

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE  
FORMULAÇÕES: UM ESTUDO DE CASO NO SETOR ALIMENTÍCIO**

**Corina Márcia Rangel Martins**

**Porto Alegre, 2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE  
FORMULAÇÕES: UM ESTUDO DE CASO NO SETOR ALIMENTÍCIO**

**Mestranda: Corina Márcia Rangel Martins**

**Orientador: Prof. Flávio S. Fogliatto, Ph.D**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dra. Carla Schwengler Ten Caten**

**Prof. Dra. Simone Hickmann Flores**

**Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio**

**Trabalho de conclusão do Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia – Ênfase: Qualidade,  
Desenvolvimento de Produto e Processo.**

**Porto Alegre, 2002**

**Este trabalho de conclusão foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

---

**Prof. Flávio S. Fogliatto, Ph.D**

Orientador  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof. Dra. Helena Beatriz Bettella Cybis**

Coordenadora  
Mestrado Profissionalizante  
Escola de Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dra. Carla Schwengler Ten Caten**  
PPGEP/UFRGS

**Prof. Dra. Simone Hickmann Flores**  
ICTA/UFRGS

**Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio**  
ENQ/UFRGS

*Aos meus filhos Lucas, Ana Luiza e Renata.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, José e Luiza, e ao meu esposo, Renato, pelo incentivo e pelas condições necessárias propiciadas para a realização deste mestrado.

Agradeço aos professores do PPGE/UFGRS, pela contribuição à minha formação profissional e, de forma especial, ao meu orientador, Prof. Flávio S. Fogliatto, Ph.D, pela valiosa orientação, principalmente, pela paciência a qual fez com que eu não desistisse ao longo do caminho.

Ao colega Vítor Ruffoni gostaria de agradecer o empenho em sugerir e fornecer material necessário ao meu trabalho, o que muitas vezes fez com que o desânimo fosse substituído por ânimo redobrado.

Agradeço à empresa Liteq Ind. e Com. Ltda, a qual, gentilmente, cedeu a máquina Universal Lloveras UL20 para a realização dos experimentos.

À Praver-Chocolates Finos Gramado Ltda agradeço a oportunidade de executar este trabalho.

À engenheira de alimentos Cristiane Allgayer, agradeço a boa vontade e persistência em busca de soluções para os problemas encontrados para a realização do estudo de caso.

Aos professores Dra. Carla S. Ten Caten, Dr. Nilson Romeu Marcilio e Dra. Simone Hickmann Flores, agradeço a gentileza de terem aceito o convite para compor a banca examinadora.

E, finalmente, agradeço a Deus por ter colocado todas essas pessoas no meu caminho, tornando possível a realização deste trabalho.

***“O rio atinge seus objetivos, porque aprendeu a contornar seus obstáculos”.***

(autor desconhecido)

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvi</b>

### **CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO**

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 O TEMA E SUA IMPORTÂNCIA.....	3
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.3 O MÉTODO DE TRABALHO .....	4
1.4 LIMITAÇÕES .....	5
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	5

### **CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**

<b>2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO.....</b>	<b>8</b>
2.1 CONCEITO DE PRODUTO .....	8
2.2 CLASSIFICAÇÃO DE PRODUTOS.....	9
2.3 DEFINIÇÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO.....	10
2.4 TÉCNICAS PROJETUAIS .....	17
<b>2.4.1 Conceito de projeto .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2 Categorias de projeto .....</b>	<b>17</b>

<b>2.4.3</b>	<b>Formas de projetar</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Tipos de projeto</b> .....	<b>20</b>
<b>2.5</b>	<b>FASES DO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Pesquisa de mercado</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Definição da tarefa</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Definição do conceito</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Projeto preliminar</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5.5</b>	<b>Projeto detalhado</b> .....	<b>22</b>
<b>2.5.6</b>	<b>Avaliação do projeto (“prototipação”)</b> .....	<b>23</b>
<b>2.6</b>	<b>O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO E SUA GESTÃO</b> .....	<b>26</b>
<b>2.6.1</b>	<b>Metodologias de gestão de projetos</b> .....	<b>27</b>

### **CAPÍTULO III - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PROJETOS DE EXPERIMENTOS**

<b>3</b>	<b>PROJETOS DE EXPERIMENTOS</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>PROJETO COMPOSTO CENTRAL</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>PROJETOS DE EXPERIMENTOS COM FORMULAÇÕES</b> .....	<b>44</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Definição e Conceitos</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Projetos exploratórios iniciais</b> .....	<b>49</b>
<b>3.2.2.1</b>	<b>Projetos simplex-lattice</b> .....	<b>49</b>
<b>3.2.2.2</b>	<b>Projeto simplex-centróide</b> .....	<b>52</b>
<b>3.2.2.3</b>	<b>Projetos Axiais</b> .....	<b>57</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Técnicas utilizadas no Planejamento e Análise de Dados dos Experimentos com Formulações quando a região de interesse é uma sub-região do espaço “simplex”</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.3.1</b>	<b>Pseudocomponentes</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.3.2</b>	<b>Utilização de sub-regiões elipsoidais</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2.3.3</b>	<b>Utilização de variáveis independentes</b> .....	<b>62</b>

### **CAPÍTULO IV - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AVALIAÇÃO SENSORIAL**

<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO SENSORIAL</b> .....	<b>70</b>
<b>4.1</b>	<b>ÓRGÃOS DOS SENTIDOS</b> .....	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>PAINEL SENSORIAL</b> .....	<b>73</b>



4.3	MÉTODOS SENSORIAIS DE AVALIAÇÃO.....	73
<b>4.3.1</b>	<b>Métodos discriminativos .....</b>	<b>74</b>
4.3.1.1	Teste de Sensibilidade ou <i>Threshold</i> .....	74
4.3.1.2	Testes de Diferença .....	75
<b>4.3.2</b>	<b>Métodos Analíticos ou descritivos.....</b>	<b>78</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Métodos Afetivos de Preferência e Aceitabilidade .....</b>	<b>79</b>

## CAPÍTULO V - PROPOSTA METODOLÓGICA

<b>5</b>	<b>PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE FORMULAÇÕES.....</b>	<b>82</b>
5.1	ETAPA 1- IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	85
<b>5.1.1</b>	<b>Identificação dos objetivos.....</b>	<b>85</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Ouvir a “voz” do cliente (o quê ?).....</b>	<b>85</b>
5.1.2.1	Pesquisa de mercado.....	85
5.1.2.2	Associar a qualidade demandada com as características de qualidade.....	87
<b>5.1.3</b>	<b>Ouvir a “voz” do engenheiro (como?).....</b>	<b>88</b>
5.1.3.1	Eleger variáveis de resposta associadas a cada característica de qualidade .....	88
5.1.3.2	Identificar outras variáveis de resposta de interesse.....	89
5.1.3.3	Identificar os parâmetros do processo.....	89
5.1.3.4	Identificar possíveis interações entre os fatores controláveis.....	90
5.1.3.5	Identificar o intervalo de variação dos fatores controláveis.....	91
5.1.3.6	Definir o número de níveis para cada fator controlável.....	91
5.1.3.7	Identificar restrições experimentais.....	91
5.1.3.8	Identificar a necessidade de rodadas prévias.....	91
5.1.3.9	Identificar associações entre as variáveis de resposta.....	92
5.2	ETAPA 2- PLANEJAMENTO FINAL DOS EXPERIMENTOS .....	92
<b>5.2.1</b>	<b>Escolha do modelo estatístico .....</b>	<b>92</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Projeto de experimentos com formulações .....</b>	<b>93</b>
5.2.2.1	Transformação para variáveis independentes.....	93
5.2.2.2	Matriz experimental expressa em variáveis independentes.....	93
5.2.2.3	Transformação das variáveis independentes nas variáveis dependentes originais – Transformação inversa .....	93
5.2.2.4	Matriz experimental expressa em proporções dos ingredientes das formulações.....	94

<b>5.2.3</b>	<b>Execução dos experimentos .....</b>	<b>94</b>
5.3	ETAPA 3 - SELEÇÃO DAS MELHORES RODADAS EXPERIMENTAIS QUANTO À CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE FLAVOR.....	94
5.4	ETAPA 4 - OBTENÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS DAS RODADAS EXPERIMENTAIS SELECIONADAS NA ETAPA 3.....	94
5.5	ETAPA 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	95
<b>5.5.1</b>	<b>Modelagem individual.....</b>	<b>95</b>
<b>5.5.2</b>	<b>Otimização individual e transformação inversa.....</b>	<b>96</b>
<b>5.5.3</b>	<b>Definir uma função objetivo global .....</b>	<b>96</b>
<b>5.5.4</b>	<b>Otimização global e transformação inversa.....</b>	<b>100</b>
5.6	ETAPA 6- INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS .....	101
5.7	ETAPA 7- <i>SCALE-UP</i> .....	101
5.8	ETAPA 8- VALIDAÇÃO DO PRODUTO.....	102

## **CAPÍTULO VI - ESTUDO DE CASO**

<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>104</b>
6.1	ETAPA 1- IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA.....	105
<b>6.1.1</b>	<b>Identificação dos objetivos.....</b>	<b>106</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Ouvir a “voz” do engenheiro (como?).....</b>	<b>107</b>
6.1.2.1	Eleger as variáveis de resposta associadas a cada característica de qualidade..	112
6.1.2.2	Identificação dos parâmetros do processo. ....	113
6.1.2.3	Identificação das possíveis interações entre os fatores controláveis .....	115
6.1.2.4	Identificar o intervalo de variação dos fatores controláveis. ....	115
6.1.2.5	Definir o número de níveis dos fatores controláveis. ....	116
6.1.2.6	Restrições experimentais .....	116
6.1.2.7	Identificar a necessidade de rodadas prévias .....	116
6.2	ETAPA 2 - PLANEJAMENTO FINAL DOS EXPERIMENTOS. ....	117
<b>6.2.1</b>	<b>Escolha do modelo estatístico .....</b>	<b>117</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Projeto de experimentos com formulações .....</b>	<b>118</b>
6.2.2.1	Obtenção da matriz experimental expressa em variáveis dependentes – Transformação inversa .....	118
<b>6.2.3</b>	<b>Execução dos experimentos .....</b>	<b>122</b>

6.3	ETAPA 3 – SELEÇÃO DAS MELHORES RODADAS EXPERIMENTAIS QUANTO À CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE <i>FLAVOR</i> .....	125
6.4	ETAPA 4 – OBTENÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS DAS RODADAS EXPERIMENTAIS SELECIONADAS NA ETAPA 3.....	126
6.5	ETAPA 5 - ANÁLISE DOS DADOS .....	128
6.5.1	<b>Modelagem individual das variáveis de resposta qualitativas e quantitativas</b>	<b>129</b>
6.5.2	<b>Otimização individual das variáveis de resposta e transformação inversa .....</b>	<b>130</b>
6.5.3	<b>Definir função objetivo global.....</b>	<b>133</b>
6.5.4	<b>Otimização global e transformação inversa.....</b>	<b>134</b>
6.6	ETAPA 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	135

## **CAPÍTULO VII - COMENTÁRIOS FINAIS**

7	<b>COMENTÁRIOS FINAIS .....</b>	<b>137</b>
7.1	CONCLUSÕES .....	137
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:.....	139

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>140</b>
--------------------------	------------

<b>ANEXOS .....</b>	<b>145</b>
---------------------	------------

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases da inovação tecnológica .....	18
Figura 2 – As fases de um projeto .....	24
Figura 3 – Fases de um projeto.....	25
Figura 4 – Desenvolvimento em espiral de projetos. ....	26
Figura 5 – Engenharia Convencional .....	28
Figura 6 – Engenharia Simultânea.....	31
Figura 7 – Mudança de paradigma dos esforços de engenharia .....	31
Figura 8 – Perfil dos profissionais em desenvolvimento de produtos.....	33
Figura 9 – Modelo Geral de um Processo ou Sistema.....	38
Figura 10 – Projeto composto central de segunda ordem ( $\alpha = 1,41$ ) .....	44
Figura 11 – Espaço fatorial simplex para uma formulação com três ingredientes.....	46
Figura 12 – Espaço fatorial simplex para uma formulação com quatro ingredientes .....	47
Figura 13 – Sistema de coordenadas simplex para três ingredientes. ....	48
Figura 14 – Representação cartesiana do espaço experimental de uma formulação de três ingredientes.....	48
Figura 15 – Projeto simplex-lattice $\{3, 2\}$ .....	51
Figura 16 – Projeto simplex-lattice $\{3, 3\}$ .....	51
Figura 17 – Projeto simplex-lattice $\{4, 2\}$ .....	51
Figura 18 – Projeto simplex-centróide para três ingredientes .....	53
Figura 19 – Projeto simplex-centróide para quatro ingredientes.....	54
Figura 20 – Eixos dos ingredientes $x_1, x_2$ e $x_3$ . ....	58

Figura 21 – Projeto Axial para três componentes cuja distância do ponto central do simplex aos pontos do projeto é $\Delta$ .....	58
Figura 22 – Espaço experimental para uma formulação de três ingredientes. ....	61
Figura 23 – Poliedro irregular inscrito no triângulo resultante das restrições impostas às proporções dos ingredientes da formulação. ....	61
Figura 24 – Espaço experimental na forma de uma região elipsoidal inscrita no poliedro irregular .....	62
Figura 25 – Fluxograma da metodologia de otimização experimental de formulações .....	84
Figura 26 – Representação gráfica da perda para variáveis de resposta do tipo maior é melhor .....	99
Figura 27 – Representação gráfica da perda para variáveis de resposta do tipo menor é melhor .....	99
Figura 28 – Representação gráfica da perda para variáveis de resposta do tipo nominal é melhor .....	100
Figura 29 – Máquina Universal Lloveras UL20.....	123
Figura 30 – Esquema do interior do equipamento.....	124
Figura 31 – Disposição das lâminas no interior do equipamento.....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de pontos em um projeto simplex-lattice .....	56
Tabela 2 - Número de termos dos polinômios canônicos.....	56
Tabela 3 - Evolução do mercado de alimentos dietéticos no Brasil, em milhões de US\$. ....	106
Tabela 4 - Formulação tradicional de chocolate ao leite .....	107
Tabela 5 - Ingredientes mais comuns na substituição do açúcar em alimentos. ....	108
Tabela 6 - Formulação chocolate dietético.....	110
Tabela 7 - Formulação modificada do chocolate dietético.....	111
Tabela 8 - Variáveis de resposta qualitativas .....	112
Tabela 9 - Variáveis de resposta quantitativas .....	112
Tabela 10 - Fatores controláveis experimentados .....	114
Tabela 11 - Fatores controláveis mantidos constantes .....	115
Tabela 12 - Intervalo de variação dos fatores controláveis .....	115
Tabela 13 - Número de níveis dos fatores controláveis.....	116
Tabela 14 - Matriz experimental expressa em termos de variáveis independentes ( $w_i$ e $z_{cod}$ ) .....	118
Tabela 15 - Médias ( $\bar{x}_{hi}$ ) e semi-amplitudes ( $h_i$ ) das faixas de variação dos fatores controláveis (proporções dos ingredientes da formulação). ....	119
Tabela 16 - Matriz experimental expressa em termos de variáveis originais.....	122
Tabela 17 - Matriz dos ingredientes das rodadas experimentais selecionadas.....	126
Tabela 18 - Soma das ordens totais das variáveis de resposta qualitativas.....	127
Tabela 19 - Valor calórico dos ingredientes.....	127
Tabela 20 - Preço dos ingredientes.....	128

Tabela 21 - Valores das variáveis de resposta quantitativas .....	128
Tabela 22 - Modelos de regressão ( $\hat{Y}_i$ ), coeficientes de determinação( $R^2$ ) e coeficientes de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) para as variáveis de resposta qualitativas.....	129
Tabela 23 - Modelos de regressão ( $\hat{Y}_i$ ), coeficientes de determinação( $R^2$ ) e coeficientes de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) para as variáveis de resposta quantitativas.....	129
Tabela 24 - Ajuste ótimo expresso em termos de variáveis independentes ( $w_i$ e $Z_{cod}$ ) e o valor da Perda quadrática Multivariada [ $\hat{Z}_i(w)$ ] no ajuste ótimo. ....	134
Tabela 25 - Valores das variáveis de resposta no ajuste ótimo. ....	134
Tabela 26 - Ajuste ótimo expresso em termos das variáveis originais.....	134
Tabela 27 - Formulação de chocolate dietético otimizada .....	135

## RESUMO

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo apresentar uma metodologia para planejamento e análise de experimentos com formulações, em um contexto de múltiplas variáveis de resposta, para aplicação em indústrias alimentícias de pequeno porte que se caracterizam por utilizar métodos empíricos, ou seja, tentativa e erro, no desenvolvimento de seus produtos.

A utilização de Projeto de Experimentos com Formulações, como ferramenta estatística de suporte no desenvolvimento de produtos formulados, tem como objetivo otimizar o planejamento, execução e análise dos experimentos, permitindo que a seqüência de ensaios seja estruturada adequadamente, de forma a traduzir os objetivos a serem atingidos. A metodologia proposta neste trabalho apoia-se nessa ferramenta estatística e põe grande ênfase nas fases de identificação do problema e planejamento, fases nas quais a criatividade do investigador tem uma função muito importante.

A metodologia proposta é ilustrada através de um estudo de caso. As etapas do estudo de caso envolvem: identificação do problema; planejamento do experimento; execução do experimento; seleção das melhores rodadas experimentais quanto a características de qualidade sensoriais através de uma análise sensorial comparativa com um produto similar líder de mercado (benchmarking); modelagem individual das variáveis de resposta e definição de uma função objetivo e otimização. A aplicação de Projetos de Experimentos fez-se através da utilização de variáveis independentes, tornando o método adaptável a situações onde há algum tipo de restrição.

O desenvolvimento do produto, apresentado no estudo de caso, fez-se em um ambiente de Engenharia Simultânea, propiciado pelas características multifuncionais próprias das empresas em questão, reduzindo substancialmente o tempo de desenvolvimento do novo produto, por meio da realização das várias fases do projeto de forma simultânea.

**Palavras Chaves:** Projeto de Experimentos com Formulações, Otimização Multivariada, Desenvolvimento de Produto.



## ABSTRACT

This master's thesis presents a methodology for planning and analysis of experiments with mixtures, in a context of multiple responses, for application in small food companies, which are characterized by the use of empirical methods, that is, trial and error in the development of their products.

The use of Design of Mixture Experiments as a statistical tool in the development of formulated products has the goal to optimize planning, execution and analysis of experiments, allowing the sequence of experimental runs to be properly structured, so that the goals to be fulfilled can be formally expressed. The methodology proposed in this work is based on that statistical tool and emphasizes the stages of problem identification and planning, stages in which the investigator's creativity plays a very important role.

The proposed methodology is illustrated in a case study. The steps in the case study are: problem identification; experiment planning; experiment execution; selection of the best experimental runs regarding sensory characteristics by means of a comparative sensory analysis with a similar benchmark product; individual modeling of responses and definition of optimization function; and optimization. The application of experimental design was carried out using independent variables, rendering the method adaptable to situations where the same sort of restriction is found. The product development in the case study was carried out in an environment of Simultaneous Engineering, benefiting from the multifunctional features peculiar to the company, substantially reducing the time of development for the new product by means of simultaneous accomplishment of several project stages.

**Key-words:** Design of experiments with mixtures, multiresponse optimization, product development.

---

*Capítulo I*

**INTRODUÇÃO**

## 1 INTRODUÇÃO

Desenvolver um produto, ou serviço, de qualidade, significa conferir características ao mesmo que atendam perfeitamente (projeto perfeito), de forma confiável (sem defeitos), acessível (baixo custo), segura (segurança do cliente) e no tempo certo (entrega no prazo, no local e na quantidade certa) as necessidades dos clientes, tanto internos quanto externos. Para satisfazê-las, em um mercado crescentemente competitivo, está, cada vez mais claro, que a informação (conhecimento que alimenta o *humanware*, que desenvolve o *software*) é, de fato, muito importante. Este conhecimento é fundamental para saber: (i) captar as necessidades dos clientes através de métodos e instrumentos cada vez mais sofisticados; (ii) pesquisar e desenvolver novos produtos, que melhor se adaptem àquelas necessidades; (iii) pesquisar e desenvolver novos processos que garantam melhor qualidade de conformidade e custos mais baixos; (iv) gerenciar sistemas administrativos que conduzam a maior produtividade; e (v) comercializar e dar assistência técnica aos clientes. Esta necessidade de conhecimento irá, inevitavelmente, conduzir as empresas a uma elevação do nível de qualificação da mão-de-obra, como meio de aumentar a sua competitividade. Em resumo, garantir a sobrevivência de uma empresa implica em formar e manter uma equipe de pessoas que saiba montar e operar um sistema, que seja capaz de projetar um produto que conquiste a preferência do consumidor a um custo inferior ao da concorrência. A soma de todos estes requisitos é o que se pode chamar de qualidade (Falconi, 1992). Segundo este mesmo autor, o verdadeiro critério da boa qualidade é a preferência do consumidor. É isto que garantirá a sobrevivência de uma empresa: a preferência do consumidor pelo seu produto em relação ao concorrente hoje e no futuro.

## 1.1 O TEMA E SUA IMPORTÂNCIA

A escolha da metodologia organizacional denominada Engenharia Simultânea e a utilização da ferramenta estatística de *Projetos de Experimentos com Formulações* como metodologia de suporte para o desenvolvimento de produto, como tema desta dissertação de mestrado, fundamenta-se no fato de que o uso conjunto destes elementos apresenta potencial de resultar em reduções significativas no tempo e nos custos de desenvolvimento de formulações. Desenvolver formulações empiricamente, ou seja, através de tentativa e erro, variando-se as proporções de cada um dos ingredientes por vez, isto é, variando-se um dos ingredientes, enquanto os demais são mantidos fixos, resulta em experimentos caros e pouco eficientes, visto que não permitem uma compreensão das interações que possam existir entre os diversos ingredientes. Embora uma abordagem estritamente empírica possa levar a uma fórmula que atinja os objetivos preestabelecidos, tal abordagem não provê, na maioria dos casos, um caminho estruturado para a obtenção de uma formulação ótima.

Metas com base nos estudos de engenharia, geralmente, têm produzido melhores resultados do que as metas com bases empíricas (Juran, 1995)

Tentativas de se alcançar uma combinação ótima dos níveis dos fatores, através de tentativa e erro, são, na maioria das vezes, infrutíferas, devido às variáveis que são muitas e de atuação complexa sobre os resultados da formulação. Em um mercado altamente competitivo e globalizado, faz-se necessário projetar e desenvolver produtos de qualidade num tempo cada vez menor, sob pena de perder o cliente para o concorrente mais ágil. O processo de desenvolvimento de produtos é um dos mais importantes para a manutenção e melhoria da competitividade empresarial.

A grande maioria das indústrias alimentícias nacionais, desenvolve produtos, tradicionalmente, na base da tentativa e erro, daí a relevância da difusão da técnica de projetos de experimentos, em particular, experimentos com formulações, característicos neste setor industrial (Fogliatto, 1994).

Para que o desenvolvimento de novos produtos de alta qualidade seja uma realidade, é preciso o conhecimento, domínio e utilização dessa técnica por parte das indústrias que projetam seus produtos.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é identificar e selecionar algumas ferramentas técnicas de apoio ao desenvolvimento de produto com o intuito de desenvolver uma metodologia auxiliar no desenvolvimento de produtos alimentícios formulados.

Os objetivos secundários da dissertação são:

- Apresentar uma revisão bibliográfica sobre metodologias de apoio ao desenvolvimento de produtos, em particular, a metodologia organizacional da Engenharia Simultânea, Projeto de Experimentos com Formulações e Avaliação Sensorial;
- Investigar sistemáticas para otimização de produtos com características de qualidade subjetivas, mensuráveis apenas através de painéis sensoriais;
- Aplicar a metodologia proposta em um estudo de caso na indústria alimentícia, no desenvolvimento de um chocolate dietético.

## 1.3 O MÉTODO DE TRABALHO

A metodologia adotada para elaborar esta dissertação de mestrado é classificada como Pesquisa Ação de acordo com a classificação apresentada por Roesch *apud* Ruffoni (2000). Através da Pesquisa Ação, solucionam-se problemas específicos dentro de uma organização. Primeiramente, baseando-se nas necessidades internas da empresa-alvo deste trabalho, fez-se uma análise e posterior seleção das técnicas de suporte ao desenvolvimento de produtos que seriam passíveis de serem aplicadas e que maiores benefícios trariam para a qualidade do produto e à empresa. Em seguida, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimento de produto, avaliação sensorial e ferramentas técnicas de suporte selecionadas que são: Projeto de Experimentos com Formulações e a metodologia organizacional da Engenharia Simultânea

Após o embasamento teórico e com os conhecimentos adquiridos através da revisão bibliográfica, realizou-se um estudo de caso com a aplicação da metodologia escolhida,

objetivando suprir a necessidade da empresa alvo deste trabalho quanto à existência de um chocolate dietético em sua linha de produtos.

Por último, sugeriu-se a aplicação de técnicas adicionais que, provavelmente, permitirão uma melhor performance dos produtos a serem desenvolvidos junto ao mercado consumidor.

#### 1.4 LIMITAÇÕES

A principal limitação encontrada para a implementação da metodologia proposta nesta dissertação de mestrado reside no fato de não existir, na empresa alvo deste trabalho, pessoal tecnicamente qualificado para o completo domínio das ferramentas técnicas de suporte utilizadas.

A inexistência de uma pesquisa de mercado como meio de captar a qualidade demandada pelos consumidores também limitou a elaboração de um trabalho mais aprofundado sobre as características de qualidade a serem priorizadas no produto a ser otimizado. A pesquisa de mercado tornaria possível a priorização destas características de qualidade através da aplicação de mais uma técnica de suporte ao desenvolvimento de produto que é o QFD (Desdobramento da Função Qualidade), onde a qualidade demandada pelos consumidores é transformada em características de qualidade do produto.

A complexidade da teoria estatística limitou o entendimento, por parte do pessoal envolvido, da metodologia proposta e, conseqüentemente, restringiu a implantação da mesma no desenvolvimento e otimização de produtos na organização onde o estudo de caso foi executado.

#### 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está dividido seis capítulos como se segue:

- No primeiro capítulo, é apresentado o tema do estudo de caso; os objetivos a serem alcançados; os métodos para se atingir esses objetivos e as limitações encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho.

- O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito dos conceitos de Desenvolvimento de Produto e das metodologias organizacionais de gestão de projetos: Engenharia Convencional e Engenharia Simultânea.
- O terceiro capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de Projeto de Experimentos e descreve também, de maneira objetiva, os Experimentos com Formulações, metodologia de suporte para o desenvolvimento de produtos formulados.
- O quarto capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre Avaliação Sensorial e os principais métodos adotados para avaliação de produtos alimentícios.
- O quinto capítulo descreve as fases da metodologia proposta para desenvolvimento de produtos alimentícios.
- O sexto capítulo apresenta um estudo de caso, ilustrando a metodologia proposta e, por fim, as conclusões da dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros.

