dado por:

$$E(L) = K\left[(\bar{Y} - T)^2 + \hat{\sigma}^2\right] \quad (4.8)$$

onde:

- $L(y)$ perda associada a uma medida y da variável resposta Y (perda para uma unidade produzida);
- T o valor alvo para a variável resposta Y ;
- K é o coeficiente de custos, que converte a perda em unidades monetárias;
- $E(L)$ o valor esperado, isto é, a perda média para muitas unidades;
- \bar{Y} média estimada da variável resposta Y ;
- $\hat{\sigma}^2$ variância estimada da variável resposta Y ;

Segundo Phadke (1989) a função perda quadrática possui três variações dependendo do tipo de característica de qualidade: (1) *quanto menor melhor*, onde o experimentador deseja minimizar a característica de qualidade ou resposta de interesse; (2) *quanto maior melhor*, onde o experimentador está interessado em maximizar a característica de qualidade de interesse e finalmente, (3) *nominal é melhor*, onde o experimentador deseja que a característica de qualidade atenda a um determinado valor alvo.

A função perda de Taguchi considera somente o caso de uma única característica de qualidade a ser otimizada. No entanto, muitos produtos manufaturados tem mais de uma característica de qualidade consideradas importantes para o consumidor no produto.

No caso de experimentos que envolvem múltiplas respostas, pode ser difícil determinar um ajuste ótimo para os fatores controláveis, considerando todas as respostas simultaneamente.

Muitos autores propuseram diferentes versões multivariadas da função perda para otimização de múltiplas caracteísticas de qualidade. Alguns exemplos

comentados na literatura serão apresentados sem a pretensão de confrontá-los, já que a ênfase desta dissertação é o planejamento da otimização.

4.3.4 Métodos para Otimizar Experimentos de Múltiplas Variáveis resposta

Segundo Kapur e Cho (1991), no ambiente competitivo atual, a função perda quadrática pode não ser adequada para refletir a percepção dos consumidores a respeito da qualidade de um produto. Para uma simples característica de qualidade, a função perda quadrática é uma boa aproximação de muitos sistemas. Entretanto, do ponto de vista do consumidor, o produto é tipicamente avaliado por múltiplas características de qualidade.

Como estas múltiplas características de qualidade são geralmente interdependentes na vida real, a perda total não é somente a soma das perdas causadas por todas as variáveis resposta. Assim, os autores propuseram a seguinte função para estimar a perda:

$$L(y,t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^i K_{ij}(y_i - T_i)(y_j - T_j) \quad (4.9)$$

onde:

y_i um valor específico associado à variável resposta y_i , onde $i=1, \dots, Q$;

T_i o valor alvo associado à variável resposta i , para $i=1, \dots, Q$;

K_{ij} é o coeficiente de perda associado às variáveis resposta i e j .

Uma vez que a perda esperada é baseada em todos valores possíveis de Y , para avaliar-se a perda média, utiliza-se:

$$E[L(Y,t)] = \sum_{i=1}^m K_i \left[(\bar{Y}_i - T_i)^2 + \hat{\sigma}_i^2 \right] + \sum_{i=2}^m \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij} \left[\hat{\sigma}_{ij} + (\bar{Y}_i - T_i)(\bar{Y}_j - T_j) \right] \quad (4.10)$$

onde:

\bar{Y}_i média estimada para a variável resposta Y_i ;

$\hat{\sigma}_{ij}$ covariância estimada entre Y_i e Y_j ;

$\hat{\sigma}_i$ desvio-padrão estimado da variável resposta Y_i ;

K_i coeficiente de custos associado a variável resposta Y_i .

Pignatiello (1993) apresentou uma generalização da função perda quadrática proposta por Taguchi. A função perda esperada foi expressa em termos de um componente de variância e do quadrado dos desvios dos valores alvo. A forma da função perda proposta por Pignatiello é idêntica à função proposta por Kapur e Cho (1991). Para minimizar a perda esperada, Pignatiello propõe dois tipos de estratégias: a direta e a parcionada. A estratégia direta procura encontrar a melhor combinação dos fatores de projeto que minimizem a função perda proposta pelos autores e a parcionada assume que o experimentador tenha algum conhecimento prévio, dividindo os fatores controláveis entre aqueles que afetam a média e aqueles que afetam a variabilidade.

Ribeiro e Albin (1993) propuseram uma função perda quadrática chamada de função perda de contorno elíptico, onde a perda é modelada através dos desvios absolutos de um valor alvo e algumas restrições que são aplicadas quando necessárias. A função perda de contorno elíptico generalizada tem a seguinte forma:

$$L = \max\{L^*, w_q (Y_q - T_q)^2, q = 1 \dots Q\} \quad (4.11)$$

onde:

$$L^* = \sum_{q=1}^Q w_q (Y_q - T_q)^2 + \sum_{q=1}^Q \sum_{r=q+1}^Q c_{qr} \sqrt{w_q w_r} |Y_q - T_q| |Y_r - T_r| \quad (4.12)$$

$$-1 < c_{qr} < \infty, \quad w_q > 0 \quad \text{e para } q, r = 1, \dots, Q$$

A perda esperada da função perda elíptica considera a covariância dos desvios absolutos dos valores alvo para cada par de variável resposta.

$$E(L^*) = \sum_{q=1}^Q w_q \left[\text{var}(Y_q) + E(Y_q - T_q)^2 \right] + \sum_{q=1}^Q \sum_{r=q+1}^Q c_{qr} \sqrt{w_q w_r} \left[\text{cov}(|Y_q - T_q|, |Y_r - T_r|) + E(|Y_q - T_q| |Y_r - T_r|) \right] \quad (4.13)$$

onde:

- Y_q valor da variável resposta q para um determinado tratamento
- Y_r valor da variável resposta r para um determinado tratamento
- T_q valor alvo para a variável resposta q
- T_r valor alvo para a variável resposta r
- w_q peso atribuído à variável resposta q
- w_r peso atribuído à variável resposta r
- c_{qr} coeficiente de associação entre a variável resposta q e a variável resposta r

O coeficiente c_{qr} reflete o sinal do grau de associação entre duas variáveis resposta. Um coeficiente de associação é positivo quando a perda devido às duas variáveis resposta fora do alvo excede a soma individual das perdas de cada variável resposta fora do alvo. E o sinal é negativo quando a perda devido às duas variáveis resposta fora do alvo é menor que a soma das perdas individuais.

Ainda, w_q é a importância relativa das variáveis resposta e fornece o ajuste das diferenças das escalas de medidas. Os valores dos coeficientes c_{qr} e w_q são fornecidos subjetivamente segundo a opinião de especialistas.

Ribeiro (1993) aplicou uma função de perda multivariada a uma linha de produção de batons, contemplando três objetivos da engenharia de qualidade:

- 1- minimizar os desvios do alvo;
- 2- maximizar a robustez aos ruídos (minimizar a variabilidade);
- 3- maximizar a robustez às oscilações nos próprios parâmetros do processo;

A fim de capturar o terceiro objetivo descrito por Ribeiro (1993), isto é, o de maximizar a robustez às oscilações nos parâmetros do processo, Ribeiro (1993) e Elsayed e Ribeiro (1995) propuseram a função perda quadrática multivariada Z :

$$\hat{Z}(i) = \sum_{j=1}^Q w_j \left[\left(\hat{Y}_j - T_j \right)^2 + \hat{\sigma}_{y_j}^2 + \sum_{k=1}^K \hat{\sigma}_k^2 \left(\frac{\partial \hat{Y}_j}{\partial X_k} \right)^2 \right] \quad (4.14)$$

onde:

- $\hat{Z}(i)$ valor da função objetivo a ser minimizada; i refere-se a um certo tratamento;
- w_j peso atribuído à variável resposta Y_j ; $j = 1 \dots Q$, onde Q é o número de variáveis resposta;
- \hat{y}_j valores estimados para a média da variável resposta j do tratamento i ;
- T_j valor alvo para a variável resposta j ;
- $\hat{\sigma}_{y_j}^2$ variância estimada atribuída ao efeito dos fatores não controláveis da variável resposta j no tratamento i ;
- $\hat{\sigma}_k^2$ variância estimada do fator controlável k , durante a manufatura

Se os fatores controláveis que deveriam permanecer fixos em determinado ajuste oscilarem, isso provocará variabilidade na resposta. Esta variabilidade pode ser estimada a partir da expressão que se refere ao terceiro termo incorporado à função perda de Ribeiro (1993) e Elsayed e Ribeiro (1995):

$$\text{variância adicionada a } y = \sum_{k=1}^K \hat{\sigma}_k^2 \left[\frac{\partial \hat{Y}_j}{\partial X_k} \right]^2, \text{ para } X_1 \dots X_p \text{ independentes} \quad (4.15)$$

No caso das variáveis estarem correlacionadas, ver Elsayed e Ribeiro (1995).

Caten (1995) complementou a função perda proposta por Elsayed e Ribeiro (1995) levando em conta custos de produção, os quais, em alguns casos, podem depender do ajuste dos fatores controláveis.

Em teoria, é possível definir uma constante K que transforme os valores de perda devido à má qualidade (Z) em unidades monetárias, isto é:

$$C_{Q(i)} = K \times Z_{(i)} \quad (4.16)$$

A autora também considera os custos de matéria-prima e energia de fabricação de um produto em função dos fatores controláveis, ou seja:

$$C_{M(i)} = f(X_1, \dots, X_k) \quad (4.17)$$

Desta forma, a função objetivo proposta é dada por:

$$Z_{(i)}^* = C_{Q(i)} + C_{M(i)} \quad (4.18)$$

Esta função objetivo foi aplicada em alguns casos práticos de otimização, por exemplo de Pasa, Ribeiro e Caten (1995).

Os procedimentos propostos pelos autores citados nesta seção, são versões baseadas na função de perda quadrática. Outras formas de função objetivo poderão ser utilizados para solução de um problema de otimização de múltiplas variáveis resposta, conforme será visto a seguir.

Em geral, um sistema multivariado tem múltiplas respostas Y_1, \dots, Y_r que são todas influenciadas por um conjunto de fatores controláveis X_1, X_2, \dots, X_g . O objetivo é encontrar a solução X^* tal que cada resposta irá chegar o mais próximo possível de seu valor alvo.

Chang e Shivpuri (1995) utilizaram a abordagem MODM (Multiple-Objective Decision Making) para encontrar um ajuste ótimo global utilizando uma função utilidade que envolve a transformação de cada variável resposta estimada em um valor $d(i)$. Os autores compararam os resultados da abordagem da MODM com a proposta de maximização da função utilidade composta pela média geométrica do valor $d(i)$. As utilidades individuais são combinadas num valor de utilidade global D , que é a média geométrica dos $d(i)$'s. Isto é:

$$D = [d(1) \times d(2) \times \dots \times d(n)]^{1/n} \quad (4.19)$$

Para cada situação existe uma transformação adequada da variável resposta $Y(i)$ para $d(i)$. Por exemplo, em situações onde o objetivo é maximizar a variável resposta, é recomendado a seguinte transformação:

$$\begin{aligned} (i) &= 0 && \text{se } \hat{Y}(i) \leq Y(i_{\min}) \\ (i) &= \left(\frac{\hat{Y}(i) - Y(i_{\min})}{Y(i_{\max}) - Y(i_{\min})} \right)^r && \text{se } Y(i_{\min}) \leq \hat{Y}(i) \text{ e } \hat{Y}(i) \leq Y(i_{\max}) \quad (4.20) \\ (i) &= 1 && \text{se } \hat{Y}(i) \geq Y(i_{\max}) \end{aligned}$$

Quando o objetivo é minimizar $\hat{Y}(i)$, maximiza-se $-\hat{Y}(i)$. No caso de “nominal é melhor” ver Layne (1995) ou Chang e Shivpuri(1995).

Layne (1995) comparou três métodos para determinar os valores ótimos dos fatores controláveis em experimentos com múltiplas respostas. O primeiro método definia uma função perda que é minimizada quando as respostas preditas estiverem próximas do valor alvo. Isto seria padronizado pela divisão da diferença entre o valor alvo e o valor predito para a resposta e pelo erro padrão estimado para a resposta:

$$L(i) = \sum_{i=1}^n \frac{W_i (r_i - alvo(r(i)))}{desvio(r(i))} \quad (4.21)$$

Onde $r(i)$ é o valor predito para resposta obtido através de análise de regressão, W_i é a taxa de importância para a resposta i (atribuída pelo usuário) e n é o número de múltiplas respostas.

O segundo método é dado por uma função utilidade que foi usada por Chang e Shivpuri (1995) descrita anteriormente e, finalmente o terceiro método foi descrito por Khuri e Cornell (apud Layne, 1995) que aplicou uma função distância que considera o caso em que as respostas são correlacionadas através do uso de uma matriz de covariâncias:

$$D(Y - T) = \left[\frac{(Y - T) \cdot \sum^{-1} (Y - T)}{Z'(x) \cdot (X'X)^{-1} \cdot Z(x)} \right]^{1/2} \quad (4.22)$$

Onde Y é o vetor de respostas preditas, T é um vetor de valores alvo da resposta, $Z(x)$ é um vetor de níveis dos fatores para dada observações, X é a matriz de projeto e Σ é a matriz de covariância amostral das respostas.

Layne (1995) concluiu que a função perda proposta no primeiro método e a função utilidade são facilmente entendidas e permitem ao usuário atribuir pesos de acordo com a importância relativa das variáveis resposta. Por sua vez, a função distância tem seu ponto forte na consideração da correlação entre as variáveis resposta. Porém não é de fácil entendimento por não estatísticos e exige mais memória computacional, principalmente quando se estuda muitas combinações de variáveis.

CAPÍTULO 5

MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE PROCESSOS CRÍTICOS E PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Melhorias de qualidade devem ser obtidas a partir do conhecimento da qualidade demandada pelo cliente. É necessário que essa qualidade demandada seja um guia para as ações de melhoria.

Além disso, é importante aliar à qualidade demandada (visão do cliente), o conhecimento da equipe técnica e a estratégia gerencial (visão da empresa). Essas informações podem ser utilizadas na identificação de processos críticos para a qualidade.

Diante deste cenário, este capítulo pretende desenvolver um método que estabelece um elo entre o cliente e os processos da empresa, considerando aquilo que é importante para o consumidor e os processos existentes na companhia. De posse deste conhecimento, a ênfase é dada para aqueles processos cuja melhoria pode ser obtida através da otimização experimental.

O método escolhido para traduzir a opinião do cliente em requisitos técnicos utiliza matrizes que seguem a estrutura do QFD. Essas matrizes permitem o entendimento das relações entre as características de qualidade que interessam ao cliente e os processos relacionados a essas características. O entendimento dessas relações permite priorizar as ações de melhoria, dirigindo ações para os processos críticos, que devem ser controlados ou otimizados.

Muitas técnicas estatísticas propõem diferenciados modelos matemáticos para a coleta e análise de dados, porém poucos autores discutem como planejar a otimização e quais são as etapas anteriores à aplicação de tais técnicas. Mizuno e Akao (1994), na descrição das etapas do QFD, menciona que nas etapas 14 e 19 (ver capítulo 3) é

necessário melhorar o sistema ou testar um protótipo utilizando projeto de experimentos, porém não descreve como planejar essa ação.

Coleman e Montgomery (1993) propuseram um método de organização dos dados para o planejamento experimental através de folhas-guia. No entanto, o uso das folhas-guia, não segue a ótica de desdobramento da qualidade, o que pode conduzir a uma otimização experimental desvinculada do sistema produtivo global.

Para o planejamento da otimização dos processos, propõe-se o uso de uma plataforma, cuja principal contribuição é a matriz de planejamento da otimização de processos. A plataforma de planejamento de otimização pode ser utilizada isoladamente quando a equipe já tem conhecimento dos processos a serem otimizados ou pode ser utilizada conjuntamente com o método de identificação dos processos críticos. Uma visão geral do método é apresentada na figura 5.1, enquanto que a plataforma de otimização é apresentada na figura 5.2. .

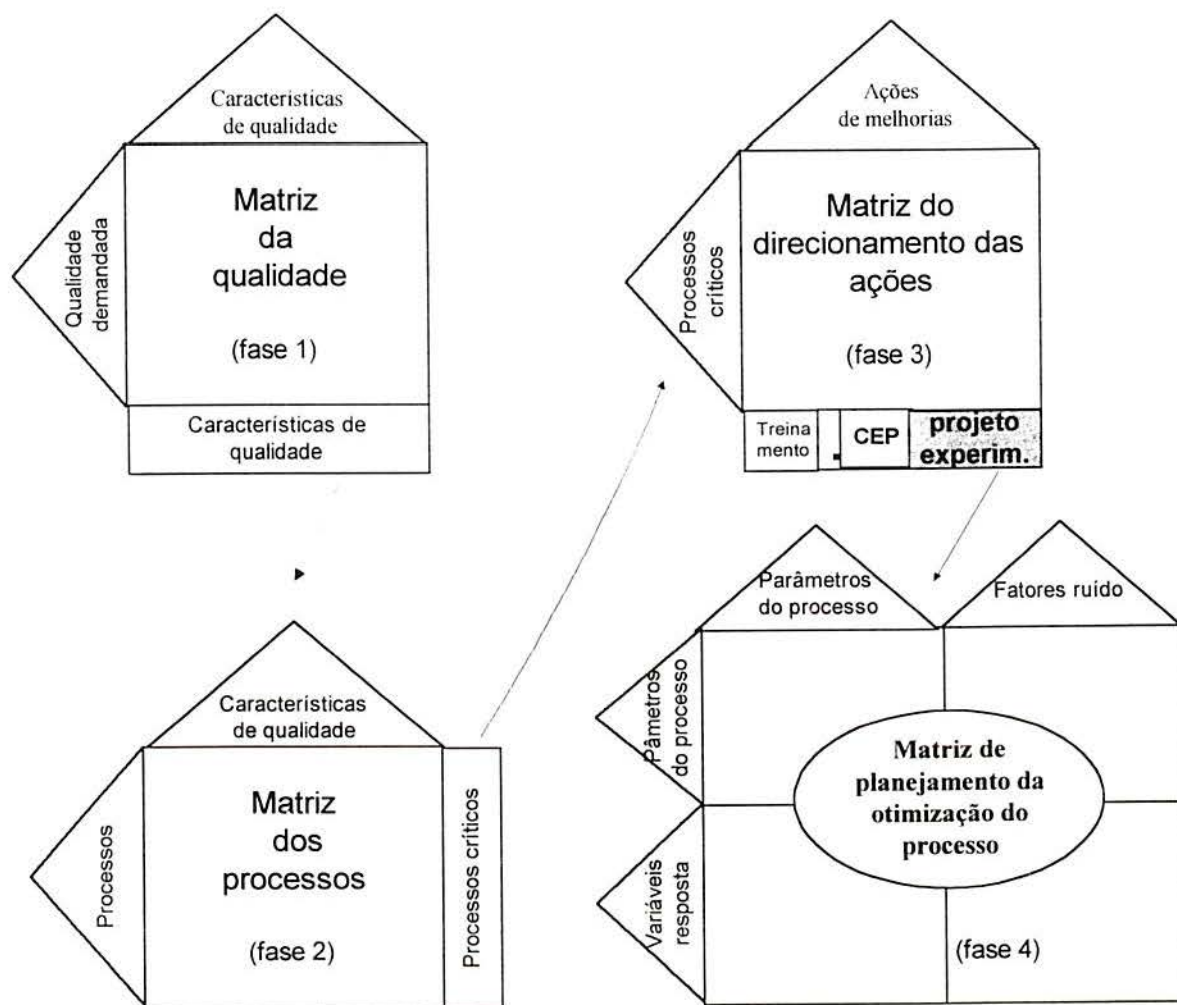


Figura 5.1 - Método de identificação de processos críticos para a qualidade e planejamento da otimização experimental

As etapas do método podem ser subdivididas em quatro fases interdependentes. A **fase 1** refere-se à construção da matriz da qualidade, que cruza a qualidade demandada com as características de qualidade e prioriza essas características de qualidade. A **fase 2** utiliza a matriz de processos, que cruza as características de qualidade com os processos, priorizando os processos. Na seqüência, na **fase 3**, é traçado um plano de ações para os processos prioritários. Finalmente, a **fase 4** trata das etapas para o planejamento da otimização experimental. A figura 5.2 mostra o detalhamento das etapas que constituem as quatro fases do método.