---

*Capítulo II*

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**



## 2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

### 2.1 CONCEITO DE PRODUTO

Um produto é o resultado de um trabalho empresarial organizado, dedicado, que atende a algum tipo de desejo, ou necessidade humana, proveniente de alguma atividade de transformação de recursos e que possui certo valor atribuível (Cunha, 1999).

No entender de Juran (1992), um produto é um bem ou serviço resultante de qualquer processo. O produto isolado mais importante é aquele que traz a receita para a empresa. Em empresas industriais, são os bens e serviços produzidos pelos departamentos operacionais e vendidos aos clientes. Os economistas também definem produtos como sendo bens e serviços, desse modo, caracterizando a palavra produto como um termo genérico para qualquer coisa que se produza, seja ela bens ou serviços .

Para Cunha (1999) são três as propriedades fundamentais de um produto: funcionalidade (atendimento às necessidades), domínio (faixa e condições de utilização) e estrutura da configuração e do aspecto (atendimento a necessidades e desejos). As características do produto são definidas de modo a satisfazer adequadamente a essas propriedades. Esse autor, refere-se às necessidades humanas a serem atendidas como: *(i)* primárias (básicas), ou seja, são aquelas que atendem ao que é essencial à preservação da vida humana, tais como alimentos, água etc.; *(ii)* secundárias, que atendem níveis elementares de conforto (ex. energia elétrica) e *(iii)* terciárias, que atendem a níveis mais elevados de conforto (ex. controle remoto).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DE PRODUTOS

Os produtos são classificados em dois grandes grupos que são: produtos *in natura* (produtos agropecuários) e produtos processados ou industrializados. Os produtos processados ou industrializados, segundo Back *apud* Ruffoni (2000), são classificados de acordo com o uso, a fabricação e a tecnologia utilizada nos mesmos. Esta classificação leva ao entendimento das diferentes características dos tipos de produtos, sendo que cada produto industrial apresenta uma funcionalidade essencial, prioritária sobre os demais aspectos.

A classificação de produtos industriais, levando em consideração a magnitude da habilidade tecnológica e de projeto necessária para cada tipo de projeto, pode ser assim explicada:

**Produtos de grande magnitude:** São produtos que envolvem a montagem de uma grande quantidade de componentes num sistema maior. Neste caso, os projetistas principais deverão ser especialistas em conhecimentos da característica funcional principal do produto. Engenheiros, especialistas e projetistas devem ter responsabilidades, principalmente nas áreas de desenho industrial, projeto mecânico e fabricação.

**Produtos com alto conteúdo tecnológico:** São produtos industriais que apresentam um conteúdo tecnológico muito além da competência do projetista do produto. O relacionamento entre os projetistas e o engenheiro responsável pelos itens tecnológicos muda de intensidade conforme os casos:

- Produtos com função tecnológica prioritária deverão estar sob a orientação de um engenheiro especialista;
- Produtos com funções mecânicas simples, porém, com componentes de natureza tecnológica complexa, deverão estar sob orientação de engenheiros e projetistas;
- Produtos de natureza especializada deverão ser da competência de projetistas com habilidade tecnológica e de projeto neste campo particular.

**Produtos de natureza mecânica simples:** São produtos do tipo mecanismos, estruturas e componentes em geral, com pouco conteúdo tecnológico. Os custos de desenvolvimento e o volume de produção vão determinar se o produto estará sob a responsabilidade de um

projetista ou será objeto de um estudo mais detalhado, envolvendo mais especialistas. Na fase inicial de lançamento de um novo produto, a concorrência é pequena, devendo o mesmo ser produzido em pequena escala para se ter um razoável sucesso comercial; no entanto, se informações a respeito do grande potencial de mercado do produto são expostas, logicamente, a concorrência entrará em ação, lançando o produto com alterações que o favoreçam e com a utilização de mais recursos tecnológicos.

**Produtos que exigem predominantemente a habilidade de desenho industrial:** São produtos nos quais os fatores humanos e de aparência são predominantes. A importância do conteúdo tecnológico é irrelevante, não necessitando que as responsabilidades pelo projeto sejam de engenheiros especialistas ou do projetista.

**Serviços e Vendas:** Serviços são atividades, benefícios ou satisfações que são oferecidos à venda (ex. assistência técnica, corte de cabelo etc.). As principais características dos serviços, reconhecidas na literatura, são agrupadas conforme Kotler *apud* Pegoraro (1999) em: (i) intangibilidade, pois “não podem ser vistos, sentidos, provados, ouvidos ou cheirados antes de serem comprados”; (ii) inseparabilidade, pois “são produzidos e consumidos ao mesmo tempo”, com a interação fornecedor-cliente afetando o resultado final; (iii) variabilidade devido ao fato de dependerem de quem, quando e onde são executados; e (iv) perecibilidade pelo fato de “não poderem ser estocados”. Os produtos também podem ser divididos em duas categorias que são: produtos discretizáveis (artefato) ou produtos não discretizáveis (produto contínuo) (Cunha,1999).

### 2.3 DEFINIÇÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Segundo Juran (1995), desenvolver um produto significa fornecer-lhe características que respondam às necessidades dos clientes. A atividade de fornecer estas características ao produto pode se dar através da aplicação de um padrão já existente (projeto variante) ou através de longas pesquisas (projeto inovador ou de “raiz”); sendo necessário, neste caso, percorrer todas as fases de desenvolvimento de produto (fases da inovação). O ciclo completo de desenvolvimento, tipicamente longo, pode ser reduzido utilizando-se conhecimentos derivados de casos similares prévios (projeto variante). Entretanto, para necessidades

inteiramente novas e críticas, é preciso passar por todas as fases de desenvolvimento de produto:

- Determinar os princípios conceituais científicos a serem empregados.
- Analisar a exeqüibilidade técnica.
- Avaliar o ponto de vista econômico.
- Decidir sobre os princípios conceituais.
- Projetar o modelo, montá-lo e testá-lo.
- Dimensionar para o mercado.

As necessidades dos clientes são atendidas através das características do produto. Idealmente, cada uma dessas características de produto deve obedecer aos seguintes critérios: (i) atender às necessidades dos clientes; (ii) atender às necessidades da empresa fornecedora; (iii) atender à concorrência e (iv) otimizar os custos combinados (fornecedor/cliente).

Atender às necessidades dos clientes significa atender também às necessidades reais, e não apenas as necessidades enunciadas e percebidas pelos clientes. Algumas vezes, o fornecedor deixa de atender as necessidades dos clientes devido a muitas limitações, como, por exemplo, o custo de atendê-las. O fato de um produto atender às necessidades dos clientes não significa que os clientes irão comprá-lo. Um produto concorrente pode ser melhor ou fornecer mais valor. Assim, atender à concorrência torna-se um critério importante para quem desenvolve o produto. Tanto clientes como fornecedores incorrem nos custos quando usam ou fornecem o produto, e cada um tenta manter mínimo seu respectivo custo. Entretanto, o ideal para a sociedade seria quando os custos combinados são minimizados (Juran, 1995).

O processo de desenvolvimento de produto tem se revelado cada vez mais crítico para a competitividade das empresas, principalmente com as tendências de crescente globalização da economia, aumento da diversidade e variedade de produtos no mercado. Esse processo situa-se na interface entre a empresa e o mercado, daí sua importância estratégica, cabendo-lhe desenvolver um produto que atenda às expectativas do mercado, em termos de qualidade total do produto, e desenvolver o produto no tempo adequado, ou seja, mais rápido do que os concorrentes e a um custo de projeto compatível. Além disso, deve ser assegurada a

manufaturabilidade do produto desenvolvido, ou seja, a facilidade de produzi-lo, atendendo às restrições de custos e demanda de qualidade na produção. O desempenho, nesta área, depende da capacidade das empresas gerenciarem o processo de desenvolvimento e de aperfeiçoamento dos produtos, e de interagirem com o mercado e com as fontes de inovação tecnológica (Toledo, 2001).

Segundo Toledo (2001), diversos estudos apontam o papel central do Desenvolvimento de Produto no ambiente competitivo do final dos anos 80 e década de 90. Outrossim, há estudos que demonstram que uma importante parcela da vantagem competitiva da manufatura japonesa advém do modo como os produtos são projetados, desenvolvidos e aperfeiçoados. Portanto, o lançamento eficaz de novos produtos e a melhoria da qualidade dos produtos já existentes são duas questões de grande relevância para a capacidade competitiva das empresas. Ambas atividades compõem o que normalmente se chama de desenvolvimento de produto. No caso de países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, o desenvolvimento de produto se concentra, em grande parte, nas adaptações e melhorias de produtos existentes. As condições econômicas, tecnológicas e sociais desses países, na maioria dos casos, inibem as inovações radicais e tornam as mudanças incrementais de fundamental importância para a competitividade de diversos segmentos industriais. Os novos produtos tendem a ser desenvolvidos nos países centrais (onde normalmente estão localizados os centros de desenvolvimento) e são difundidos nos demais países via transferência internacional de tecnologia. Para Fransman *apud* Toledo, 2001), a atividade tecnológica, no terceiro mundo, tende a ser quase que exclusivamente incremental, ao invés de inovadora. Entretanto, segundo o autor, é importante não subestimar a importância acumulativa da mudança tecnológica incremental. Estudos de caso permitem observar que a melhoria incremental dos produtos existentes é tão importante quanto as rupturas tecnológicas e o lançamento de novos produtos (Georghiou *et al. apud* Toledo, 2001).

Essa visão geral sobre a importância estratégica e sobre a divisão internacional de trabalho em relação ao processo de desenvolvimento de produto manifesta-se de forma diferenciada conforme a indústria, bem como de acordo com o papel do país na produção mundial do produto em questão. Daí a importância de se estudar esse processo e sua gestão em indústrias específicas, mas que, ao mesmo tempo, representem um papel relevante no país e para as quais o desenvolvimento de produto seja um processo considerado crítico. Esse é o

caso, por exemplo, da indústria brasileira de autopeças, da indústria agroalimentar e da indústria farmacêutica (Toledo, 2001).

Ainda, conforme o mesmo autor, no Brasil, em muitas indústrias, a tendência é no sentido de uma competência local para adaptar projetos mundialmente atuais para o mercado local, ou mesmo participar do processo de desenvolvimento responsabilizando-se por atividades ou etapas do mesmo. Neste segundo caso, a unidade local pode se responsabilizar por etapas do desenvolvimento e, eventualmente, ser a responsável pelo fornecimento global em função da capacidade de manufatura local. Também, podem existir casos específicos em que a unidade local é responsável pelo desenvolvimento total de um produto em função do domínio tecnológico e de vantagens competitivas no desenvolvimento de determinadas linhas de produto. Essa possibilidade surge como reflexo de uma alternativa de organização do desenvolvimento de produto, de uma corporação multinacional, de forma distribuída, a partir de competências locais distribuídas pelo mundo, em contraposição às alternativas de desenvolvimento totalmente centralizadas ou descentralizadas (Toledo, 2001).

O processo de desenvolvimento de um produto que atenda às necessidades dos clientes (processo eficaz) e que seja conduzido com metodologias adequadas (processo eficiente) realmente cumprirá sua missão de favorecer a competitividade da empresa. A sua ineficiência levará ao desperdício de recursos importantes para a empresa, por ser esse processo, quando mal administrado, um grande consumidor de recursos, e a ineficácia levará ao desenvolvimento de produtos que não serão absorvidos pelo mercado, pelo fato dos mesmos não corresponderem às necessidades do mercado consumidor. O processo de desenvolvimento de produto é de suma importância para a qualidade final do produto e, conseqüentemente, para garantir as vantagens competitivas das empresas. Esse processo pode ser visto como uma seqüência interligada de tarefas de processamento de informações (Toledo, 2001).

Para Clark e Fujimoto *apud* Toledo (2001), desenvolvimento de produto é o processo pelo qual uma organização transforma as informações de oportunidades de mercado e de possibilidades tecnológicas em informações vantajosas para a fabricação de um bem ou serviço com fins comerciais. Essa perspectiva do desenvolvimento de produto como um sistema de informação estende-se além do projeto de engenharia, englobando a produção, marketing, serviço de pós-venda e o próprio comportamento do consumidor.

Pugh *apud* Rozenfeld e Amaral (2001) define o processo de desenvolvimento de produto como uma “atividade sistemática de identificação das necessidades do mercado consumidor até a venda de produtos capazes de satisfazer essas necessidades - uma atividade que engloba produto, processos, pessoas e organização”.

O grupo de Engenharia Integrada *apud* Rozenfeld e Amaral (2001) define o desenvolvimento de produto como um “processo de negócio compreendendo desde a idéia inicial e levantamento de informações até a homologação final do produto e processo e transmissão das informações sobre o projeto e o produto para todas as áreas funcionais da empresa”.

O aumento da concorrência, as rápidas mudanças tecnológicas, o ciclo de vida dos produtos cada vez menor e consumidores com grau de exigência cada vez maior requerem empresas ágeis, com produtividade e qualidade ímpar, e para que todos esses requisitos sejam cumpridos, imprescindivelmente, as empresas precisam ser eficientes e eficazes em todo o processo de desenvolvimento de produto.

Uma importante característica do desenvolvimento de produto é o alto grau de incertezas no início do desenvolvimento, quando um maior número de soluções construtivas são selecionadas. Essas incertezas decrescem ao longo do processo, mas as decisões tomadas no início do desenvolvimento são responsáveis por 85% do custo final do produto. O custo de modificações no projeto aumenta ao longo desse ciclo. A cada mudança, um número maior de decisões, já tomadas, pode ser invalidado. Portanto, é um desafio gerenciar as incertezas envolvidas num processo de desenvolvimento de produto (Rozenfeld e Amaral, 2001).

Soma-se a isso o fato deste processo se basear num ciclo de projetar-construir-testar que gera atividades necessariamente interativas; ser uma atividade essencialmente multidisciplinar, que traz grandes barreiras culturais sobre a integração, principalmente nas grandes corporações; a existência de uma grande quantidade de ferramentas, sistemas, metodologias, soluções etc., desenvolvidas por profissionais e empresas de diferentes áreas, as quais não interagem entre si e, por último, a existência de diversas visões parciais sobre o processo de desenvolvimento de produtos (Rozenfeld e Amaral, 2001).

A existência de diversas visões parciais tem sido a principal dificuldade para o gerenciamento do processo de desenvolvimento de produto. As diversas visões, quando transportadas para a prática, podem levar a muitos problemas e ineficiências, pois qualquer

tipo de desenvolvimento, por maior que seja a hegemonia de um determinado conteúdo tecnológico, requer o conhecimento de várias dessas visões.

Esse é um processo de integração que, para um resultado final satisfatório, precisa levar em consideração os diferentes fatores das mais diversas áreas do conhecimento. Cada visão parcial carrega consigo uma linguagem e determinados valores próprios que dificultam a integração entre os profissionais pertencentes a cada uma dessas escolas. Enfrentar esta situação depende do desenvolvimento de uma visão holística, ou seja, da construção de uma imagem única e integrada do processo de desenvolvimento de produto (Rozenfeld e Amaral, 2001).

“Neste caminho, percebendo um empreendimento como um conjunto de processos de negócios, está concluída e formalizada a maneira de representar a visão holística” (Rozenfeld *apud* Rozenfeld *et al.*, 1998).

Segundo Rozenfeld e Amaral (2001), algumas das mais importantes abordagens propostas para a análise e intervenções no processo de desenvolvimento de produto são descritas a seguir:

**Estudos de Harvard e MIT:** No final da década de 80 e no início dos anos 90 foram desenvolvidos, por pesquisadores ligados a Harvard e ao MIT, importantes projetos de pesquisa relacionados com manufatura enxuta e a gestão do processo de desenvolvimento de produto. Esses primeiros trabalhos, puramente analíticos, tornaram-se clássicos e comumente referenciados na literatura sobre desenvolvimento de produto (Clark e Fujimoto; Womack, Jones e Ross *apud* Rozenfeld e Amaral, 2001), gerando muitos dos conceitos aplicados nessa área. Na abordagem proposta, os autores dividem o processo de desenvolvimento de produto em três grandes etapas:

- ***Estratégia de Desenvolvimento:*** Estruturação para o planejamento e gerenciamento do portfólio dos projetos em andamento.
- ***Gerenciamento do Projeto Específico:*** Gerenciamento, liderança, tipos de interação entre atividades etc.
- ***Aprendizagem:*** Formas para garantir a melhoria do processo e a aprendizagem organizacional a partir da experiência com o projeto.



**Stuart Pugh:** A abordagem de Pugh apresenta influência da experiência prática do autor como gerente de projetos em diversas indústrias. Sua principal preocupação é com a busca de uma visão total da atividade de projeto, ou seja, que supere as visões parciais presentes em cada setor tecnológico específico. Para atingir esse objetivo o autor dedicou uma grande ênfase à educação e desenvolveu um modelo conhecido como *Total Design*. Esse modelo possui um conjunto de seis etapas, todas interativas e aplicáveis a qualquer tipo de projeto (independente da disciplina tecnológica envolvida). Cada etapa é representada por um cilindro, significando que nela são empregados um conjunto específico de conhecimentos, compostos por diversas visões tecnológicas parciais.

**Don Clausing:** Este autor propôs uma abordagem chamada *Total Quality Development* (TQD), baseada nos trabalhos de Pugh e Taguchi. No TQD, o grande enfoque são as técnicas Desdobramento da Função Qualidade (QFD), Método Taguchi e Matriz de Pugh e para os conceitos sobre gerenciamento dos times de desenvolvimento de produto. Uma de suas principais contribuições é a de mostrar a integração entre o QFD e o Método de Taguchi. As fases em que Clausing divide o processo de desenvolvimento de produto são: Conceito (focando a metodologia do QFD); *Design* (projeto de subsistemas e projeto das partes); e preparação da produção (dividido em verificação do sistema, prontidão e produção piloto).

**Prasad:** Este autor propõe uma sofisticada abordagem para Engenharia Simultânea, que engloba diversos fatores em uma estrutura bastante independente das fases de um processo de desenvolvimento de produto. Ele divide a Engenharia Simultânea em dois círculos denominados: Organização do Produto e Processo (*Product and Process Organization Wheel* - PPO) e o do Desenvolvimento de Produto Integrado (*Integrated Product Development Wheel* - IPD). Ambos possuem no seu centro a descrição dos quatro elementos de suporte da metodologia proposta, que são: modelos, métodos, métricas e medidas. Os dois círculos possuem também anéis intermediários idênticos, que representam os times, ou a estrutura organizacional que dirige as ações dentro do processo de Engenharia Simultânea. O primeiro círculo, PPO, aborda os fatores que determinam o grau de complexidade do gerenciamento do desenvolvimento de produto e os fatores organizacionais. O segundo círculo, IPD, define de uma maneira bastante flexível a integração do processo de desenvolvimento de produto.

**Planejamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP) da QS 9000:** O manual de Planejamento e Controle da Qualidade do Produto, desenvolvido dentro do conjunto de normas da QS 9000, possui uma estrutura que pode muito bem servir como referência para a

estruturação e gerenciamento do processo de desenvolvimento de produto. Apesar de não ter sido desenvolvido especificamente para esse fim, ele resume um conjunto de preocupações, técnicas e um modelo suficientemente detalhado capaz de servir de base para intervenções no processo de desenvolvimento de produto.

**Grupo de Engenharia Integrada:** Segundo Rozenfeld e Amaral (2001), a proposta deste grupo tem como objetivo fundamental promover a *visão holística* do processo de desenvolvimento de produto.

## 2.4 TÉCNICAS PROJETUAIS

### 2.4.1 Conceito de projeto

“Projetar é o ato de conceber a estrutura de um produto, de modo a poder utilizá-lo num certo domínio com a finalidade de cumprir certa função, observando-se as limitações de ordem econômico-financeiras e tecnológicas” (Cunha, 1999).

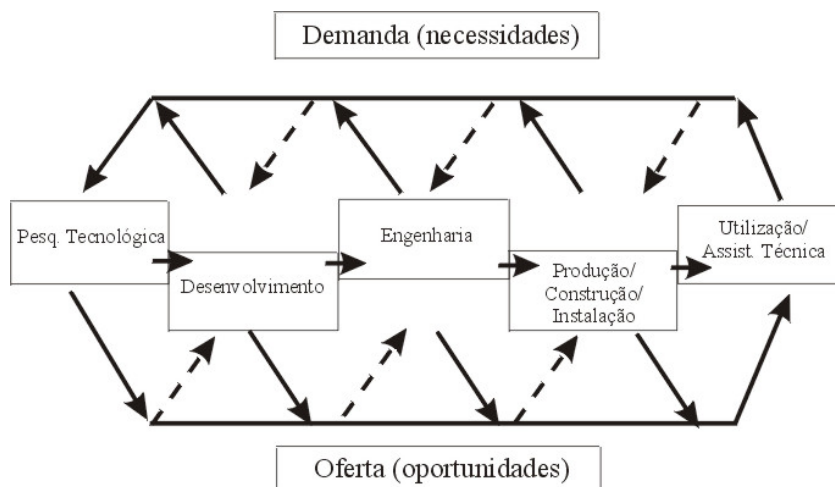
### 2.4.2 Categorias de projeto

Para Valeriano (1998), as inovações cobrem diversas ações em diferentes setores da atividade humana, que se desenrolam idealmente seguindo as fases a seguir:

- Pesquisa tecnológica;
- Desenvolvimento tecnológico;
- Engenharia;
- Produção/ Construção/ Instalação;
- Utilização/ Assistência técnica.

A ordem seguida e a forma completa nem sempre correspondem a esse modelo. Essas fases, na prática, são altamente iterativas, com fluxos e refluxos em ambas direções (Figura 1), impulsionadas pelas forças do mercado, que são a oferta (ou oportunidades) e a demanda (ou necessidades) e que podem partir de qualquer um dos participantes do processo. Os

trabalhos realizados nas três primeiras fases são executados sob a forma de projetos, recebendo os qualificativos de projeto de pesquisa, projeto de desenvolvimento e projeto de engenharia, sendo todos conceituados a seguir.



**Figura 1 – Fases da inovação tecnológica**

Fonte: Valeriano (1998).

– *Projeto de pesquisa*

“O projeto de pesquisa consiste na busca sistematizada de novos conhecimentos, podendo situar-se no campo da ciência (projeto de pesquisa científica ou básica) ou no da tecnologia (projeto de pesquisa tecnológica ou aplicada). Os projetos de pesquisa científica, a rigor, não fazem parte do processo de inovação tecnológica, enquanto processos não intencionalmente dirigidos para o mercado. Os resultados das pesquisas científicas são divulgados livremente, enquanto que aqueles obtidos no campo da tecnologia têm valor comercial, sendo considerados mercadorias” (Valeriano, 1998, p. 34).

– *Projeto de desenvolvimento*

“O projeto de desenvolvimento objetiva a materialização de um produto, ou processo, por meio de protótipo, ou instalação piloto ou modelo, tendo como ponto de partida suas *Especificações Preliminares*. O resultado do projeto de desenvolvimento geralmente dá origem ao projeto de engenharia

do produto. Até materializar o produto ou o processo, o projeto de desenvolvimento utiliza os conhecimentos científicos e tecnológicos, às vezes abrindo soluções alternativas aos problemas que vão sendo enfrentados, e, para estabelecer condições para a seleção das alternativas, usam-se métodos experimentais, ou simulações, para viabilizar e otimizar as decisões” (Valeriano, 1998, p. 34).

O autor ressalta, ainda, que entre os objetivos dessa categoria de projetos, incluem-se os desenvolvimentos de processos, de instalações, *softwares* etc., voltados para a logística, manutenção ou suporte técnico a produtos. Esses projetos são, em geral, projetos que constituem-se, ao lado de muitos outros, em um programa de desenvolvimento e produção de sistemas, compostos de produtos e serviços associados.

– *Projeto de engenharia*

“O projeto de engenharia consiste na elaboração e consolidação de informações destinadas a: (i) execução de uma obra; ou (ii) fabricação de um produto; ou (iii) o fornecimento de um serviço, ou execução de um processo” (Valeriano, 1998, p. 34).

### 2.4.3 Formas de projetar

Segundo Cunha (1999), projeta-se por:

**Síntese:** Usando os mesmos elementos ou componentes de um determinado produto, procura-se produzir novos efeitos. Para tanto, é necessário que se pesquise para atingir uma nova composição ou combinação.

**Análise:** É a solução de um produto a partir do estudo dos seus componentes e de suas relações. Isso significa definição, estruturação e combinação. A informação adquirida é transformada em conhecimento. Significa separar o essencial do secundário, caso a solução torne-se difícil, uma nova formulação faz-se necessária, podendo orientar para uma melhor solução.

#### 2.4.4 Tipos de projeto

Segundo Cunha (1999), são três os tipos de projetos: (i) projeto inovador ou de “ raiz”: é um projeto baseado em regras que envolve uma solução original, não existindo uma experiência anterior para consulta; (ii) projeto variante: desenvolve-se por similaridade, podendo mudar a escala ou a combinação de um sistema, mas a função original não muda. Caracterizado pelo predomínio de consulta às experiências anteriores; (iii) projeto orientado pela configuração, ou seja, baseado na forma. Caracterizado pela predominância dos fatores estético, aspecto e preenchimento de espaço. Presença de detalhes de forma. Este tipo de projeto contempla a adaptação de sistemas conhecidos com a mudança de tarefas para as quais foram projetados, sendo que a solução original não muda.

Ullman *apud* Ruffoni (2000) classifica os projetos de produtos em três grandes grupos, dependendo da origem de seu desenvolvimento, como segue:

- **Desenvolvimento de novos produtos baseados numa nova tecnologia:** São produtos totalmente novos e inovadores. Não existe referencial de produto similar.
- **Desenvolvimento de novos produtos criados por sistemas integrados:** São produtos novos, sem semelhantes no mercado, mas que utilizam tecnologias ou sistemas já existentes.
- **Desenvolvimento de produtos criados pelo melhoramento de um produto existente:** São produtos lançados no mercado e que, constantemente, são sujeitos a melhorias. Este tipo de desenvolvimento é o mais freqüente e é quase sempre considerado como um novo produto para o mercado.

A diferença entre novos produtos e produtos já existentes não é tão óbvia no entender de Drumond *apud* Ruffoni (2000). Tecnicamente, ou conceitualmente, poucos produtos são completamente novos, a maioria dos produtos, que assim são considerados, são apenas marcas novas lançadas no mercado.

O desenvolvimento de um novo produto, no sentido amplo, pode ser classificado em quatro categorias segundo Drumond *apud* Ruffoni (2000):

- Extensão de linha de produtos existentes: fortalecimento de uma linha de produtos, melhoria da qualidade, redução de custos etc.

- Uso de materiais, tecnologia e equipamentos existentes para desenvolver produtos com novas aplicações.
- Desenvolvimento de produtos que utilizam os mesmos canais de venda e distribuição que os produtos existentes.
- Desenvolvimento de novos produtos que não têm qualquer conexão com os produtos existentes.