É possível estabelecer ações de melhoria do processo utilizando as fases 1, 2 e 3. Essas fases propiciam uma troca de conhecimento e incentivam a discussão entre os integrantes da equipe, a partir da qualidade demandada pelo cliente. Desta forma, poderão ser tomadas ações de melhoria, tais como: controle estatístico de processo, padronização, treinamento, troca de ferramentas, etc. Nessa dissertação, a ênfase é dada aos processos que necessitem de otimização experimental. O planejamento da otimização experimental é realizado na fase 4.

Vale observar que, quando a equipe já tem conhecimento dos processos críticos, o planejamento da otimização experimental poderá ser desenvolvido independentemente das fases anteriores.

Assim sendo, este capítulo está estruturado em duas partes: (i) o item 5.1 descreve as fases 1,2 e 3, que se referem à identificação dos processos críticos, e (ii) o item 5.2 descreve o planejamento da otimização experimental, constituindo-se a fase 4.

O método proposto neste capítulo foi desenvolvido a partir das referências bibliográfica: Ribeiro e Echeveste (1996); Ribeiro e Caten (1996b), Ribeiro, Echeveste e Caten (1996).

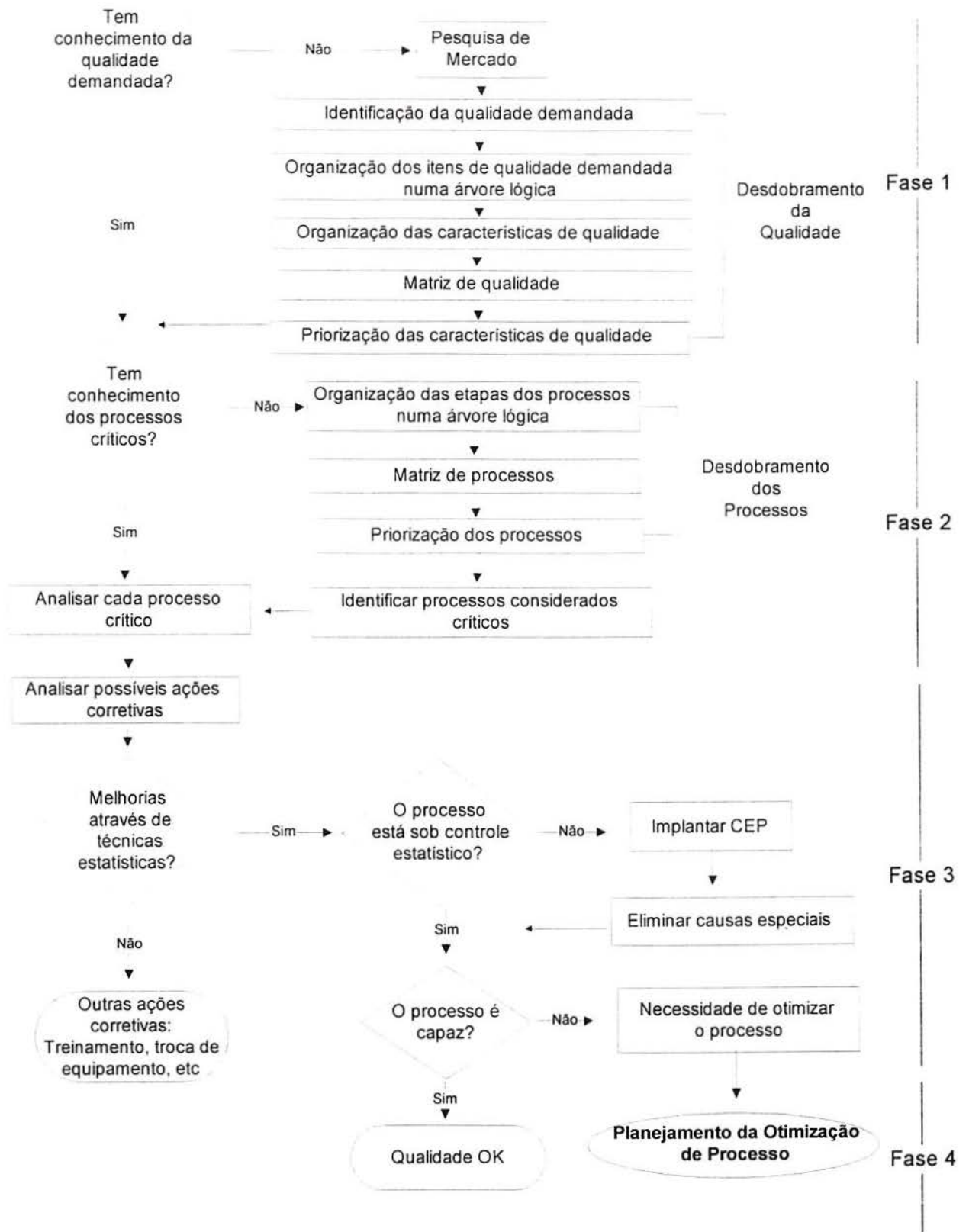


Figura 5.2 - Etapas do método de identificação e análise dos processos críticos para a qualidade e planejamento de otimização experimental.

5.1 MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS CRÍTICOS ATRAVÉS DO USO DAS MATRIZES DO QFD.

5.1.1 Desdobramento da Qualidade

Entrada: Qualidade demandada pelo cliente e características de qualidade

Saída: Características de qualidade priorizadas

5.1.1.1 *Identificação da qualidade demandada*

As características desejadas pelos clientes são os itens da qualidade demandada. A identificação dos clientes e dos itens da qualidade demandada pode ser feita através de pesquisa de mercado.

Sempre que possível, é importante a obtenção da opinião do consumidor como fonte primária, utilizando questionários, entrevistas ou ainda outras técnicas de pesquisa de mercado. Porém, uma pesquisa interna com as principais reclamações, dados de outras pesquisas ou artigos publicados sobre o assunto também podem servir como fontes para a identificação dos itens da qualidade demandada.

5.1.1.2 *Organização dos itens da qualidade demandada numa árvore lógica*

Os itens levantados pela pesquisa devem ser organizados numa árvore lógica e desdobrados em níveis primário, secundário e terciário de detalhe.

O desdobramento dos itens da qualidade demandada deve ser feito com cautela, uma vez que será o alicerce para as etapas posteriores. A árvore lógica deve ser equilibrada e composta por itens mutuamente exclusivos. Esses aspectos são fundamentais para a correta atribuição dos pesos aos itens de qualidade demandada.

5.1.1.3 Priorização dos itens da qualidade demandada

Um índice final poderá ser elaborado de forma que considere todos aspectos julgados importantes pela equipe. Normalmente este índice toma como base os resultados da pesquisa de mercado.

Para avaliação dos itens da qualidade demandada sugere-se a escala apresentada na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Escala de avaliação para os itens da qualidade demandada.

Avaliação	Valor da escala
Importância muito forte	5
Importância forte	4
Importância de moderada a forte	3
Importância moderada	2
Pouca importância	1
Nenhuma importância	0

Primeiramente, a equipe atribui um grau de importância para cada um dos itens de qualidade demandada do nível primário. Esta importância é transformada em pesos percentuais.

Da mesma forma, a equipe atribui um grau de importância para cada item de qualidade do nível secundário. Este grau reflete a importância daquele item para a qualidade demandada do nível primário a qual pertence.

A importância relativa para cada item de qualidade demandada secundário foram dados a partir do grau de importância, ponderados pelo percentual atribuído à qualidade demandada primária.

Isto é, a importância relativa dos itens de qualidade demandada secundários é dada por:

$$Q_{mn} = \frac{Q_m \times G_n}{\sum_n G_n} \quad (5.1)$$

onde:

Q_{mm} importância relativa da qualidade demandada do nível primário m secundário n

Q_m importância relativa da qualidade demandada do nível primário m

G_n grau atribuído pela equipe a qualidade demandada do nível secundário n

A distribuição de pesos é feita de forma que a soma de todos itens de qualidade do nível primário é 100%. Enquanto que a soma dos itens de qualidade do nível secundário é igual à percentagem do item primário a qual pertence e assim sucessivamente para os itens de nível terciário.

Para a atribuição adequada de pesos para os itens da qualidade demandada é importante observar que o detalhamento de cada item seja feito de forma equilibrada, ou seja, em princípio todos os itens primários devem ser desdobrados no mesmo nível de detalhe. O mesmo equilíbrio também deve ser observado quando se desdobra os itens terciários.

Além disso, outro ponto importante a ser observado é se a definição dos itens é feita de modo clara, a fim de evitar superposições, isto é, os itens da qualidade demandada devem ser mutuamente exclusivos, para não se correr o risco de superestimar um item, considerando-o mais de uma vez.

A ponderação dos itens da qualidade demandada deve ser exaustivamente discutida e difundida entre todos os componentes da equipe responsável pelo estudo.

5.1.1.4 Organização das características de qualidade

O objetivo dessa etapa é identificar as características de qualidade que atendem aos itens da qualidade demandada pelo cliente. As características de qualidade são aspectos mensuráveis que avaliam a qualidade demandada.

O desdobramento das características de qualidade é realizado pela equipe técnica, que é formada por pessoas de diferentes áreas que possam contribuir para o estudo com o seu conhecimento.

5.1.1.5 Construção da Matriz da qualidade

A matriz da qualidade é uma matriz que relaciona a qualidade demandada com as características de qualidade (figura 5.3). O preenchimento da matriz é realizado com base no conhecimento da equipe técnica que é questionada com respeito à intensidade das relações entre as características de qualidade e os itens da qualidade demandada. Geralmente, a escala utilizada para representar a intensidade das relações é 9, 3 e 1 ou 9, 5 e 1, para representar uma relação forte, moderada e fraca respectivamente.

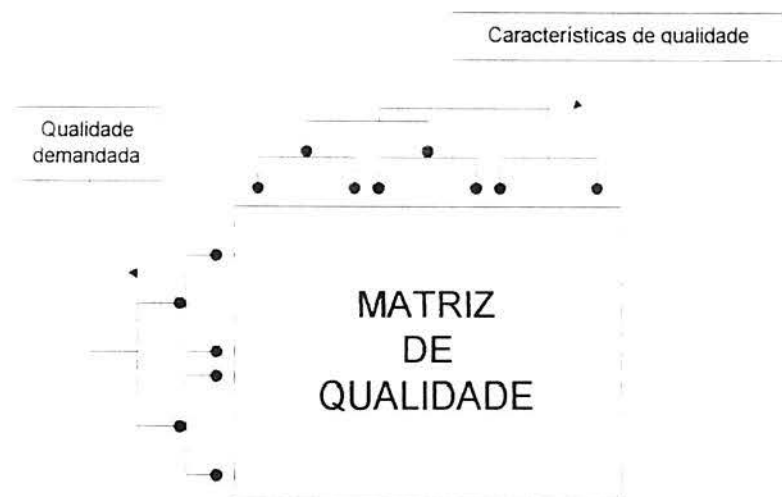


Figura 5.3 - Desenho esquemático da matriz da qualidade

5.1.1.6 Priorização das características de qualidade

O resultado da matriz da qualidade é a identificação das características de qualidade prioritárias. A priorização é feita através de um índice, normalmente uma média aritmética ponderada que leva em conta a importância da qualidade demandada e as relações no interior da matriz. Outros elementos poderão ser incluídos como a frequência de reclamações, análise competitiva, etc.

A priorização das características de qualidade, basicamente, é feita por um índice que calcula o total dos pesos atribuídos a cada característica de qualidade ponderada pelo peso relativo de cada item da qualidade demandada.

Uma característica de qualidade é considerada importante se:

- (i) atende a itens da qualidade demandada que são muito importantes. e/ou
- (ii) atende a vários itens da qualidade demandada. e/ou
- (iii) possui relações fortes com os itens da qualidade demandada.

Em linhas gerais, a priorização final é realizada considerando a importância absoluta de cada característica de qualidade. Isto é,

$$C_j = \sum_i (Q_i \times R_{ij}) \quad (5.2)$$

onde:

- Q_i importância da qualidade demandada de nível terciário i
- C_j importância da característica de qualidade j , ($j=1, \dots, C$)
- C número de características de qualidade
- R_{ij} intensidade do relacionamento entre a qualidade demandada i e a característica de qualidade j

Para facilitar a visualização e análise, a importância das características de qualidade pode ser representada por meio de um gráfico de Pareto.

5.1.2 Desdobramento dos Processos

Entrada: Características de qualidade e etapas dos processos

Saída: Etapas críticas

5.1.2.1 Organização das etapas dos processos numa árvore lógica

O desdobramento dos processos é feito a partir do conhecimento técnico da equipe que inicialmente desenha o macrofluxo das principais etapas dos processos.

Baseado no macrofluxo, as etapas dos processos de manufatura são identificadas e organizadas numa árvore lógica e, a seguir, relacionadas com as características de qualidade priorizadas na etapa anterior, formando a matriz dos processos.

5.1.2.2 *Matriz dos Processos*

A matriz da qualidade priorizou as características de qualidade, segundo o conhecimento técnico da equipe, tomando como base a qualidade demandada pelo cliente. A partir das características de qualidade priorizadas, o passo seguinte é identificar quais etapas dos processos são responsáveis pela garantia destas características.

A matriz dos processos é uma matriz que cruza as características de qualidade com as etapas dos processos (figura 5.4). A matriz é preenchida de forma similar à matriz da qualidade, utilizando uma escala que quantifica a intensidade da relação entre cada característica da qualidade e as etapas dos processos responsáveis pelo seu atendimento.

O preenchimento da matriz dos processos é uma tarefa importante para localizar quais etapas estão relacionadas com as características de qualidade prioritárias. Assim, as melhorias serão focalizadas sobre as etapas dos processos importantes sob o ponto de vista da qualidade demandada pelo cliente.

A construção da matriz de processos é crucial para a identificação das etapas dos processos críticas para a qualidade, pois nesta fase localiza-se quais etapas dos processos são responsáveis pelo atendimento das características de qualidade consideradas importantes pela equipe técnica que, por sua vez, tomou como base a opinião do cliente.

O preenchimento da matriz é realizado pela equipe técnica que é questionada com respeito à intensidade das relações entre as etapas dos processos e as características de qualidade.

A matriz dos processos possui duas características importantes:

(i) permite a fácil visualização das relações de todas as características de qualidade importantes na melhoria da qualidade do produto;

(ii) possui uma riqueza de informações que supera aquela necessária para a alimentação das etapas posteriores. Isso porque a matriz dos processos é um meio de documentar as relações entre características importantes e cada etapa operacional do processo. Um problema no produto pode ter sua solução facilitada com o entendimento das relações mostradas na matriz.

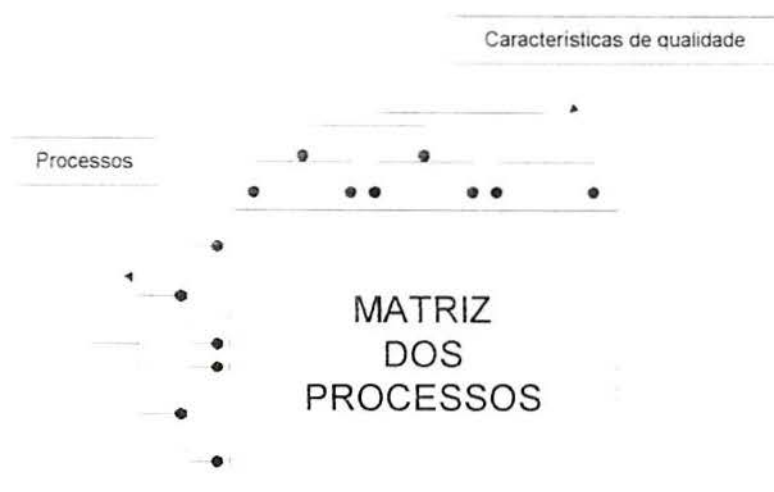


Figura 5.4 - Desenho esquemático da matriz dos processos

5.1.2.3 Priorização dos processos

O objetivo principal da matriz de processos é localizar em quais etapas dos processos são construídas as características de qualidade consideradas relevantes para o cliente. Com o preenchimento da matriz é possível priorizar as etapas dos processos tomando como base as relações estabelecidas no interior da matriz, que serão ponderadas pela importância relativa das características de qualidade, conforme definido em 5.1.1.6.

Assim, uma etapa do processo é considerada importante se:

- i) atende a características de qualidade que são muito importantes e/ou;
- ii) está associado com muitas características de qualidade e/ou;
- iii) possui relações fortes com essas características.

O índice de priorização poderá incluir outros aspectos como, por exemplo, a criticidade daquela etapa do processo do ponto de vista de produtividade ou custos. A equipe deverá entrar num consenso para o cálculo do índice no início do estudo, de forma que o mesmo consiga refletir a importância daquela etapa para o sistema global de manufatura. Isso porque cada sistema tem suas particularidades que deverão ser consideradas na identificação e priorização das etapas críticas.

Para priorização das etapas dos processos sugere-se um índice que considere as relações assinaladas no interior da matriz ponderadas pelo peso relativo de cada característica de qualidade.

Ribeiro e Caten (1996) propõem o seguinte índice para priorização das etapas dos processos:

$$P_i = \sum_j (C_j \times PR_{ij}) \quad (5.3)$$

onde:

P_i importância da etapa de processo i

C_j importância da característica de qualidade j

PR_{ij} intensidade do relacionamento entre a etapa de processo i e a característica de qualidade j

Aqui pode-se perceber quais as etapas são críticas para a qualidade, ou seja, identificam-se aquelas etapas responsáveis pelo ganho ou perda de determinadas características de qualidade importantes para o cliente.

A priorização final das etapas dos processos pode ser feita considerando um fator de correção que se refere à existência de controles atuais e a frequência de falhas.

Os controles atuais referem-se àquelas etapas do processo que já estão sendo fortemente monitoradas. A avaliação dos controles atuais e da frequência de ocorrência de falhas nas etapas dos processos têm como objetivo ponderar o índice P_i , atribuindo uma importância maior para aquelas etapas do processo onde o controle é fraco e a frequência de falhas no processo é alta.

Assim sendo, sugere-se a seguinte escala para avaliação dos controles atuais:

Tabela 5.2 - Escala atribuída aos controles atuais

Controles Atuais	Valor da escala
Forte	0,5
Moderado	1,0
Fraco	1,5
Nenhum	2,0

A frequência de falhas é avaliada por uma escala que prioriza aquelas etapas do processo nas quais a equipe verifica uma alta frequência de ocorrência.

A escala sugerida é apresentada na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Escala atribuída a frequência de falhas

Frequência de Falhas	Valor da escala
Muito Baixa	0,5
Baixa	1,0
Média	1,5
Alta	2,0

Assim a importância corrigida (P_i^*) da etapa de processo i pode ser calculada usando o seguinte formulário:

$$P_i^* = P_i \times \sqrt{A_i \times F_i} \quad (5.4)$$

onde:

- P_i^* importância corrigida da etapa de processo i
- A_i intensidade dos controles atuais existentes nas etapas do processo i
- F_i intensidade da frequência de ocorrência de falhas nas etapas do processo i

A importância de uma etapa do processo que não apresenta nenhum controle e apresenta alta frequência de falhas pode ser duplicada e, da mesma forma, essa importância pode ser reduzida pela metade para uma etapa do processo que apresente forte controle atual e muito baixa ocorrência de falhas.

5.1.3 Direcionamento das Ações de Melhoria

Entrada: Etapas de processo críticas e ações de melhoria

Saída: Ações para cada etapa de processo.

A equipe técnica, após identificar as etapas de processos prioritários, direciona ações a serem realizadas para melhoria desses etapas. Essas ações poderão ser de monitoramento, utilizando o controle estatístico de processo (CEP), de padronização e redução do *setup*, ou ainda outras ações como treinamento, aquisição de equipamentos, implantação de novas tecnologias, etc. Vale ressaltar que as ações são propostas pela equipe, podendo ser um conjunto de ações diferentes das que estão listadas aqui.

Aquelas etapas dos processos que, segundo a opinião da equipe, necessitem de ajustes operacionais serão otimizadas. A esses casos é pertinente o planejamento da otimização experimental.

A ênfase aqui será dada para melhorias através de técnicas estatísticas. Conforme a figura 5.2, há três alternativas principais: (i) se o processo está sob controle estatístico e é capaz, a qualidade está satisfeita; (ii) se o processo está fora de controle estatístico é necessário implantar ou intensificar o CEP e remover as causas especiais; e (iii) se o processo está sob controle estatístico, mas é incapaz, é necessário um estudo de otimização.

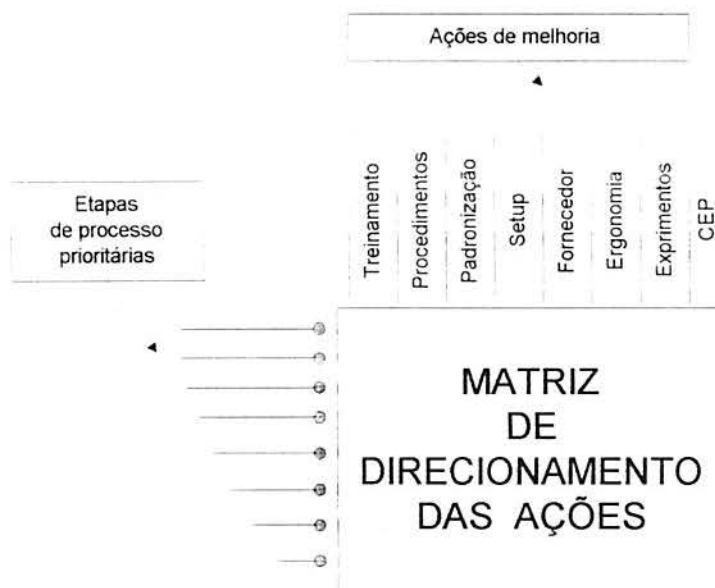


Figura 5.5 - Desenho esquemático da matriz de direcionamento das ações

A partir da definição das possíveis ações, constrói-se uma matriz cruzando as etapas prioritárias e as ações de melhoria descritas anteriormente.

O preenchimento da matriz pode ser feito a partir da seguinte escala:

Tabela 5.4 - Escala atribuída ao direcionamento das ações de melhoria

Ação	Valor da escala
Não se aplica	0
Pouco importante	1
Importante	2
Muito Importante	3

5.1.4 Planejamento da Otimização Experimental de Processo

Entrada: Etapa de processo a ser otimizada.

Saída: Modelo estatístico e matriz experimental

O planejamento da otimização experimental é constituído de 7 etapas, desde a definição das variáveis resposta até a determinação da matriz experimental que será usada como base para a coleta de dados (ver figura 5.6).

A partir da matriz experimental, o próximo passo é a execução do experimento e a otimização dos parâmetros do processo.

As etapas do planejamento da otimização do processo serão discutidas no item 5.2.1.

5.2 PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO ATRAVÉS DA MATRIZ DE PLANEJAMENTO

A proposta desta fase é planejar de forma eficiente e eficaz o programa experimental. Essa contribuição é diretamente proporcional à complexidade do problema. Para problemas que envolvem um grande número de variáveis inter-relacionadas, é muito difícil ou mesmo impossível o planejamento da otimização do processo se não for seguido um método estruturado.

Outro ponto importante é a redução do tempo de análise e solução dos problemas. A utilização das etapas propostas acelera todo o processo de planejamento do experimento, pois seleciona os parâmetros do processo mais importantes e utiliza o conhecimento da equipe para a otimização, restringindo a região experimental e facilitando a busca do ajuste ótimo.

As etapas serão desenvolvidas através de uma plataforma de planejamento que inclui tabelas e a matriz de planejamento da otimização experimental (ver Anexo). Essa plataforma foi construída a partir de experiências práticas com processos industriais que foram objeto de otimização experimental. As tabelas e a matriz que constituem a plataforma foram designadas para serem discutidas e preenchidas por uma equipe multidisciplinar constituída de engenheiros, estatísticos, técnicos, especialistas no processo, etc. A plataforma é apropriada para experimentos que envolvem um grande número de parâmetros, onde o experimentador não tem uma idéia clara de quais parâmetros do processo deveriam ser investigados. Além disso, outro ponto importante é a discussão que o preenchimento da plataforma estimula aos integrantes da equipe, uma vez que traz à tona o conhecimento que a equipe detém antes da realização do experimento. Isso porque todo experimento é melhor conduzido se é planejado a partir do conhecimento técnico. Não considerar esse conhecimento aumenta a probabilidade de, por exemplo: testar variáveis que não possuem uma relação pronunciada com as características de qualidade finais do produto; negligenciar as restrições experimentais ou interações significativas, entre outros. Isso faria com que o modelo estatístico não representasse o fenômeno estudado e, conseqüentemente a otimização experimental não traria as melhorias desejadas.

Quando Coleman e Montgomery (1993) propuseram as folhas-guia, o objetivo era diminuir as lacunas entre a equipe técnica e o profissional que detém o conhecimento estatístico e levar o corpo técnico a discutir questões genéricas, que precisam ser esclarecidas antes da execução do experimento. Isso porque, mesmo que supridas as lacunas entre a teoria e a prática, a equipe multidisciplinar necessitaria de um meio de discutir e inferir sobre os parâmetros envolvidos no estudo. Um químico, por exemplo, teria uma idéia do fenômeno sobre seu ponto de vista. Já alguém que é um supervisor de linha pode ter outra visão do assunto. Ou mesmo um elemento da gerência ou do departamento de custos pode ter outra visão que faz parte do seu próprio conhecimento prévio.

Tanto a plataforma proposta nesta dissertação como as folhas-guias propostas por Coleman e Montgomery (1993), além de sistematizar a coleta de informação para o planejamento do experimento, ajudam a focalizar os objetivos e o escopo do estudo.

No entanto, uma crítica às folhas-guias é que a aplicação das mesmas é bastante trabalhosa, necessitando de um razoável conhecimento estatístico, o que dificulta sua utilização no meio industrial. Outra crítica que poderia ser feita às folhas-guias é o fato dos autores analisarem o problema de otimização experimental de forma isolada, sem vinculá-lo com o sistema produtivo como um todo.

Em contraponto, a plataforma proposta se insere perfeitamente no ambiente do QFD e pode ser vista como uma alternativa às folhas-guias propostas por Coleman e Montgomery (1993). Na verdade, a plataforma é composta de 7 etapas que são um meio de facilitar a execução do planejamento da otimização experimental.

A maior contribuição da plataforma é a matriz de planejamento do processo descrita no item 5.2.1.4. Essa matriz é de fácil utilização e tem sido aplicada com sucesso em diversos exemplos de problemas industriais que necessitem de otimização.

A seguir, serão descritas todas as etapas da plataforma de planejamento de otimização do processo. A figura 5.6 ilustra a plataforma do planejamento.

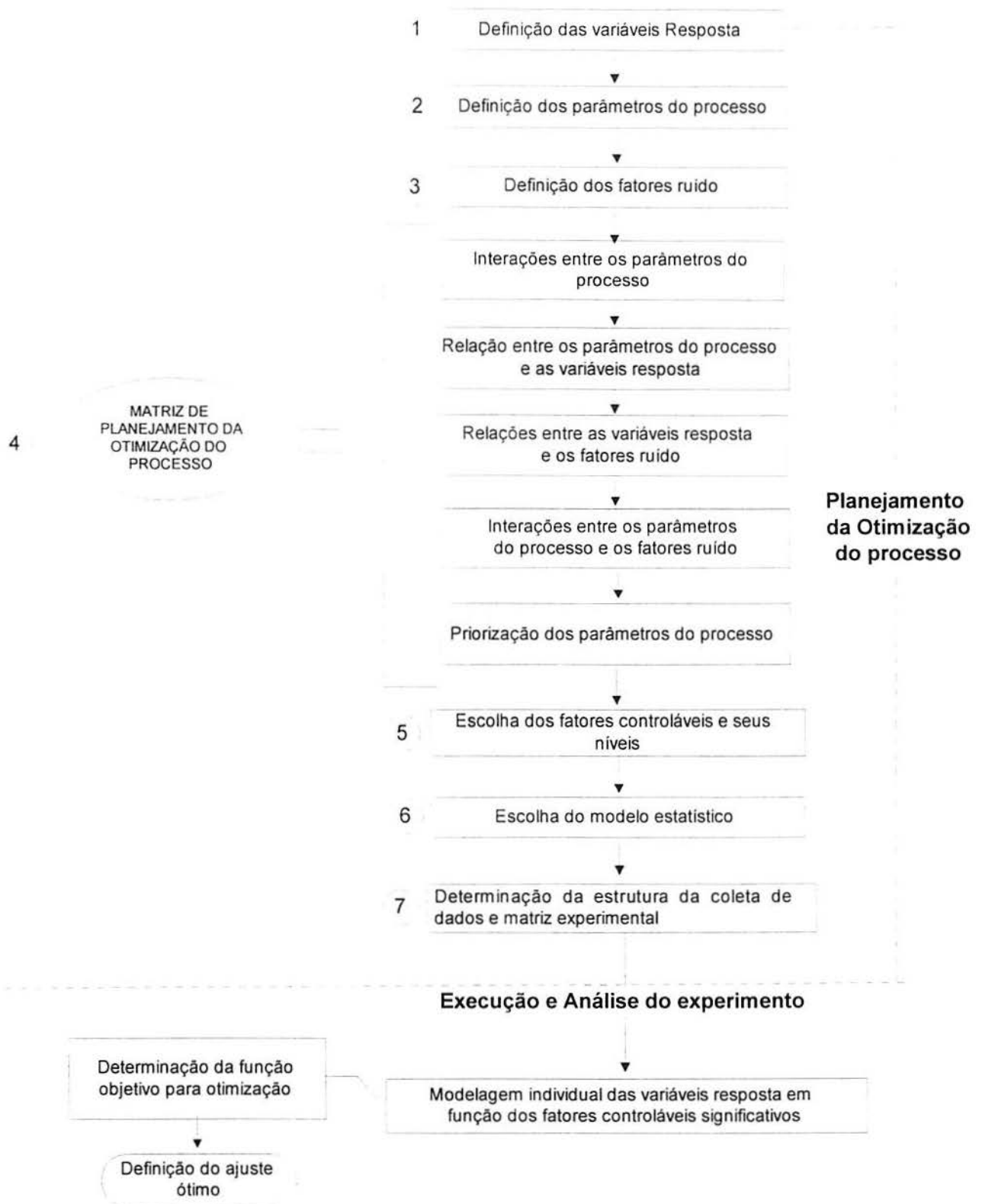


Figura 5.6 - Plataforma de planejamento da otimização experimental de processos

5.2.1 Descrição das Etapas de Planejamento da Otimização Experimental

5.2.1.1 Definição das variáveis resposta

O planejamento da otimização constitui-se de 7 etapas. A primeira dessas etapas é a definição das variáveis resposta a serem otimizadas.

Nas fases anteriores foram definidas as características de qualidade prioritárias e essas foram associadas às etapas dos processos. Por sua vez, as etapas dos processos prioritários foram avaliadas quanto às possíveis ações de melhoria. Assim, as etapas dos processos que necessitam de ajustes devem ser otimizadas. As características de qualidade já definidas nas fases anteriores servirão de diretrizes para a identificação das variáveis respostas a serem incluídas no experimento. Vale comentar que as características de qualidade identificadas em 5.1.1 são características do produto final e as variáveis resposta são específicas do chão-de-fábrica, mas devem guardar uma forte relação com as características de qualidade do produto final.

A identificação e caracterização das variáveis resposta é feita na primeira tabela da plataforma de planejamento de otimização do processo. Para escolha das variáveis resposta, é importante que essas traduzam com fidedignidade as características de qualidade identificadas nas fases anteriores.

Para escolha das variáveis resposta deverão ser considerados os aspectos levantados no capítulo 4, item 4.1.2.

Tabela 5.5 - Descrição e caracterização das variáveis resposta

Variáveis Resposta	Unidades	Tipo	Alvo	Especificações		Importância relativa
				Min	Max	
Y1:						
Y2:						
Y3:						
Y4:						
Y5:						

Uma vez listadas as variáveis resposta, identifica-se o seu tipo, o qual pode ser nominal-é-melhor, menor-é-melhor ou maior-é-melhor. Na coluna ao lado coloca-se a unidade de medição da respectiva variável resposta (ver tabela 5.5).

Os campos das especificações e do alvo devem ser preenchidos respectivamente com os valores limites e com o valor ideal especificado para cada variável resposta. No caso de característica maior é melhor ou menor é melhor, o alvo não deve ser estabelecido como $+\infty$ ou $-\infty$, mas sim deve ser fixado como um valor excelente, capaz de satisfazer plenamente o cliente (interno ou externo).

A importância relativa dada às características de qualidade na fase 1, contribuirá para a atribuição da importância das variáveis resposta. A importância de cada variável resposta e o tipo são usados na construção da função-objetivo utilizada na otimização.

5.2.1.2 Definição dos parâmetros do processo

Os parâmetros do processo são todos os fatores operacionais que podem ser alterados durante o processo de manufatura e que podem causar algum efeito na variável resposta. O projeto de experimentos irá verificar a existência ou não desse efeito e a sua magnitude.

A equipe deve listar todos os parâmetros do processo relacionados ao processo em estudo (ver tabela 5.6). É importante verificar também se dois parâmetros do processo podem estar correlacionados, isso significa que não é possível incluir ambos no experimento. Ainda, pode-se verificar se dois ou mais parâmetros do processo provocam o mesmo efeito na variável resposta. Nesse caso um deles poderia ser eliminado.

A seguir, para cada parâmetro do processo, a equipe deve: indicar o ajuste atual, intervalo de pesquisa e o ajuste sugerido. Ao lado da coluna do ajuste atual, a equipe informa também o que ela supõe ser o coeficiente de variação (C.V.), que diz respeito à possível variação dos parâmetros do processo em torno de uma determinada condição fixada. Por exemplo, a equipe pode indicar que determinado parâmetro atualmente está ajustado na condição de 50 graus. Porém, existe uma variação em torno desse valor. A equipe então é indagada sobre a magnitude dessa variação. Digamos que a resposta seja

“em torno de 2 graus”, então segundo a opinião da equipe, o coeficiente de variação vale $(2/50) = 0.04$ ou 4%.

O coeficiente de variação será útil na otimização do processo, pois essa otimização será conduzida de forma a encontrar ajustes que minimizem o efeito das oscilações nos parâmetros do processo sobre as variáveis resposta (ver descrição da função perda multivariada, no capítulo 4).

O intervalo de pesquisa diz respeito aos limites inferior e superior de investigação do parâmetro do processo. Esse intervalo deve ser grande o suficiente para que seja possível observar o efeito dos parâmetros do processo sobre as variáveis estudadas. No entanto, deve respeitar os limites operacionais do respectivo parâmetro.

Na descrição e caracterização dos parâmetros do processo a equipe informa também a facilidade de ajuste. A facilidade de ajuste refere-se à facilidade em alterar um determinado parâmetro de uma condição para outra. Para a facilidade de ajuste, sugere-se uma escala ordinal com grau 5 para muito difícil e 10 para muito fácil.

Tentar quantificar a facilidade de ajuste é importante para a avaliação das restrições experimentais, necessidade de blocagem, e assim por diante. Isso porque, se um parâmetro do processo é difícil de ser ajustado, torna-se trabalhosa ou quase impraticável a aleatorização completa. Esse conhecimento é fundamental para a definição do modelo estatístico e da matriz experimental. Sem esse conhecimento, corre-se o risco de planejar um experimento interessante do ponto de vista estatístico, mas inviável na prática.

Tabela 5.6 - Descrição e caracterização dos parâmetros do processo

Parâmetro do processo	unidade	Ajuste atual	C.V	Ajuste Sugerido	Intervalo		Facilidade de ajuste
					MIN	MAX	
<i>X1:</i>							
<i>X2:</i>							
<i>X3:</i>							
<i>X4:</i>							
<i>X5:</i>							

5.2.1.3 Definição dos fatores ruído

Fatores ruído são todos aqueles fatores que não podem ser controlados ou não há interesse, mas que podem ter algum efeito sobre as variáveis resposta. É importante esgotar todas as possibilidades, uma vez que as relações dos fatores ruído com as variáveis resposta permitem avaliar a importância dos fatores ruído, enquanto que as relações entre os fatores ruído e os parâmetros do processo permitem identificar a necessidade de modelar a variabilidade da variável resposta em função destes últimos.

As relações entre os fatores ruído e as variáveis resposta e entre os fatores ruído e os parâmetros do processo serão avaliadas na matriz de planejamento de otimização do processo. A tabela 5.7 é utilizada para a descrição dos fatores ruído.

Tabela 5.7 - Descrição dos fatores ruído

Fatores ruído	Faixa de variação
Z1: Temperatura ambiental	1° a 25° C
Z2: Experiência dos operadores	2 a 6 anos
Z3: PH da matriz prima	3,5 a 4,5
Z4:	
Z5:	

5.2.1.4 Preenchimento da matriz de planejamento da otimização do processo (MPOP)

O objetivo principal da MPOP é dar suporte a estudos de otimização experimental. Ela toma como base a opinião dos engenheiros e registra as informações importantes para estabelecer o planejamento do estudo. Essas informações partem da definições das variáveis resposta, dos parâmetros do processo e dos fatores ruído, já preenchidas nas tabelas anteriores. Em seguida, as relações e interações entre esses elementos são investigadas.

Há quatro submatrizes na MPOP: (a) interações dos parâmetros do processo entre si; (b) relações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta; (c) relações entre os fatores ruído e as variáveis resposta; (d) interações entre os parâmetros do processo e os fatores ruído.

As submatrizes são preenchidas segundo uma escala que representa a intensidade dessas relações e interações. A escala sugerida é apresentada na tabela 5.8 (podendo ser atribuído valores intermediários).

Tabela 5.8 - Escala utilizada para avaliar a intensidade das relações e interações.

Intensidade das relações e interações	Peso
Inexistente	0
Fraca	1
Moderada	2
Forte	4

Após preenchida a matriz, o objetivo é transformar as informações fornecidas em critérios quantitativos que irão permitir a priorização dos parâmetros do processo a serem estudados em um programa de otimização experimental. Assim, foi criado um índice de priorização dos parâmetros do processo (PR), o qual é dado a partir de quatro critérios descritos a seguir.