## 2.5 FASES DO DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

Para Cunha (1999), as fases de desenvolvimento de produto, concebidos de “**raiz**”, são:

### 2.5.1 Pesquisa de mercado

Fase em que é feita uma prospecção do mercado consumidor, objetivando descobrir a possibilidade de aceitação de um novo produto. A tarefa de marketing é reunir informações de clientes e, às vezes, de não clientes, para compreender e identificar suas necessidades e expectativas, também, para procurar possíveis oportunidades de mercado. Nesta etapa, ficam definidas as características que os consumidores esperam encontrar no produto a ser projetado.

Ferramentas de apoio: “Clínicas”, análises estatísticas.

### 2.5.2 Definição da tarefa

Em seguida à Pesquisa de mercado, a tarefa dos projetistas de produtos e serviços é analisar essas necessidades e expectativas, como interpretadas por marketing, e criar uma especificação para o produto ou serviço. Esta é a fase em que são estabelecidos os parâmetros básicos do produto para o atendimento aos requisitos de produto, definidos na fase anterior, que são o atendimento às solicitações do mercado e aos condicionantes de engenharia.

Ferramenta de apoio: QFD – Desdobramento da função qualidade.

### 2.5.3 Definição do conceito

É a fase em que são propostas diversas soluções de engenharia que atendam às especificações técnicas e aos requisitos do produto, sendo escolhida uma alternativa ao final. É feita uma primeira aproximação a, pelo menos, uma solução de projeto de acordo com as especificações técnicas definidas anteriormente. Para certas classes de produtos é o momento em que pode ocorrer uma associação entre o atendimento das especificações e um objeto nominado. Nesta fase, são definidas a funcionalidade e a configuração básica do produto. Predomínio da experiência e da criatividade. O planejamento da obsolescência pode ter início nesta fase.

Ferramentas de apoio: Modelagem Funcional, sistemas de CAD (*Computer Aided Design*), métodos de avaliação comparativa entre as diversas soluções conceituais, quando existirem, Projeto Axiomático, Análise de Valor, *Brainstorming*.

### 2.5.4 Projeto preliminar

É a etapa em que a solução conceitual divisada/escolhida é formalizada, ganhando seus contornos definitivos. O planejamento do consumo é feito a partir desta etapa. As características estruturais, do produto ou serviço, são definidas com as especificações dos valores de seus parâmetros de engenharia em termos nominais.

Ferramentas de apoio: Sistemas de CAD (*Computer Aided Desing*), sistemas de CAE (*Computer Aided Engineer*), aplicação de técnicas de *confiabilidade* (ex.: Método Taguchi).

### 2.5.5 Projeto detalhado

É a fase em que é feito um refinamento dos parâmetros de projeto, além de serem incluídos valores de tolerância operacional e de fabricação dos parâmetros nominais definidos no projeto preliminar. Os detalhes de configuração física são introduzidos para facilitar a fabricação do produto, ou tornar a utilização pelo usuário mais eficaz.

Ferramentas de apoio: Aplicação de técnicas de otimização dos parâmetros de projeto (QFD, DOE etc.) e sistemas de CAD.

### 2.5.6 Avaliação do projeto (“prototipação”)

É a fase em que a solução detalhada é verificada em termos do cumprimento das especificações técnicas, do atendimento aos anseios do cliente, da exequibilidade de fabricação, da adequação de sua funcionalidade, da integridade física, química, etc. A solução de projeto é testada na forma de protótipo. Admitindo-se a necessidade de serem efetuadas correções no projeto, retorna-se às etapas anteriores de acordo com as falhas detectadas.

#### **PROTÓTIPOS → UNIDADES DE LOTE-PILOTO → UNIDADES DE PRÉ-SÉRIE**

Ferramentas de apoio: Prototipação, FMEA de projeto (*Failure Mode and Effect Analysis*), FTA (*Fault Tree Analysis*).

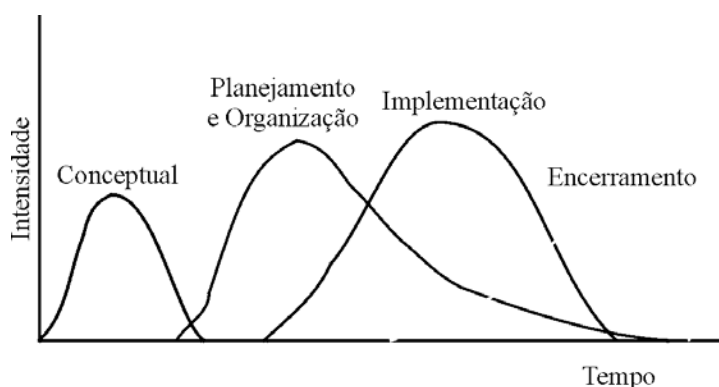
Há diversas versões para o ciclo de vida do projeto, desde aquelas que contêm umas poucas fases até aquelas de mais de uma dezena, dependendo do que, arbitrariamente, considera-se como uma fase distinta ou um componente de uma delas. Porém, convencionou-se chamar de “ciclo de vida genérico de um projeto” a seqüência de quatro fases, às quais podem ser reduzidos os demais ciclos (Valeriano, 1998):

- **Fase conceptual**, inclui atividades que vão desde a idéia inicial do produto, ou do assunto a pesquisar, passando pela elaboração de uma proposta e chegando até a aprovação;
- **Fase de planejamento e organização**, quando o projeto é planejado e organizado com as minúcias necessárias à execução e ao controle;
- **Fase de implementação**, na qual os trabalhos da equipe do projeto são levados a efeito, sob a coordenação e liderança do gerente, até a obtenção do objetivo, compreendendo a execução propriamente dita das tarefas e o controle dessa execução;
- **Fase de encerramento**, em que se efetiva a transferência dos resultados do projeto, com aceitação do seu cliente, seguida de uma avaliação geral do projeto e, por fim, da desmobilização dos meios e recursos postos à disposição do projeto.

Essa seqüência abriga, nessa forma compacta, projetos cujos objetivos são itens materiais, “*softwares*”, como os projetos de Pesquisa e Desenvolvimento, e também respostas a questões



técnicas ou científicas, como os projetos de pesquisa. O detalhamento dessas fases é que deverá amoldar-se ao tipo de projeto, sua natureza, dimensão, grau de complexidade, etc. As fases descritas não são estanques, nem totalmente sucessivas. Ao contrário, elas superpõem-se por quase toda duração do projeto, podendo-se observar, em cada momento, a predominância de uma delas de acordo com o andamento dos trabalhos (Valeriano, 1998). A Figura 2 mostra uma típica superposição das fases.



**Figura 2 – As fases de um projeto**

Fonte: Valeriano (1998).

Observa-se que a fase de planejamento estende-se até quase o fim do projeto. Nota-se também que, à medida que algumas partes vão terminando na fase de implementação, elas dão origem a trabalhos na fase de encerramento.

As fases de um projeto genérico também podem ser descritas da seguinte forma segundo Reis *et al. apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999):

**Fase 1 - Identificação do problema:** Levantamento de informações, de modo a permitir a perfeita definição do escopo do projeto, análise do meio ambiente e delimitação da área de atuação. Com esses dados, desenvolvem-se alternativas para a solução do problema.

**Fase 2 - Planejamento Preliminar:** Faz-se o planejamento preliminar das alternativas, estimando-se, para cada uma, custos, tempos e benefícios. Com esses dados, seleciona-se a melhor alternativa, segundo critérios definidos na fase anterior.

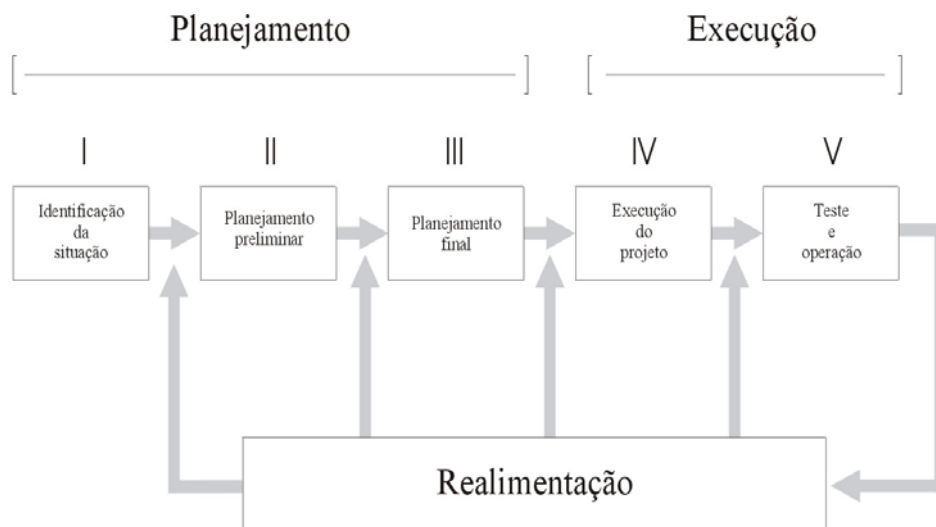
**Fase 3 - Planejamento Final:** Definida a melhor alternativa, procede-se ao planejamento final, repetindo-se as operações da fase anterior, porém, em um nível maior de precisão e detalhamento.

**Fase 4 - Execução do Projeto:** As atividades planejadas anteriormente, para a obtenção do sistema, entram em execução e os procedimentos de controle são iniciados.

**Fase 5 - Teste e Operação:** O sistema é testado e avaliado, para que sejam detectadas e corrigidas possíveis falhas de planejamento, tanto no dimensionamento quanto na dinâmica de operação.

**Fase 6 - Controle:** O controle não é uma fase cronológica, pois age continuamente em todas as fases do projeto, procurando detectar desvios de planejamento e atuando para corrigi-los.

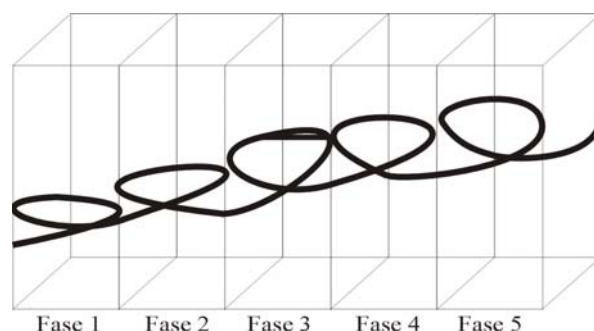
A Figura 3 mostra as fases de um projeto genérico apresentadas por Reis *et al.* *apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999).



**Figura 3 – Fases de um projeto.**

Fonte: José Reis *et al.* *apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999)

Cabe ressaltar que a ordem cronológica das fases não é absolutamente serial, existindo sobreposição entre o final de uma fase e o início da fase subsequente. Esse fato, demonstrado por Archibald *apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999), aliado ao efeito do controle contínuo em todas as fases, leva ao conceito de desenvolvimento em helicóide de Gane e Sarson *apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999), originalmente concebido para projetos de sistemas de informação, mas aplicável à maioria dos projetos. A Figura 4 mostra a idéia do helicóide adaptada às cinco primeiras fases do projeto apresentadas por Reis *et al.* *apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999), que caracteriza, muito bem, a introdução de refinamentos sucessivos pela interação das diversas fases. Outro ponto que pode ser notado Figura 4 é que não existem pontos definidos para início e fim de cada fase.



**Figura 4 – Desenvolvimento em espiral de projetos.**

Fonte: Adaptado de Chris Gane e Trish Sarson *apud* Casarotto, Fávero e Castro (1999).

## 2.6 O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO E SUA GESTÃO

Muitas das características que compõem a qualidade total de um produto “nascem”, ou seja, são consolidadas, ainda durante o processo de desenvolvimento do mesmo, de forma que a gestão da qualidade deve ter aí seu início de atuação para prover a adequação ao uso desejado (satisfação total do cliente). Historicamente, o foco da gestão da qualidade evoluiu da inspeção do produto final para os estágios mais iniciais, com ênfase na identificação dos requisitos de qualidade do mercado e na sua tradução em especificações do produto e do processo, o que se realiza por meio de atividades do processo de desenvolvimento de produto.

No sentido de superar esses desafios e apresentar vantagem competitiva resultante de produtos diferenciados, as empresas devem ter, além de uma capacidade superior de produção (manufatura flexível, com produtividade e qualidade), um desempenho superior no processo de desenvolvimento do produto, obtido em grande parte por uma estratégia adequada de desenvolvimento com visão de longo prazo, e uma gestão eficaz e eficiente deste processo. Torna-se relevante a capacidade de realizar não somente inovações radicais, independente da fonte de obtenção da tecnologia, bem como pequenas diferenciações em estilo e estrutura física de produtos básicos.

### **2.6.1 Metodologias de gestão de projetos**

*Engenharia Convencional - Projeto seqüencial:* O processo de desenvolvimento de produtos é realizado de forma seqüencial, isto é, cada área funcional da empresa, após executar suas atividades de desenvolvimento, transfere a documentação acabada para o departamento seguinte, que então dá seqüência às outras atividades e, assim, sucessivamente. Os profissionais envolvidos nessa abordagem de desenvolvimento tradicional são especialistas que conhecem muito bem o escopo técnico dos produtos, mas não têm visão do todo em relação ao processo de desenvolvimento. Este fato fez com que as empresas começassem a ter dificuldades de projetar com simplicidade, a atenção com a qualidade do produto ficou comprometida e tempos excessivamente longos de desenvolvimento tornaram-se regra. A integração entre as fases de projeto e produção era inexistente. A falta de foco no cliente, o pouco envolvimento dos fornecedores no desenvolvimento de produtos e falhas no processo de melhorias contínuas são algumas das dificuldades e limitações encontradas nesse tipo de abordagem. Com o avanço tecnológico e a crescente complexidade dos produtos, essa abordagem tornou-se ineficiente.

Segundo Hartley (1998), esse tipo de metodologia de desenvolvimento de produtos, muitas vezes, é rotulado de “engenharia por cima da cerca” ou “por cima do muro”, porque projetam seus produtos sem a participação de todos os envolvidos no ciclo projeto-produção, fazendo com que as sugestões dos envolvidos só sejam conhecidas quando o projeto está demasiadamente adiantado, dificultando a incorporação dessas melhorias. Na Engenharia Seqüencial, apenas mudanças pequenas são elaboradas nas primeiras fases do projeto. Mais tarde, quando os testes nas bancadas mostram que são necessários alguns re-projetos, aumentam as escalas das mudanças. Os transtornos causados com esse enfoque são enormes,

pois mudanças importantes são feitas, justamente, quando o produto está prestes a entrar em produção, gerando pânico devido à necessidade dos componentes serem retrabalhados de modo que a produção possa iniciar, implicando em produtos de qualidade duvidosa. A Figura 5 ilustra o seqüenciamento das atividades no processo de desenvolvimento de produtos sob o enfoque da metodologia da Engenharia Convencional.

Atividade	Desenvolvimento do Conceito	Desenvolvimento do Projeto	Validação do Projeto	Desenvolvimento da produção
Marketing Produto Planejamento	■			
Engenharia		■		
Testes			■	
Fabricação				■

**Figura 5 – Engenharia Convencional**

Fonte: Hartley (1998).

*Engenharia Concorrente ou Engenharia Simultânea* - Projeto concorrente: Projeto concorrente é aquele que adota a metodologia da Engenharia Simultânea (ES) como base para o seu desenvolvimento. Para Hartley (1998), a ES é uma metodologia de gestão de projetos onde a característica comum a todos os projetos é que, a cada novo projeto, forma-se uma força-tarefa interdisciplinar, trabalhando em tempo integral. Para que esta metodologia seja definida como ES, a força-tarefa deve contar com a participação de engenheiros de projeto de produto, engenheiros de fabricação, marketing, compras, finanças, fornecedores, etc. Esta força de trabalho normalmente permanece unida durante todo o desenvolvimento do projeto e se dedicam integralmente ao mesmo. O planejamento das instalações de fabricação pode ser iniciado com o mesmo conceito com que os engenheiros de projeto planejam o produto a ser produzido, pois as informações são compartilhadas por toda a equipe desde o princípio do projeto. Os membros da equipe trabalham simultaneamente, inter-relacionando-se, fazendo

recomendações para reduzir custos, número de componentes e principalmente para melhorar a qualidade. Metas realistas são asseguradas pela presença do pessoal de marketing, pois, na abordagem da ES, outorga-se às expectativas do cliente uma ponderação maior do que na engenharia seqüencial. A maioria das modificações é feita ainda na fase de definição do produto, fazendo com que se gaste mais tempo nessa fase. Porém, essa forma de trabalhar não implica em um maior tempo de projeto, pois quando a definição do produto é feita detalhadamente, uma quantidade substancial de tempo é poupada no ciclo completo de desenvolvimento do projeto. Um importante princípio da ES é que a qualidade se introduz no projeto desde o começo, erradicando quaisquer características que possam ser adversamente afetadas por variações na produção. Essa abordagem exige uma cultura na qual cada pessoa é responsável pela qualidade. A ES deve encaixar-se na cultura da empresa.

Os elementos vitais da ES, de acordo com Hartley (1998), são:

- Força–tarefa interdisciplinar.
- Produto definido em termos de cliente, traduzidos em termos de engenharia com um grande detalhamento.
- Projeto por parâmetros, para assegurar a otimização da qualidade.
- Projeto orientado à fabricação e montagem (DFMA).
- Desenvolvimento simultâneo do produto, equipamento de fabricação e processos, controle de qualidade e marketing.

Com a força–tarefa interdisciplinar, princípio básico que norteia a metodologia da ES, o conjunto de elementos vitais é muito mais que a soma das partes, é a concretização da colocação de novos produtos no mercado em tempo e custos associados menores. A melhoria do projeto do produto, da qualidade, da fabricação e do rendimento do produto durante o uso é viabilizada sob este enfoque.

A ES combina todas as tendências em um pacote coerente e substitui as melhorias em pequenas doses, típico da Engenharia seqüencial, por ganhos em todos os aspectos do produto, a começar por lançar produtos que se ajustem às necessidades do mercado. Um produto brilhante, que seja colocado demasiadamente tarde no mercado, ou que não se ajuste

às necessidades do mercado, não é um produto. Esforços desnecessários foram desperdiçados na elaboração do mesmo.

Segundo Hartley (1998), sob o enfoque da metodologia da ES, comprovadamente, se verificará que: os produtos atenderão com precisão as necessidades dos clientes; os prazos para a colocação dos produtos no mercado serão menores; o ponto de equilíbrio ocorrerá mais cedo; serão feitas pequenas mudanças nos estágios avançados do processo de desenvolvimento, reduzindo-se o custo de desenvolvimento.

A ES surgiu como um modo de organizar as atividades de engenharia, sendo capaz de fazer frente ao desafio de agirem segundo os condicionantes de qualidade, flexibilidade e integração de atividades e sistemas. A qualidade deve ser avaliada sob dois aspectos distintos: qualidade de produto, que mede o grau de satisfação do consumidor para com o mesmo, e qualidade de produção, que está diretamente relacionada com o índice de perdas apresentado pelo sistema produtivo e que, conseqüentemente, incide diretamente sobre o custo final do produto fornecido ao mercado consumidor (Cunha, 1999).

Quanto à flexibilidade, também, deve-se avaliá-la sob dois aspectos: flexibilidade do perfil de produtos oferecidos ao mercado, e a flexibilidade do sistema produtivo em ajustar-se a essa flexibilidade do perfil de produtos. A integração entre homens e equipamentos e a integração entre os diferentes setores e departamentos de uma organização desencadeia a necessidade de se viabilizar um fluxo de informações eficiente e utilizável dentro da empresa. Uma característica básica da ES, citada por Cunha (1999), é a execução temporal em paralelo das diversas etapas de atividades de engenharia, por oposição ao modo convencional (seqüencial). Como conseqüência básica desse tipo de execução, tem-se a diminuição do tempo de desenvolvimento de um novo produto, pois, ao paralelismo temporal das diversas etapas de atividades de engenharia, que por si só já reduz o tempo, soma-se o fato da efetiva antecipação da detecção de problemas de engenharia. Evidentemente, a diminuição do tempo de desenvolvimento do produto tem como conseqüência benéfica a redução de seu custo de desenvolvimento.

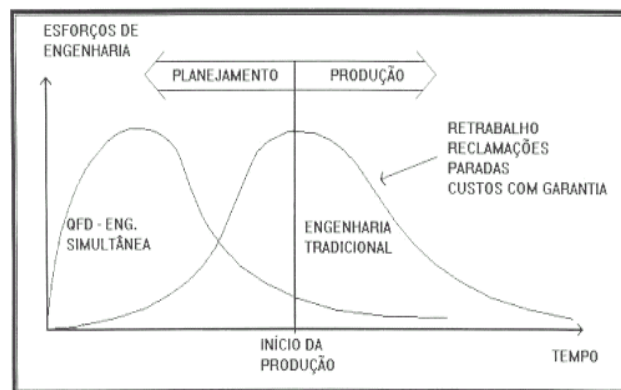
A Figura 6 ilustra o paralelismo temporal das diversas etapas de atividades do processo de desenvolvimento de produtos sob o enfoque da metodologia da Engenharia Simultânea.

Atividade		Desenvolvimento do Conceito	Desenvolvimento do Projeto	Validação do Projeto	Desenvolvimento da produção
Marketing Produto Planejamento		██████████			
Engenharia	Viabilidade	██████████			
	Projeto da produção		██████████		
Testes	Nova tecnologia	██████████			
	Programa principal		████████████████████		
Fabricação	Viabilidade/ tolerâncias	██████████████████			
	Estudos das ferramentas		██████████		
	Ferramentas			██████████████████	

**Figura 6 – Engenharia Simultânea**

Fonte: Hartley (1998).

Para Ribeiro, Danilevicz e Echeveste (1999) investimentos feitos na fase de planejamento repercutem em substancial economia de recursos despendidos em fases posteriores de resolução de problemas, como pode ser visto na Figura 7.



**Figura 7 - Mudança de paradigma dos esforços de engenharia**

Fonte: Ribeiro, Danilevicz e Echeveste (1999).

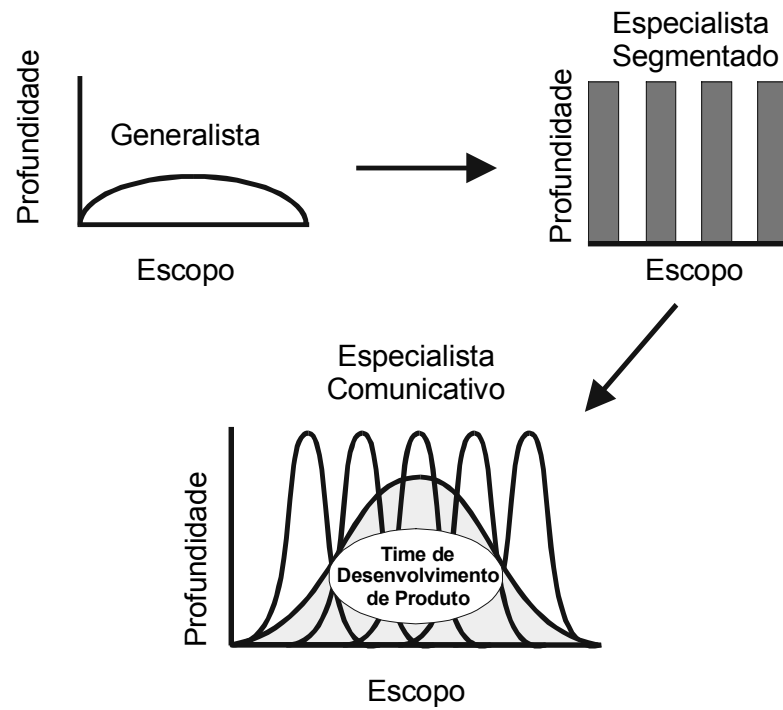


Segundo Schneider *apud* TecHoje (2001), o termo “*Concurrent Engineering*” (Engenharia Concorrente) foi introduzido no final dos anos 80, visando à integração do desenvolvimento de produtos. Somente nos últimos anos é que essa metodologia adquiriu maior projeção, sendo hoje um dos pilares para a sustentação competitiva das empresas. O sucesso de uma empresa está diretamente relacionado com a capacidade que a mesma tem de introduzir produtos novos e diferenciados no mercado. Quanto maior for o diferencial em relação à concorrência, quanto ao atendimento às necessidades do consumidor, maior será o potencial competitivo do produto. O mesmo autor define a ES como uma

“abordagem sistemática para integrar o desenvolvimento do produto, enfatizando a resposta às expectativas do cliente e que incorpora valores de time, tais como cooperação, confiança e compartilhamento de forma tal que a tomada de decisão procede com intervalos grandes de trabalho paralelo por todas as perspectivas do ciclo de desenvolvimento de produtos, desde o início do processo, sincronizadas por trocas comparativamente breves, para produzir consenso” (p. 1).

Essa abordagem elimina, ou minimiza, os problemas típicos encontrados na metodologia seqüencial de desenvolvimento de produtos. As decisões envolvidas neste processo levam em consideração os requisitos e as experiências das diversas áreas envolvidas. As atividades relacionadas com o desenvolvimento de produtos são realizadas por um time multifuncional (*Product Development Team*).

De acordo com Clausing *apud* Rozenfeld e Aguiar (2001), para o sucesso desse tipo de abordagem, os membros desse time não devem ser pessoas extremamente especializadas, mas que combinem bem escopo e profundidade de conhecimento. A Figura 8 apresenta um esquema do perfil adequado dos profissionais envolvidos com o processo de desenvolvimento de produto.



**Figura 8 – Perfil dos profissionais em desenvolvimento de produtos.**

Fonte: Rozenfeld e Aguiar (1999).

Quando necessário, o time deve consultar pessoas especializadas que, apesar de um perfil mais técnico, também devem ser comunicativas e ter conhecimento da integração de seu trabalho com outras áreas.

---

*Capítulo III*

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PROJETOS DE EXPERIMENTOS**

### 3 PROJETOS DE EXPERIMENTOS

Experimentos são realizados para validar teorias e levantar novas hipóteses desde os primórdios da investigação científica. Entretanto, foi a partir da década de 20 que desenvolveu-se uma metodologia para planejar experimentos e avaliar os dados obtidos. Os estudos iniciais restringiam-se a experimentos de agricultura. Posteriormente, a metodologia se difundiu-se rapidamente para campos como a Agronomia, Biologia, Engenharia Química e Engenharia Industrial. Atualmente, a metodologia de Projeto de Experimentos tem sido aplicada, virtualmente, em todas as áreas do conhecimento (Ribeiro, 1999).

A prática comum, na indústria, para avaliação do efeito de vários fatores no desempenho de um produto, era o uso de experimentos nos quais variava-se um dos fatores, enquanto mantinham-se os demais fixos. Contudo, graças à influência dos trabalhos de Box *et al.* e Taguchi *apud* Barbeta (1999), nas últimas décadas as técnicas de planejamento de experimentos passaram a fazer parte de programas de melhoria da qualidade.