(1) *grau de interação de um parâmetro com outros parâmetros do processo (K1)*;

Considera a intensidade das interações entre os parâmetros do processo, conforme indicado pela equipe técnica. Por exemplo, no quadro 5.1, a equipe acredita que exista interação forte entre o parâmetro do processo X_1 e X_2 , e uma interação fraca entre X_3 e X_4 .

Essa informação muitas vezes é difícil de ser obtida da equipe técnica, pois exige um conhecimento muito apurado dos parâmetros do processo. No entanto, quando obtida auxilia na definição de experimentos confundidos em blocos, ou experimentos fracionados, ou na escolha de interações para compor o termo de erro, entre outros.

A tentativa de obter esse conhecimento, mesmo que de forma aproximada, fornece maiores subsídios para a escolha do modelo estatístico. Essas informações serão úteis para decidir entre um experimento executado em blocos ou um experimento parcionado em células (*split-plot*), por exemplo.

Quadro 5.1 - Submatriz das interações entre os parâmetros do processo

		I _{ij} = Interações XiXj						
		X1	X2	X3	X4	X5	...	X _j
X1			4	3		1		
X2		4		2	4	2		
X3		3	2		1	3		
X4			4	1		3		
X5		1	2	3	3			
X _i		2,00	3,00	2,25	2,00	2,25		=K1

O grau de interação de um parâmetro com outros parâmetros do processo é representado pelo índice K1, que pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$K1(x_j) = \frac{\sum_i I_{ij}}{(P-1)}, \quad i=1, \dots, P, \quad i \neq j \quad (5.5)$$

onde:

$K1(x_j)$ índice que avalia a interação entre os parâmetros do processo.

P número de parâmetros do processo

I_{ij} grau de interação entre os parâmetros do processo i e j

$$\text{Assim, para o exemplo do quadro 5.1, } K1(X_1) = \frac{4+3+1}{5-1} = 2,00$$

(2) *efeito de um parâmetro sobre as variáveis resposta (K2)*

Esse efeito é avaliado pela intensidade das relações indicadas pela equipe entre o parâmetro em estudo e as diversas variáveis resposta ponderada pela importância relativa de cada variável resposta. Na análise desse critério, é também levada em conta a natureza do relacionamento entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta. As relações podem ser de natureza linear, quadrática, exponencial, entre outras, representadas respectivamente pelas letras L, Q e E que podem ser indicadas em sobrescrito juntamente com a intensidade de cada relação.

Quando a equipe não tem condições de opinar a respeito da natureza da relação entre cada variável resposta e determinado parâmetro do processo, esse campo pode ser deixado em branco. Quando a equipe é capaz de ter uma idéia da natureza da relação entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta, isso irá auxiliar na definição do número de níveis dos parâmetros do processo a serem testados, uma vez que, por exemplo, para estimar um efeito quadrático no mínimo três níveis do respectivo parâmetro do processo são necessários.

Quadro 5.2 - Submatriz das relações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta

		R_{ij} = Relações Y_iX_j						
	IE_i	X1	X2	X3	X4	X5	...	X_j
Y1	5	1 ^L	4 ^L	3 ^L		3 ^Q		
Y2	4	2 ^Q	3 ^L	2 ^Q	1 ^E	1 ^L		
Y3	3		4 ^L		2 ^Q			
...								
...								
		1,08	3,67	1,92	0,83	1,58		<=K2

Nesta submatriz (ver quadro 5.2), por exemplo, a equipe considera que o parâmetro do processo X_2 tem uma relação forte com a variável resposta Y_1 e que possivelmente essa relação tenha um comportamento linear. Da mesma forma, a equipe acredita que o parâmetro do processo X_3 tem uma relação moderada com a variável resposta Y_2 e possivelmente de natureza quadrática.

É claro que as informações anotadas no interior da matriz são suposições que a equipe tem referente ao efeito dos parâmetros do processo sobre as variáveis resposta estudadas. Essas informações contribuirão para fazer com que a equipe aumente seu conhecimento sobre o estudo. Muitas vezes, quando indagada sobre a possível relação de tais variáveis, a equipe técnica é levada a pensar e pode chegar a conclusões que ainda não haviam sido verbalizadas.

Após o preenchimento da submatriz, o efeito de um parâmetro sobre as variáveis resposta será dado pelo índice $K2$, que pode ser obtido pela seguinte fórmula:

$$K2(x_j) = \frac{\sum_i IE_i \times VR_{ij}}{\sum_i IE_i}, \quad i=1, \dots, Q \quad (5.6)$$

onde:

$K2(x_j)$ índice que avalia o efeito do parâmetro j sobre as variáveis resposta

IE_i grau de importância relativa para a variável resposta i

VR_{ij} relação entre a variável resposta i e o parâmetro do processo j

Q número de variáveis resposta

Para o exemplo do quadro 5.2., $K2(x_1) = \frac{5 \times 1 + 4 \times 2 + 3 \times 0}{5 + 4 + 3} = 1,08$, que

representa o grau médio de relacionamento do parâmetro do processo X_1 com as variáveis resposta.

(3) *efeito de um parâmetro do processo sobre os fatores ruído (K3);*

Esse efeito é calculado em dois passos. Inicialmente, a equipe relaciona aqueles fatores ruído que podem causar alguma influência nas variáveis resposta (ver quadro 5.3). Da mesma forma que anteriormente, a equipe atribui um valor ao relacionamento, utilizando uma escala previamente definida. O estudo dessas relações fornecerá um índice de importância aos fatores ruído, denotado por IR_j .

Quadro 5.3 - Submatriz das relações entre os fatores ruído e as variáveis resposta

		RRij = Relações YiZj							
	IE_i	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	...	Z_i	
Y1	5	4		3	1				
Y2	4								
Y3	3	2	1	4	4	4			
...									
Y_i		2,17	0,25	2,25	1,41	1,00			<=IR_j

O índice IR_j pode ser definido por:

$$IR_j = \frac{\sum_i IE_i \times RR_{ij}}{\sum_i IE_i}, \quad i=1, \dots, Q \quad (5.7)$$

onde:

IR_j índice de importância para o fator ruído j

IE_i índice de importância para a variável resposta i

RR_{ij} relação entre a variável resposta i e o fator de ruído j

Q número de variáveis resposta

Observando o quadro 5.3, verifica-se que $IR_1 = \frac{5 \times 4 + 4 \times 0 + 3 \times 2}{5 + 4 + 3} = 2,17$,

representa o índice de importância para o fator ruído Z_1 .

A seguir é feita a avaliação do efeito dos parâmetros do processo sobre os fatores ruído. Esse efeito considera as interações entre o parâmetro em análise e os fatores ruído. A submatriz das interações é apresentada no quadro 5.4.

Quadro 5.4 - Submatriz das interações entre os fatores ruído e os parâmetros do processo

		ILij = Interações ZiXj						
	IR_i	X1	X2	X3	X4	X5	...	Xj
Z1	2,17	4	3	4				
Z2	0,25	2				1		
Z3	2,25	1	1	4	2			
Z4	1,41	1			2	2		
Z5	1,00	1	1					
...		1,95	1,38	2,50	1,03	0,43		<=K3

O conhecimento de quais parâmetros do processo podem interagir com os fatores ruído apontará quais parâmetros têm a potencialidade de modificar o efeito dos fatores ruído sobre as variáveis resposta.

Para cálculo desse índice, utiliza-se a seguinte fórmula:

$$K3(x_j) = \frac{\sum_i (IR_i \times II_{ij})}{\sum_i IR_i}, \quad i=1, \dots, R \quad (5.8)$$

onde:

$K3(x_j)$ índice que avalia o efeito do parâmetro do processo j sobre os fatores ruído

II_{ij} índice de interação entre o fator ruído i e o parâmetro do processo j

IR_i índice de importância para o fator de ruído i

R número de fatores ruído

Para o exemplo do quadro 5.4,

$$K3(x_2) = \frac{2,17 \times 3 + 0,25 \times 0 + 2,25 \times 1 + 1,41 \times 0 + 1,00 \times 1}{2,17 + 0,25 + 2,25 + 1,41 + 1,00} = 1,38.$$

(4) *facilidade de ajuste do parâmetro do processo (FA)*;

A facilidade de ajuste pode ser dada por uma escala de 5 a 10, onde 10 representa ajuste muito fácil. A facilidade de ajuste diz respeito à facilidade de serem alterados os níveis dos parâmetros do processo.

Priorização dos Parâmetros do Processo

Baseado nesses critérios, o índice de priorização será dado por:

$$PR(x_j) = [K1(x_j) + K2(x_j) + K3(x_j)] \times FA(x_j) \quad (5.9)$$

onde:

$K1(x_j)$ índice que avalia o grau de interação do parâmetro do processo j com os demais

$K2(x_j)$ índice que avalia o efeito do parâmetro do processo j sobre as variáveis resposta.

$K3(x_j)$ índice que avalia o efeito do parâmetro do processo j sobre os fatores ruído

$FA(x_j)$ facilidade de ajuste do parâmetro do processo j

A priorização dos parâmetros do processo fornece quais parâmetros devem ser preferencialmente investigados no experimento. Isto é, quais parâmetros do processo seriam os fatores controláveis do experimento.

Essa priorização é feita tomando como base os quatro índices acima descritos. No entanto a equipe tem muito mais informação do que simplesmente um índice de priorização, pois cada índice, em particular, é uma fonte de informação que poderá ajudar na escolha do modelo estatístico e na estrutura da coleta de dados.

O resultado da priorização é fornecido conforme o quadro 5.5.

Quadro 5.5 - Priorização dos parâmetros do processo.

		X1	X2	X3	X4	X5	
K1		2,00	3,00	2,25	2,00	2,25	
K2		1,08	3,67	1,92	0,83	1,58	
K3		1,95	1,38	2,50	1,03	0,43	
FA		8	8	10	10	6	
	PR=	40,24	64,40	66,70	38,60	25,56	
PR	%	17,08	27,34	28,32	16,39	10,85	

Observando o quadro 5.5, verifica-se que os parâmetros do processo X_3 e X_2 possuem maiores índices de priorização e serão preferencialmente incluídos no experimento. O parâmetro X_5 poderia ser um fator mantido constante. A escolha dos parâmetros do processo também é feita levando em conta o número máximo de ensaios, em função do custo e tempo disponível para realização do experimento.

Para facilitar a visualização e análise, os resultados da priorização podem ser ilustrados por um gráfico de Pareto.

5.2.1.5 Escolha dos fatores controláveis e seus níveis

A escolha dos fatores controláveis é consequência direta da priorização feita na etapa anterior. A escolha é feita através do índice de priorização **PR** (eq. 5.9).

Os parâmetros do processo podem ser subdivididos em fatores controláveis e fatores a serem mantidos constantes. Isso significa que todos os parâmetros do processo que não foram incluídos no experimento serão considerados fatores a serem mantidos constantes. A tabela 5.10 contempla quais fatores deverão permanecer constantes numa determinada condição considerada ideal pela equipe.

Uma vez escolhidos os fatores controláveis, o número de níveis e quais serão os níveis para cada fator controlável deverão ser decididos a partir das informações da matriz.

Os níveis extremos dos fatores controláveis serão definidos a partir dos intervalos de investigação dos parâmetros do processo descritos na tabela 5.6. Dentro de cada intervalo serão definidos os níveis.

O número de níveis poderá ser decidido tomando como base a matriz das relações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta (quadro 5.2) que foi preenchida com a possível natureza dos parâmetros do processo sobre as variáveis resposta: linear, quadrático ou exponencial.

A tabela 5.9 relaciona os fatores controláveis, isto é, aqueles parâmetros do processo a serem investigados no experimento, enquanto que a tabela 5.10 relaciona os fatores a serem mantidos constantes no experimento. Esses fatores mantidos constantes serão os parâmetros do processo que não foram priorizados e ainda outros parâmetros que a equipe escolheu deliberadamente manter constante e nem mesmo foram considerados no estudo de priorização.

Tabela 5.9 - Fatores controláveis a serem incluídos no experimento

Fatores controláveis	Níveis reais	Níveis codificados

Tabela 5.10 - Fatores a serem mantidos constantes no experimento

Fatores mantidos constantes	Nível

5.2.1.6 Escolha do modelo estatístico

A escolha do modelo estatístico é decorrente de todas as informações até então processadas com o preenchimento da matriz. Com o conhecimento dessas informações, o próximo passo é encontrar um modelo estatístico que melhor se adapte ao problema em estudo.

Nesse ponto, a equipe já tem subsídios suficientes para projetar o experimento e utilizar as informações provenientes desse experimento para a otimização do processo.

Decisões importantes serão tomadas nesta fase, tais como: *(i)* a necessidade de rodadas prévias; *(ii)* o número de repetições de cada tratamento; *(iii)* a decisão de blocar; *(iv)* a forma pela qual as variáveis resposta serão medidas; *(v)* como os fatores constantes serão mantidos fixos; *(vi)* a existência de covariáveis, etc.

As rodadas prévias podem ser úteis para rever os procedimentos de ensaios, número de ensaios, número de repetições, estimativa do termo de erro ou ainda mudar o projeto de experimento escolhido (ver Coleman e Montgomery, 1993).

5.2.1.7 Determinação da matriz experimental

A matriz experimental define a estrutura de coleta de dados. É importante que a equipe forneça às pessoas que irão obter as medidas das variáveis resposta uma tabela com os níveis reais de cada fator controlável. Além disso, deve estar especificado em quais níveis deverão ser mantidos os fatores constantes. A planilha de coleta de dados deve ser adequadamente elaborada, de forma a facilitar o trabalho das pessoas que irão coletar os

dados. Se houver covariáveis, essas deverão ser devidamente anotadas. Essas pessoas devem ser encorajadas a documentar qualquer alteração observada durante a execução do experimento julgada relevante.

Com a definição da matriz experimental, o próximo passo é a execução do experimento. Posteriormente, procede-se a otimização do processo, trabalhando-se com aqueles fatores controláveis que exercem um efeito significativo sobre as variáveis resposta. A otimização dos parâmetros do processo tomará como base tanto as informações registradas na plataforma como os resultados do experimento.

5.2.2 Programa Computacional para o Planejamento da Otimização Experimental (PPO).

Fritsch e Ribeiro (1996) desenvolveram um programa computacional em ambiente *windows* que contempla as etapas da plataforma de planejamento da otimização experimental. O programa é de fácil manuseio e realiza os cálculos pertinentes da matriz de planejamento da otimização. O programa e as suas interfaces gráficas serão apresentadas através de um exemplo de otimização de um processo de manufatura de lentes de contato. Este exemplo será apresentado no capítulo 6, item 6.2.

CAPÍTULO 6

ESTUDOS DE CASO

A plataforma sugerida para o planejamento da otimização experimental de processos, descrita no capítulo 5, foi aplicada a vários casos de otimização de processos, quais sejam:

- Planejamento de experimento e otimização em um processo de pintura de lentes de contato (Echeveste et alii, 1995);
- Investigação experimental no desgaste em cilindros e pistões de motosserras (Ribeiro, Echeveste e Caten, 1995a);
- Otimização da receita de banda Pré-curada da empresa Tipler Ltda (Pasa, Ribeiro e Caten, 1995);
- Planejamento da otimização experimental da extrusora na empresa Moreflex Borrachas Ltda (Ribeiro e Caten, 1995);
- Planejamento da otimização da receita de bandas pré-curadas, modelo radial, na empresa Moreflex Borrachas Ltda (Ribeiro, Caten, Echeveste e Vigo, 1995);
- Otimização do processo de exposição de lentes de contato ao ultravioleta (Ribeiro, Caten e Echeveste, 1996).

O método de identificação de processos críticos, fases 1, 2, 3 e 4, detalhado no capítulo 5, foi aplicado na íntegra numa fábrica de calçados que gerou os seguintes relatórios técnicos:

- Desdobramento da matriz da qualidade numa fábrica de calçados (Ribeiro e Echeveste, 1996)
- Desdobramento da matriz dos processos numa fábrica de calçados (Ribeiro e Caten, 1996a)
- Implantação de CEP no curtume de uma fábrica de calçados (Ribeiro, Echeveste e Caten, 1996)
- Implantação de CEP na linha de montagem de uma empresa de calçados (Ribeiro e Caten, 1996)

Este capítulo será composto de dois estudos de caso, sendo que o primeiro refere-se à aplicação do método de identificação de processos críticos, proposta no capítulo 5, em uma fábrica de calçados. O segundo refere-se ao estudo da otimização do processo de exposição de lentes de contato ao ultravioleta, onde o planejamento foi realizado também utilizando a plataforma de otimização experimental proposta no capítulo 5.

6.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO AO SETOR CALÇADISTA: QUALIDADE DO COURO.

Este estudo de caso é baseado no trabalho realizado numa empresa do setor de calçados do Rio Grande do Sul. Essa empresa produz calçados que são exportados para os Estados Unidos e Europa. A venda é executada através de empresas exportadoras.

O objetivo principal da empresa era conhecer melhor seus processos críticos e identificar quais seriam as oportunidades de melhoria da qualidade. Isso porque não se tinha um entendimento claro de onde poderiam ser feitas melhorias.

A empresa possui linhas de produção independentes que manufacturam o calçado desde a preparação do material até o produto final. Para esse estudo, uma linha piloto foi utilizada e posteriormente os resultados foram estendidos para outras linhas de fabricação.

Face a esse cenário, a equipe procurou identificar os processos críticos da linha de produção. Essa identificação iniciou com a pergunta referente à qualidade de um bom calçado. Na verdade, a questão é “o que é um calçado de boa qualidade para o cliente?”. Assim, a equipe iniciou com o levantamento da qualidade demandada e, a partir desse conhecimento, procurou localizar na produção onde as melhorias poderiam ser feitas.

Neste contexto, o ambiente encontrado é propício para aplicação do método proposto no capítulo 5, pois o método começa com a identificação do que é importante para o cliente, identifica quais os processos críticos que deveriam ser analisados e sugere ações de melhoria que deveriam ser tomadas. Os processos críticos cuja melhoria poderia ser obtida através de otimização, passariam para a fase de planejamento da otimização.

O desenvolvimento desse estudo é bastante longo, por essa razão cada etapa do método será apresentada especificamente para os aspectos relacionados com a qualidade do couro, isto é ao processo de curtume de uma fábrica de calçados. Além disso, algumas informações foram omitidas e adaptadas para preservar a confidencialidade das informações da empresa envolvida.

O trabalho na íntegra, considerando aspectos de qualidade e manufatura de todas as partes do calçado, encontra-se nos relatórios técnicos: Ribeiro e Echeveste (1996), Ribeiro e Caten (1996) e Echeveste, Ribeiro e Caten (1996).

Cada etapa apresentada no capítulo 5 será descrita a seguir para a qualidade do couro de um calçado.

6.1.1 Desdobramento da Qualidade

Entrada: Qualidade demandada

Saída: Características de qualidade prioritárias

6.1.1.1 *Identificação da Qualidade Demandada*

Os itens da qualidade demandada são as características desejadas pelo cliente. Conseqüentemente, para listar os itens da qualidade demandada é necessário o conhecimento de quem é o cliente. O cliente, neste caso é o usuário final do calçado. As empresas intermediárias de exportação são as tradutoras da voz do cliente, quais sejam: os usuários do mercado europeu e mercado americano.

Assim, como fonte de dados para identificação dos itens da qualidade demandada, utilizou-se:

- (i) pesquisa junto a principais exportadores através de relatórios e conversa com os responsáveis de cada empresa exportadora;
- (ii) conversa informal com alta gerência, marketing, etc;
- (iii) pesquisas já realizadas neste assunto em revistas especializadas;
- (iv) conhecimento prévio de cada integrante da equipe;
- (v) principais defeitos encontrados nas linhas de produção.

6.1.1.2 *Organização dos itens da qualidade demandada numa árvore lógica*

Com base nestes dados, listas foram geradas e organizadas numa árvore lógica.

Basicamente, os itens da qualidade demandada primária foram: **Bom visual, Toque, Conforto e Resistência**. A tabela 6.1 apresenta o desdobramento da qualidade demandada do calçado relacionada com o couro.

Tabela 6.1 - Desdobramento da qualidade demandada para aspectos do calçado relacionados com o couro.

PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO	TERCIÁRIO
Bom Visual	Não ter aspecto de sintético	Apresentar brilho natural
	Sem defeitos aparentes	Sem marcas Sem manchas
Toque	Toque adequado	Leveza e estrutura Textura agradável
Confortável	Bom ajuste ao pé	Não machucar a frente do pé Não machucar o calcanhar Calçarr bem
	Cômodo	Comodidade ao calçar Comodidade ao caminhar
Resistente	Durável	Ser durável
	Resistente	Resistente a esforços Resistente a agentes agressivos Resistente a deformações
	Uso	Não manchar meias Alinhamento Correto

6.1.1.3 *Priorização dos itens da qualidade demandada*

A importância para cada item da qualidade demandada foi realizada segundo o critério de avaliação apresentado no capítulo 5, item 5.1.1.3. Os resultados finais da ponderação dos itens da qualidade demandada aparecem na tabela 6.2.

6.1.1.4 *Organização das características de qualidade*

As características de qualidade foram definidas pela equipe como variáveis mensuráveis que avaliam os itens da qualidade demandada.

Essas características de qualidade foram desdobradas formando a tabela de desdobramento das características de qualidade (tabela 6.3). Esse desdobramento foi realizado a partir do conhecimento técnico da equipe da empresa.

Tabela 6.2 - Priorização dos itens da qualidade demandada para aspectos do calçado relacionados com o couro .

PRIMÁRIO	peso	peso relat.	SECUNDÁRIO	peso	peso relat.	TERCIÁRIO	peso	peso relativo
Bom Visual	5	50%	Não ter aspecto sintético	5	28%	Apresentar brilho natural	5	28%
			Sem defeitos aparentes	4	22%	Sem marcas	4	13%
						Sem manchas	3	9%
Toque	1	10%	Toque adequado	1	10%	Leveza e estrutura	3	3,75
						Textura agradável	5	6,25%
Confortável	3	30%	Bom ajuste ao pé	3	11%	Não machucar a frente do pé	4	4,4%
						Não machucar o calcanhar	3	3,3%
						Calçar bem	3	3,3%
			Cômodo	5	19%	Comodidade ao calçar	5	11,9%
						Comodidade ao caminhar	3	7,1%
Resistente	1	10%	Durável	2	4%	Ser durável	3	4%
						Resistente a esforços	3	1,1%
			Resistente	2	4%	Resistente a agentes agres.	3	1,1%
						Resistente a deformações	5	1,8%
			Uso	1	2%	Não manchar meias	3	1%
						Apoio Correto	3	1%

6.1.1.5. Construção da matriz da Qualidade

A matriz da qualidade foi construída com o cruzamento da tabela de qualidade demandada (tabela 6.1) com a tabela de desdobramento das características de qualidade (tabela 6.3). A qualidade demandada aparece nas linhas e as características de qualidade nas colunas da matriz. A matriz de qualidade encontra-se na tabela 6.4.

O preenchimento da matriz foi realizado com base no conhecimento da equipe técnica que foi questionada quanto à intensidade das relações entre as características de qualidade e os itens da qualidade demandada. Para isso foi utilizada uma

escala de 1 a 9, onde 1 representa uma relação fraca, 5 uma relação moderada e 9 uma relação forte. As relações atribuídas pela equipe técnica foram assinaladas no interior da matriz.

O uso da matriz permitiu identificar quais características de qualidade podem medir ou avaliar o atendimento da lista de itens da qualidade demandada.

Tabela 6.3 - Desdobramento das características de qualidade referentes ao couro (parcial)

PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO	TERCIÁRIO
Couro	Acabamento da superfície	Presença de efeito <i>pull-up</i> Lisura Cobertura ao acabamento Penetração da tinta Resistência à penetração d'água Número de falhas papel metalizado
	Características dos poros/flor	Tamanho dos poros Área relativa de flor ardida Área relativa de flor solta Área relativa de partes vazias
	Características físico/químicas	Espessura Elasticidade Umidade Retração PH do couro Percentual graxos Teor de cromo Presença de PCP/produtos proibidos Presença de nitrocelulose
	Resistência do couro	Resistência a fricção Resistência a ruptura da flor Resistência ao rasgamento Resistência a tração Resistência a solventes/amaciantes Resistência a intempéries Resistência a adesão do acabamento

6.1.1.6 Priorização das características de qualidade

A priorização das características de qualidade foi realizada levando em conta as relações estabelecidas no interior da matriz e o peso relativo de cada item da qualidade demandada.

A expressão utilizada para calcular a importância de cada característica de qualidade está apresentada no capítulo 5, item 5.1.1.6. O resultado dos cálculos de priorização estão apresentados na última linha da matriz da qualidade.

As características de qualidade mais importantes foram dispostas sob a forma de um gráfico de Pareto (figura 6.1). Nota-se que *elasticidade*, *penetração da tinta*, *tamanho dos poros* e *espessura* são características de qualidade que apresentaram maior importância relativa para a qualidade final do couro. Essas características são aquelas em que a empresa deve concentrar seus esforços, pois são responsáveis pelo atendimento da maior parte, e dos itens mais importantes, da qualidade demandada.

O próximo passo é localizar quais processos estão relacionados com essas características.

Característica de qualidade	Peso
Elasticidade	8,25
Penetração da tinta	8,01
Tamanho de poros	6,65
Espessura	5,89
Resist. adesão acabamento	5,43
Percentual graxos	5,22
Número falhas papel metalizado	4,93
Cobertura ao acabamento	4,67
Umidade	4,17
Área relativa de partes vazias	3,96
Área relativa de flor solta	3,83
Resistência a tração	3,54
Lisura	3,45
PH do couro	3,45
Resist. a fricção	3,28
Resist. ruptura flor	3,26
Resist. ao rasgamento	3,20
Área de flor ardida	3,12
Resist. a permeab. vapor água	3,07
Resist. a solventes/amaciam	2,69
Retração	2,48
Resistência a intempéries	2,44
Resist. penetração água	2,11
Presença de efeito pull-up	1,94
Teor do cromo	1,05

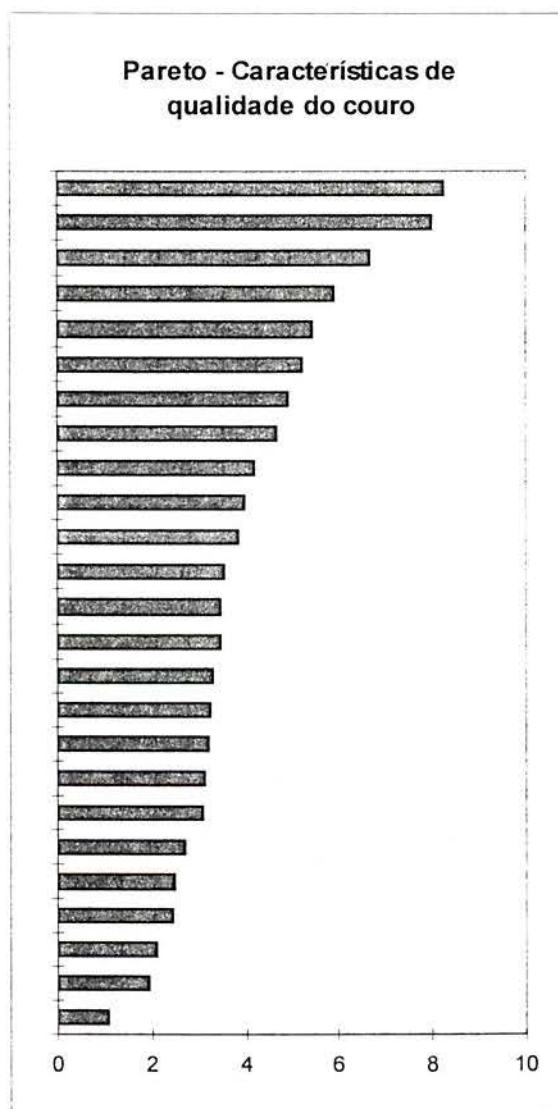


Figura 6.1 - Pareto das características de qualidade do couro (parcial)

Tabela 6.4 - Matriz da qualidade Parcial (qualidade do couro)

Características de Qualidade	Acabamento Superfície				Características poros/flor				Características Físico-químicas						Resistência do couro														
	Presença de efeito pull-up	Lisura	Cobertura ao acabamento	Penetração da tinta	Resistência a penetração de água	Número de falhas papel metalizado	Tamanho dos poros ideal	Área de flor ardida	Área relativa de flor solta	Área relativa de partes vazias	Teor do cromo	Espessura	Elasticidade	Umidade	Retração	Ph do couro	Percentual graxos	Presença de PCP/produtos proibidos	Resist permeab.ao vapor d'água	Resistência à fricção	Resistência a ruptura da flor	Resistência ao rasgamento	Resistência à tração	Resistência a solventes/amaciamento	Resistência a intempéries	Resistência à adesão do acabamento			
Qualidade Demandada	Q_i																												
TERCIÁRIO																													
Apresentar brilho natural	1	1	2	3	1	2	4	1	1	1		2	2	3	2	1	2				1	1	1	1	1	1	1	2	
Sem marcas	1	2	1	5	1	4	1	2	2	2											2	2	1	1	1	1	2	2	
Sem manchas			2	4	1	1	1	1	1							2	1				1	1	1	1	1	2	2	2	
Leveza e estrutura	5										2	4																	
Textura agradável	5	6					4			5	3	4	4	3		6	7												
Não machucar frente do pé	4,5												2																
Não machucar calcanhar	3,4																												
Vestir bem	3,4																												
Comodidade ao vestir	11,7												6																
Comodidade ao caminhar	7												3																
Ser durável	4		6			1	1	2	6	3			2																
Resistente à esforços	1												1																
Resistente à agentes agressivos	1												2																
Resistente à deformações	2												3																
Não manchar meias	1	5			5																								
Apoio correto	1												3																
Priorização das características de qualidade	46	84	111	190	50	117	158	74	91	94	25	140	196	99	59	82	124	0	73	78	75	76	82	64	58	129			
%	1,9	3,5	4,7	8	2,1	4,9	6,7	3,1	3,8	4	1,1	5,9	8,3	4,2	2,5	3,5	5,2	0	3,1	3,3	3,2	3,2	3,5	2,7	2,4	5,4			

6.1.2 Desdobramento dos Processos

Entrada: Características de qualidade

Saída: Processos críticos

6.1.2.1 *Organização das etapas dos processos numa árvore lógica*

O desdobramento dos processos parte de um macrofluxo realizado pela equipe da empresa. Esse macrofluxo inicia com a seqüência dos principais processos. A partir do macrofluxo, os processos são desdobrados nas principais etapas que o caracterizam.

A tabela 6.5 apresenta o desdobramento dos processos referentes ao curtume de uma fábrica de calçados.

Assim, com a matriz de qualidade concluída na fase anterior, o próximo passo é associar as características de qualidade prioritárias com as etapas de cada processo, formando a matriz dos processos.

6.1.2.2 *Construção da matriz dos Processos*

A matriz dos processos relaciona as etapas do processo (linhas da matriz) com as características de qualidade listadas e priorizadas na fase anterior (colunas da matriz). A matriz para os processos do curtume está na tabela 6.6.

O preenchimento da matriz foi realizado pela equipe técnica após o questionamento com respeito à intensidade das relações entre os processos e as características de qualidade. A escala utilizada para a intensidade das relações é mesma utilizada na matriz de qualidade.

A partir do levantamento da intensidade dessas relações, foi possível identificar quais processos apresentam maior contribuição para o atendimento das características de qualidade. Além disso, a intensidade das relações mostrou claramente onde é possível melhorar a qualidade do couro através do conhecimento de etapas do processo responsáveis pelo atendimento das características de qualidade.

Tabela 6.5 - Desdobramentos dos Processos do curtume

Primário	Secundário	Terciário
C U R T U M E	Depósito de Couro	Recebimento Descarga Inspeção Corte ao meio Aplicação do <i>Sort Assist</i> Classificação Enxugado Estoque Formação de lote Transporte
	Pré-Recurtimento	Divisão Rebaixamento e recorte Lixado Pesagem
	Recurtimento	Matização Pesagem Produtos químicos Lavagem/Remolho Neutralização Recurtimento Tingimento Engraxe Fixação
	Secagem	Estiradeira (rolo de feltro) Vácuo Estiradeira (rolo quente) Secador aéreo Túnel de secagem Estufa Máquina de amaciar Fulão de bater Palecionadora (braço mecânico.) Toogling (grampeadeira M/A) Vácuo seco (lisura)
	Acabamento	Máquina de impregnar Matização Tamponar Pintura em túnel Pintura em multi-ponto Máquina de escovar Máquina de polir Prensa Prensa contínua Máquina de lustrar
	Classificação e Inspeção final	Inspeção visual e classificação Teste de laboratório e liberação

6.1.2.3 Priorização dos Processos

Para cada etapa dos processos, a equipe avaliou os controles atuais e a frequência de falhas (ver item 5.1.2.3, capítulo 5). Os processos considerados críticos foram priorizados pela importância corrigida P_i^* (eq.5.4, capítulo 5). Os resultados dos

cálculos da importância das etapas dos processos, bem como um gráfico de Pareto da priorização das etapas estão na figura 6.2.

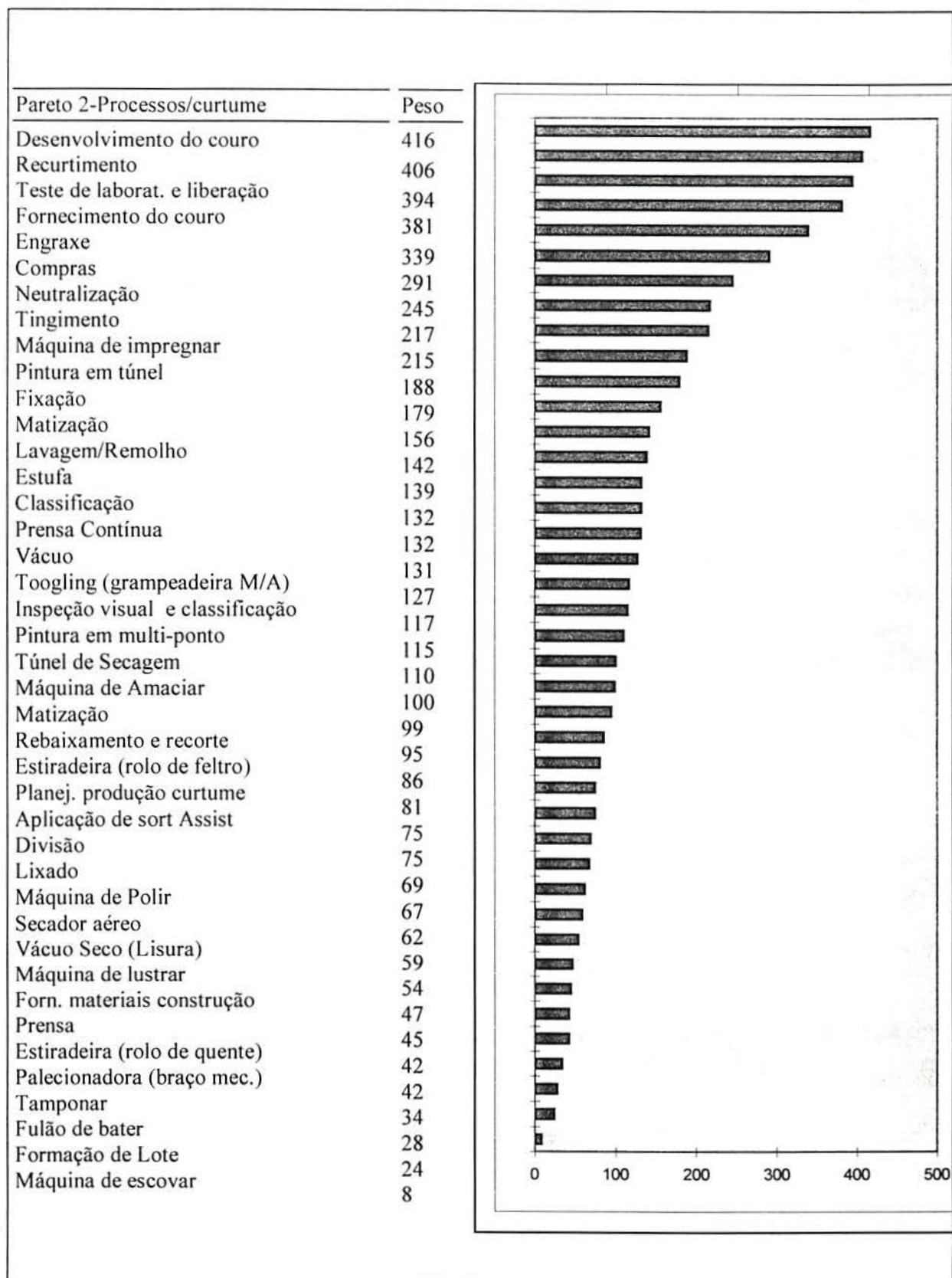


Figura 6.2 - Pareto contendo a priorização dos processos do curtume

6.1.3 Direcionamento de Ações

Entrada: Processos críticos

Saída: Ações de melhoria

Para os processos críticos, a equipe técnica sugeriu possíveis ações. Essas ações referem-se a sugestões da equipe para melhoria da qualidade do processo.

As ações contempladas pela equipe foram as seguintes:

- treinamento
- controle Estatístico do Processo
- desenvolvimento de fornecedor
- redução do *Setup* (preparação de máquina) e ajustes operacionais
- estudos ergonômicos
- definição de procedimentos
- definição de Especificações
- aquisição de equipamentos

Nesta lista, **treinamento**, refere-se àquelas etapas dos processos, onde as operações realizadas dependem da habilidade do operador para melhoria da qualidade. Por essa razão, operadores bem treinados garantiriam o cumprimento das especificações de características de qualidade construídas nas respectivas etapas de processo.

O **controle estatístico do processo** constitui-se na aplicação de cartas de controle e rotinas de monitoramento das características de qualidade relativas a esse processo.

O **desenvolvimento de fornecedor** refere-se àqueles processos onde melhorias de qualidade são feitas junto aos fornecedores, em termos de qualidade, confiabilidade e prazos de entrega dos produtos por eles fornecidos.

Redução do **setup** diz respeito a redução do tempo necessário para fazer alterações na regulagem de máquina e **ajustes operacionais** são a definição de ajustes dos parâmetros do processo que melhorariam as características de qualidade do processo em questão. A alternativa para tais processos, muitas vezes, é a realização de um projeto de experimentos.

Estudos ergonômicos referem-se a aspectos relacionados com mudanças de *layout* e aspectos relacionados com o operador e sua bancada e ambiente de trabalho.