Muitas vezes, o desenvolvimento de produtos na indústria baseia-se em métodos empíricos para obter informações sobre os produtos e processos. O Planejamento de Experimentos surge como uma metodologia capaz de resolver problemas de fabricação, auxiliando na decisão entre diferentes processos de manufatura, diferentes conceitos de produto e propiciando o entendimento da influência de determinados fatores. Trata-se, portanto, de uma metodologia utilizada para planejar experimentos, ou seja, para definir: (i) quais dados; (ii) em que quantidade e (iii) em quais condições devem ser coletados. O objetivo consiste na obtenção da maior precisão estatística possível na resposta e o menor

custo, gerando economia de tempo e dinheiro, parâmetros fundamentais em um mercado cada vez mais competitivo e globalizado. O desenvolvimento de produtos, através da utilização dessa metodologia pode resultar em um *desing* com desempenho superior, seja em termos de suas características funcionais como também de sua robustez (Amaral, 1999).

Ribeiro (1999) define Projeto de Experimentos como uma metodologia que apóia-se fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a seqüência de ensaios, de forma a traduzir os objetivos preestabelecidos pelo pesquisador. A eficiência de experimentos projetados é superior, em termos de informação, a qualquer outra seqüência não estruturada de ensaios e os resultados são confiáveis.

Ainda, segundo o mesmo autor, devido às decisões importantes que são tomadas a partir dos resultados experimentais, bem como ao custo dos experimentos, não é recomendável buscar a solução de um determinado problema confiando apenas na intuição. Uma das vantagens do Projeto de Experimentos é que o efeito dos fatores não controláveis (erro experimental) é minimizado e quantificado. Outra vantagem é a redução, em geral considerável, do trabalho experimental.

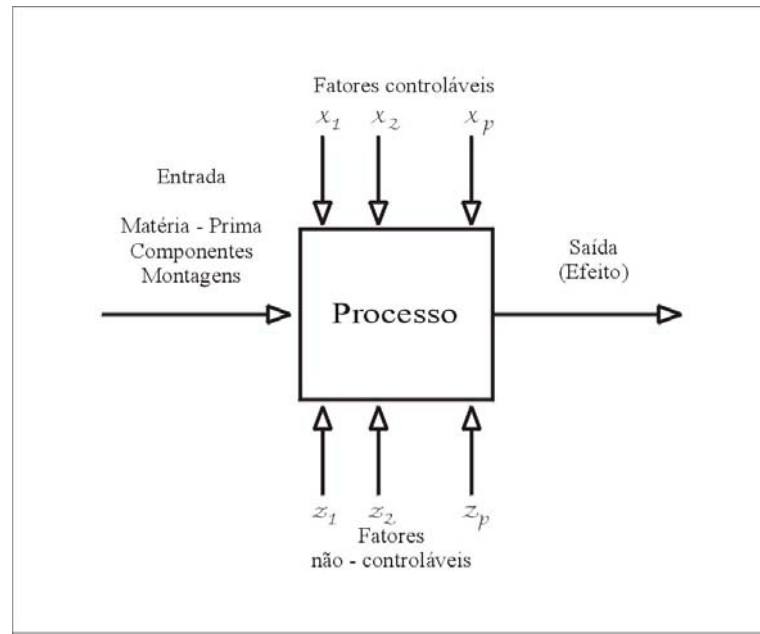
Essa metodologia firma-se em técnicas científicas e coloca grande ênfase nas fases de identificação do problema e planejamento. Nessas fases a criatividade do investigador tem uma função muito importante. Em geral, os experimentos incluem vários fatores qualitativos ou quantitativos e para cada fator controlável cuja influência sobre a variável de resposta se deseja estudar, o intervalo de investigação e o número de níveis a serem estudados deve ser definido, ou seja, os diferentes modos da presença do fator controlável deve ser definido a priori. Também, devem ser definidas as variáveis de resposta mais convenientes para representar o fenômeno em estudo, ou seja, quais as variáveis cuja resposta permitem quantificar, objetivamente ou subjetivamente, as características de qualidade de um produto (bem ou serviço) ou processo. Essas características de qualidade são decisivas para o correto desempenho de um produto, proporcionando a satisfação dos consumidores que dele fazem uso. Além disso, restrições experimentais, em geral presentes, devem ser levadas em conta. Em função dessas restrições, diferentes planos experimentais podem ser escolhidos de modo a facilitar e otimizar a coleta de informações (Ribeiro, 1999).

Amaral (1999) afirma que o conhecimento técnico do especialista não pode ser substituído por essa metodologia, pois o domínio do problema é de fundamental importância. A combinação da metodologia de planejamento de experimentos com o conhecimento técnico do especialista sobre o problema é que irá permitir resultados confiáveis, baseados em inferência estatística.

Segundo o manual de referência do *APQP*– Planejamento Avançado da Qualidade do Produto e Plano de Processo (1994), da **QS 9000**, um experimento delineado é um teste, ou seqüência de testes, em que variáveis de influência em potencial, de um processo, são sistematicamente alteradas de acordo com uma matriz de projeto prescrita. A variável de resposta ( $y$ ) de interesse, é avaliada sob várias condições para: (i) Identificar as variáveis de influência ( $x$ 's) entre aquelas testadas; (ii) Quantificar os efeitos das variáveis de influência, através da gama representada pelos níveis destas variáveis; (iii) Obter uma melhor compreensão sobre a natureza do sistema de causa em andamento no processo. (iv) Comparar os efeitos das variáveis de influência, sobre a variável de resposta e as possíveis interações entre as variáveis de influência.

Um processo pode ser definido como um conjunto de causas ou fatores (insumos, equipamentos, informações do processo ou medidas, condições ambientais, pessoas e métodos ou procedimentos) que tem por objetivo produzir um determinado efeito (produto do processo), que apresenta uma ou mais respostas observáveis (Werkema e Aguiar,1996).

Para Montgomery (1991), somente é possível visualizar um processo como uma combinação, de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos, que transforma a entrada de um processo ou sistema em uma saída que tem uma ou mais respostas observáveis. Algumas variáveis de influência ( $x_1, x_2, \dots, x_p$ ) são controláveis, enquanto outras ( $z_1, z_2, \dots, z_p$ ) não são controláveis (fatores de ruído).



**Figura 9 – Modelo Geral de um Processo ou Sistema.**

Fonte: Adaptado de Montgomery *apud* Werkema e Aguiar (1996).

Segundo Werkema e Aguiar (1996), os objetivos principais de um experimento planejado são:

- (i) Identificar a influência dos fatores controláveis sobre as características de qualidade, ou seja, sobre as variáveis de resposta;
- (ii) Identificar os ajustes dos fatores controláveis que resultem em características de qualidade próximas aos valores alvo pré-estabelecidos, e com variabilidade mínima; e
- (ii) Identificar os ajustes dos fatores controláveis que minimizem o efeito dos fatores não-controláveis sobre as características de qualidade.

A metodologia de Projeto de Experimentos tem uma importância muito grande no desenvolvimento de produtos e processos e na melhoria dos mesmos. Em muitos casos, o objetivo pode ser desenvolver um processo consistente e robusto, isto é, um processo afetado minimamente por fontes de variabilidade externas (fatores de ruído). Segundo Vick *apud* Caten (1995), é através desta metodologia que se elimina a subjetividade de uma afirmação e as discussões sobre a validade de uma conclusão.

Para realizar um experimento eficientemente, conforme Werkema e Aguiar (1996), o planejamento do mesmo deve ter uma abordagem científica, baseado em um planejamento estatístico, de tal forma que os dados coletados sejam confiáveis e os custos mínimos.

Portanto, os experimentos planejados são extremamente úteis na descoberta dos principais fatores que influenciam (variáveis de influência) os itens de controle de um processo. Uma vez que os fatores tenham sido identificados é, geralmente, necessário modelar a relação existente entre estes fatores (itens de verificação) e as características da qualidade do produto e do processo (itens de controle). A análise de regressão é uma técnica estatística muito útil para construir tais modelos e aplicável a muitas situações.

Quando os fatores importantes tiverem sido identificados e um modelo que os relacione aos efeitos do processo tiver sido construído, as ações gerenciais de manutenção e melhoria da qualidade poderão ser conduzidas de forma mais eficiente (Werkema e Aguiar, 1996).

As fases de um Projeto Experimental, propostas por Ribeiro (1999), são as que se seguem :

*1. Ouvir a voz do cliente (O QUÊ?)*

- Pesquisa de mercado.
- Identificar as características de qualidade (C.Q) de interesse.
- Identificar a importância relativa das C.Q.

*2. Ouvir a voz do engenheiro (COMO?).*

- Definir as variáveis de processo associadas às C.Q.
- Identificar outras variáveis de resposta de interesse.



- Identificar os parâmetros do processo.
- Identificar o intervalo de variação dos parâmetros do processo.
- Identificar os fatores controláveis.
- Definir o número de níveis para cada fator controlável.
- Definir possíveis interações entre os fatores controláveis.
- Identificar as restrições experimentais.
- Escolher o modelo estatístico do experimento.

### *3. Planejamento final e execução*

- Escrever a matriz experimental.
- Definir a ordem dos ensaios.
- Definir os procedimentos dos ensaios.
- Desenhar planilhas de coleta de dados.
- Executar o experimento e anotar os resultados.

### *4. Análise*

- Fazer a análise de variância.
- Escrever uma tabela de médias.
- Fazer gráficos dos efeitos dos fatores principais.
- Fazer gráficos das interações significativas.

### *5. Otimização.*

- Modelar individualmente cada variável de resposta.
- Definir uma função objetivo.

- Otimização.
- Verificar a consistência da solução.

As principais fases da seqüência acima estão detalhadas no Capítulo 5, que descreve a metodologia proposta para esta dissertação.

Os critérios para classificação dos projetos experimentais, segundo Juran *apud* Werkema e Aguiar (1996) são definidos a seguir:

- Pelo número de fatores a serem estudados, ou seja, um único fator ou vários fatores.
- Pela estrutura do planejamento experimental (planejamentos em blocos, fatoriais, hierárquicos ou para superfícies de resposta).
- Pelo tipo de informação que o experimento pode fornecer (estimativa dos efeitos, estimativa da variância ou mapeamento empírico da resposta).

Juran *apud* Werkema e Aguiar (1996) classifica os Projetos de Experimentos em: (i) completamente aleatorizados com um único fator; (ii) fatorial; (iii) fatorial  $2^k$  em blocos; (iv) fatorial  $2^k$  fracionado; (v) blocos aleatorizados; (vi) blocos incompletos balanceados; (vii) blocos incompletos parcialmente balanceados; (viii) quadrados latinos; (ix) quadrados de Youden; (x) hierárquico; e (xi) do tipo superfície de resposta

Hahn *apud* Caten (1995) cita os projetos blocados, projetos fatoriais, projetos fatoriais do tipo  $2^k$ , projetos fatoriais fracionados e os projetos *screening* como os projetos de experimentos mais conhecidos na literatura.

Myers *et al.* *apud* Caten (1995) descrevem os projetos mais utilizados na Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology* – RSM), destacando o Projeto Composto Central (PCC). Os Projetos Compostos Centrais são projetos de múltiplos fatores controláveis a níveis contínuos, onde a relação entre os fatores controláveis e a variável de resposta é modelada através de análise de regressão. Um caso especial da classe dos projetos compostos é o projeto composto central de segunda ordem. Devido à relevância desse tipo de projeto na aplicação prática reportada nesta dissertação, o mesmo será brevemente detalhado a seguir.

### 3.1 PROJETO COMPOSTO CENTRAL

Box e Wilson *apud* Khuri e Cornell (1996) introduziram uma classe alternativa de projetos aos projetos fatoriais  $3^k$ , denominados de classe dos projetos compostos centrais (*Central Composite Designs - CCDs*).

Segundo Myers e Montgomery (1995), os CCDs são a classe mais popular de projetos de segunda ordem. Isso deve-se, em grande parte, pela sua utilização freqüente em experimentação seqüencial.

Um projeto composto central de segunda ordem consiste de um projeto fatorial a dois níveis ( $2^k$ ) ou fatorial fracionário (escolhido de forma a permitir a estimativa de todos os termos de interação bifatoriais e de primeira ordem), cujos pontos são os vértices de um quadrado inscrito em uma circunferência, ao qual são acrescentados pontos adicionais. Os pontos experimentais adicionais consistem em pontos centrais e pontos em forma de estrela ( $2k$  pontos, ao todo) arranjados ao longo dos eixos das variáveis e posicionados simetricamente em relação ao cubo fatorial. Os pontos em estrela são acrescentados para que efeitos quadráticos puros também possam ser estimados (Box e Draper, 1987).

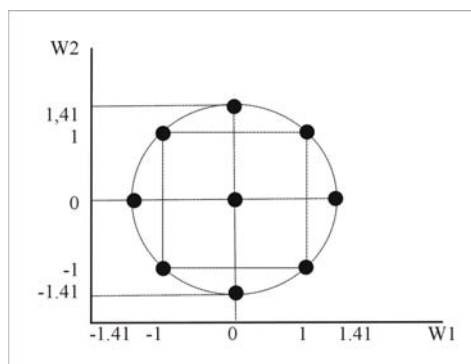
Caso necessário, o projeto pode contemplar repetições do ponto central, permitindo uma avaliação mais precisa da variância experimental através do aumento dos graus de liberdade do termo de erro (Ribeiro, 1999).

A Figura 10 ilustra um exemplo de CCD para  $k=2$ , onde os pontos do projeto são os vértices do quadrado inscrito na circunferência, ao qual são acrescentados um ponto central e quatro pontos mais externos chamados de pontos em “estrela”, com a repetição do ponto central. Observa-se, na Figura10, que o número total de pontos do projeto está representado por oito pontos igualmente espaçados sobre o círculo, mais os dois pontos centrais.

Os valores da distância axial ( $\alpha$ ) geralmente variam de 1 até  $\sqrt{k}$ . Quando  $\alpha = 1$ , todos os pontos axiais estão posicionados sobre a face do cubo ou hipercubo; quando  $\alpha = \sqrt{k}$ , os pontos experimentais localizam-se no perímetro de uma esfera comum, como exemplificado na Figura 10. No caso esférico, três a cinco pontos centrais devem ser usados e, no caso cubóide, um a dois pontos centrais serão suficientes (Myers e Montgomery, 1995).

É importante que um CCD de segunda ordem apresente uma distribuição razoavelmente estável da variância da variável de resposta estimada ( $N \text{ Var } \hat{y}(x)/\sigma^2$ ), por toda região experimental. O experimentador desconhece, inicialmente, a porção do espaço experimental onde previsões serão necessárias, bem como a localização do ponto ótimo neste espaço. Assim, uma variância razoavelmente estável de  $\hat{y}(x)$  por toda região experimental proporciona uma garantia de que a qualidade de  $\hat{y}(x)$ , que é a previsão dos valores de resposta futuros, seja mais ou menos a mesma por toda a região de interesse. Para essa finalidade, Box e Hunter *apud* Myers e Montgomery (1995) desenvolveram a noção de “rotabilidade do projeto”. Um projeto rotativo é aquele no qual a variância da variável de resposta estimada,  $\hat{y}(x)$ , tem o mesmo valor em locais equidistantes do centro do projeto. Em outras palavras, a variância da variável de resposta estimada,  $\hat{y}(x)$ , é constante em esferas equidistante do centro do projeto (Myers e Montgomery, 1995).

Segundo Khuri e Cornell (1996), para que o CCD de segunda ordem apresente a característica de rotabilidade, é necessário que, tanto os pontos de sua porção fatorial quanto os pontos da porção “estrela”, estejam localizados a uma mesma distância  $\alpha$  do centro do projeto. Para atribuir rotacionalidade ao projeto, o parâmetro  $\alpha$  deve ser calculado por  $\alpha = (F)^{\frac{1}{4}}$ , onde  $F$  é o número de pontos fatoriais. O valor de  $\alpha$  que assegura a rotabilidade para o projeto representado na Figura 10 é 1,41, pois os pontos da porção fatorial do projeto são os vértices de um quadrado de lado igual a 2. O número total de pontos do projeto é  $N=2^k+2k+ n_0$ . Valores de  $n_0$  e de  $\alpha$  são escolhidos de forma a conferir ao projeto propriedades de interesse.



**Figura 10 – Projeto composto central de segunda ordem ( $\alpha = 1,41$ )**

Fonte: Pasa (1996).

A flexibilidade de utilização em experimentos sequenciais é o maior atrativo dos CCDs. A porção fatorial (fracionada ou completa) e os pontos centrais constituem uma fase preliminar de experimentação a partir da qual pode-se ajustar um modelo de primeira ordem e verificar a necessidade de incorporar termos quadráticos puros. A flexibilidade desses projetos é evidenciada pela variedade de aplicações de CCDs reportadas na literatura, por exemplo Box e Draper (1987), Khuri e Cornell (1987), Lucas (1976), Giovannitti-Jensen e Myers (1989) e Myers *et al.* (1992).

### 3.2 PROJETOS DE EXPERIMENTOS COM FORMULAÇÕES

Os Projetos de Experimentos com Formulações são uma adaptação dos projetos de experimentos tradicionais e estão fundamentados na aplicação de algumas técnicas adicionais aos projetos de experimentos tradicionais. A aplicação dessas técnicas adicionais faz-se necessária devido à dependência existente entre as variáveis de controle do experimento, isto é, os ingredientes de uma formulação. Os assuntos abordados nessa seção estão fundamentados, principalmente, em Cornell (1990a).

### 3.2.1 Definição e Conceitos

Entende-se por formulação, ou “mistura”, o ato de associar vários ingredientes para formar um produto. O produto resultante de uma formulação tem características de qualidade, na maioria das vezes, diretamente relacionadas à natureza e às proporções dos seus ingredientes, não dependendo da quantidade total da formulação.

“O estudo dos experimentos com formulações tem por objetivo principal determinar as proporções dos ingredientes da formulação que resultem em um produto com características preestabelecidas” (Fogliatto e Caten, 1999).

Para esses mesmos autores, experimentos com formulações diferenciam-se dos experimentos tradicionais por apresentarem dependência entre as variáveis de controle. Essa dependência origina-se da restrição às proporções dos ingredientes da formulação, ou seja, no fato da soma das variáveis ser, obrigatoriamente, igual a 100%. Tal restrição é um fator limitante da região de experimentação dos experimentos. Caso contrário, os experimentos com formulações poderiam ser planejados e analisados como experimentos tradicionais.

Cornell (1990a) define Experimentos com Formulações como um experimento no qual as variáveis de resposta assumem dependência somente nas proporções relativas dos ingredientes presentes na formulação, e não na quantidade total da formulação, que é constante. Por esse motivo, o valor das variáveis de resposta somente muda quando alterações são feitas nas proporções relativas dos ingredientes, que compõem a formulação. Assim, o valor observado da variável de resposta será uma medida da combinação das propriedades dos ingredientes da formulação.

Em uma formulação, se  $q$  representa o número de ingredientes da formulação e  $x_i$  representa a proporção do  $i$ -ésimo ingrediente, então:

$$0 \leq x_i \leq 1, i= 1, 2, \dots, q. \quad (3.1)$$

e

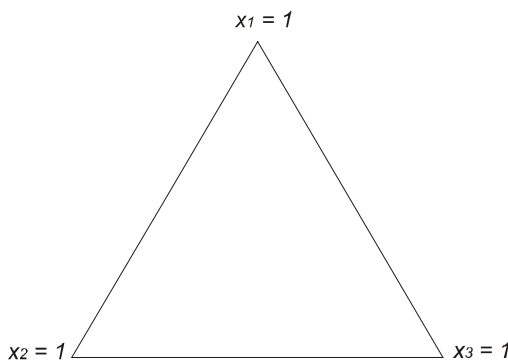
$$\sum_{i=1}^q x_i = \sum_{i=1}^q x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (3.2)$$

A partir das expressões (3.1) e (3.2), percebe-se que, como as proporções dos ingredientes da formulação devem ter soma igual a 1, as proporções  $x_i$  são interdependentes, ou seja, a alteração na proporção de qualquer um dos ingredientes da formulação acarretará em mudança na proporção de, pelo menos, um dos outros ingredientes. Devido às restrições apresentadas para os valores de  $x_i$ , nas expressões (3.1) e (3.2), o espaço experimental resultante apresenta um formato especial denominado de espaço simplex.

“Um espaço simplex é o conjunto de todos os pontos possíveis de experimentação para os quais a soma dos componentes na mistura é 100%” (Fogliatto e Caten, 1999).

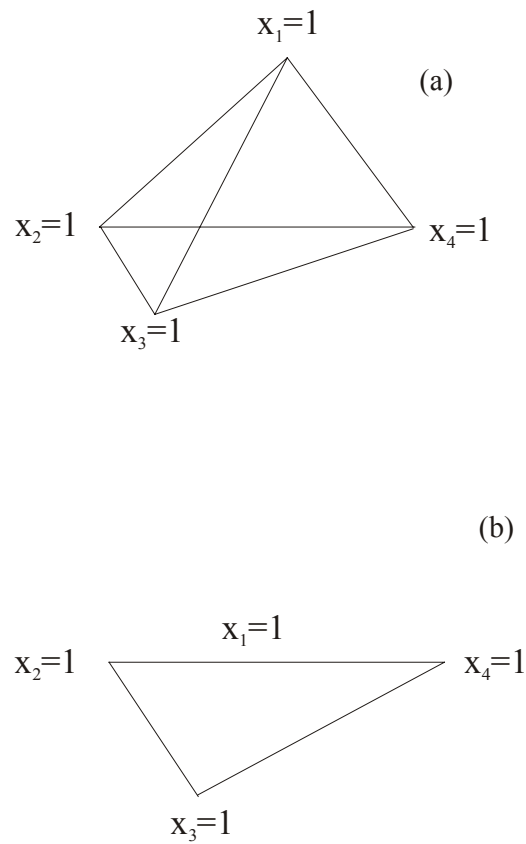
Crosier *apud* Pasa (1996) define um simplex como uma configuração especial determinada por um número de pontos, uma unidade maior do que o número de dimensões do espaço. O simplex possui  $q$  pontos vértices, onde um dos  $q$  ingredientes assume a proporção 1. As restrições apresentadas nas expressões (3.1) e (3.2) formam um simplex regular, visto que todos os vértices estão igualmente distante uns dos outros.

O espaço experimental simplex para  $q=2$  ingredientes é uma linha reta; para  $q=3$  ingredientes, o espaço simplex é um triângulo equilátero (ver Figura 11); para  $q=4$  ingredientes, o espaço simplex é um tetraedro [ver Figura 12 (a) e 12 (b)].



**Figura 11 – Espaço fatorial simplex para uma formulação com três ingredientes.**

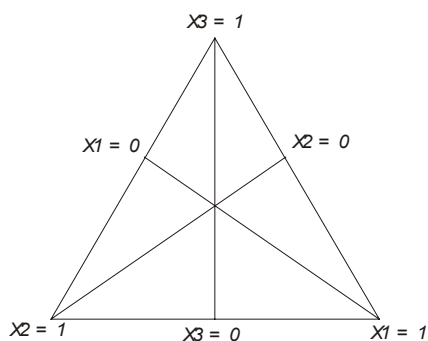
Fonte: Cornell (1990a).



**Figura 12 – Espaço fatorial simplex para uma formulação com quatro ingredientes**

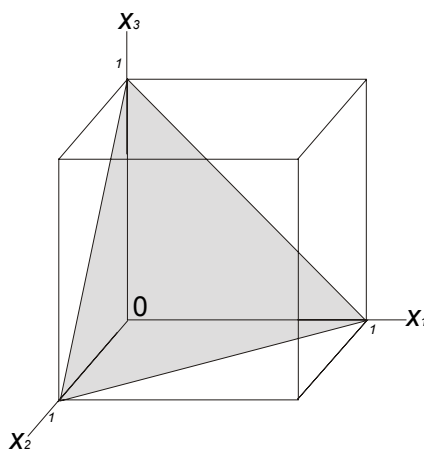
O sistema utilizado para formulações é o sistema de coordenadas simplex (Figura 13), o qual é o rebatimento de uma representação cartesiana (Figura 14).





**Figura 13 – Sistema de coordenadas simplex para três ingredientes.**

Fonte: Cornell (1990a)



**Figura 14 – Representação cartesiana do espaço experimental de uma formulação de três ingredientes**

Fonte: Cornell (1990a).

Os eixos  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , apresentados na Figura 13, representam os três ingredientes da formulação. O espaço experimental resultante de uma formulação com três ingredientes é um triângulo equilátero (área hachurada na Figura 14), pois somente os pontos nele contidos têm a soma de suas coordenadas igual a 1.

$$x_i = 1,$$

$$x_j = x_k = 0$$

Os pontos no interior do espaço simplex representam formulações onde todas as proporções dos ingredientes são diferentes de zero. O ponto central representa uma formulação onde as proporções dos ingredientes são iguais; os meios dos lados correspondem a formulações de dois componentes, onde cada um está na proporção de 50%; o ponto de intersecção das medianas corresponde a uma formulação onde cada ingrediente contribui com  $\frac{1}{3}$ .

O custo dos experimentos torna-se elevado quando não se sabe ao certo quais os componentes investigar e as faixas de variação dos mesmos, pois o resultado é uma região experimental muito grande para investigação. Nessas condições, torna-se difícil obter modelos matemáticos capazes de descrever a região experimental com precisão e, portanto, faz-se necessário restringir o espaço experimental através da utilização de experimentos exploratórios iniciais. Esses experimentos fornecem informações com suficiente precisão de uma região de interesse menor que a região inicial do experimento.

### 3.2.2 Projetos exploratórios iniciais

Os projetos exploratórios iniciais, apresentados a seguir, são: “simplex-lattice”; “simplex-centróide” e projetos axiais. Os projetos simplex-lattice e projetos simplex-centróide são úteis quando se deseja realizar uma investigação inicial abrangendo toda a região simplex; os projetos axiais são úteis para investigar o efeito dos ingredientes candidatos a participarem do experimento, de forma que sejam selecionados apenas aqueles  $q$  ingredientes principais.

#### 3.2.2.1 Projetos simplex-lattice

O projeto simplex-lattice foi apresentado pela primeira vez por Scheffé em 1958. Muitos pesquisadores consideram o simplex-lattice como o marco inicial de desenvolvimento da teoria sobre Experimentos com Formulações. O projeto simplex-lattice é um arranjo ordenado de pontos distribuídos uniformemente sobre a região simplex, formando um reticulado. Arranjos lattice podem apresentar correspondências com equações polinomiais específicas (Cornell, 1990a).

Para suportar um modelo polinomial de grau  $m$ , com  $q$  ingredientes da formulação, o arranjo reticulado deverá ter como pontos experimentais todas as possíveis combinações envolvendo as seguintes proporções dos ingredientes:

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, m \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (3.3)$$

O número de pontos de um projeto simplex-lattice é dado pela expressão 3.4:

$$Nro. \text{ Pontos } \{q, m\} = \frac{(q + m - 1)!}{m! \cdot (q - 1)!} \quad (3.4)$$

onde  $m! = m \times (m-1) \times (m-2) \times \dots \times (2) \times (1)$ .

Para um experimento com  $q = 3$  ingredientes e um modelo de grau  $m=2$  (modelo de segundo grau), as proporções assumidas serão  $x_i = 0, \frac{1}{2}, 1$ , resultando nas seguintes combinações:

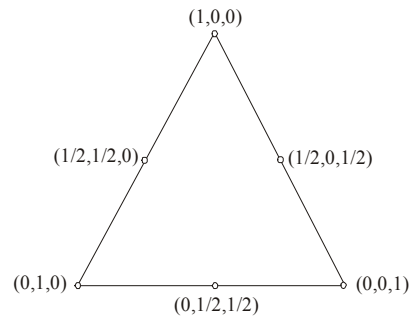
$$(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right), \left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right), \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$$

Aplicando-se a expressão (3.4), tem-se o número de pontos experimentais do projeto:

$$Nr^\circ \text{ pontos } \{3, 2\} = \frac{((3 + 2 - 1)!)}{(2!(3 - 1)!)} = 6 .$$

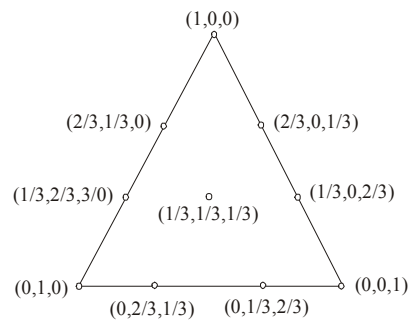
Os três vértices  $(1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1)$  representam componentes puros, enquanto os pontos  $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right), \left(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}\right), \left(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$  representam misturas binárias, localizadas nos meios dos lados do triângulo.

As Figuras 15, 16 e 17 trazem exemplos de projetos simplex-lattice para os casos de um simplex lattice  $\{3,2\}$ , simplex lattice  $\{3,3\}$  e simplex lattice  $\{4,2\}$ , respectivamente.



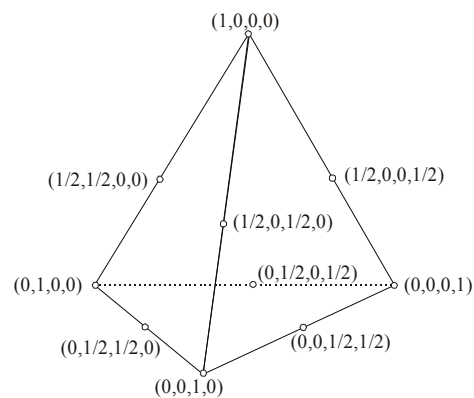
**Figura 15 – Projeto simplex-lattice  $\{3, 2\}$**

Fonte: Cornell (1990a).



**Figura 16 – Projeto simplex-lattice  $\{3, 3\}$**

Fonte: Cornell (1990a).



**Figura 17 – Projeto simplex-lattice  $\{4, 2\}$ .**

Fonte: Cornell (1990a).

Cornell (1990) cita algumas propriedades de um arranjo simplex-lattice:

- i. O lattice consiste de um arranjo uniforme e simétrico de pontos sobre o simplex; conseqüentemente, os ingredientes no sistema são todos explorados em um mesmo nível.
- ii. A elaboração do projeto experimental é de baixa complexidade.
- iii. A estimativa dos mínimos quadrados dos coeficientes do modelo de regressão é facilmente calculada a partir da média das observações nos pontos do lattice.

Dois propriedades indesejáveis de um arranjo simplex-lattice  $\{q, m\}$  são:

- i. A região de experimentação está restrita às bordas do triângulo simplex, ou seja, o simplex lattice é estritamente um projeto de fronteira.
- ii. O número de pontos do “lattice” pode ser excessivo quando  $q$  assumir valores grandes e  $m \geq 2$ .

### 3.2.2.2 Projeto simplex-centróide

Os projetos simplex-centróide foram introduzidos por Scheffé (1963) e se constituem em um arranjo alternativo ao arranjo simplex-lattice  $\{q, m\}$ . Eles também são adequados a situações em que se deseja explorar toda a região simplex (Cornell, 1990a).

O número de pontos distintos em um projeto simplex-centróide com  $q$  ingredientes é dado pela expressão (3.5).

$$Nr^{\circ} \text{ de pontos} = 2^q - 1 \quad (3.5)$$

Os pontos no arranjo simplex-centróide para um experimento com  $q$  ingredientes são os seguintes:

- i. “ $q$ ” permutações de  $(1, 0, 0, \dots, 0)$  ou as  $q$  formulações puras.
- ii.  $\binom{q}{2}$  permutações de  $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \dots, 0\right)$  ou todas as formulações binárias.

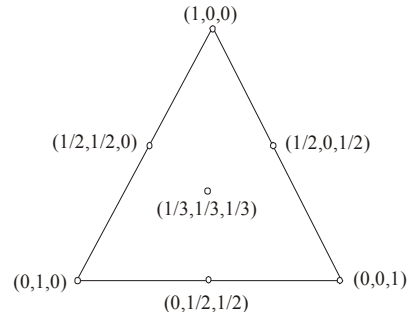
- iii.  $\binom{q}{3}$  permutações de  $\left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, 0, \dots, 0\right)$  ou todas as formulações ternárias,

até finalmente,

- i. Um ponto centróide geral  $\left(\frac{1}{q}, \frac{1}{q}, \dots, \frac{1}{q}\right)$  ou formulação  $q$ -nária.

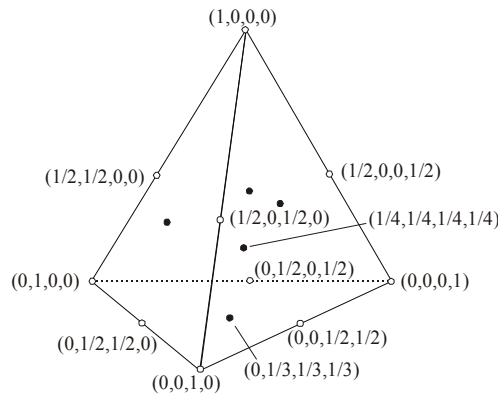
O projeto simplex-centróide constitui-se da soma de cada subconjunto não vazio de  $q$  ingredientes, nos quais os ingredientes da formulação aparecem em proporções iguais. Essas formulações localizam-se nos centróides das regiões simplex de dimensão  $(q - 1)$ , e nos centróides de todas as sub-regiões simplex de dimensão inferior, contidas na região simplex  $(q - 1)$  (Pasa, 1996) .

O projeto simplex-centróide para três e quatro ingredientes são ilustrados nas Figuras 18 e 19, respectivamente.



**Figura 18 – Projeto simplex-centróide para três ingredientes.**

Fonte: Cornell (1990a).



**Figura 19 – Projeto simplex-centróide para quatro ingredientes**

Fonte: Cornell (1990a).

Para a análise dos dados dos experimentos com formulações, as técnicas de Análise de Regressão Linear e Análise de Variância (ANOVA) não podem ser utilizadas, pois pressupõem variáveis de controle independentes. Para a modelagem dos dados, Scheffé *apud* Cornell (1990a) introduziu os polinômios de formulações na forma canônica, também chamados de polinômios de Scheffé.

Os polinômios de formulações na forma canônica são obtidos aplicando-se as restrições  $\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1$  aos termos do polinômio padrão e, em seguida, realizando-se simplificações.

O modelo geral da função de regressão que pode ser ajustado aos dados coletados de um simplex-lattice  $\{q, m\}$  é derivado da utilização do procedimento a seguir.

Como ponto de partida, considere a equação de um polinômio de grau  $m$ :

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^q \sum_{j=1}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i \leq j \leq k}^q \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^q \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (3.6)$$

O número de termos da expressão (3.6) é dado por  $\binom{q+m}{m}$ . Para um polinômio de grau  $m$ , com  $q$  ingredientes sujeitos à restrição na expressão (3.2), uma equação alternativa para a

expressão (3.6) pode ser obtida a partir da multiplicação de alguns de seus termos pela identidade  $(x_1 + x_2 + \dots + x_q) = 1$  e posterior simplificação de termos. Para uma formulação com dois ingredientes,  $x_1$  e  $x_2$ , onde é imposta a restrição  $x_1 + x_2 = 1$ , o polinômio padrão de primeiro grau é escrito como  $\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ . Substituindo-se  $\beta_0$  por  $\beta_0(x_1 + x_2 = 1)$ , em  $\eta$ , tem-se  $\eta = (\beta_0 + \beta_1)x_1 + (\beta_0 + \beta_2)x_2$  ou, removendo-se a constante  $\beta_0$  do modelo,  $\eta = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ . Os termos quadráticos dos polinômios de segundo grau,  $\beta_{11}x_1^2$  e  $\beta_{22}x_2^2$ , também podem ser removidos do modelo, juntamente com o termo constante  $\beta_0$ . Dessa forma, os modelos de formulação possuem menos termos do que os polinômios padrão. A equação resultante é denominada de polinômio “canônico” ou de “forma canônica do polinômio” ou, simplesmente, de polinômio  $\{q, m\}$  (Cornell, 1990a).

As formas canônicas dos modelos de formulação são:

i. Linear:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad (3.7)$$

ii. Quadrática:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.8)$$

iii. Cúbico Completo:

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j} \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3.9)$$

iv. Cúbico Especial

$$\eta = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (3.10)$$

O número de termos em um polinômio  $\{q, m\}$  é uma função do grau do polinômio que se deseja ajustar ( $m$ ), bem como do número de ingredientes ( $q$ ). Os pontos experimentais, a



serem testados, dependem do grau do polinômio que se deseja ajustar e isso deve ser determinado *a priori* (Fogliatto e Caten, 1999).

A Tabela 1 fornece o número de pontos em um projeto simplex-lattice  $\{q,m\}$  como função de  $q$  e  $m$  para  $3 \leq q \leq 10$  e  $1 \leq m \leq 4$ .

**Tabela 1 - Número de pontos em um projeto simplex-lattice**

Número de componentes ( $q$ )	3	4	5	6	7	8	9	10
Grau do modelo ( $m$ )								
1	3	4	5	6	7	8	9	10
2	6	10	15	21	28	36	45	55
3	10	20	35	56	84	120	165	220
4	15	35	70	126	210	330	495	715

Fonte: Cornell (1990a).

O número de termos presente nos polinômios canônicos descritos nas expressões (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10) podem ser vistos na Tabela 2.

**Tabela 2 - Número de termos dos polinômios canônicos.**

Numero de componentes	Linear	Quadrático	Cúbico Especial	Cúbico completo
2	2	3	-	-
3	3	6	7	10
4	4	10	14	20
5	5	15	25	35
6	6	21	41	56
7	7	28	63	84
8	8	36	92	120
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
$q$	$q$	$q(q+1)/2$	$q(q^2+5)/6$	$q(q+1)(q+2)/6$

Fonte: Cornell (1990a).

Como já foi mencionado, existe uma relação especial entre um simplex-lattice e uma equação polinomial, onde a correspondência é de um para um entre o número de pontos no lattice e o número de termos no polinômio. Como resultado dessa relação, os parâmetros do polinômio podem ser expressos como funções simples da resposta esperada nos pontos do simplex-lattice  $\{q, m\}$ . Considere  $n_i$  observações do ingrediente puro  $i$  ( $x_i = 1, x_j = 0, j \neq i$ ), com média  $\bar{Y}_i$ , e  $n_{ij}$  observações de misturas binárias dos ingredientes  $i$  e  $j$  ( $x_i = \frac{1}{2}, x_j = \frac{1}{2}, x_k = 0$ ), para todo  $i < j < k$ , com médias dadas por  $\bar{Y}_{ij}$ . As fórmulas do método dos mínimos quadrados para o cálculo dos coeficientes  $b_i$  e  $b_{ij}$  no modelo de segundo grau [expressão (3.8)], são:

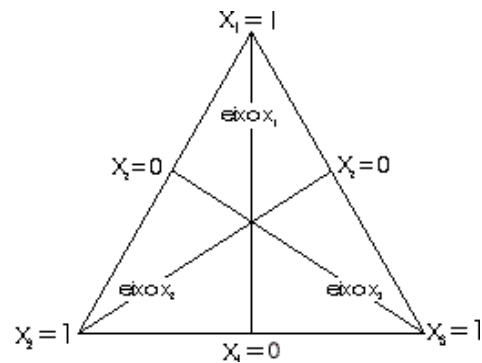
$$b_i = \bar{Y}_i \quad , \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, q. \quad (3.11)$$

$$b_{ij} = 4\bar{Y}_{ij} - 2(\bar{Y}_i + \bar{Y}_j), \quad \text{com } i, j = 1, 2, \dots, q, \quad i < j \quad (3.12)$$

### 3.2.2.3 Projetos Axiais

Os projetos simplex-lattice  $\{q, m\}$  e simplex-centróide são projetos com pontos experimentais localizados nos limites (vértices, lados ou faces) do espaço fatorial simplex, com exceção do ponto central. Os projetos axiais, por sua vez, consistem principalmente de formulações completas onde a maior parte dos pontos está posicionada no interior do espaço simplex.

Segundo Cornell (1990a), para definir um Projeto Axial é preciso visualizar o eixo do ingrediente  $i$  como uma linha imaginária que se estende da base do eixo  $x_i$  ( $x_i = 0, x_j = \frac{1}{(q-1)}$  para todo  $j \neq i$ ), ao vértice do eixo  $x_i$  ( $x_i = 1, x_j = 0$  para todo  $j \neq i$ ). O ponto da base é o centróide de limite dimensional  $(q-2)$ , o qual é oposto ao vértice  $x_i$  ( $x_i = 1, x_j = 0$  para todo  $j \neq i$ ). O comprimento do eixo é a menor distância do limite dimensional  $(q-2)$  até o vértice. Essa distância no sistema de coordenadas simplex é definida como uma unidade. Os eixos  $x_1, x_2$  e  $x_3$  para os ingredientes  $x_1, x_2$  e  $x_3$  podem ser vistos na Figura 20.

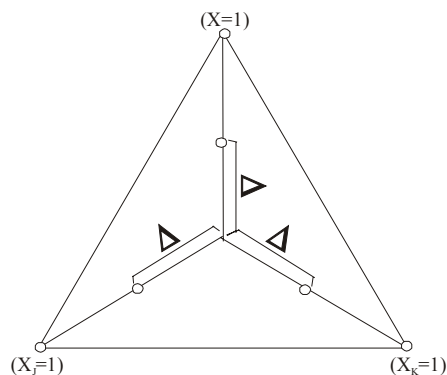


**Figura 20 – Eixos dos ingredientes  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ .**

Fonte: Cornell (1990a).

Em um projeto axial, os pontos são posicionados somente sobre os eixos  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  dos ingredientes. A forma mais simples de Projeto Axial é aquela na qual os pontos são posicionados equidistantes do centróide global  $\left(\frac{1}{q}, \frac{1}{q}, \dots, \frac{1}{q}\right)$  na direção dos vértices. A distância do centróide, medida em unidades de  $x_i$ , é simbolizada por  $\Delta$ , e o máximo valor de  $\Delta$  é  $\frac{q-1}{q}$ .

Um Projeto Axial para três componentes, com distância do ponto central do simplex aos pontos do projeto representada por  $\Delta$ , pode ser visto na Figura 21.



**Figura 21 – Projeto Axial para três componentes cuja distância do ponto central do simplex aos pontos do projeto é  $\Delta$**

Fonte: Cornell (1990a).

Os Projetos Axiais são úteis em situações cujos efeitos relativos dos ingredientes precisam ser estudados e em experimentos exploratórios iniciais onde, entre um grande número de ingredientes, procura-se identificar os mais importantes (Pasa, 1996).

### **3.2.3 Técnicas utilizadas no Planejamento e Análise de Dados dos Experimentos com Formulações quando a região de interesse é uma sub-região do espaço “simplex”.**

#### 3.2.3.1 Pseudocomponentes

Essa técnica é utilizada quando o objetivo não é investigar toda a região do espaço simplex, e sim investigar uma sub-região do espaço simplex da formulação. A razão de se limitar o experimento a uma sub-região do espaço simplex pode ser: (i) a existência de restrições de natureza física, econômica ou experimental; ou (ii) quando se conhece suficientemente o espaço simplex a ponto de ser possível localizar, dentro do mesmo, um sub-espaço de interesse prático para o experimento. A redução do espaço experimental permite aumentar a precisão dos modelos e, algumas vezes, reduzir os custos e o tempo de experimentação. Essa redução é feita através de restrições às proporções dos ingredientes da formulação. A faixa de variação dos ingredientes da formulação ( $x_i$ ) é definida pela expressão (3.13):

$$0 \leq L_i \leq x_i \leq L_s \leq 1 \quad (3.13)$$

onde:

$L_i$  é a mínima proporção assumida pelo ingrediente  $i$  na formulação e

$L_s$  é a máxima proporção assumida pelo ingrediente  $i$  na formulação.

A primeira técnica investigada para planejar experimentos em sub-regiões do simplex é a técnica dos pseudocomponentes. A imposição de restrições ao espaço experimental, geralmente, altera o tamanho e a forma originais do espaço simplex. O uso de pseudocomponentes reduz o mau condicionamento da região irregular que resulta das restrições, permitindo, em alguns casos, adaptar projetos tradicionais à região irregular. Os pseudocomponentes são variáveis novas, resultantes de transformações feitas sobre os ingredientes originais.

Cornell (1990a) apresenta os pseudocomponentes como forma de simplificar o projeto e ajustar os modelos ao espaço experimental, em casos cujos limites inferiores sejam impostos às proporções de alguns ou de todos os ingredientes da formulação. Para que inferências sejam feitas, faz-se necessária a transformação inversa dos pseudocomponentes para os ingredientes originais. A transformação utilizada para adaptar projetos padrão ao espaço simplex, quando da existência das restrições descritas na expressão (3.13), é descrita a seguir:

$$Z_i = \frac{(X_i - L_i)}{1 - \sum_{j=1}^q L_j}, \quad (3.14)$$

onde:

$L_s$  é a coordenada do pseudocomponente.

$X_i$  é a coordenada do ingrediente original.

$L_i$  é o limite inferior da faixa de variação do ingrediente  $i$ .

$L_j$  é o limite inferior da faixa de variação do ingrediente  $j$ .

Maiores informações sobre pseudocomponentes podem ser encontradas em Cornell (1990a), Heinsman e Montgomery (1995), Montgomery e Voth (1994) e em St. John (1984), conforme sugerido por Pasa (1996).

### 3.2.3.2 Utilização de sub-regiões elipsoidais.

Essa técnica é adequada aos experimentos com formulações quando as restrições impostas às proporções dos ingredientes da formulação reduzem o espaço experimental simplex a um poliedro irregular. O espaço experimental, nessa técnica, é uma região elipsoidal inscrita em um poliedro irregular, o que simplifica o planejamento do experimento, pois é mais fácil distribuir pontos uniformemente sobre uma região elipsoidal do que os distribuir sobre um poliedro irregular. Essa técnica tem como desvantagem o risco de se perder parte do experimento pelo fato de se inserir um elipsóide no poliedro irregular. Se um ponto importante ficar localizado fora do elipsóide, o mesmo poderá ser acrescentado ao experimento para que a informação desejada possa ser obtida.

A Figura 22 traz um exemplo de espaço experimental para uma formulação com três ingredientes ( $i = 1, 2$  e  $3$ ). Sejam as seguintes restrições impostas nas faixas de variação da proporção de cada ingrediente:

$$L_{i1} \leq x_1 \leq L_{s1} \quad (3.15)$$

$$L_{i2} \leq x_2 \leq L_{s2} \quad (3.16)$$

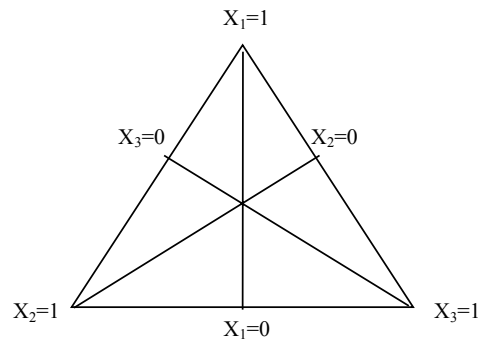
$$L_{i3} \leq x_3 \leq L_{s3} \quad (3.17)$$

onde:

$L_{ii}$  = o limite inferior da faixa de variação do componente  $i$ ,

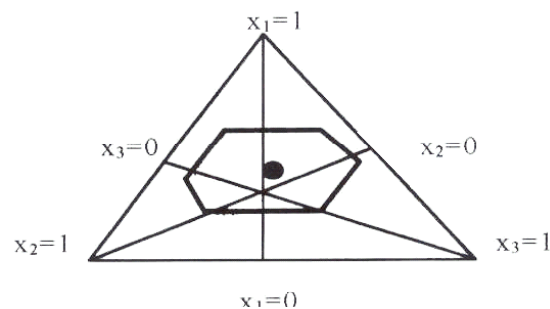
$L_{si}$  = o limite superior da faixa de variação do componente  $i$ .

O espaço experimental da Figura 22 transforma-se em um poliedro irregular após a imposição das restrições (3.15), (3.16) e (3.17) como pode ser visto na Figura 23.



**Figura 22 – Espaço experimental para uma formulação de três ingredientes.**

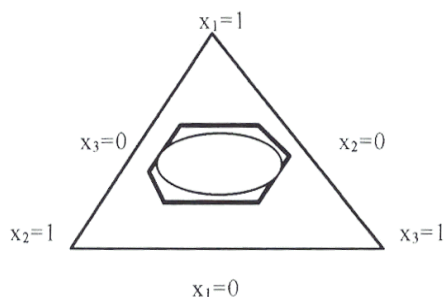
Fonte: Pasa (1996).



**Figura 23 – Poliedro irregular inscrito no triângulo resultante das restrições impostas às proporções dos ingredientes da formulação.**

Fonte: Pasa (1996).

Tendo sido definido o poliedro irregular e o ponto central da região de interesse, o próximo passo é inserir a região elipsoidal no poliedro irregular conforme pode ser visto na Figura 24.



**Figura 24 – Espaço experimental na forma de uma região elipsoidal inscrita no poliedro irregular**

Fonte: Pasa (1996).

A utilização de regiões elipsoidais simplifica o planejamento dos experimentos, pois é muito mais fácil distribuir pontos uniformemente sobre uma região elipsoidal do que sobre um poliedro irregular. A inserção de uma elipse no poliedro irregular, acarreta a perda de uma parte do espaço experimental, mas esse fato não se constitui em um problema, pois o espaço perdido é muito pequeno em relação ao espaço experimental total. Se algum ponto importante estiver localizado fora da elipse, o mesmo poderá ser acrescentado ao experimento.

Segundo Pasa (1996), é importante salientar que esse tipo de abordagem é feita quando a formulação ainda está expressa em termos das proporções dos  $q$  ingredientes da formulação, as quais são variáveis linearmente dependentes.

### 3.2.3.3 Utilização de variáveis independentes.

O uso de variáveis independentes permite a utilização de técnicas tradicionais de projeto de experimentos no desenho de experimentos com formulações. Assim, projetos experimentais como os fatoriais e os projetos compostos de segunda ordem podem ser utilizados no experimento com formulação. Além disso, técnicas como ANOVA e análise de regressão podem ser utilizadas na análise e modelagem dos resultados. A utilização de variáveis independentes traz diversas vantagens no projeto e análise dos dados de um

experimento. O uso de variáveis independentes não implica na perda da capacidade de visualizar o que está acontecendo com as proporções dos ingredientes; a visualização somente deixa de ser imediata. É possível, a qualquer momento, passar do espaço das variáveis dependentes para as independentes e vice-versa, bastando, para isso, conhecer a transformação utilizada. Além disso, se a transformação a ser aplicada for adequadamente escolhida, pode-se fazer com que a relação entre as variáveis dependentes e independentes seja simples, de forma que a leitura dessas conduza a uma compreensão quase imediata daquelas (Pasa, 1996).

Para se obter um sistema de  $(q - 1)$  variáveis independentes, partindo-se de um sistema de  $q$  variáveis dependentes, faz-se necessária a transformação destas variáveis. Uma seqüência de passos a ser utilizada para este fim vem dada a seguir:

*Transformação de variáveis originais dependentes em variáveis dependentes intermediárias*

O primeiro passo consiste na transformação de  $q$  variáveis originais dependentes (proporções  $x_i$  dos  $q$  ingredientes da formulação) em  $q$  variáveis dependentes intermediárias (designadas por  $v_i$ ). Essa primeira transformação afeta apenas a escala de valores da faixa de variação das variáveis originais dependentes. As variáveis originais apresentam variação conforme descrito na expressão (3.13).

As variáveis dependentes intermediárias,  $v_i$ , por sua vez, vão apresentar faixas de variação do tipo:

$$-1 \leq v_i \leq 1 \quad (3.18)$$

A transformação de variáveis originais dependentes em variáveis intermediárias faz-se através da aplicação da expressão a seguir:

$$v_i = \frac{x_i - x_{0i}}{h_i} \quad i = 1, 2, \dots, q. \quad (3.19)$$

onde:

- $q$  é o número de ingredientes da formulação,
- $v_i$  é a variável intermediária,  $i$ , expressa em unidades adimensionais,



- $x_i$  é a proporção do ingrediente  $i$  expressa em percentual,  
 $x_{0i}$  é a média, da faixa de variação da proporção do ingrediente  $i$ ,  
 $h_i$  é a semi- amplitude da faixa de variação da proporção do ingrediente  $i$ .

Essa transformação faz com que a sub-região do simplex, formada pelos limites inferiores e superiores da faixa de variação dos ingredientes da formulação, assumam a configuração de uma região esférica de tamanho unitário, centrada em  $v_i = 0$ . Em outras palavras, a região experimental do simplex, originalmente triangular, quando  $q=3$ , é reescrita em formato elipsoidal, ou seja, uma elipse é inserida dentro da região do simplex original (Fogliatto e Caten, 1999).

As vantagens da utilização desta transformação são:

- i. A sub-região de experimentação pode assumir qualquer conformação. Todavia, trabalhar com uma região esférica é mais simples do que trabalhar com regiões de formato irregular.
- ii. Problemas de multicolinearidade entre as variáveis são eliminados.
- iii. Os coeficientes das proporções dos ingredientes da formulação e interações entre as proporções dos ingredientes, de um mesmo modelo, podem ser comparados diretamente, tendo em vista o tamanho unitário da esfera.

#### *Transformação de variáveis dependentes intermediárias em variáveis independentes*

O segundo passo consiste na transformação das variáveis dependentes intermediárias  $v_i$  em variáveis independentes  $w_i$ . A eliminação da dependência nas variáveis  $v_i$  faz com que se obtenha uma matriz de variáveis independentes  $\mathbf{W}_i$ , de ordem  $N \times (q-1)$ , onde  $N$  é o número de rodadas experimentais (linhas da matriz) e  $(q-1)$  é o número de ingredientes (colunas da matriz). A obtenção da matriz de variáveis independentes  $\mathbf{W}_i$  é feita através da expressão :

$$\mathbf{V} = [\mathbf{W}\mathbf{O}] \quad (3.20)$$

onde:

$\mathbf{V}$  é a matriz de variáveis intermediárias  $v_i$ , de ordem  $(N \times q)$ ,

$\mathbf{T}$  é uma matriz ortogonal de ordem  $(q \times q)$ ,  
 $\mathbf{W}$  é a matriz de variáveis independentes  $w_i$ , de ordem  $[N \times (q - 1)]$ ,  
 $\mathbf{0}$  é o vetor de zeros, de ordem  $(N \times 1)$ ,  
 $\mathbf{N}$  é o número de rodadas experimentais.