A **definição dos procedimentos** faria com que a equipe revisse os atuais procedimentos no sentido de adaptá-los e padronizá-los para garantir melhor qualidade no processo.

Da mesma forma **definições de especificações** é a revisão das especificações atuais e a verificação se estas estão adequadas, levando em contas as demandas dos clientes.

E, finalmente, **aquisição de equipamentos** refere-se àqueles processos cuja troca ou melhoria de equipamento é fator principal para resultados satisfatórios nas características de qualidade associadas ao processo em questão.

A partir da definição das ações possíveis, constrói-se uma matriz cruzando os processos prioritários e as ações de melhoria descritas anteriormente.

Com essas informações, é possível identificar quais ações proporcionariam melhorias nos processos priorizados. A ênfase deste trabalho é dada para aqueles processos que necessitam de ajustes operacionais. Esses processos passarão para a fase 4, de planejamento da otimização experimental.

A tabela 6.7 apresenta os processos relacionados ao couro e as ações possíveis para melhoria dos mesmos. Nesta tabela, observa-se que o processo de *toogling* necessita de ajustes operacionais, sendo pertinente, portanto, um projeto experimental. A escala assinalada no interior da matriz é a apresentada no capítulo 5, tabela 5.4.

Tabela 6.7 - Processos prioritários e possíveis ações de melhorias (parcial).

Etapas do Processo					Ações possíveis								
	Importância	Controles atuais	Freq. de ocorrência	Priorização	Treinamento	CEP	Desenv. Fornecedores	Setup e Ajustes Op.	Estudos Ergonômicos	Definição de proced.	Definição de Especific.	Padronização	Aquisição Equip.
Desenvolvim. Desenv. do couro	416	1,5	1,7	664	1		3			1	3	1	
Recurtimento Recurtimento	406	1	0,5	287			1			1	1		
Insp.final Teste de laborat. e lib.	394	0,5	0,7	233	1							1	
Recurtimento Engraxe	339	1	0,7	284			1			1	1		
Recurtimento Neutralização	245	1	0,5	173						1	1		
Recurtimento Tingimento	217	0,7	2	257	2	1	1				1		
Acabamento Máquina de impregnar	215	0,5	0,5	108				1		1			
Acabamento Pintura em túnel	188	1	0,7	157	1			2					
Recurtimento Fixação	179	1	1	179			1			1	1		
Acabamento Matização	156	0,7	2	185	2	1					1		
Recurtimento Lavagem/Remolho	142	1,5	1	174			1	2		1			
Secagem Estufa	139	1,3	1,2	174	1	2	1			1			
Depósito Classificação	132	1,2	2	204	2		3		1	2	1		
Acabamento Prensa contínua	132	0,5	0,5	66	1			2					
Secagem Vácuo	131	1,5	0,8	144	1	1		2			1		
Secagem Toogling (gramp. M/A)	127	1,5	1,5	191	2	1		3		2	2		
Insp.final Insp. visual e classif.	117	0,5	1	83	1						1		
Acabamento Pintura em multi-ponto	115	0,8	1	103	1								2
Secagem Túnel de secagem	110	1	0,5	78				2					
Secagem Máquina de amaciar	100	1,2	1,7	143		2				2			1
Recurtimento Matização	99	0,8	2	125	1								
Pré-Recurt. Rebaixamento e recorte	95	0,8	0,5	60	3	1							
Secagem Estiradeira (rolo feltro)	86	1	0,5	61	2			2					
PCP Planej. produção curt.	81	1,5	1,5	122	2		1	0		3			
Pré-Recurt. Divisão	75	0,8	0,5	47	1								
Pré-Recurt. Lixado	69	1,5	1	85	2			2					
Acabamento Máquina de polir	67	1,5	0,5	58	2			1		1			
Secagem Vácuo seco (lisura)	59	0,8	0,5	37				1					
Acabamento Prensa	45	1	0,5	32				1		1			

Para as etapas de processos priorizadas, onde era viável efetuar medições, a melhoria poderia ser realizada através do controle estatístico de processo.

No caso do processo de *toogling*, a equipe julgou não ter conhecimento do comportamento das variáveis envolvidas nessa etapa de manufatura. Esse processo possivelmente causa algum efeito na elasticidade do couro. Essa característica tem grande

importância, uma vez que é responsável pelo cumprimento ou perda de muitos itens da qualidade demandada referentes ao calçado como um todo. (ver tabela 6.4 e figura 6.1)

Por essa razão, o projeto de experimentos é considerado a ferramenta adequada para o estudo das características de qualidade do processo de *toogling* onde, certamente, os resultados deste experimentos irão trazer ganhos para o produto final.

6.1.4 Planejamento da Otimização do Processo de *Toogling*

Na fase 3, os processos críticos foram relacionados com as possíveis ações de melhoria aos processos. Na fase 4, o foco de atenção volta-se para aqueles processos passíveis de otimização através do projeto de experimentos. Estes processos são considerados críticos para a qualidade, e sua melhoria pode ser realizada através de um melhor conhecimento dos parâmetros do processo e do possível efeito desses sobre as características de qualidade resultantes.

Muitas vezes, os engenheiros não têm uma idéia clara de quais deveriam ser as ações de melhorias. Ao chegar nesta fase, a equipe já têm conhecimento de quais processos poderiam ter ganhos com a realização de um programa experimental.

Para o processo de *toogling*, o experimento foi realizado através da plataforma de planejamento da otimização do processo proposta no capítulo 5. Para o planejamento desse experimento, a equipe contou com profissionais especializados que auxiliaram no projeto e na análise do experimento.

As etapas para o planejamento serão descritas a seguir.

6.1.4.1 Identificação e caracterização das variáveis resposta

As variáveis resposta do experimento serão as características de qualidade resultantes do processo a serem medidas no experimento. Para o processo de *toogling*, as variáveis umidade, maciez, elasticidade, área final e espessura são variáveis quantitativas que a equipe selecionou para serem incluídas no experimento. Na tabela 6.8 aparecem listadas as variáveis resposta escolhidas, as especificações para essas variáveis, o alvo e a respectiva importância estratégica.

Tabela 6.8 - Variáveis resposta escolhidas para a otimização experimental

Variáveis Resposta	Tipo	Especificações		Alvo	Import. Estratég.
		Min	Max		
Y1: Diferencial da espessura	Nominal	0	13	0	3
Y2: Diferencial da umidade	Nominal	0	11	0	3
Y3: Diferencial de Maciez	Maior-Melhor	4,0	5,0	4,5	4
Y4: Diferencial de metragem	Maior-Melhor	0	1,70	1,70	5
Y5: Difer. elasticidade (E1)	Nominal	50	90	60	5
Y6: Difer. elasticidade (E3)	Nominal	50	90	60	5

Como variáveis resposta utilizaram-se *diferenciais* de medidas antes e depois do processo de *toogling*. Assim, o diferencial de espessura refere-se à diferença entre a espessura antes do processo e a espessura depois do processo. Da mesma forma, o diferencial de umidade refere-se à diferença de umidade obtida nas peles antes e depois do processo de *toogling* e assim por diante.

O diferencial de elasticidade foi medido em duas zonas da pele: E1 representando a zona oficial e E3: a zona da barriga (telártico).

6.1.4.2 Definição dos parâmetros do processo

Os parâmetros do processo que a equipe julga ter alguma influência sobre as variáveis resposta aparecem na tabela 6.9.

Para cada parâmetro do processo, identifica-se o ajuste atual, o intervalo de ajuste, o ajuste sugerido (ajuste ótimo segundo a opinião da equipe) e a “facilidade de ajuste”, que se refere à facilidade de alterar os níveis do respectivo parâmetro do processo. A facilidade de ajuste é indicada usando-se uma escala de 5 a 10, onde 5 representa um ajuste muito difícil e 10 um ajuste fácil.

Tabela 6.9 - Descrição dos parâmetros do processo

Parâmetro do processo	Ajuste atual	Intervalo de ajuste		Ajuste Sugerido	Facilid. de ajuste
		MIN	MAX		
X1: Tipo de Artigo	M13	M13	M21	M13	10
X2: Tipo de Secadora	aéreo	aéreo	estufa	estufa	8
X3: Expansão (mm)	70	60	80	65	10
X4: Temperatura	18 a 22	20	40	40	10
X5: Tipo de máquina	Mn/Aut	Mn	Aut	Aut	7
X6: Matéria prima	Gibaut 20	-	-	-	10
X7: Posição de secagem	3 varas	fio lombo	3 varas	3 varas	8

6.1.4.3 Definição dos fatores ruído

Fatores ruído são aqueles fatores que a equipe acredita ter um efeito sobre as variáveis resposta, cujo controle é difícil ou impossível de ser realizado. Para este estudo, os fatores ruído elencados foram aqueles que aparecem na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Descrição dos fatores ruído

Fatores ruído
Z1: Umidade do dia
Z2: Temperatura do dia
Z3: Força do operador (expansão)

A partir dessa informação, a temperatura do dia e a umidade do dia foram anotadas e consideradas como covariáveis.

6.1.4.4 Preenchimento da matriz de otimização do processo

Quadro 6.1 - Interações entre os parâmetros do processo de *toogling*

		Iij = Interações XiXj							
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
X1				1		4			
X2				1					
X3		1			2	3	1		
X4				2		3			
X5		4		3	3		1		
X6						1			
X7									
		0,83	0	1,17	0,83	1,83	0,33	0	≤K1

Quadro 6.2 - Relações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta do *toogling*

		Rij = Relações YiXj							
IEj		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
Y1	3	2		3	1		2		
Y2	2		3		4 ^Q	3		1	
Y3	4	3	3	4 ^Q	3 ^L	4	4	1	
Y4	5			3	2 ^Q	4	3		
Y5	5	2	2	3	2	4	3		
Y6	4	2	2	3	2				
		1,56	1,56	2,91	2,22	2,70	2,26	0,26	≤K2

Quadro 6.3 - Relações entre as variáveis resposta e os fatores ruído do processo de *toogling*

		RRij = Relações YiZj			
IEi		Z1	Z2	Z3	
Y1	3			4	
Y2	2	4	4		
Y3	4	3	2	1	
Y4	5			4	
Y5	5			4	
Y6	4			4	
		0,87	0,70	3,13	≤IR

Quadro 6.4 - Interações entre os parâmetros do processos e os fatores ruído do *toogling*

		ILij = Interações ZiXj							
	IR _i	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
Z1	0,87								
Z2	0,69		3		4				
Z3	3,13	1		4					
		0,67	0,44	2,67	0,59	0,00	0,00	0,00	≤K3

Quadro 6.5 - Priorização final dos parâmetros do processo do *toogling*

		Iij = Interações XiXj							
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
K1		0,83	0	1,17	0,83	1,83	0,33	0	
K2		1,56	1,56	2,92	2,22	2,69	2,26	0,26	
K3		0,66	0,44	2,66	0,58	0	0	0	
FA		10	8	10	10	7	10	8	
	PR =	30,50	16,00	67,50	36,30	31,64	25,90	2,08	

A partir do grau de priorização dos parâmetros do processo, a equipe decidiu investigar quatro parâmetros do processo, em função de tempo e custos. Os parâmetros do processo com maior grau de priorização foram incluídos no experimento, tornando-se os fatores controláveis do experimento do *toogling*.

6.1.4.5 Escolha dos fatores controláveis e seus níveis

Os fatores controláveis e seus níveis foram escolhidos de acordo com os resultados da Matriz de Planejamento da Otimização do Processo (MPOP) descrita na etapa anterior. A tabela 6.11 apresenta os fatores controláveis e seus níveis. Os níveis foram decididos em função do intervalo de ajuste (Tabela 6.9) e dos possíveis efeitos dos parâmetros do processo sobre as variáveis resposta preenchidos na matriz (Quadro 6.2).

Tabela 6.11 - Fatores controláveis no experimento do *toogling*

Fatores controláveis	Níveis testados	Níveis codificados
X1: Tipo de artigo	M11, M13	-1 a +1
X3: Expansão (mm)	70, 90	-1 a +1
X4: Temperatura (°C)	10, 30	-1 a +1
X5: Tipo de máquina	Mn, At	-1 a +1

Os parâmetros do processo que não foram investigados no experimento serão mantidos constantes, juntamente com outros fatores que a equipe não tiver interesse em estudar seu efeito. Desta forma, para o experimento realizado no processo de *toogling*, os fatores mantidos constantes estão discriminados na tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Fatores mantidos constantes no experimento do processo de *toogling*

Fatores controláveis	Nível fixado
X2: Tipo de secadora	Aérea
X6: Matéria prima	Gibaut 20
X7: Posição da secagem	3 varas

6.1.4.6 Escolha do modelo estatístico

Para execução desse experimento realizou-se um fatorial 2^k completo com quatro fatores controláveis totalizando 16 ensaios.

6.1.4.7 Determinação da matriz experimental

A matriz experimental foi definida com o objetivo de verificar se havia alterações significativas nas variáveis após o processo de *toogling*. Por essa razão, efetuaram-se medidas nas peles que foram utilizadas como unidades experimentais antes

do processo, e depois do processo, mais precisamente após 24 horas. Para cada ensaio os diferenciais foram calculados.

A matriz experimental do experimento do *toogling* também tem espaço para anotar a temperatura do dia e a umidade do dia, consideradas covariáveis. A planilha de dados aparece na tabela 6.13.

Tabela 6.13 - Matriz experimental do processo de *toogling*

Ensaio	Fatores				Antes						Depois					
	Artigo	Maquina	Expansao	temperatura	Espessura	Umidade	Maciez	Metragem	Elast. Z1	Elast. Z3	Espessura	Umidade	Maciez	Metragem	Elast. Z1	Elast. Z3
1	M11	Mn	70	10												
2	M11	Mn	90	30												
3	M11	At	70	30												
4	M11	At	90	10												
5	M13	Mn	70	30												
6	M13	Mn	90	10												
7	M13	At	70	10												
8	M13	At	90	30												
9	M13	Mn	70	10												
10	M13	Mn	90	30												
11	M13	At	70	30												
12	M13	At	90	10												
13	M11	Mn	70	30												
14	M11	Mn	90	10												
15	M11	At	70	10												
16	M11	At	90	30												

6.1.5 Conclusões do Planejamento do Experimento do Processo de Toogling

O experimento do processo do *toogling* revelou quais parâmetros do processo têm efeito significativo sobre a elasticidade, espessura, umidade, maciez e metragem. Com esse resultado, é possível melhorar o desempenho referente as variáveis resposta, através da otimização do processo do *toogling*

Com esse conhecimento é possível tomar medidas de melhoria com um controle sobre os parâmetros que têm um efeito significativo sobre as variáveis resposta. Além disso, sabe-se que o ajuste desses parâmetros conduzirá a melhorias na qualidade do couro do calçado, pois são conhecidas as relações dessas parâmetros com as características de qualidade do produto final. Sabe-se, ainda, através das matrizes da qualidade demandada, qual o impacto que isso causaria na satisfação do cliente.

A execução do experimento e a otimização das variáveis resposta encontram-se em Ribeiro, Echeveste e Caten (1996).

6.2 PLANEJAMENTO DA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM PROCESSO DE EXPOSIÇÃO DE LENTES DE CONTATO AO ULTRAVIOLETA

Durante o processo de manufatura de lentes de contato, estas são expostas à estufa e ao ultravioleta. Esse processo é complexo e demanda cuidados especiais na definição do ajuste de vários parâmetros. Assim, o objetivo desse estudo é identificar os parâmetros do processo que afetam a qualidade das lentes que são expostas ao ultravioleta e, em seguida, encontrar o ajuste ótimo desses parâmetros. Como estratégia de ação, optou-se pela otimização *experimental* do processo.

As atividades e os resultados obtidos em cada uma dessas etapas até a definição da matriz experimental serão apresentados a seguir. Os dados apresentados aqui foram transformados para preservar a confidencialidade dos resultados da empresa em questão.

6.2.1 Descrição das Etapas de Planejamento da Otimização Experimental

6.2.1.1 Identificação das variáveis respostas

Esta etapa demanda uma ampla discussão do problema com a equipe técnica, visando esclarecer os objetivos do estudo. Isso inclui identificar os resultados que

a equipe técnica pretende atingir, que podem incluir melhorias de qualidade e produtividade, redução de custos, redução de tempo de processo, etc.

Neste estudo de caso, a intenção é obter melhorias de qualidade nas lentes de contato atuando-se no processo de exposição ao ultravioleta. Mais especificamente, o objetivo é otimizar as etapas de exposição das lentes de contato à estufa e ao ultravioleta.

A discussão com a equipe da empresa revelou quatro itens da qualidade demandada considerados importantes pelo cliente:

- A lente não deve apresentar deformação;
- A sua ótica deve ser excelente;
- A curva base deve coincidir com o valor nominal especificado;
- O grau deve coincidir com o valor nominal especificado.

Como a equipe já possuía conhecimento de qual processo deveria ser otimizado, no caso, o processo de exposição das lentes à estufa e ao ultravioleta, a partir desse objetivo, foram listadas as possíveis variáveis resposta associadas com as características listadas acima. Também se questionou a importância relativa das variáveis resposta. A importância relativa auxilia na definição da função objetivo que irá direcionar a otimização do processo.

As etapas do planejamento de otimização do processo serão apresentadas através de interfaces gráficas do programa do planejamento da otimização (PPO). A figura 6.3 apresenta a primeira interface onde são preenchidos os campos: identificação, equipe responsável e objetivos do experimento.

Experimental Study Label	Quality Needs	Response Variables	Process / Product Parameters	Noise Factors
Experimental Study Title:	Otimização Processo Exposição Lentes de Contato			
Development Team:	UFRGS / Empresa			
Study Objectives:	Melhoria da Qualidade			
Date & Place:	Porto Alegre, junho de 1996.			
Close		Proceed		

Figura 6.3 - Identificação do estudo experimental para o processo de exposição ao ultravioleta.

Na seqüência, na figura 6.4, aparece a interface que apresenta a qualidade demandada pelo cliente, que é conhecida pela equipe responsável pelo experimento.

Experimental Study Label	Quality Needs	Response Variables	Process / Product Parameters	Noise Factors
Quality Needs		Importance		
A lente nao deve apresentar deformacao		10		
A sua otica deve ser excelente		10		
A curva base deve coincidir com o valor nominal especificado		10		
O grau deve coincidir com o valor nominal especificado		10		
Close		Proceed		

Figura 6.4 - Qualidade demandada de lentes de contato

Na Figura 6.5 aparecem listadas as variáveis resposta escolhidas, as especificações para essas variáveis, o alvo e a respectiva importância estratégica.

Experimental Study Label		Quality Needs		Response Variables		Process / Product Parameters		Noise Factors	
	Response Variables	Type N/mM/MM	Unit	Target	Specifications		Importance (1 to 10)		
					Min	Max			
Y1:	Deformacao	mM	u1	0	0	<6	5		
Y2:	Ótica	MM	u2	10	>6	10	5		
Y3:	Curva base	N	u3	8.00	7.80	8.20	4		
Y4:	Grau	N	u4	3.00	2.75	3.25	3		
Y5:									
Y6:									
Y7:									
Y8:									
Y9:									
Y10:									
Y11:									

Figura 6.5 - Identificação das variáveis resposta do processo de exposição ao ultravioleta

A variável resposta *Deformação* é uma variável qualitativa ordinal medida por uma escala de 0 a 10. Um técnico especializado atribui o valor para a deformação. Nesse caso, 0 representa um valor excelente (nenhuma deformação), enquanto 10 representa um valor péssimo (muita deformação). A variável resposta *Ótica* também é avaliada por um técnico especializado usando uma escala de 0 a 10. Mas, nesse caso, 0 representa um valor péssimo (ótica muito ruim), enquanto 10 representa um valor excelente (ótica excelente).