A transformação dada pela expressão (3.20) consiste de uma rotação de eixos em torno da origem da esfera ( $\mathbf{v}=\mathbf{0}$ ) representada pelas variáveis intermediárias  $v_i$ . A rotação realizada pela matriz  $\mathbf{T}$  ocorre de tal forma que as restrições em  $\mathbf{V}$  são expressas na forma  $w_{uq} = 0$ , ( $1 \leq u \leq N$ ), projetando a esfera unitária de dimensão  $q$  sobre o espaço dimensional  $(q - 1)$ . Obtém-se, dessa forma, uma esfera unitária centrada em  $\mathbf{w} = \mathbf{0}$  com  $(q - 1)$  eixos ortogonais entre si, que representam o conjunto de variáveis independentes desejado. Antes, porém, faz-se necessário encontrar a matriz ortogonal  $\mathbf{T}$  de ordem  $(q \times q)$ . Tal matriz pode ser decomposta em duas matrizes:  $\mathbf{T}_1$ , de dimensão  $[q \times (q - 1)]$ , e  $\mathbf{T}_2$ , de dimensão  $(q \times 1)$ , onde:

$$\mathbf{V} \mathbf{T}_1 = \mathbf{W} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{V} \mathbf{T}_2 = \mathbf{0} \quad (3.22)$$

A matriz  $\mathbf{T}$  deve ser ortogonal e satisfazer a condição de  $\mathbf{V} \mathbf{T}_2 = \mathbf{0}$  para que a expressão (3.20) resulte em uma matriz ortogonal  $\mathbf{W}$ , de variáveis independentes  $w_i$ , contendo um vetor de zeros na última coluna. A ortogonalidade da matriz  $\mathbf{T}$  é verificada através da satisfação da condição  $\mathbf{T}'\mathbf{T} = \mathbf{T}\mathbf{T}' = \mathbf{I}$ , onde  $\mathbf{I}$  é uma matriz identidade de dimensão  $(q \times q)$ . De posse desses dados, obtém-se a matriz  $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2]$ . A determinação dos elementos das “ $q$ ” colunas da matriz  $\mathbf{T}_1$ , é feita a partir das semi-amplitudes  $h_i$  das faixas de variação das proporções dos ingredientes  $i$  da formulação, descritas a seguir:

$$\begin{array}{lll} t_{11} = -h_2 & t_{12} = -h_1h_3 & t_{13} = -h_1h_4 \\ t_{21} = h_1 & t_{22} = -h_2h_3 & t_{23} = -h_2h_4 \\ t_{31} = 0 & t_{32} = h_1^2 + h_2^2 & t_{33} = -h_3h_4 \\ t_{41} = 0 & t_{42} = 0 & t_{43} = h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 \end{array} \quad (3.23)$$

Na expressão (3.23),  $t_{ij}$  é o elemento não normalizado da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna da matriz  $\mathbf{T}_1$ .

$$\begin{array}{l}
 \left[ \begin{array}{ccc}
 -h_2 & -h_1 h_3 & -h_1 h_4 \\
 h_1 & -h_2 h_3 & -h_2 h_4 \\
 0 & h_1^2 + h_2^2 & -h_3 h_4 \\
 0 & 0 & h_1^2 + h_2^2 + h_3^2
 \end{array} \right] \\
 \begin{array}{l}
 \leftarrow q=2 \\
 \leftarrow q=3 \\
 \leftarrow q=4
 \end{array}
 \end{array} \quad (3.24)$$

A matriz da expressão (3.24) serve para experimentos com até 4 ingredientes ( $q = 4$ ).

Calculados os elementos  $t_{ij}$  da matriz  $\mathbf{T}_1$ , normalizam-se seus valores, obtendo-se a matriz  $\mathbf{T}_1$  normalizada, apresentada a seguir:

$$\left[ \begin{array}{ccc}
 \frac{-h_2}{\sqrt{h_2^2 + h_1^2}} & \frac{-h_1 h_3}{\sqrt{(h_1 h_3)^2 + (h_2 h_3)^2 + (h_1^2 + h_2^2)^2}} & \frac{-h_1 h_4}{\sqrt{(h_1 h_4)^2 + (h_2 h_4)^2 + (h_3 h_4)^2 + (h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)^2}} \\
 \frac{h_1}{\sqrt{h_2^2 + h_1^2}} & \frac{-h_2 h_3}{\sqrt{(h_1 h_3)^2 + (h_2 h_3)^2 + (h_1^2 + h_2^2)^2}} & \frac{-h_2 h_4}{\sqrt{(h_1 h_4)^2 + (h_2 h_4)^2 + (h_3 h_4)^2 + (h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)^2}} \\
 0 & \frac{h_1^2 + h_2^2}{\sqrt{(h_1 h_3)^2 + (h_2 h_3)^2 + (h_1^2 + h_2^2)^2}} & \frac{-h_3 h_4}{\sqrt{(h_1 h_4)^2 + (h_2 h_4)^2 + (h_3 h_4)^2 + (h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)^2}} \\
 0 & 0 & \frac{h_1^2 + h_2^2 + h_3^2}{\sqrt{(h_1 h_4)^2 + (h_2 h_4)^2 + (h_3 h_4)^2 + (h_1^2 + h_2^2 + h_3^2)^2}}
 \end{array} \right] \quad (3.25)$$

As matrizes descritas nas expressões (3.24) e (3.25) são essencialmente iguais. A obtenção da matriz  $\mathbf{T}_2$  é feita através da expressão (3.26).

$$\sum_{i=1}^q h_i v_i = 0 \quad (3.26)$$

Então:

$$\tilde{h}_i = \frac{h_i}{\left( \sum_{i=1}^q h_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.27)$$

Como  $\sum_{i=1}^q \tilde{h}_i v_i = 0$ , o vetor  $\mathbf{T}_2$  pode ser assim definido:

$$\mathbf{T}_2 = \tilde{h} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_1 \\ \tilde{h}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{h}_q \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Calculadas as matrizes  $\mathbf{T}_1$  e  $\mathbf{T}_2$ , obtém-se a matriz  $\mathbf{W}$  de dimensão  $N \times (q-1)$  e o vetor  $\mathbf{0}$  de zeros de dimensão  $N \times 1$  através das expressões (3.21) e (3.22). Porém, toda a análise é feita baseada nas variáveis independentes que, por serem uma transformação das variáveis originais, não permitem a visualização das proporções dos ingredientes da formulação. Para permitir esta visualização, se faz necessária uma transformação inversa, ou seja, reescrever as variáveis independentes em variáveis originais dependentes (variáveis da formulação).

*Transformação das variáveis independentes em variáveis dependentes originais -  
Transformação Inversa*

A expressão (3.29) resume o procedimento para transformação de um dado ponto do espaço experimental, expresso em variáveis independentes, no ponto correspondente no espaço experimental, expresso em proporções dos ingredientes da formulação.

$$[\mathbf{X}_0] = [\mathbf{X}_C] + [\mathbf{W}][\mathbf{T}_1][\mathbf{H}] \quad (3.29)$$

onde:

$[X\%]$  é a matriz resultado de dimensão  $(N \times q)$ ;

$[X_c\%]$  é a matriz de dimensão  $(N \times q)$  das coordenadas do ponto central da região experimental expressa em variáveis dependentes  $x_i$  (todas as linhas da matriz são iguais);

$[W]$  é a matriz de ordem  $[1 \times (q-1)]$  de um ponto qualquer do espaço experimental expressa em variáveis independentes  $w_i$ ;

$[T_1']$  é a transposta da matriz  $T_1$ ;

$[H]$  é a matriz Diagonal de dimensão  $(q \times q)$  das semi-amplitudes ( $h_i$ ) das faixas de variação dos ingredientes da formulação.

---

*Capítulo IV*

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AVALIAÇÃO SENSORIAL**

## 4 AVALIAÇÃO SENSORIAL

A qualidade de alguns produtos industrializados somente pode ser plenamente medida através da avaliação sensorial de algumas de suas propriedades. Esse fato é particularmente verdadeiro nas indústrias de alimentos e farmacêuticas, onde os técnicos de desenvolvimento de produtos estão, muitas vezes, envolvidos com a tarefa de coletar e processar dados avaliados em painel sensorial (Fogliatto, Albin e Silva, 2000)

A análise sensorial, no Brasil, tem recebido um grande impulso nos últimos anos, principalmente no sentido de encontrar maior aplicação no setor produtivo (Almeida *et al.*, 1996). Esse impulso deve-se a uma maior divulgação dessa ciência. A maioria das publicações atuais relacionadas com investigações em alimentos incluem a avaliação sensorial. O uso que se faz das informações obtidas através da avaliação sensorial é bastante diversificado. Atualmente, grande parte das decisões de mais alto nível de uma empresa, acerca de problemas relacionados com alimentos, sustenta-se nessa ciência.

A confiabilidade obtida com os resultados da avaliação sensorial resulta de diferentes fatores, dentre os quais, destaca-se o rigor científico no planejamento de experimentos. Muitas vezes, os resultados da avaliação sensorial constituem-se em informações decisivas para definir o lançamento de um novo produto no mercado, ou para definir até que nível pode-se variar a qualidade de um produto sem perder sua imagem perante o mercado consumidor. Outras vezes, a avaliação sensorial provê informações que permitem estimar a aceitabilidade ou preferência por produtos alternativos. O desenvolvimento de produtos está estreitamente relacionado com as necessidades e os desejos do consumidor; conseqüentemente, as indústrias

de alimentos devem responder com rapidez às mudanças detectadas no mercado consumidor (Almeida *et al.*, 1999).

Idealmente, o resultado da avaliação sensorial deve permitir ao analista relatar os diversos fatores durante a preparação das amostras e o impacto sensorial correspondente sobre eles. Em outras palavras, resultados são transformados em modelos matemáticos e usados para prever resultados sensoriais de acordo com a combinação dos fatores escolhidos durante o preparo das amostras. Dessa maneira, modelos matemáticos só podem ser determinados quando a avaliação sensorial de amostras produz dados quantitativos, uma ou mais medidas por amostra (Fogliatto, Albin e Silva, 2000)

Segundo Almeida *et al.* (1999), o desenvolvimento de alimentos é um empreendimento de risco, visto que se estima que menos de 1% dos projetos iniciados para gerar novos produtos alimentícios têm êxito. Nem os programas computacionais, nem as soluções gráficas mais sofisticadas podem substituir o julgamento humano na seleção do desenho experimental adequado e dos procedimentos de avaliação associados, com o objetivo de encontrar a melhor formulação para um produto alimentício. Quando necessita-se determinar a aceitabilidade e a qualidade dos alimentos, faz-se uso da avaliação sensorial, que consiste na utilização dos órgãos humanos dos sentidos (visão, gustação, olfato, audição e sensibilidade cutânea) para detectar diferenças ou preferências entre amostras avaliadas. É através dos órgãos dos sentidos que o ser humano se relaciona com o mundo que o cerca. As sensações que resultam da interação dos órgãos humanos dos sentidos com os alimentos são utilizadas para avaliar a sua qualidade e aceitabilidade conforme percebida pelo consumidor e em pesquisas para o desenvolvimento de novos produtos.

A avaliação sensorial é efetuada de maneira científica, utilizando-se de um painel sensorial, composto por um grupo de pessoas, especialmente selecionadas para analisar as diferentes características organolépticas dos alimentos (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

#### 4.1 ÓRGÃOS DOS SENTIDOS

O órgão relacionado ao sentido da visão (olhos) permite avaliar a cor e a aparência de um alimento, aspectos que primeiro impressionam o consumidor. A partir dessa primeira impressão é que os consumidores se posicionarão quanto à aceitação, indiferença ou rejeição



do alimento. Além disso, características visuais do alimento induzem o consumidor a esperar certo sabor correspondente, isso porque cada vez que o mesmo se confronta com determinada imagem, recordar-se-á de tudo o que já aprendeu sobre o alimento em questão.

O sentido do olfato é percebido pelo nariz, que permite que o odor dos alimentos, provenientes de substâncias voláteis que se desprendem do mesmo e estimulam os quimiorreceptores olfativos das narinas, seja percebido. Diversas concentrações de odor estimulam diferentes células sensoriais de acordo com seus valores específicos de *threshold* (limite mínimo detectável), ou seja, a combinação das células sensoriais envolvidas na criação da imagem olfativa - percepção do odor- varia de acordo com a concentração do odor. O ser humano possui uma alta sensibilidade olfativa, embora o mesmo esteja no limite mínimo da habilidade olfativa quando comparado a outros animais. Com treinamento, odores podem ser reconhecidos em concentrações muito baixas, e milhares de odores diferentes podem ser distinguidos. Painelistas treinados parecem utilizar-se muito mais de uma memória altamente desenvolvida para odores do que apenas depender de uma hipersensibilidade.

Os alimentos, ao serem mastigados, originam determinados sons que os caracterizam e que são percebidos pelos ouvidos, órgãos responsáveis pelo sentido da audição. Os consumidores, pela experiência prévia com determinados tipos de alimentos, esperam que os sons emanados da mastigação sejam compatíveis com o que se espera do alimento que está sendo consumido. Os sons emanados durante a mastigação também estão associados à textura dos alimentos. Um exemplo de defeito que pode ser detectado através da audição é o som emanado durante a degustação de um doce pastoso que sofreu a cristalização do açúcar. A textura esperada, nesse caso, é de cremosidade e não de crocância.

O sentido da gustação é responsável pela sensação de sabor, percebida pelos sistemas sensoriais químicos. Os sistemas sensoriais químicos estão distribuídos por toda cavidade bucal e concentrados na língua. O sentido da gustação está intimamente envolvido na seleção do alimento e na regulação da ingestão do mesmo. Alimentos de bom sabor, quase sem exceção, são bons para o organismo. Os alimentos necessários ao organismo têm bom sabor mesmo quando há plenitude estomacal. Além disso, alimentos de bom sabor frequentemente causam sensação de bem-estar.

O *flavor* de um alimento é o resultado da associação das percepções gustativas e olfativas, somadas às sensações subjetivas resultantes da avaliação (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

## 4.2 PAINEL SENSORIAL

A utilização de painelistas como dispositivo de medida da qualidade de um alimento é análoga ao uso de um instrumento de medição. O instrumento é selecionado pela sua capacidade de fornecer medidas precisas, tão acuradas e consistentes quanto possível. Da mesma forma, deve-se adotar um procedimento rigoroso para a seleção dos membros de um painel sensorial. Os instrumentos podem ser calibrados para fornecer medidas padronizadas, que poderão ser universalmente reproduzidas e interpretadas, enquanto que os painelistas devem ser treinados através de experiências diretas, especialmente elaboradas para familiarizar o indivíduo com o procedimento de teste. Aperfeiçoa-se, dessa forma, a habilidade do painalista para reconhecer e identificar os atributos sensoriais, melhorando a sensibilidade e a memória. Conseqüentemente, obtém-se maior precisão e consistência nos julgamentos sensoriais. O treinamento consiste na utilização sistemática da percepção sensorial combinada do painalista, como referência para testar a qualidade dos produtos (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

## 4.3 MÉTODOS SENSORIAIS DE AVALIAÇÃO

Os métodos de avaliação sensorial consistem de uma forma organizada de coletar informações a respeito de aspectos sensoriais de amostras, conforme percebidas pelos sentidos humanos. Esses métodos são aplicados no desenvolvimento e melhoria de produtos, controle de qualidade e no *marketing* do produto (Fogliatto, Albin e Silva, 2000)

Almeida *et al.* (1999), classificam os métodos sensoriais em dois grandes grupos: (i) testes de resposta objetiva e (ii) testes de resposta subjetiva. Em testes de resposta objetiva, deve-se trabalhar com painelistas treinados ou semi-treinados de acordo com as exigências do teste e do problema a que se aplicam. Nesses testes, espera-se uma alta reprodutibilidade dos julgamentos, como fruto do treinamento dos painelistas, controlando-se a veracidade e consistência de suas respostas. Dentro desse grupo de testes, estão os discriminatórios, que servem para avaliar a qualidade de amostras, e os analíticos, que se constituem em um grupo de testes mais minuciosos e requerem painelistas altamente treinados.

O segundo grupo de testes, de resposta subjetiva, é implementado com painelistas sem treinamento prévio nas técnicas de avaliação sensorial. Espera-se que as respostas obtidas resultem da reação espontânea dos indivíduos ao degustar e avaliar um alimento. Tais testes são utilizados para avaliar a aceitabilidade e preferência dos produtos. Os dois grupos de testes mencionados, constituem-se nas ferramentas básicas para desenvolver a avaliação sensorial.

De acordo com Lawless e Claasen e Lawless *apud* Cândido e Campos (1995), a escolha de um método de análise sensorial está baseada na resposta a pelo menos uma de três questões fundamentais: (i) existe diferença perceptível entre o produto em estudo e algum produto convencional similar (já que dois produtos podem ser diferentes, mas igualmente aceitos)?; (ii) o produto é aceito pelo consumidor?; (iii) quais os pontos de diferença (quais qualidades sensoriais estão presentes? Quais as suas intensidades?)?

A resposta a essas três questões fundamentais permite classificar os métodos sensoriais em: (i) discriminativos; (ii) afetivos de preferência e aceitabilidade e (iii) analíticos ou descritivos conforme descrito na seqüência:

#### **4.3.1 Métodos discriminativos**

Teixeira, Meinert e Barbeta (1987) dividem os métodos discriminativos em: teste de sensibilidade ou *threshold* e testes de diferença. Esta última categoria inclui: testes Triangulares, testes de Comparação Pareada, testes de Ordenação, testes Duo- Trio e testes de Comparações Múltiplas ou de Amostras Múltiplas.

##### 4.3.1.1 Teste de Sensibilidade ou *Threshold*

*Threshold* significa o limite mínimo de percepção absoluta, ou seja, o limite de concentração de uma determinada substância a partir do qual os painelistas ainda podem perceber alguma diferença entre amostras, relativamente a um determinado estímulo. O *threshold* é um ponto na escala de estímulo no qual ocorre uma transição na série de sensações ou julgamentos. Os testes de sensibilidade são indicados, especialmente, para determinar o limite mínimo, detectável, da concentração de uma substância (*threshold* absoluto), ou de alteração nesta concentração, na qual um sabor específico pode ser reconhecido (*threshold* de reconhecimento).

#### 4.3.1.2 Testes de Diferença

Os testes de diferença são de fácil interpretação, necessitam de um painel relativamente pequeno, treinado e selecionado, e são relativamente baratos. A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) conceitua os testes de diferença como sendo métodos que estabelecem diferenciação qualitativa e/ ou quantitativa entre amostras (Cândido e Campos, 1995).

Os testes de diferença são fundamentais para a avaliação de diferenças sensoriais entre amostras de alimentos. Através deles, pode-se determinar três tipos básicos de diferenças: (i) diferenças simples; (ii) diferenças direcionais; e (iii) diferenças de preferência-qualidade. Com a utilização desses testes pode-se obter informações efetivas em diversos campos de investigação. Na ciência dos alimentos, os testes de diferenças são utilizados para determinar variações sensoriais dos alimentos, resultantes de alterações físicas e químicas, visto que as propriedades sensoriais propriamente ditas originam-se de características genéticas, de plantio, práticas de conservação, tratamentos pré e pós-mortem, materiais e métodos utilizados para o processamento, tipos e materiais de embalagem e condições de armazenagem. As informações que os testes de diferença fornecem podem ser usadas no desenvolvimento de programas de controle e padrões de qualidade. Os testes de diferença podem também ser utilizados como indicativo prévio sobre a preferência dos consumidores (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

– *Teste de Ordenação ou Método da Ordens*: Esse teste é muito sensível e amplamente utilizado devido à simplicidade de aplicação e interpretação dos resultados obtidos. Três ou mais amostras, que se diferenciam por alguma característica, são apresentadas ao mesmo tempo aos painelistas. Pede-se aos mesmos que as ordenem de forma crescente ou decrescente de acordo com a preferência ou intensidade da característica que está sendo avaliada. A escolha da ordem, crescente ou decrescente, não é relevante, ainda que seja preferível que a ordem a ser escolhida para um alimento de sabor intenso, tenha início pelo alimento de maior intensidade (Anzaldúa, 1994). O número de amostras dependerá das condições psicológicas e da extensão da memória dos painelistas. Geralmente, esse número varia de três a dez amostras. No entanto, o número irá depender, também, das características do alimento que se está degustando; o número máximo de amostras a serem degustadas poderá ser maior no caso de painelistas treinados e experientes (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987). A ABNT sugere que testes de ordenação sejam aplicados para: pré-seleção entre um grande número de

amostras e na ordenação de amostras com relação à intensidade de um determinado atributo ou com relação à preferência. As vantagens são a rapidez na aplicação e na avaliação de várias amostras simultaneamente. A desvantagem é a impossibilidade de quantificar o grau de diferença ou preferência entre as amostras (Cândido e Campos, 1995). A principal limitação desse método reside no fato da avaliação realizada ser válida apenas para o conjunto de amostras estudado, não podendo comparar os resultados de um conjunto de amostras com os de outro (Anzaldúa, 1994).

– *Teste Triangular*: O teste triangular é o método discriminativo mais utilizado na indústria de alimentos, através do qual, o julgador deve determinar qual amostra codificada, entre três (duas iguais e uma diferente), é estranha, ou comentar sobre a natureza e grau de diferença, ou ainda expressar a preferência entre as amostras. A ABNT recomenda que o teste triangular seja utilizado para detectar pequenas diferenças entre amostras e para selecionar e treinar painelistas. As vantagens atribuídas ao teste são uma menor probabilidade de acertar ao acaso e uma melhor diferenciação entre amostras de maneira global. A principal desvantagem é que o teste pode se tornar pouco prático com um número elevado de amostras devido ao aumento do número de intercomparações necessárias, podendo ser afetado pela fadiga sensorial mais do que o teste de comparação pareada, principalmente com amostras de sabor forte (Cândido e Campos, 1995). O teste triangular é recomendado quando se deseja identificar pequenas diferenças entre as amostras, ou quando as diferenças que envolvem todos os atributos organolépticos (odor, textura, doçura, salinidade, acidez, etc.) devem ser avaliadas (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

– *Teste Duo-Trio*: O teste Duo-Trio é utilizado quando se deseja determinar a existência de alguma diferença sensorial entre duas amostras, sendo uma amostra considerada padrão, ou de referência. É um teste recomendado quando a amostra de referência é bem conhecida dos painelistas.

– *Teste Pareado*: nesse teste, as amostras são apresentadas aos pares, para comparação e detecção de diferenças ou preferências, baseado em algum critério preestabelecido. Se duas amostras são apresentadas aos painelistas para identificar uma diferença entre elas, o teste é denominado pareado simples; se os painelistas precisam identificar qual das duas amostras apresenta maior intensidade de determinada característica sensorial, ou qual é a amostra predileta, o teste é denominado de comparação pareada ou comparação aos pares. Esses testes podem utilizar, em cada par de amostras, uma amostra de referência ou padrão. Baseia-se no

princípio de que a diferença ou a preferência de determinada amostra de alimento sobre a outra é manifestada quando duas amostras são comparadas diretamente entre si (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

As vantagens do teste pareado sobre os demais são a simplicidade e menor fadiga sensorial. Os painelistas não necessitam de muitas instruções para a realização da análise e não se corre o risco de haver fadiga sensorial, pois o número de amostras é pequeno. A desvantagem desse tipo de teste é que a probabilidade de acertar por acaso é muito alta (50%) (Kramer e Twigg *apud* Anzaldúa, 1994).

As amostras podem ser apresentadas aos painelistas de duas maneiras. Pelo procedimento geral, apresenta-se aos painelistas a amostra de referência (padrão) em primeiro lugar e imediatamente a seguir a amostra que se deseja avaliar. Solicita-se aos painelistas verificarem se as amostras são iguais ou diferentes (teste de diferença simples), ou qual é a amostra predileta (teste de diferença de preferência-qualidade). O outro procedimento é quando as duas amostras são apresentadas simultaneamente aos painelistas para avaliação (Chaves, 1981). O teste pareado de preferência é amplamente aplicado na pesquisa de mercado (Cândido e Campos, 1996).

– *Teste de Comparação Múltipla ou de Amostras Múltiplas*: Teste que envolve a comparação de mais de três amostras. Quando deseja-se analisar um grande número de amostras, em vez de se fazer muitas comparações pareadas ou provas triangulares, é possível realizar a comparação simultânea de várias amostras através da comparação com uma amostra de referência, ou seja, de uma amostra padrão. Esse tipo de teste é muito utilizado para avaliar o efeito de variações em uma formulação (por exemplo, a substituição de um ingrediente), assim como a influência do material de embalagem, condições de processo, etc. (Larmond *apud* Anzaldúa, 1994). Esses testes podem ser aplicados como testes de diferenças verdadeiras, onde os painelistas classificam as amostras dentro de dois grupos semelhantes, ou como testes de diferença, nos quais os painelistas são solicitados a identificar os grupos de maior ou menor intensidade de um determinado atributo preestabelecido (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

### 4.3.2 Métodos Analíticos ou descritivos

Para Amerine *et al. apud* Anzaldúa, 1994) os métodos descritivos procuram definir as propriedades do alimento e medi-las da maneira mais objetiva possível. Nesses métodos a preferência ou rejeição dos painelistas pela amostra não é importante, e sim qual a magnitude ou intensidade dos atributos da mesma.

Nesses testes, as amostras são discriminadas, descritas e quantificadas relativamente a um atributo ou característica de interesse. Segundo Anzaldúa (1994), os métodos analíticos dividem-se em testes de: (i) Análise Descritiva Quantitativa (ADQ) – Perfil de Características; (ii) Estimativa da magnitude; (iii) Avaliação de atributos sensoriais com relação ao tempo (método tempo/intensidade) e (iv) Relações psicofísicas.

Devido ao fato da análise descritiva quantitativa (ADQ) ser o método descritivo mais importante entre os métodos descritivos, o mesmo será brevemente descrito a seguir.

A principal utilidade dos perfis sensoriais é o no desenvolvimento de novos produtos, visto que, ao se observar o perfil sensorial de um produto, o pesquisador pode detectar quais são as características que necessitam ser modificadas para que a formulação se assemelhe ao padrão. As modificações realizadas com base nesse método resultam em formulações ótimas com um número menor de tentativas do que simplesmente pelo método de tentativa e erro. O teste de Análise Descritiva Quantitativa (perfil de características) é um método utilizado para determinar o perfil sensorial de um produto ou dos componentes sensoriais de seus ingredientes, pois algumas propriedades sensoriais não podem ser descritas com um só atributo, mas como uma combinação de vários atributos (Anzaldúa, 1994).