As variáveis resposta *Curva base* e *Grau* são do tipo Nominal-é-Melhor e são variáveis quantitativas medidas em suas próprias unidades.

A importância estratégica é um peso atribuído pela equipe técnica que representa a importância que cada variável resposta tem sobre a qualidade total do produto. Neste exemplo, a importância estratégica foi dada numa escala de 1 a 5, onde 1 pouco importante e 5 é muito importante.

6.2.1.2 Definição dos parâmetros do processo

A equipe técnica foi questionada a respeito de todos os parâmetros do processo que poderiam ter algum efeito sobre as variáveis resposta definidas na etapa anterior. A figura 6.6 apresenta as informações coletadas em relação aos parâmetros do processo.

Process Data [11/11/2001]							
Experimental Study Label	Quality Needs	Response Variables	Process / Product Parameters			Noise Factors	
	Process / Product Parameters	Actual Setting	CV	Suggested Setting	Research Interval		Facility (5 to 10)
					Min	Max	
X1:	Iniciador USP	0.1%	12	0.15%	0.1%	0.4%	10
X2:	Intensidade do UV	1150	4	1200	1100	2000	10
X3:	Tempo de Exposicao ao UV	60	2	45	25	60	10
X4:	Temperatura da estufa	120	30	110	105	130	10
X5:	tempo de estufa	120	1	60	60	180	10
X6:	Molde	1:com	0	1:com	0:sem	1:com	10
X7:	Iniciador BME	0.1%	12	0.15%	0.1%	0.4%	10
X8:							
X9:							
X10:							
X11:							

Figura 6.6 - Descrição dos parâmetros do processo de exposição ao ultravioleta

6.2.1.3 Descrição dos fatores ruído

Em seguida, a equipe técnica é indagada a respeito dos fatores ruído, presentes no processo, que poderiam causar variabilidade nas variáveis resposta. Os fatores ruído identificados aparecem listados na figura 6.7.

Experimental Study Label	Quality Needs	Response Variables	Process / Product Parameters	Noise Factors
				Noise Factors
Z1:	Variacoes na intensidade de UV			
Z2:	Variacoes na temperatura de polimerizacao			
Z3:	Tempo de destacamento			
Z4:	Idade do iniciador BME			
Z5:	Idade do iniciador USP			
Z6:	Materia prima			
Z7:				
Z8:				
Z9:				
Z10:				
Z11:				
Z12:				

Figura 6.7 - Fatores ruído do processo de exposição ao ultravioleta.

6.2.1.4 Descrição da matriz de planejamento da otimização do processo

O próximo passo é o preenchimento da Matriz de Planejamento da Otimização do Processo (MPOP). Essa matriz é preenchida levando-se em conta a opinião dos integrantes da equipe técnica.

A escala utilizada para representar a intensidade destas relações e interações foi a proposta no capítulo 5, item 5.2.1.4. A matriz é, na verdade, composta de 4 submatrizes. A primeira submatriz refere-se a interações entre os parâmetros do processo apresentadas na figura 6.8.

Process Parameter (Interactions)	Process Param. & Response Variables	Response Variables & Noise Factors	Process Param. & Noise Factors (Inter.)					
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
X1	-			3	3		1	
X2		-	4				3	
X3		4	-				3	
X4	3			-	4	2		
X5	3			4	-		2	
X6				2		-		
X7	1	3	3		2		-	

Intensity

Strong

Moderate to Strong

Moderate

Weak

None

X1 : Iniciador USP

X1 : Iniciador USP

Figura 6.8 - Interações entre os parâmetros do processo

A figura 6.9 apresenta a segunda submatriz, que diz respeito às relações entre os parâmetros processo elencados pela equipe e as variáveis resposta do processo de exposição de lentes de contato ao ultravioleta.

Relationships								
Process Parameter (Interactions)	Process Param. & Response Variables	Response Variables & Noise Factors	Process Param. & Noise Factors (Inter.)					
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	
Y1	2Q	2L	2Q	4Q	4L	4L	2Q	
Y2	1L	3L	3L	4L	4L	4L	1L	
Y3	1Q	4Q	4Q	2L	2L	2L	1L	
Y4	1L	3L	3Q	4Q	4L	4L	1L	

Intensity

Strong

Moderate

Moderate

Weak

None

Effect

Linear

Quadratic

More Complex

X1 : Iniciador USP

Y1 : Deformacao

Figura 6.9 - Interações entre os parâmetros do processo e as variáveis resposta

A figura 6.10 refere-se às relações entre as variáveis resposta e os fatores ruído.

Process Parameter (Interactions)	Process Param. & Response Variables	Response Variables & Noise Factors	Process Param. & Noise Factors (Inter.)																																			
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Z1</th> <th>Z2</th> <th>Z3</th> <th>Z4</th> <th>Z5</th> <th>Z6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Y1</th> <td>1</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>Y2</th> <td>2</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <th>Y3</th> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> <tr> <th>Y4</th> <td>2</td> <td>4</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>		Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Y1	1	4	2	1	1	1	Y2	2	4	2	1	1	3	Y3	3	2	2	1	1	3	Y4	2	4	2	1	1	3	Intensity <input type="radio"/> Strong <input type="radio"/> Moderate to Strong <input type="radio"/> Moderate <input checked="" type="radio"/> Weak <input type="radio"/> None
	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6																																
Y1	1	4	2	1	1	1																																
Y2	2	4	2	1	1	3																																
Y3	3	2	2	1	1	3																																
Y4	2	4	2	1	1	3																																
Y1 : Deformacao Z1 : Variacoes na intensidade de UV																																						
Close		Proceed																																				

Figura 6.10 - Relações entre os fatores ruído e as variáveis resposta

A figura 6.11 apresenta as interações entre os parâmetros do processo e os fatores ruído.

Process Parameter (Interactions)	Process Param. & Response Variables	Response Variables & Noise Factors	Process Param. & Noise Factors (Inter.)																																																								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>X3</th> <th>X4</th> <th>X5</th> <th>X6</th> <th>X7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Z1</th> <td>2</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <th>Z2</th> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <th>Z3</th> <td></td> <td>2</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td>4</td> <td></td> </tr> <tr> <th>Z4</th> <td></td> <td>2</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2</td> </tr> <tr> <th>Z5</th> <td>2</td> <td></td> <td></td> <td>2</td> <td>2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>Z6</th> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Z1	2	2					2	Z2	2	2	2	1	2	2	1	Z3		2	2			4		Z4		2	2				2	Z5	2			2	2			Z6								Intensity <input type="radio"/> Strong <input type="radio"/> Moderate to Strong <input type="radio"/> Moderate <input type="radio"/> Weak <input checked="" type="radio"/> None
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7																																																				
Z1	2	2					2																																																				
Z2	2	2	2	1	2	2	1																																																				
Z3		2	2			4																																																					
Z4		2	2				2																																																				
Z5	2			2	2																																																						
Z6																																																											
X1 : Iniciador USP Z1 : Variacoes na intensidade de UV																																																											
Close		Proceed																																																									

Figura 6.11 - Interações entre os parâmetros do processos e os fatores ruído

A priorização foi dada pelo cálculo dos quatro critérios descritos no item 5.2 do capítulo 5 dessa dissertação, quais sejam: o grau de interação dos parâmetros do processo (K1); o efeito dos parâmetros do processo sobre as variáveis resposta (K2); o efeito dos parâmetros do processo sobre os fatores ruído (K3); e a facilidade de ajuste (FA).

Com os resultados da priorização e o preenchimento da matriz a equipe tem conhecimento suficiente para definir os fatores controláveis, seus níveis e, posteriormente o modelo estatístico adequado.

A figura 6.12 exibe a priorização final dos parâmetros do processo e um Pareto. Ao lado do Pareto, o programa PPO possui campos que poderão ser assinalados pelo usuário, de acordo com o número de fatores controláveis desejados pela equipe.

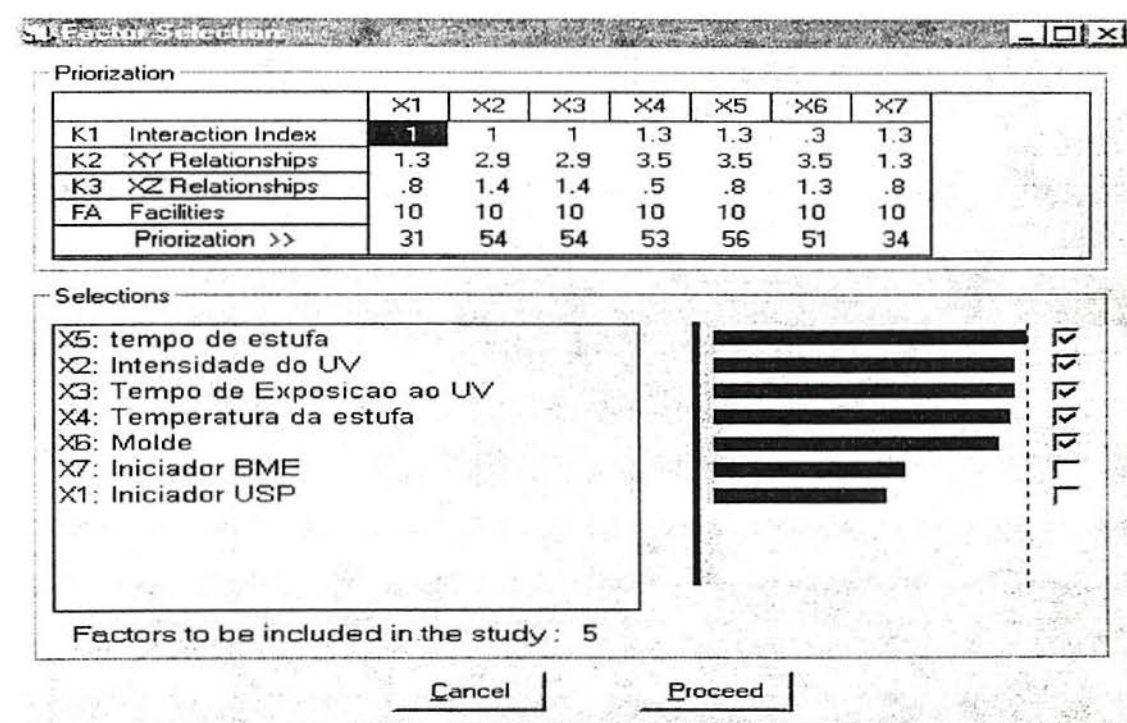


Figura 6.12- Priorização final dos parâmetros do processo de exposição ao ultravioleta

6.2.1.5 Escolha dos fatores controláveis e seus níveis

Em função de tempo e dinheiro, foram incluídos no estudo seis parâmetros do processo, a partir de agora denominados fatores controláveis.

Os fatores controláveis incorporados no experimento são aqueles que aparecem na Tabela 6.14. Vale ressaltar que os resultados da matriz, que revelam a

opinião da equipe técnica, indicam que o fator X6: *molde* praticamente não interage com os demais. Isso permitiu tratar esse fator como *bloco*, possibilitando uma importante redução no número de ensaios.

Tabela 6.14 - Fatores controláveis no experimento de exposição ao ultravioleta

Fatores controláveis	Níveis reais	Níveis codificados
X1: iniciador BME	0,3% a 0,6%	-1 a +1
X2: intensidade do UV	1800 a 2500	-1 a +1
X3: tempo de exposição ao UV	45 a 85	-1 a +1
X4: temperatura da estufa	95 a 115	-1 a +1
X5: tempo na estufa	85 a 205	-1 a +1
X6: molde	sem ou com	-1 e +1

6.2.1.6 Escolha do modelo estatístico

O modelo estatístico escolhido foi uma adaptação de um projeto composto de segunda ordem. Os projetos compostos de segunda ordem combinam um cubo n -dimensional, referente a um projeto fatorial 2^k , com uma estrela n -dimensional. Neste estudo, o cubo foi formado através de um delineamento fatorial fracionado 2^{5-1} , a estrela, um ponto central e oito pontos extremos correspondentes aos seguintes fatores controláveis a níveis contínuos: X1, X2, X3 e X5. Para o fator X4, *temperatura da estufa*, não foram usados pontos em estrela, pois o número de níveis definido para esse fator foi três (seria preciosismo definir um número maior de níveis, uma vez que a temperatura da estufa não pode ser ajustada com muita precisão). O fator X6: *molde* foi tratado como bloco. Para tanto, os pontos da estrela foram repetidos duas vezes e os pontos do cubo foram divididos em dois blocos equilibrados, de modo a permitir os ensaios *com* e *sem* molde.

A escolha de um projeto composto de segunda ordem deve-se ao interesse em avaliar interações de dois fatores e efeitos quadráticos que poderiam estar presentes (ver figura 6.9).

O fracionamento foi feito de forma que todos os efeitos principais ficassem livres de interações de dois fatores, e as próprias interações de dois fatores não seriam confundidas entre si. Como o fator X6 foi introduzido como bloco, esse projeto não

permite avaliar interações que envolvam X_6 ; contudo, os técnicos não acreditam que essas interações sejam significativas.

6.2.1.7 Determinação da matriz experimental:

A matriz experimental e os valores medidos para as variáveis resposta (média e desvio padrão) aparecem na Tabela 6.15.

6.2.2 Conclusões do Planejamento da Otimização do Processo de Exposição ao Ultravioleta

Nesse estudo, o planejamento da otimização do processo tomou como base a opinião de engenheiros. Essas informações englobam inicialmente a definição das variáveis resposta, parâmetros do processo, fatores ruído e investigação das relações e interações.

A matriz de planejamento da otimização do processos apontou quais parâmetros do processo mais importantes que deveriam ser controlados no estudo. Outras importantes informações foram registradas na matriz, como por exemplo, a possibilidade de bloquear o fator X_6 que possivelmente não tem interações significativas com os outros parâmetros do processo.

Para escolha do modelo estatístico e posterior otimização foram utilizados dados provenientes do preenchimento da matriz de planejamento da otimização.

O uso da matriz tornou mais fácil o entendimento dos engenheiros em relação à aspectos importantes na definição do modelo estatístico. Ao mesmo tempo, para aquele que detém o conhecimento estatístico, foi possível planejar o experimento com o conhecimento prévio dos engenheiros a respeito do processo.

Tabela 6.15 - Matriz experimental para o experimento do processo de exposição ao ultravioleta

ordem	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Médias				Desvios			
							Y1	Y2	Y3	Y4	S1	S2	S3	S4
	INI	IUV	TUV	TTE	TPE	MOL	Dsec	Osec	Cbas	Grau	Dsec	Osec	Cbas	Grau
20	-1	0	0	0	0	1								
34	-1	0	0	0	0	-1								
30	1	0	0	0	0	1								
18	1	0	0	0	0	-1								
16	0	-1	0	0	0	1								
2	0	-1	0	0	0	-1								
10	0	1	0	0	0	1								
22	0	1	0	0	0	-1								
14	0	0	-1	0	0	1								
28	0	0	-1	0	0	-1								
26	0	0	1	0	0	1								
1	0	0	1	0	0	-1								
32	0	0	0	0	-1	1								
8	0	0	0	0	-1	-1								
4	0	0	0	0	1	1								
24	0	0	0	0	1	-1								
17	-0,5	-0,5	-0,5	1	-0,5	1								
23	-0,5	-0,5	-0,5	-1	0,5	1								
13	-0,5	-0,5	0,5	-1	-0,5	1								
7	-0,5	-0,5	0,5	1	0,5	1								
29	-0,5	0,5	-0,5	-1	-0,5	-1								
15	-0,5	0,5	-0,5	1	0,5	-1								
3	-0,5	0,5	0,5	1	-0,5	-1								
25	-0,5	0,5	0,5	-1	0,5	-1								
9	0,5	-0,5	-0,5	-1	-0,5	-1								
19	0,5	-0,5	-0,5	1	0,5	-1								
5	0,5	-0,5	0,5	1	-0,5	-1								
31	0,5	-0,5	0,5	-1	0,5	-1								
33	0,5	0,5	-0,5	1	-0,5	1								
27	0,5	0,5	-0,5	-1	0,5	1								
11	0,5	0,5	0,5	-1	-0,5	1								
21	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1								
6	0	0	0	0	0	-1								
12	0	0	0	0	0	1								

A execução do experimento e a otimização das variáveis resposta encontram-se em Ribeiro, Caten e Echeveste, 1996.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 CONCLUSÕES

Essa dissertação desenvolveu uma plataforma para planejar a otimização experimental de produtos e processos.

A plataforma de planejamento da otimização de processos pode ser utilizada quando a equipe tem conhecimento de qual processo traria melhorias na qualidade através da otimização experimental, ou ainda, pode ser utilizada num contexto maior quando a equipe não tem conhecimento em qual processo é pertinente a otimização. Para isso, essa dissertação propõe um método de identificação de processos críticos para qualidade.

O método de identificação de processos críticos utiliza *pesquisa de mercado* na identificação da qualidade demandada pelo cliente e *QFD - Desdobramento da Função Qualidade*, que organiza os itens de qualidade demandada e os desdobra por meio de matrizes, apontando quais processos são críticos para a qualidade e em quais deles seria pertinente a otimização experimental. Com esses objetivos, buscou-se na literatura conhecimentos relativos à *pesquisa de mercado*, ao *QFD* e à *otimização experimental de processos*.

Em pesquisa de mercado, apresentaram-se as etapas de planejamento de uma pesquisa através de procedimentos científicos. As etapas de uma pesquisa de mercado englobam um estudo detalhado na formulação do problema, nas hipóteses de pesquisa, no planejamento amostral anterior à coleta de dados propriamente dita. Os resultados da pesquisa são úteis para o conhecimento geral da empresa a respeito da opinião dos clientes

sobre seus produtos ou serviços. Esse conhecimento fornecerá os itens de qualidade demandada e os correspondentes pesos relativos que alimentarão as etapas iniciais do QFD.

O QFD é a ferramenta de planejamento da qualidade utilizada no desdobramento da opinião do cliente (qualidade demandada) em requisitos técnicos (as características de qualidade). O QFD cria uma estrutura de matrizes que pode ser aplicada a diferentes propósitos, como melhorias na qualidade de manufatura e serviços. Mizuno e Akao (1994) propuseram 27 etapas que têm como objetivo organizar a identificação de características de qualidade, processos, equipamentos e partes críticas responsáveis pela qualidade do produto final. Para as etapas propostas por Akao, identificou-se em quais delas é necessário otimizar o processo, sendo necessário, portanto, planejar essa otimização.

O planejamento da otimização é o tema discutido nesta dissertação, por isso foram estudadas etapas de planejamento propostas por diferentes autores concernentes à otimização de processos. Essas etapas englobam a identificação das variáveis resposta, dos fatores ruído, fatores controláveis e seus níveis, escolha do modelo estatístico e definição da matriz experimental. A partir dos resultados do experimento, o próximo passo é a otimização das variáveis. Alguns métodos de otimização foram apresentados, entre eles a metodologia de superfície resposta, a função perda quadrática de Taguchi e os métodos baseados na função perda quadrática multivariada.

Por outro lado, essa dissertação também tem como objetivo secundário a identificação de processos críticos para a qualidade, direcionando possíveis melhorias para esses processos e os encaminhando, quando pertinente, à otimização experimental. Para esse segundo objetivo propõe-se um método de identificação de processos críticos utilizando as matrizes do QFD que é apropriado a casos onde a empresa demanda um estudo mais completo e não tem uma idéia clara de onde melhorias poderiam ser tomadas e nem quais processos obteriam ganhos com a otimização experimental.