São avaliados a aparência, a cor, o odor, o sabor e a textura de um produto em ordem de detecção. Os testes ADQ permitem aos fabricantes de alimentos identificar e definir todos os sabores e sensações táteis bucais (*mouthfeel*) característicos de um produto, fornecendo um retrato comparativo das intensidades relativas dos componentes sensoriais de diferentes amostras ou produtos. O teste permite identificar importantes similaridades e diferenças entre produtos ou protótipos. Os testes ADQ utilizam equipes de painelistas altamente treinadas. Inicialmente, desenvolve-se um vocabulário de termos que descrevam todos os odores, sabores, sensações táteis bucais e sabores residuais característicos do produto que está sendo testado. Cada um desses termos deve ser cuidadosamente definido pela equipe através de

padrões, o que assegura o uso correto por todos os painelistas e, o que é mais importante, gera resultados consistentes. O passo seguinte é definir valores para a intensidade de cada atributo. Na seqüência faz-se a avaliação sensorial em laboratório, análise estatística dos resultados e apresentação do perfil sensorial do produto em um gráfico chamado de “gráfico aranha” (Cândido e Campos, 1995).

### 4.3.3 Métodos Afetivos de Preferência e Aceitabilidade

Os métodos afetivos são aqueles nos quais os painelistas expressam suas reações perante o produto que está sendo avaliado, indicando se gosta ou desgosta, se aceita ou rejeita, ou se prefere um outro produto (Larmond *apud* Anzaldúa, 1994). Anzaldúa (1994) classifica os métodos afetivos em três tipos: (i) testes de preferência, nos quais os painelistas simplesmente expressam a preferência sobre determinada amostra ; (ii) testes de grau de satisfação, onde a intenção é avaliar mais objetivamente dados extremamente subjetivos tais como o quanto se gosta ou desgosta de um alimento. Para a realização desse tipo de teste utiliza-se as escalas hedônicas que medem as sensações prazerosas ou desagradáveis produzidas por um alimento degustado. As escalas hedônicas podem ser verbais ou gráficas (também chamada de escala de caras) e a escolha do tipo de escala depende da idade dos painelistas e do número de amostras a serem avaliadas e (iii) testes de aceitação, que são utilizados para detectar a predisposição do consumidor em adquirir um determinado produto, pois o fato de se gostar do produto não significa que o consumidor tenha a intenção de comprá-lo. Existe uma similaridade entre preferência e aceitação, mas os dois termos não significam a mesma coisa. A preferência pode expressar o grau máximo de gostar ou não gostar de um produto; implica na escolha de uma amostra ou de um produto sobre outro; expressa o julgamento da qualidade de um produto pelo consumidor e pode se afetada por vários fatores: influências psicológicas, nutricionais, genéticas, econômicas, socioculturais, sexo, idade, religião etc. A aceitação é uma experiência que se caracteriza por uma atitude positiva, medida através do consumo real de um alimento e expressa o grau de gostar. Duas amostras podem ser boas, ainda que uma possa ser selecionada como levemente melhor do que a outra, entretanto, esse fato não leva, necessariamente, à exclusão ou eliminação da amostra menos aceitável (Teixeira, Meinert e Barbetta, 1987).

A ABNT classifica os métodos que expressam opinião pessoal do julgador como Métodos Subjetivos (Cândido e Campos, 1995).



Os testes de preferência são uma alternativa menos dispendiosa para o desenvolvimento de alimentos em laboratório. Esses testes são utilizados na pesquisa de mercado, mas a interpretação dos resultados pode ser difícil e os mesmos podem não ser válidos ou previsíveis do espaço do produto no mercado consumidor se não forem constituídos por um número elevado de consumidores representativos da população a que se destina o produto e se os avaliadores de laboratório (painelistas) enfocarem sobre atributos que não são importantes para os consumidores ou subestimarem fatores de valor para os mesmos (Cândido e Campos, 1995).

Segundo Teixeira, Meinert e Barbeta (1987), os testes utilizados para prever a preferência e aceitabilidade são:

– *Teste de Ordenação ou Método das Ordens*: Descrito nos testes de diferença.

– *Comparação Pareada*: O teste afetivo de comparação pareada utiliza o mesmo procedimento de comparação pareada do método discriminativo, descrito nos testes de diferença.

– *Testes de Escalas de Avaliação*: O procedimento dos testes de escalas de avaliação consiste em utilizar as escalas de avaliação para medir a preferência da amostra. Em alguns casos particulares, pode não existir uma escala de avaliação adequada e disponível para avaliação. Nesses casos, a escala de avaliação pode sofrer ligeiras modificações, desde que não sejam alteradas as características do método, para adaptá-la e torná-la específica para o propósito do estudo (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

As escalas de avaliação consistem de um “*continuum*” para quantificar julgamentos e variam quanto ao formato, mas, em geral, são formadas por um número implícito ou explícito de pontos sobre este *continuum*, com o qual os painelistas avaliam o produto. Podem ser: (i) verbais ou não verbais, (ii) estruturadas, semi-estruturadas, não estruturadas, (iii) descritivas, (iv) hedônicas etc. (Teixeira, Meinert e Barbeta, 1987).

---

*Capítulo V*

**PROPOSTA METODOLÓGICA**

## **5 PROPOSTA METODOLÓGICA PARA OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE FORMULAÇÕES**

O presente capítulo propõe uma metodologia para a otimização experimental de formulações. O objetivo desta proposta metodológica consiste em fornecer uma forma eficiente para a realização de otimização experimental de formulações onde o espaço experimental sofre restrições nas faixas de variação dos ingredientes. Uma aplicação ilustrativa da presente proposta, no contexto do desenvolvimento e otimização de uma formulação de um chocolate dietético, é apresentada em um estudo de caso, no Capítulo 6 desta dissertação.

As etapas propostas para a metodologia, listadas abaixo, foram adaptadas das fases de um Projeto Experimental, propostas por Ribeiro (1999) e brevemente descritas no Capítulo 3.

### ***Etapas 1:*** Identificação do problema

1. Identificação dos objetivos
2. Ouvir a “voz” do cliente
3. Ouvir a “voz” do engenheiro

### ***Etapas 2:*** Planejamento dos experimentos

1. Escolha do modelo estatístico

2. Projeto de experimentos com formulação - Transformação para variáveis independentes
3. Matriz experimental expressa em variáveis independentes
4. Matriz experimental expressa em proporções dos ingredientes da formulação
5. Execução dos experimentos

***Etapa 3:*** Seleção das melhores rodadas experimentais- Avaliação sensorial

***Etapa 4:*** Obtenção dos valores das variáveis de resposta qualitativas e quantitativas das rodadas experimentais selecionadas na Etapa 3

***Etapa 5:*** Análise dos resultados

1. Modelagem individual
2. Otimização individual – Transformação inversa
3. Definir função objetivo global
4. Otimização global – Transformação inversa

***Etapa 6:*** Interpretação dos resultados

***Etapa 7:*** *Scale-up*

***Etapa 8:*** Validação do produto

O fluxograma apresentado na figura 25 ilustra a seqüência das etapas propostas.

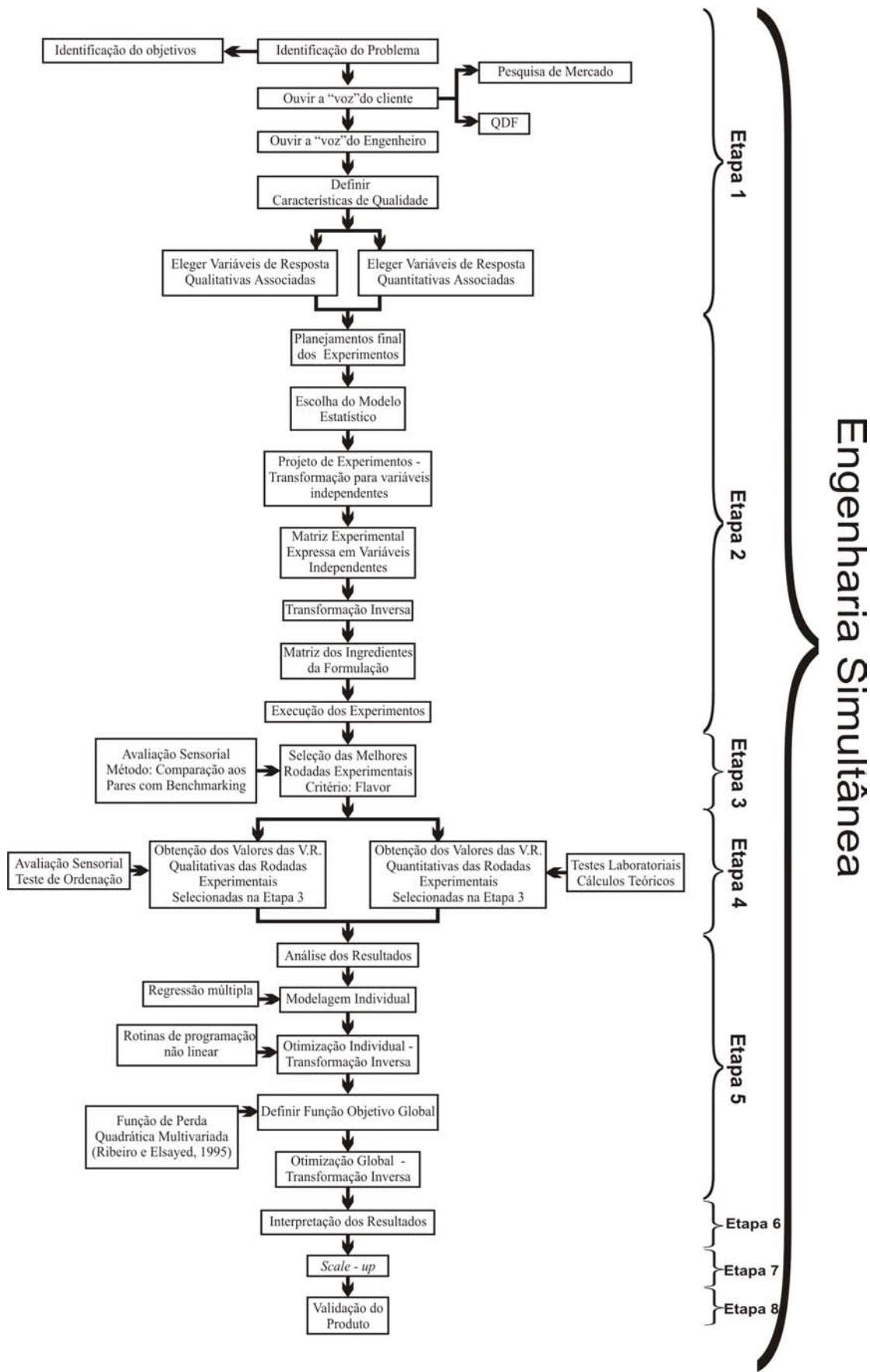


Figura 25 – Fluxograma da metodologia de otimização experimental de formulações

## 5.1 ETAPA 1- IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Nesta etapa, sugere-se trabalhar sob o enfoque da Engenharia Simultânea, reunindo-se uma equipe multidisciplinar que permitirá definir um produto que leve em conta, desde o princípio, todos os elementos do ciclo de vida do produto.

Coleman e Montgomery *apud* Echeveste (1997) consideram que o conhecimento empírico da equipe deve ser o ponto de partida para planejar o estudo experimental, aliando conhecimento teórico ao conhecimento prático. O envolvimento da equipe é de suma importância para a definição do problema, contribuindo de forma expressiva para um melhor entendimento do sistema e para uma solução final satisfatória.

### 5.1.1 Identificação dos objetivos

Esta é uma etapa vital para o sucesso do estudo a ser realizado, pois o êxito de todas as outras etapas e a validade dos resultados que serão obtidos dependerão da sua perfeita execução. Os objetivos devem ser específicos, mensuráveis, não tendenciosos, devem ter consequência prática e devem estar suficientemente detalhados de forma a ficar claro quando esses forem alcançados (Pasa, 1996).

### 5.1.2 Ouvir a “voz” do cliente (o quê ?)

#### 5.1.2.1 Pesquisa de mercado

Quando não se tem conhecimento sobre o que é importante para o consumidor e não se sabe as respectivas importâncias relativas, Ribeiro, Danilevicz e Echeveste (1999) sugerem uma pesquisa de mercado para uma correta definição da qualidade demandada pelos consumidores. Ouvindo a voz do cliente, torna-se possível incorporar ao processo de manufatura as preferências do consumidor, associando a isso alta qualidade e baixo custo. De acordo com esses mesmos autores, a fase de identificação é crítica, pois os dados coletados servirão de ponto de partida para o desdobramento da qualidade desejada pelos consumidores e na identificação dos processos críticos de manufatura.

Campos (1992) adverte que baixos índices de defeitos e especificações obedecidas integralmente não garantem, por si só, qualidade. Um projeto pode ser perfeito, gerando um produto sem defeitos, mas que não satisfaz as necessidades do consumidor. Portanto, um produto ou serviço precisa atender às expectativas do consumidor. Consequentemente, destaca-se a importância do levantamento das características de qualidade relevantes para os consumidores atuais e potenciais através da pesquisa de mercado.

Mattar *apud* Echeveste (1997) propõe as seguintes etapas direcionadas à pesquisa de mercado:

- (i) Reconhecimento e formulação de um problema de pesquisa: antes do início do estudo, o pesquisador deve ter idéia sobre o problema e o mesmo deve ser do conhecimento de toda equipe responsável pela pesquisa que deverá discutir amplamente todos os aspectos.
- (ii) Planejamento da pesquisa: consiste em se estabelecer os objetivos da pesquisa de tal forma que a mesma contribua para a solução do problema a que se destina. O estabelecimento de questões chaves é de fundamental importância para o sucesso da pesquisa. Tais questões referem-se ao tipo de consumidor, sexo, idade, escolaridade, classe social, estilo de vida, hábitos (o que compram?, quando compram?, com que frequência?, quanto compram? etc.)
- (iii) Coleta dos dados: a coleta dos 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 essa razão, esta atividade exige supervisão e controle rígidos sobre os aspectos discutidos na fase de planejamento da pesquisa.
- (iv) Processamento, análise e interpretação: essa etapa consiste na transformação dos dados coletados em informações úteis a respeito do problema. O suporte na análise dos dados é feito com técnicas estatísticas.
- (v) Comunicação dos resultados: os resultados da pesquisa são apresentados por escrito e verbalmente. A documentação dos resultados servirá de subsídio para a tomada de decisão.

### 5.1.2.2 Associar a qualidade demandada com as características de qualidade.

O QFD (*Quality Function Deployment*) pode ser empregado para completar esta fase, permitindo a correta associação da qualidade demandada pelos consumidores com as características de qualidade. Trata-se de um método organizado e sistemático, que utiliza um conjunto de matrizes para identificar as relações que existem entre a qualidade demandada pelos consumidores e os processos de chão de fábrica.

Para Akao *apud* Ribeiro, Danilevicz e Echeveste (1999, p.17) o “QFD é uma conversão das demandas dos consumidores em características de qualidade de projeto para o produto acabado, pelos relacionamentos desdobrados sistematicamente entre as demandas e as características, começando com a qualidade de cada componente funcional e estendendo o desdobramento para a qualidade de cada parte e processo. Assim, a qualidade do produto como um todo será gerada através de uma rede de relacionamentos”.

O planejamento da qualidade através do QFD consiste em se determinar o que fazer e projetar e decidir como será feito (Mizuno e Akao *apud* Echeveste, 1997).

Segundo Cohen *apud* Ribeiro, Danilevicz e Echeveste (1999), o QFD auxilia efetivamente no atendimento das três estratégias básicas de sobrevivência de uma empresa: redução de custos, aumento dos lucros e redução do tempo de produção de um bem ou serviço. A redução dos custos deriva da mínima perda de produto ou retrabalho em virtude de problemas de projeto, pois mudanças são feitas ainda na fase de projeto. O aumento dos lucros é consequência da produção de bens ou serviços mais atrativos para os consumidores, pois o QFD enfatiza as necessidades dos clientes. A redução do ciclo de desenvolvimento é da ordem de 30 a 50% no tempo normal de desenvolvimento, aumentando as chances da empresa conquistar uma grande fatia do mercado.

“O QFD pode ser considerado a própria tradução da Garantia da Qualidade com ênfase no desenvolvimento de novos produtos, pois propicia tanto a qualidade de projeto adequada para a satisfação das necessidades do consumidor como a qualidade de conformidade” (Ribeiro, Danilevicz e Echeveste, 1999, p.25).

Ribeiro, Danilevicz e Echeveste (1999) citam breves definições para o QFD:



- Uma técnica de gestão, pois auxilia no gerenciamento de projetos simples ou complexos;
- Um método de planejamento onde os esforços de engenharia são deslocados para a fase de planejamento;
- Um método de solução de problemas, listando O QUÊ precisa ser feito e COMO pode ser feito;
- Um facilitador da modelagem do conhecimento, descobrindo o conhecimento técnico da equipe;
- Um facilitador da documentação de informações através do uso de matrizes de dados;
- Um facilitador do transporte de informações, pois matrizes relacionam-se de forma seqüencial e utiliza-se uma linguagem e uma lógica comum no preenchimento dessas matrizes;
- Fornece abertura à criatividade e inovações através de discussões multisetoriais em um ambiente de Engenharia Simultânea.

Maiores detalhes sobre a metodologia do QFD podem ser encontradas em: Hauser e Clausing (1988); Akao (1996); Cheng *et al.* (1995); Ribeiro, Danilevitz e Echeveste (1999), Ferreira (1997); Eureka e Ryan (1992); Pasetto e Echeveste (1997).

### **5.1.3 Ouvir a “voz” do engenheiro (como?)**

#### 5.1.3.1 Eleger variáveis de resposta associadas a cada característica de qualidade

Para quantificar as características de qualidade, elegem-se variáveis de resposta que permitam capturar a quantidade e a qualidade de interesse para o estudo experimental. As variáveis de resposta ou variáveis dependentes são as características de qualidade que serão estudadas no experimento.

Coleman e Montgomery *apud* Echeveste (1997) estabeleceram alguns critérios para a escolha das variáveis de resposta:

- a variável deve refletir, com máxima fidedignidade, a qualidade de interesse para o experimento;
- deve ser mensurável;
- deve estar associada a um valor alvo que permita fazer medidas de desempenho;
- ensaios não destrutivos são preferíveis, permitindo a quantificação do erro experimental através de réplicas;
- não deve estar próxima dos limites naturais, pois desta forma não discriminará bem a diferença entre unidades experimentais expostas a diferentes tratamentos.

Algumas diretrizes, para a seleção das variáveis de resposta também foram sugeridas por Blake *et al. apud* Echeveste (1997):

- considerar a demanda da qualidade dos consumidores, na escolha das variáveis;
- sempre que possível, as variáveis devem ser contínuas, pois fornecem mais informações que as variáveis ordinais e binárias;
- a variável deve ser de fácil medida e o sistema de medida deve ser preciso, acurado e estável;
- a variável resposta selecionada deve descrever 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.

#### 5.1.3.2 Identificar outras variáveis de resposta de interesse.

Outras variáveis de resposta podem ser selecionadas para incorporar características de qualidade importantes que não são identificadas pelo consumidor.

#### 5.1.3.3 Identificar os parâmetros do processo.

É necessário o conhecimento técnico sobre o processo para que se possa identificar todos os parâmetros do processo que possam influenciar as variáveis de resposta. Eles podem ser

classificados em fatores controláveis (principais e secundários), fatores mantidos constantes e fatores não controláveis (fatores de ruído).

– *Identificar os fatores controláveis.*

Os fatores controláveis são um subconjunto de parâmetros que podem ter influência sobre as variáveis de resposta e que serão estudados no experimento. O conjunto de fatores de controle selecionados em um experimento deve, idealmente, compreender a totalidade dos fatores que possam ter efeito sobre as variáveis de resposta. Em modelos matemáticos, os fatores controláveis são também chamados de variáveis independentes.

- *Identificar os fatores mantidos constantes.*

Os fatores constantes são parâmetros que a equipe deseja manter fixos no experimento. São parâmetros que podem ser controlados, mas que possivelmente não tenham efeito significativo sobre a variável de resposta ou cujos efeitos já sejam conhecidos do experimentador. Antes da execução dos experimentos devem-se estabelecer estratégias para se manter os fatores escolhidos constantes durante a experimentação (Caten, 1995).

- *Identificar os fatores não controláveis.*

Os fatores não controláveis ou fatores de ruído são os fatores que não podem ser controlados e que, no entanto, podem ter algum efeito sobre as variáveis de resposta. Procedimentos para minimizar esses efeitos devem ser elaborados.

#### 5.1.3.4 Identificar possíveis interações entre os fatores controláveis.

Dois fatores interagem sempre que uma mudança no primeiro fator de controle resultar em leituras diferentes da variável de resposta nos diversos níveis do segundo fator de controle.

Para Hahn *apud* Echeveste (1997), a informação sobre a possibilidade de interação entre os fatores controláveis deve ser discutida previamente, pois é de grande importância na definição de quais tratamentos irão em cada bloco (no caso de experimentos blocados) e para identificar quais efeitos podem ou não ser confundidos entre si.

#### 5.1.3.5 Identificar o intervalo de variação dos fatores controláveis.

Conforme Coleman e Montgomery *apud* Echeveste (1997), 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 *apud* Echeveste (1997), restringindo-se os limites dos fatores controláveis, reduz-se o tamanho e a complexidade do experimento, porém limita-se o escopo da inferência dos resultados obtidos.

#### 5.1.3.6 Definir o número de níveis para cada fator controlável.

Segundo Hahn *apud* Echeveste (1997), um número mínimo de níveis, de um fator controlável, é determinado de acordo com o modelo estatístico 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.

#### 5.1.3.7 Identificar restrições experimentais.

Coleman e Montgomery *apud* Echeveste (1997, p.65) ressaltam: “A atenção a detalhes pode determinar o sucesso ou a 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 ser o número máximo de ensaios, as dificuldades na mudança dos níveis dos fatores controláveis, tempo disponível etc.

#### 5.1.3.8 Identificar a necessidade de rodadas prévias.

A execução de rodadas prévias, ou seja, rodadas que antecedem ao experimento propriamente dito, pode ser de grande valia na fase inicial de um programa experimental. Os procedimentos experimentais são refinados, pode-se estimar o erro experimental, assegura-se de que o sistema de aquisição de dados esteja funcionando adequadamente e, principalmente, verifica-se se há necessidade ou não de mudar o rumo dos experimentos. Nas rodadas prévias, testa-se o ponto central ou alguns tratamentos potencialmente problemáticos do experimento. As correções resultantes das rodadas prévias visam possibilitar uma execução mais rápida do experimento a um menor custo.

### 5.1.3.9 Identificar associações entre as variáveis de resposta.

Existe associação entre duas variáveis de resposta se a perda incorrida, quando essas estão simultaneamente fora do alvo, é superior ou inferior ao somatório das parcelas individuais de perda (Pasa, 1996).

## 5.2 ETAPA 2- PLANEJAMENTO FINAL DOS EXPERIMENTOS

### 5.2.1 Escolha do modelo estatístico

A escolha do modelo estatístico torna-se relativamente fácil se as etapas anteriores forem executadas corretamente. A escolha mais adequada leva em consideração o tamanho da amostra a ser coletada, a seqüência de execução das rodadas e o custo dos experimentos. O planejamento final deve incorporar o melhor compromisso entre custo e informação, pois, além de fornecer resultados válidos estatisticamente, o experimento deve ser de execução viável. Uma primeira estimativa dos efeitos pode ser obtida na literatura ou através de especialistas. A tentativa de predizer o resultado freqüentemente provoca a revisão da escolha dos níveis dos fatores controláveis e proporciona comparação entre o conhecimento ganho com o experimento e a intuição dos experimentadores (Caten, 1995).

Quenouille *apud* Echeveste (1997) 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.

Segundo Hahn *apud* Caten (1995), projetar um experimento é um processo iterativo, ou seja, sempre que novas informações vão surgindo também surgem modificações na forma de se conduzir o projeto. De posse do entendimento global do problema, os estatísticos adquirem segurança para agir rapidamente quando mudanças fazem-se necessárias e para fornecer análises importantes sobre os resultados experimentais subseqüentes.

## 5.2.2 Projeto de experimentos com formulações

### 5.2.2.1 Transformação para variáveis independentes

Esta transformação consiste na transformação de um espaço experimental de formulações, expresso em termos de  $q$  variáveis dependentes (proporções dos ingredientes da formulação), em um espaço experimental expresso em termos de  $(q-1)$  variáveis independentes, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.2.3.3. Após a obtenção do espaço experimental expresso em termos de um sistema de variáveis independentes, torna-se possível a aplicação das técnicas tradicionais de Projetos de Experimentos.

### 5.2.2.2 Matriz experimental expressa em variáveis independentes.

Essa matriz refere-se à estrutura de coleta dos dados, ou seja, aos tratamentos utilizados, à ordem dos ensaios, aos níveis dos fatores e ao número de repetições. A particularidade dessa matriz reside no fato de que o espaço experimental a ser analisado encontra-se expresso em termos de variáveis independentes ( $w_i$ ). A definição da matriz de variáveis independentes dependerá do projeto experimental escolhido e deverá descrever completamente os experimentos. Cada linha da matriz representa uma rodada experimental (tratamento) a ser realizada; nas linhas deverá haver a definição dos níveis em que devem ser fixados os fatores controláveis para o tratamento em questão. A matriz também permite verificar a ortogonalidade do experimento, ou seja, se a matriz de correlações dos fatores controláveis é a matriz identidade (Echeveste, 1997).

### 5.2.2.3 Transformação das variáveis independentes nas variáveis dependentes originais – Transformação inversa

As rodadas experimentais (tratamentos) serão realizadas pelos técnicos responsáveis pelo produto. Portanto, faz-se necessário obter uma matriz experimental expressa em termos das proporções dos ingredientes das formulações, para que os executores possam compor os tratamentos. Aplicando-se a transformação inversa à matriz experimental expressa em termos de variáveis independentes, obtém-se a matriz experimental expressa em termos das proporções dos ingredientes das formulações conforme descrito no Capítulo 3, item 3.2.3.3, desta dissertação.

#### 5.2.2.4 Matriz experimental expressa em proporções dos ingredientes das formulações

Esta matriz deverá conter todas as rodadas experimentais expressas em proporções dos ingredientes das formulações e deverá descrever de forma clara e completa os procedimentos e a ordem dos experimentos a serem executados.

#### 5.2.3 Execução dos experimentos

De posse da matriz experimental expressa em termos proporções dos ingredientes das formulações, os experimentos devem ser executados conforme planejamento descrito na matriz experimental. Planilhas para coleta dos dados devem ser elaboradas para o registro de todas as ocorrências verificadas durante a execução das rodadas experimentais.