Esse método constitui-se de quatro fases. A fase 1 refere-se ao *desdobramento da qualidade*, a fase 2 ao *desdobramento dos processos*, a fase 3 ao *direcionamento das ações de melhoria* e a fase 4 ao *planejamento da otimização de processos*. O método de identificação de processos críticos constitui-se das fases 1, 2 e 3 e a plataforma de planejamento da otimização constitui-se a fase 4. Quando a equipe tem conhecimento dos processos críticos a serem otimizados, pode-se iniciar pela fase 4.

O planejamento da otimização é composto de 7 etapas que formam uma plataforma de planejamento da otimização de processos que visa, no âmbito geral, estreitar as lacunas entre o conhecimento estatístico e o conhecimento prático dos engenheiros ou pessoal de produção. Com esses objetivos, a plataforma engloba a identificação das variáveis resposta, parâmetros do processo e fatores ruído, levantados a partir do conhecimento da equipe da empresa. Uma das etapas da plataforma é o preenchimento da matriz de planejamento da otimização de processos que quantifica a intensidade das relações e interações entre os parâmetros do processo, variáveis resposta e fatores ruído identificados pela equipe. Para facilitar a utilização da plataforma pode ser utilizado um programa computacional.

O método proposto foi aplicado a dois estudos de caso. O primeiro estudo relatado contempla as quatro fases e apresentou o desdobramento referente à qualidade do couro de uma fábrica de calçados. O segundo estudo de caso refere-se à aplicação da fase 4 de planejamento da otimização a um processo de exposição de lentes de contato ao ultravioleta.

A aplicação da plataforma de otimização de processos proposta nesta dissertação levou a maior integração da equipe formada por profissionais de diferentes áreas, propiciando uma grande troca de conhecimento, transformando informações em dados importantes para o planejamento da otimização experimental.

Uma das etapas da plataforma, o preenchimento da matriz de otimização de processos transformou o conhecimento subjetivo dos técnicos em índices que permitiram estabelecer o modelo estatístico adequado e a matriz experimental do experimento. Estes índices são determinados a partir de uma escala pré-definida que quantifica o entendimento subjetivo da equipe, antes da realização do experimento.

Em linhas gerais, o uso da plataforma de otimização levou a:

- A plataforma tornou mais fácil o entendimento e o planejamento de experimentos que visem otimização por pessoas que têm pouco conhecimento estatístico.
- Planejamentos mais eficientes, pois os parâmetros do processo e as variáveis resposta estudadas foram resultantes de discussões da equipe resumidas e organizadas com o preenchimento da matriz.

- Escolha adequada do modelo estatístico, já que a plataforma propiciou estreitar as lacunas entre o conhecimento estatístico e o conhecimento técnico permitindo projetar um experimento estruturado estatisticamente e ao mesmo tempo viável na prática.

- Investigação de regiões experimentais que facilitam a busca do ajuste ótimo, uma vez que os parâmetros do processo selecionados são os mais importantes no processo, segundo o conhecimento prévio da equipe. Também quanto aos intervalos de investigação, considerando a opinião da equipe técnica, evitar-se-ia realizar ensaios em regiões experimentais impossíveis de serem obtidas do ponto de vista operacional.

Além disso, a plataforma de planejamento pode estar inserida num programa de qualidade maior, vinculado com todo sistema produtivo, resultando na otimização de processos cujas variáveis têm relação pronunciada com as características finais do produto.

7.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Essa dissertação foi desenvolvida gradativamente a partir de oportunidades em empresas onde foi propícia a aplicação de técnicas de engenharia de qualidade discutidas aqui, como o QFD e a otimização experimental. Muitas empresas tinham algum conhecimento de tais técnicas, no entanto, não sabiam exatamente como aplicá-las, ou não sabiam que melhorias essas técnicas trariam para a qualidade de seus processos.

O método de identificação de processos críticos e posterior otimização experimental busca elucidar o caminho a ser percorrido. Nas empresas onde o método proposto foi aplicado observou-se que os resultados trouxeram melhorias para a qualidade do produto final. Além disso, para aquelas empresas que não conheciam tais técnicas, a sua utilização alertou o interesse e a motivação para pesquisa, no sentido de tomar decisões baseadas em procedimentos científicos e não simplesmente por empirismo.

Essa dissertação faz parte de uma linha de pesquisa da equipe de engenharia de qualidade do Programa de Pós-graduação de Engenharia de Produção da UFRGS. O assunto abordado nesta dissertação é a primeira fase do estudo de otimização experimental, já que se refere ao planejamento desse estudo. Outras dissertações foram ou estão sendo desenvolvidas com o objetivo de estudar a otimização propriamente dita, ampliando as

técnicas estatísticas utilizadas. Paralelamente ao estudo teórico, são desenvolvidos programas computacionais com o objetivo de facilitar o uso destas técnicas e permitir que elas sejam utilizadas cada vez mais pelas empresas.

Sugere-se que a plataforma de otimização experimental que até o momento foi aplicada a processos industriais fosse estendida à otimização de experimentos de outras áreas, como a área médica, transportes, agronomia, etc.

ANEXO I

Planilha de planejamento da otimização experimental de processos

TÍTULO DO ESTUDO
Objetivos do Estudo
Equipe de Trabalho
Local e data

A voz do Cliente:

Demanda de Qualidade	Importância

A voz da equipe técnica:

Variáveis resposta	unidade	Tipo	Alvo (unidades)	Especificações		Importância
				Min	Max	
Y1:						
Y2:						
Y3:						
Y4:						
Y5:						
Y6:						
Y5:						
Y8:						
Y9:						
Y10:						

Parâmetros do processo	uni- dade	Ajuste atual	CV	Ajuste Sugerido	Intervalo		Facilid. ajuste
					MIN	MAX	
X1:							
X2:							
X3:							
X4:							
X5:							
X6:							
X7:							
X8:							
X9:							
X10:							

Fatores ruído	Faixa de variação
Z1:	
Z2:	
Z3:	
Z4:	
Z5:	
Z6:	
Z7:	
Z8:	
Z9:	
Z10:	

Observações

A priorização dos parâmetros do processo é feita em função de 4 aspectos:

- Grau de interação dos parâmetros do processo (K1);
- Efeito dos parâmetros do processo sobre as variáveis resposta (K2);
- Efeito dos parâmetros do processo sobre os fatores ruído (K3);
- Facilidade de ajuste (FA).

O formulário para os cálculos é o seguinte:

$$K1(x_j) = (\sum_i I_{ij}) / (P - 1)$$

$$K2(x_j) = \sum_i IE_i \times VR_{ij} / \sum_i IE_i, \quad i=1, \dots, Q$$

$$IR_j = \sum_i IE_i \times RR_{ij} / \sum_i IE_i, \quad i=1, \dots, Q$$

$$K3(x_j) = \sum_i (IR_i \times IL_{ij}) / \sum_i IR_i, \quad i=1, \dots, R$$

$$PR(x_j) = [K1(x_j) + K2(x_j) + K3(x_j)] \times FA(x_j)$$

onde:

- Q número de variáveis resposta
P número de parâmetros do processo
R número de fatores ruído
I_{ij} índice de interação entre os parâmetros do processo i e j
VR_{ij} relação entre a variável de resposta i e o parâmetro do processo j
RR_{ij} relação entre a variável de resposta i e o fator ruído j
IE_i índice de importância para a variável de resposta i
IR_j índice de importância para o fator ruído j
IL_{ij} índice de interação entre o parâmetro de processo i e a fator ruído j
FA(x_j) Facilidade de ajuste para o parâmetro de processo j

Priorização:

Fatores controláveis	PR	Níveis reais	Níveis codificados

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AKAO, Y. **Quality Function Deployment** : Integrating Customer Requirements into Product Design. Cambridge,: Productivity, 1990. 369 p.
- 2 ARMACOST, R. L. et al. An AHP Framework for Prioritizing Customer Requirements in QFD : an Industrialized Housing Application. **IIE Transactions**, v. 24, n. 4, p. 72-79, july 1994.
- 3 BLAKE, S., LAUSBY, R. G., WEESE, D. L. Experimental Design Meets the Realities of the 1990s. **Quality Progress**. Milwaukee, p. 99-101, oct. 1994.
- 4 BOYD, H. W., WESTFALL, R. **Pesquisa mercadológica**. Rio de Janeiro : Fundação Getúlio Vargas, 1973. 788 p.
- 5 BOX, G. E. P., DRAPER, N. **Empirical Model Building and Response Surfaces**. New York : John Wiley and Sons, 1987. 668 p.
- 6 BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters**. New York : John Wiley, 1978. 654 p.
- 7 BYRNE, M. D., TAGUCHI, S. The Taguchi Approach to Parameter Design. **Quality Progress**, v. 20, n. 12, p. 19-26, dec. 1987.
- 8 CAMPOS, V. F. **TQC - Controle da qualidade total (no estilo japonês)**. Belo Horizonte : Fundação Christiano Ottoni; Escola de Engenharia da UFMG, 1992. 220 p.
- 9 CATEN, C. S. **Método de otimização de produtos e processos medidos por múltiplas características de qualidade**. Porto Alegre, 1995, 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- 10 CHANG, I. S., SHIVPURI, R. A Multiple-Objective Decision-Making Approach for Assessing Simultaneous Improvement in Die Life and Casting Quality in a Die Casting Process. **Quality Engineering**, v. 7, n. 2, p. 371-383, 1994-1995.
- 11 CHISNALL, Peter M. **Marketing Research** : Analysis and Measurement. New York : Mc Graw-Hill, 1973. 308p.
- 12 COLEMAN, D. E., MONTGOMERY, D. C. A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. **Technometrics**, v. 35, n. 1, p. 1-12, feb. 1993.
- 13 DAETZ, D. QFD: A Method for Guaranteeing Communication of the Customer Voice through the Whole Product Development Cycle. **IEEE International Conference on Communications**, june, 1989. 6 p.
- 14 ECHEVESTE, M.E., RIBEIRO, J. L., CATEN, C. **Planejamento de experimentos e otimização em um processo de pintura de lentes de contato**. Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1995. 20 p. Relatório Técnico, 04/95.
- 15 ELSAYED, E. A., CHEN, A. Optimal Levels of Process Parameters for Products with Multiple Characteristics. **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 5, p. 1117-1132, 1993.

- 16 ELSAYED, E. A., Ribeiro, J. L. A Case Study on Process Optimization Using the Gradiente Loss Function. **International Journal of Production Research**, v. 33, n.12, p. 3233-3248, set. 1995.
- 17 EUREKA, W.E., RYAN, N.E. **QFD - Perspectivas gerenciais do desdobramento da função qualidade**. Rio de Janeiro : Qualitymark. 1993. 105 p.
- 18 FRITCH, C., RIBEIRO, J.L. **Software de planejamento da otimização experimental**. Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996.
- 19 FORTUNA, R.M. Beyond Quality : Taking SPS Upstream. **Quality Progress**, v. 21, n. 6, p. 23-28, 1988.
- 20 FOO, S., HOSSEINI, J.C. A Framework for Analyzing Perceptual Quality in Manufacturing. **Quality Engineering**, v.7, n. 4, p. 705-717, 1995.
- 21 GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 2.ed. São Paulo : Atlas, 1989. 206p.
- 22 GLUSHKOVSKY, E. A., FLORESCU, R.A., HERSHKOVITS, A., SIPPER, D. Avoid a Flop: Use QFD with Questionnaires. **Quality Progress**, v. 28, n. 6, p. 57-62, june 1995.
- 23 GOPALAKRISHANAN, K.N., MCINTYRE, B.E., SPRAGUE, J.C. Implementing Internal Quality Improvement with the House of Quality. **Quality Progress**, p.57-60, sept. 1992.
- 24 HAUSER, J.R., CLAUSING, D. The House of Quality. **Harvard Business Review**, v. 66, n. 3, p. 63-73, may-june 1988.
- 25 HAHN, G. J. Somethings engineers should know about experimental design. **Journal of Quality Technology**. Milwaukee, v. 9, n. 1, p. 13-20, jan. 1977.
- 26 _____. Experimental Design in the Complex World. **Technometrics**. Washington, v.26, n. 1, p. 19-31, feb. 1984.
- 27 HAVENER, C. Improving the Quality of quality. **Quality Progress**, v.26, n. 6, p.41-44, nov. 1993.
- 28 HICKS, C.R. **Fundamental Concepts in The Design of Experiments**. (LOCAL) : Hoh Rienehart and Winston, 1964. 293 p.
- 29 KASPER, H., LEMMINK, J. After Sales Service Quality : Views between Industrial Customers Service Managers. **Industrial Marketing Management**, n. 18, p. 199-208. 1989.
- 30 KAPUR, K.C., CHO, B.R. Univariate and multivariate Quality Loss Function. In: IASTED INTERNATIONAL CONFERENCE, **Proceedings of the IASTED International Conference**. Massachusetts : IASTED, 1991. p. 9-13.
- 31 KING, R. Listening to the Voice of the Customer : Using the Quality Function Deployment System. **National Productivity Review**. New York, v. 6, n. 3, p. 277-281, 1987.
- 32 KOTLER, P. **Administração de Marketing : análise, planejamento e controle**. São Paulo : Atlas, 1981. 384 p.

- 33 LAYNE, K.L. Methods to Determine Optimum Factor Levels for Multiple Responses in Designed Experimentation. **Quality Engineering**, v. 7, n.4, p. 649-656, 1995.
- 34 MADDUX, G.A., AMOS, R.W., WYSKIDA, A.R. Organization Can Apply Quality Function Deployment as Strategic Planning Tool. **Industrial Engineering**. Norcross p.33-37, sept. 1991.
- 35 MATTAR, F.N. **Pesquisa de marketing**. São Paulo : Atlas, 1993a. v.1. 350 p.
- 36 _____. **Pesquisa de marketing**, São Paulo : Atlas, 1993b. v.2, 225 p.
- 37 MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 3rd.ed. New York : John Wiley and Sons, 1991. 645 p.
- 38 MIZUNO, S., AKAO, Y. **QFD - The Customer Driven Approach to Quality Planning and Design**. Tokyo : Asian Productivity Organization, 1994. 365 p.
- 39 MYERS, R.H. **Response Surface Methodology**. Boston : Allyn and Bacon, 1971. 231p.
- 40 MYERS, R.H., KHURI, A.I., VINING, G. Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach. **The American Statistician**, v. 46, n. 2, p. 131-139, may 1992.
- 41 MOTA, E. **Desdobramento da qualidade em hospitais**. Porto Alegre, 1996. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.
- 42 O'NEAL, C.R., LAFIEF, W.C. Marketing Lead Role in Total Quality : Views Between Industrial Customers Service Managers. **Industrial Marketing Management**. New York, n.21, p. 133-143, 1992.
- 43 PASA, G.S., RIBEIRO, J.L., CATEN, C.S. **Otimização da receita de banda pré-curada da empresa Tipler Ltda**. Porto Alegre : Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1995. 16 p. Relatório Técnico 07/95.
- 44 PHADKE, M.S. **Quality Engineering Using Robust**. New Jersey : Englewood Cliffs, 1989. 333 p.
- 45 PIGNATIELLO JR., J.J. Strategies for Robust Multiresponse Quality Engineering. **IIE Transactions**, v. 25, n.3, p. 5-15, may 1993.
- 46 QUENOUILLE, M.H. **The Design and Analysis of Experiment**. London : Charles Griffin, 1953. 356 p.
- 47 RIBEIRO, J.L., ALBIN, S. **An Objective Function of Multiple Quality Characteristics for Parameter Optimization Experiments**. (LOCAL) : Department of Industrial Engineering, Rutgers University, 1993. 15 p. IE Working Paper.
- 48 RIBEIRO, J.L. **A Quality Engineering Case Study on the Production Line of a Cosmetic Industry**. (LOCAL) : Department of Industrial Engineering, Rutgers University, oct. 1993. 27 p. IE Working Paper.
- 49 RIBEIRO, J.L., ECHEVESTE, M.E. **A aplicação do projeto de experimentos no ambiente QFD**. Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1994. 20 P. Caderno Técnico 03/94.

- 50 RIBEIRO, J.L. e ELSAYED, E.A. **A Gradient Loss Function for Process Optimization.** (LOCAL) : Department of Industrial Engineering, Rutgers University, USA, 1993. 23 p. IE Working Paper.
- 51 RIBEIRO, J.L. **Do planejamento à manufatura com o emprego do QFD.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1994. 46 p. Notas de aula.
- 52 RIBEIRO, J.L., CATEN, C.S. **Planejamento da otimização experimental da extrusora na empresa Moreflex Borrachas Ltda.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1995. 18 p.
- 53 RIBEIRO, J.L., FERREIRA, A.M. O uso do QFD no gerenciamento de projetos: um estudo de caso no setor de serviços. In: ENEGEP, 15º, 1995, São Carlos. **Anais do XV ENEGEP.** São Carlos : ENEGEP, 1995. v. 1, p. 507-512.
- 54 RIBEIRO, J.L., ECHEVESTE, M.E., CATEN, C.S. **Investigação experimental do desgaste em cilindros e pistões.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1995. 13 p.
- 55 RIBEIRO, J.L., CATEN, C.S., ECHEVESTE, M., VIGO, A. **Planejamento e otimização da receita de bandas pré-curadas, modelo radial, na empresa Moreflex Borrachas Ltda.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1995. 16 p. Relatório Técnico 01/95.
- 56 RIBEIRO, J.L., CATEN, C.S., ECHEVESTE, M. **Otimização experimental do processo de exposição de lentes de contato ao ultravioleta.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996. 14 p. Relatório Técnico, 02/96.
- 57 RIBEIRO, J.L., ECHEVESTE, M. E. **Desdobramento da matriz de qualidade numa fábrica de calçados.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996. 18 p. Relatório Técnico, 03/96.
- 58 RIBEIRO, J. L., CATEN, C. S. **Desdobramento da matriz de processos numa fábrica de calçados.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996. 19 p. Relatório Técnico, 04/96.
- 59 RIBEIRO, J.L., CATEN, C. **Implementação do CEP na linha de montagem de uma fábrica de calçados.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996b. 30 p. Relatório Técnico, 05/96.
- 60 RIBEIRO, J.L. **Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996. 52 p. Notas de Aula.
- 61 RIBEIRO, J. L., ECHEVESTE, M., CATEN, C. **Implantação de CEP no curtume de uma fábrica de calçados.** Porto Alegre : Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção / UFRGS, 1996. 52 p. Relatório Técnico, 06/96.
- 62 RIBOLDI, J., NASCIMENTO, L.C.S.C. **Metodologia de superfície resposta : uma abordagem introdutória. Caderno de Matemática e Estatística.** Porto Alegre, n.25, série B, 1994.
- 63 ROSS, P.J. The Role of Taguchi Methods and Design of Experiments in QFD. **Quality Progress**, (LOCAL), v. 21, n.6, p.41-47, june 1988.

- 64 SHAIK, K. Thrill your Customer, Be a Winner. Symposium on Quality Function Deployment jointly sponsored by ASI., **Automotive Division of A.S.Q.C.**, and G.O.A.L /QPC. Novi, Michigan, jun. 1989. 4 p.
- 65 SAATY, T.L. **Método de análise hierárquica**. Tradução e Revisão Técnica Wainer da Silveira e Silva. Rio de Janeiro : McGraw-Hill, 1980. 367 p.
- 66 WASSERMANN, G.S. On How to Prioritize Design Requiriments During the QFD Planning Process. **IIE Transactions**, (LOCAL), v. 25, n. 3, p. 59-65, may 1993.