### 5.3 ETAPA 3 - SELEÇÃO DAS MELHORES RODADAS EXPERIMENTAIS QUANTO À CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE FLAVOR

Aliando-se a necessidade de verificar o desempenho da formulação a ser otimizada perante um produto líder de mercado e reduzir o número de rodadas experimentais a serem avaliadas sensorialmente, sugere-se uma análise sensorial prévia de todas as rodadas experimentais, pelo método de Comparação aos Pares, com um produto similar, líder de mercado. A partir dessa análise, somente serão analisadas as rodadas experimentais que se apresentarem iguais ou melhores que o padrão apresentado (líder de mercado).

### 5.4 ETAPA 4 - OBTENÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS DAS RODADAS EXPERIMENTAIS SELECIONADAS NA ETAPA 3

Os valores das variáveis de resposta qualitativas sensoriais são obtidos através de métodos sensoriais de avaliação. Os valores das variáveis de resposta quantitativas podem ser obtidos através de análises laboratoriais e cálculos teóricos.

## 5.5 ETAPA 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.5.1 Modelagem individual

A modelagem individual das variáveis de resposta consiste na determinação de modelos de regressão, capazes de estimar os valores de média e variabilidade das variáveis de resposta em função do ajuste dos fatores controláveis, ou seja, das proporções dos ingredientes da formulação. Aplicando-se uma análise de regressão múltipla sobre o ajuste dos fatores controláveis e seus respectivos valores medidos da variável de resposta, obtêm-se as expressões desejadas. Os modelos de regressão obtidos, em projetos de experimentos com formulações, são expressos em termos de variáveis independentes  $w$ , visto que os dados, sobre os quais é aplicada a análise de regressão múltipla, também são expressos em termos de variáveis independentes.

As estimativas dos valores médios são úteis para identificar experimentos próximos do alvo ( $T_j$ ), enquanto que as estimativas da variabilidade ajudam na identificação de tratamentos menos suscetíveis aos efeitos dos fatores não controláveis. As estimativas de média e variabilidade são utilizadas na composição da função objetivo empregada na otimização do experimento. O erro da estimativa é menor quando se utiliza modelos para a média e a variância, pois trabalha-se com valores médios e não com valores individuais. Portanto, o desvio padrão da perda calculada para um certo experimento é menor. Além de reduzir os erros associados ao ajuste de um modelo para a função de perda, a modelagem individual possibilita um maior conhecimento do processo e qualifica o estudo da otimização, uma vez que os modelos capturam a tendência presente nos dados e permitem efetuar previsões. Conforme o caso, os modelos podem incluir efeitos lineares dos fatores controláveis, efeitos quadráticos, interações entre os fatores ou efeitos não lineares mais complexos.

Os modelos obtidos estimam as variáveis de resposta considerando apenas os termos que apresentam efeito significativo. A significância do efeito dos diversos termos do modelo é verificada através da estatística  $t$  ou da probabilidade  $p$  fornecida nas rotinas de regressão múltipla ou na ANOVA. A identificação de fatores controláveis que não tenham efeito significativo sobre as variáveis de resposta é igualmente importante, pois pode-se escolher para estes fatores níveis mais econômicos. Outra grande vantagem da modelagem é poder



estimar o valor das variáveis de resposta para qualquer nível dos fatores controláveis, dentro do intervalo ensaiado, através de interpolação (Caten, 1995).

### **5.5.2 Otimização individual e transformação inversa**

Otimizar significa achar o ajuste ótimo dos fatores controláveis que minimiza ou maximiza a função objetivo definida para cada variável de resposta. A partir das informações anteriores, determina-se a função de perda individual associada a cada variável de resposta. A função de perda individual é obtida aplicando-se, individualmente, a função de perda global [expressão (5.1)] em cada uma das variáveis de resposta. São necessários para a realização da otimização individual das variáveis de resposta: os modelos de regressão e os respectivos valores alvo de cada variável de resposta. A atribuição dos pesos não faz-se necessária.

Obtido o ajuste ótimo dos fatores controláveis expresso em termos das variáveis independentes  $w$ , aplica-se a *Transformação inversa* (Capítulo 3, item 3.2.3.3) para a obtenção do ajuste ótimo em termos dos ingredientes da formulação.

### **5.5.3 Definir uma função objetivo global**

Através da otimização individual, obtém-se o ajuste ótimo dos fatores controláveis para cada variável de resposta separadamente. No entanto, raramente, o mesmo ajuste dos fatores controláveis conduz ao valor ideal de todas as variáveis de resposta simultaneamente; portanto, nesta fase é preciso definir uma função objetivo que incorpore simultaneamente todas as variáveis de resposta de forma a se obter um produto com variáveis de resposta o mais próximo possível do seu valor alvo, ou seja, dos valores preestabelecidos no projeto, os quais devem coincidir com a demanda dos consumidores.

Segundo Ribeiro e Caten (1996), em estudos de melhoria da qualidade, é desejável que: (i) o ajuste ótimo dos fatores controláveis seja determinado considerando que as variáveis de resposta fiquem o mais próximo possível do seu valor alvo; e (ii) deve-se reduzir a variabilidade em torno do valor alvo, o que significa dizer que o produto será robusto, apresentando bom desempenho mesmo quando submetido a condições adversas. Esses dois objetivos devem ser contemplados na função objetivo.

Fogliatto e Albin (1999) citam três grandes grupos de estratégias para otimização de experimentos multivariados identificados na literatura, e classificados segundo sua base teórica: (i) abordagens baseadas na metodologia de superfície de resposta; (ii) abordagens baseadas em uma função de utilidade conhecida como “função de preferência”; (iii) abordagens baseadas na teoria de Projeto Robusto de Taguchi, as quais são subdivididas em duas sub-categorias: Medida de desempenho Sinal-Ruído (S/N) e Função de Perda Quadrática de Taguchi.

Nessa metodologia, propõe-se a utilização de uma versão multivariada da Função de Perda Quadrática Univariada de Taguchi, proposta por Ribeiro e Elsayed (1995). Tal função de perda enquadra-se na terceiro grupo de estratégias listadas acima. O objetivo é quantificar a perda de qualidade ocorrida no produto para um dado ajuste dos fatores controláveis. Para o caso de formulações, ela quantifica a perda de qualidade de um produto gerado pela combinação das proporções dos ingredientes de uma determinada formulação:

$$\hat{Z}(i) = \sum_{j=1}^J p_j \left[ (\hat{Y}_j - T_j)^2 + \hat{\sigma}_{Y_j}^2 \right] \quad (5.1)$$

onde:

$\hat{Z}(i)$  é o valor que a função de perda assume para um dado ajuste  $i$  do conjunto de fatores controláveis;

$p_j$  é um coeficiente multiplicativo cuja função é atribuir pesos a cada variável de resposta  $j$ , de forma que as parcelas da função de perda correspondentes a uma dada variável de resposta fiquem ponderadas pela importância relativa da mesma;

$T_j$  é o valor alvo para cada variável de resposta  $j$ ;

$\hat{Y}_j$  é a equação de regressão que fornece uma estimativa da média da variável de resposta  $j$  em função do ajuste dos fatores controláveis;

$\hat{\sigma}_{Y_j}$  é a estimativa do desvio padrão da variável de resposta  $j$  em função do ajuste dos fatores controláveis.

As parcelas da expressão (5.1) objetivam:

- (i) Estimar a distância da variável de resposta  $j$  do seu valor alvo.

$$\left[ \left( \hat{Y}_j - T_j \right)^2 \right] \quad (5.2)$$

- (ii) Estimar a variabilidade das variáveis de resposta  $j$  em função do ajuste dos fatores controláveis (proporções dos ingredientes).

$$\left[ \hat{\sigma}_{y_j}^2 \right] \quad (5.3)$$

São necessários para a realização da otimização global das variáveis de resposta: a identificação do tipo de variável de resposta, ou seja, se a mesma é do tipo maior é melhor, menor é melhor ou nominal é melhor, o seu valor alvo e limites de especificação, inferior e superior. A atribuição de pesos a cada variável de resposta também faz-se necessária. Estes pesos têm duas funções: (i) normalizar os valores que representam os desvios do alvo, obtidos nas unidades de grandeza da característica de qualidade, para que os desvios de todas as variáveis de resposta possam ser diretamente comparáveis e (ii) considerar a importância relativa de cada variável de resposta (Ribeiro, 1999). Os tipos de variável de resposta contemplados na função de perda global e a expressão para o cálculo dos pesos vêm apresentados a seguir.

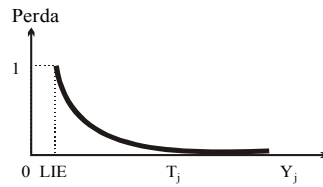
$$p_j = F_j \times IR_j \quad (5.4)$$

onde:

$IR_j$  é a importância relativa de cada variável de resposta sobre a qualidade final do produto;

$F_j$  é um fator que depende do tipo de variável de resposta:

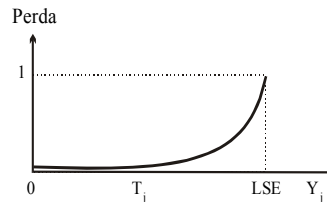
**Tipo Maior é Melhor:** Para as variáveis de resposta deste tipo, a perda é tanto menor quanto maior for o valor assumido pela variável de resposta ( $Y_j$ ). A perda assume valor=1 quando  $Y_j = LIE$  e decresce à medida que  $Y_j$  aumenta. Para valores de  $Y_j \geq T_j$ , a perda assume valor=0.



**Figura 26 – Representação gráfica da perda para variáveis de resposta do tipo maior é melhor**

$$F_j = \frac{1}{(T_j - LIE)^2} \quad (5.5)$$

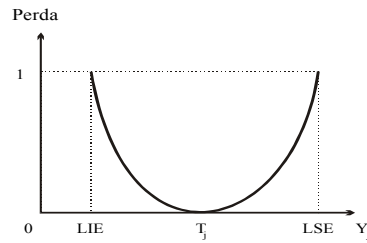
**Tipo Menor é Melhor:** Para as variáveis de resposta deste tipo, a perda é tanto menor quanto menor for o valor assumido pela variável de resposta  $Y_j$ . A perda assume valor=1 quando  $Y_j = LSE$  e decresce à medida que  $Y_j$  diminui. Para valores de  $Y_j \leq T_j$ , a perda assume valor=0.



**Figura 27 – Representação gráfica da perda para variáveis de resposta do tipo menor é melhor**

$$F_j = \frac{1}{(LSE - T_j)^2} \quad (5.6)$$

**Tipo Nominal é Melhor:** Para as variáveis de resposta deste tipo, a perda assume valor zero quando  $Y_j = T_j$ . À medida que  $Y_j$  se afasta do alvo  $T_j$  para a direita, o valor da perda cresce, até assumir o valor 1 ( $Y_j = LSE$ ). À medida que  $Y_j$  se afasta do alvo para a esquerda, o valor da perda cresce, até assumir o valor 1 ( $Y_j = LIE$ ).



**Figura 28 – Representação gráfica da perda para variáveis de resposta do tipo nominal é melhor**

$$F_j = \frac{4}{(LSE - LIE)^2} \quad (5.7)$$

onde:

$LIE$  é o limite inferior de especificação da variável de resposta;

$LSE$  é o limite superior de especificação da variável de resposta

$T_j$  é o valor alvo

A perda é uma função das variáveis de resposta  $Y$  que, por sua vez, são função dos fatores controláveis  $X$ . Logo, em última análise, tem-se que a perda é função de  $X$ , é função dos fatores controláveis. Observa-se também que a perda cresce quadraticamente quando qualquer variável de resposta afasta-se do alvo ou em regiões onde aumenta a variabilidade das variáveis de resposta. Assim, o objetivo é encontrar o ajuste dos fatores controláveis que minimize a função de perda. Tal ajuste estará associado a uma região onde a variabilidade é pequena e as variáveis de resposta estão próximas de seus respectivos alvos. Em projetos com muitos fatores, a busca do ponto ótimo exige suporte computacional (Ribeiro, 1999).

#### 5.5.4 Otimização global e transformação inversa

Definida a função objetivo, os modelos individuais das variáveis de resposta são inseridos na mesma e, através de procedimentos de otimização não-linear, determina-se o ajuste ótimo global dos fatores controláveis do experimento expresso em termos de variáveis

independentes  $w$ . Obtido o ajuste ótimo global dos fatores controláveis, expresso em termos das variáveis independentes  $w$ , aplica-se a *Transformação inversa* para a obtenção do ajuste ótimo global em termos dos ingredientes da formulação.

A otimização global consiste em se achar uma solução conciliatória que pondere as importâncias relativas de cada variável de resposta sobre o produto final (Pasa, 1996).

## 5.6 ETAPA 6- INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A interpretação dos resultados consiste em se extrair dos dados obtidos através da otimização, todas as informações relevantes para o conhecimento acerca do produto e sobre a influência dos ingredientes que compõem a sua formulação. Essa interpretação permitirá a elaboração de conclusões a respeito do produto e das relações do mesmo com os fatores controláveis estudados. Os objetivos preestabelecidos para o estudo devem ser atendidos através das informações obtidas com a interpretação dos resultados. Torna-se relevante ressaltar que as conclusões limitam-se à região de inferência, ou seja, do intervalo de variação dos fatores controláveis investigados no experimento.

## 5.7 ETAPA 7- SCALE-UP

Esta etapa consiste na elaboração, no chão de fábrica, da formulação otimizada e posterior comparação das variáveis de resposta desta com os resultados obtidos em planta piloto. Os mesmos ajustes das proporções dos ingredientes da formulação e os mesmos lotes de matéria-prima devem ser utilizados. Caso os resultados obtidos em planta piloto não sejam exatamente iguais aos resultados obtidos com a mesma formulação no chão de fábrica, verifica-se um efeito de *scale-up*. Consequentemente, torna-se possível estimar para cada variável de resposta a relação existente entre os resultados obtidos em planta piloto e os obtidos em chão de fábrica. A partir dessa relação, conhecidos os resultados de uma formulação produzida em planta piloto, pode-se prever o provável desempenho dessa mesma formulação quando produzida no chão de fábrica. As vantagens obtidas na otimização de formulações em planta piloto residem na facilidade de realização dos experimentos, menor

erro experimental e o custo e o tempo de execução são consideravelmente menores (Caten, 1996).

## 5.8 ETAPA 8- VALIDAÇÃO DO PRODUTO

Esta etapa consiste em retirar amostras, aleatoriamente, do lote produzido no chão de fábrica para confirmar os dados de entrada e então liberar para a produção.

---

*Capítulo VI*

**ESTUDO DE CASO**



## 6 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo destina-se à apresentação da metodologia para otimização experimental de formulações de alimentos, descrita no capítulo 5, através de um estudo de caso que consiste na aplicação da referida metodologia no desenvolvimento e otimização de um chocolate dietético. Segundo a definição de Valeriano (1998), este projeto está inserido na categoria de projeto de desenvolvimento e engenharia (Capítulo 2, item 2.4.2).

Conforme a Portaria nº 29 da Secretaria Nacional da Vigilância Sanitária (SNVS) do Ministério da Saúde (MS), publicada em 30/03/98, alimentos dietéticos são aqueles que foram destituídos totalmente de pelo menos um de seus ingredientes, constantes da formulação original. São especialmente elaborados e formulados de forma que sua composição atenda a necessidades dietéticas específicas de pessoas com exigências metabólicas, fisiológicas ou físicas particulares. Os produtos dessa classe, não contendo em sua formulação substâncias medicamentosas, serão considerados alimentos e não medicamentos. Inclui-se nessa classificação a categoria de alimentos para dietas com restrição de açúcares, mono e dissacarídeos (Cândido e Campos, 1995).

Deve-se distinguir duas fases diferentes na história do desenvolvimento dos chocolates sem açúcar. Na primeira, os ingredientes e a tecnologia disponíveis não permitiam uma perfeita substituição do açúcar. Pelo contrário, limitavam o produto a uma textura arenosa, quebradiça, sem brilho, sabor residual e outros defeitos de qualidade sensorial e reológica.

Na segunda fase, devido ao advento de novas tecnologias, surgiram ingredientes e aditivos capazes de reproduzir com perfeição as características do açúcar, tornando possível a

manufatura de chocolates isentos de açúcares e que apresentam características organolépticas e comportamento reológico muito similar aos chocolates tradicionais (Campos, 2000).

A produção de chocolate dietéticos foi iniciada por pequenas empresas. As empresas de médio e grande porte constataram que o mercado de dietéticos se aquecia e também entraram no negócio, onde tentam, até hoje, alcançar um elevado volume de vendas, usando os supermercados e lojas de departamento como canais de distribuição. No entanto, as empresas que têm tido mais sucesso na venda de chocolate dietético são as pequenas, voltadas para um nicho de mercado: os diabéticos. A diabetes (*diabetes mellitus*) é um distúrbio geneticamente determinado que atinge seres humanos no metabolismo de carboidratos, proteínas e gorduras, associado a uma relativa ou absoluta insuficiência da secreção de insulina<sup>1</sup>. Sua secreção é essencial ao metabolismo dos nutrientes, principalmente da glicose. Consequentemente, o sucesso dessas empresas se deve, principalmente, à credibilidade das mesmas adquirida junto a esses clientes que passam a confiar plenamente no produto. O segundo fator de sucesso é o atendimento personalizado, onde é dada toda orientação ao cliente (Garcia, 2000).

## 6.1 ETAPA 1- IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A proposta do projeto de desenvolvimento do chocolate dietético aqui reportada surgiu por iniciativa interna, própria da empresa, como um projeto isolado, em atendimento à crescente demanda por produtos dietéticos. Pela estimativa da ABIAD (Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos Dietéticos), em 1998, o mercado de alimentos dietéticos e para fins especiais movimentou no Brasil US\$1,1 bilhão. Na classificação da ABIAD, o setor de chocolates dietéticos está incluído na categoria “Outros”, juntamente com compotas, geléias, doces em pasta, balas, confeitos e produtos de confeitaria. Conforme mostra-se na Tabela 3, a categoria “Outros” movimentou US\$141 milhões em 1998 e foi a que apresentou a maior taxa de crescimento: 45,6% ao ano. Pode-se observar, através dos dados da Tabela 3, que de 1994 em diante esta categoria de alimentos dobrou a sua participação no mercado devido aos achocolatados, *cappucinos*, balas, confeitos, gomas de mascar e ovos de páscoa, cujo mercado

---

<sup>1</sup> De acordo com *Special Report – Epidemiology of NIDDM – diabetes mellitus*, de fevereiro de 2000, a estimativa era de que no final de 2000 haveria no mundo um total de 175,3 milhões de pessoas com diabetes. Nos Estados Unidos mil novos casos são diagnosticados por ano; na Austrália é a doença mais comum na faixa de idade de 20 anos, mais que o câncer.

tem se mostrado muito mais dinâmico que o de geléias, compotas e doces em pasta (Garcia, 2000).

**Tabela 3 - Evolução do mercado de alimentos dietéticos no Brasil, em milhões de US\$.**

Categoria	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998*	Taxa de crescimento anual (%)
Adoçantes	55	63	48	60	100	120	150	172	230	19,6
Sobremesas**	8	12	10	20	15	50	85	110	148	44,0
Refrigerantes	90	110	105	118	206	305	350	380	480	23,3
Iogurtes	X	X	X	X	16	30	35	44	62	40,0
Sorvetes	X	X	X	X	10	15	16	19	32	33,8
Outros***	7	15	12	12	53	80	100	115	141	45,6
<b>TOTAL</b>	<b>160</b>	<b>200</b>	<b>175</b>	<b>210</b>	<b>400</b>	<b>600</b>	<b>736</b>	<b>840</b>	<b>1093</b>	<b>27,2</b>

Fonte: Garcia, 2000

\* 1998 estimado por projeção global

\*\* Gelatinas, pudins e afins

\*\*\* Compotas, geléias, achocolatados, doces em pasta, balas, gomas de mascar, chocolate diet, etc.

### 6.1.1 Identificação dos objetivos

O objetivo principal do projeto consiste em otimizar a formulação de um chocolate dietético. Via de regra, a tarefa principal no desenvolvimento de chocolates sem adição de açúcar é produzir um chocolate dietético com perfil de sabor e textura idêntico (ou tão similar quanto possível) ao dos chocolates elaborados com açúcar. Para alcançar esse objetivo, a equipe iniciou as pesquisas de elaboração da formulação dietética com base em uma formulação de chocolate tradicional (ver Tabela 4), que contém açúcar e que apresenta, comprovadamente, boa aceitação no mercado consumidor.

O intenso esforço de inovação na área de ingredientes substitutos do açúcar tornou possível a elaboração de formulações de chocolates com substitutos de açúcar comparáveis, em sabor e qualidade, aos chocolates tradicionais (com açúcar), o que proporcionou o aumento da demanda por parte dos consumidores (ver Tabela 3), cada vez mais exigentes quanto à qualidade dos produtos que consomem. Como os produtos de confeitaria, o chocolate dietético está mais voltado para nichos de mercado, atendendo ao segmento de diabéticos e hipoglicêmicos. Portanto, a estratégia da empresa é penetrar nesse nicho de mercado.

**Tabela 4 - Formulação tradicional de chocolate ao leite**

Ingredientes	%
Açúcar (sacarose)	50,283
Manteiga de cacau	21,481
Liquor de cacau	12,582
Leite em pó desnatado	10,062
Soro de leite em pó	5,000
Lecitina de soja	0,444
Poliglicerol Poliricinoleato (PGPR)	0,137
Vanilina	0,011

### 6.1.2 Ouvir a “voz” do engenheiro (como?)

Após definidos os objetivos do projeto, identificaram-se como características de qualidade de interesse o perfil de *flavor* (sabor e aroma) e textura do chocolate dietético, os quais devem ser idênticos ou similares aos dos chocolates com açúcar. O perfil desejado para o chocolate dietético quanto ao sabor e aroma é designado como “*flavor* característico”.

A substituição do açúcar não é das tarefas mais fáceis no processo de transformação de uma formulação tradicional em uma formulação dietética, pois o açúcar é responsável por diversas características intrínsecas ao chocolate, influenciando no sabor, aroma, cor, textura, corpo, viscosidade e ponto de fusão. Dessa forma, ao se retirar o açúcar da formulação em sua totalidade, alteram-se drasticamente essas características. A solução encontrada foi reunir diversos ingredientes e somar suas funcionalidades para se obter o efeito desejado. A prática mais comum é o uso de edulcorantes de alta intensidade (EAI). Junto ao edulcorante, deve-se usar os agentes de corpo (*bulking agents*), os quais devem manter com maior similaridade possível, as propriedades que o açúcar proporciona ao produto tradicional (Campos, 2000).

Na Tabela 5 relacionam-se os edulcorantes e agentes de corpo mais freqüentemente usados na substituição do açúcar em alimentos.

**Tabela 5 - Ingredientes mais comuns na substituição do açúcar em alimentos.**

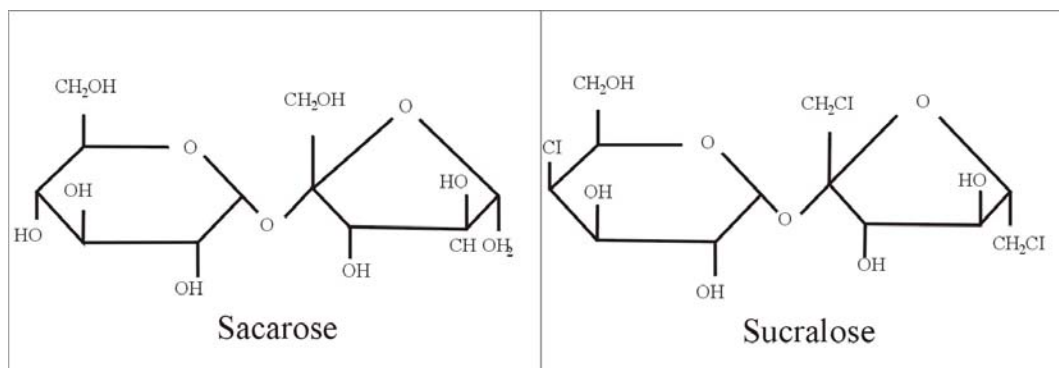
Edulcorantes	Agentes de corpo ( <i>bulking agents</i> )
Aspartame	Lactitol
Sacarina	Xylitol
Ciclamato	Isomalt
Sucralose	Maltitol
Acesulfame K	Sorbitol
Stévia	Polidextrose
Etc.	Etc.

Fonte: Bucione, 2000.

Visando atender às características de qualidade mencionadas anteriormente, optou-se pela utilização da sucralose como edulcorante devido às suas características de segurança e inocuidade. A sucralose repõe a característica doce do açúcar com forte apelo de estabilidade, sabor, características técnicas e principalmente segurança. Os fatores mercadológicos também foram levados em conta. Devido à concorrência acirrada, optou-se pela utilização de um edulcorante inovador para que o chocolate elaborado tenha um diferencial tecnológico e de marketing, uma vez que a parcela da população que se preocupa com esse tipo de alimento vem crescendo ano após ano, incentivando o desenvolvimento de alimentos mais saudáveis e inovadores.

Descoberta em 1976, a sucralose é obtida a partir do açúcar através de um processo patenteado de múltiplas etapas desenvolvido pela *McNeil Speciality Products Company*, empresa do grupo Johnson & Johnson e pela Tate & Lyle. Aprovada pelo FDA (*Food and Drug Administration*) em todas as categorias (*General Purpose*) e pela JECFA (*Joint Expert Committee on Food Additives*), a sucralose foi estudada por mais de 20 anos, quando foram conduzidos mais de uma centena de estudos sobre a sua segurança e toxicidade.

A sucralose (1,6-dicloro-1,6-dideoxi- $\beta$ -D-Frutofuranosil-4-Cloro-4-deoxi- $\alpha$ -D-Galactopiranosídeo) é o único edulcorante de alta intensidade (EAI) obtido através da sacarose ( $\alpha$ -D-Glucopiranosil- $\beta$ -D-frutofuranosídeo). Portanto, apresenta características sensoriais muito próximas às da sacarose. Trata-se de um pó branco cristalino com poder dulçor médio 600 vezes maior que o da sacarose, sendo classificada quimicamente como carboidrato clorado. As estruturas químicas desses compostos vêm apresentadas na Figura 29.



**Figura 29 - Fórmula química da sacarose e sucralose**

Fonte: Koller, 2000.

A sucralose apresenta o perfil de sabor mais semelhante ao do açúcar quando comparada com todos os outros edulcorantes existentes no mercado, porém, sem o indesejável sabor residual (*aftertaste*) amargo/metálico. O valor calórico da sucralose é zero, pois a mesma não é reconhecida como carboidrato pelo corpo humano. Sendo assim, o uso da sucralose, na substituição do açúcar, pode reduzir substancialmente as calorias ou eliminá-las por completo (Koller, 2000).

O JECFA estabeleceu uma ingestão diária (IDA) de 15 mg de sucralose/Kg de peso corpóreo. Em função de seu elevado poder edulcorante, a quantidade a ser ingerida, para propiciar o dulçor desejado, representaria um risco potencial muito inferior ao dos demais edulcorantes, especialmente considerando a comprovada segurança do produto (Cândido e Campos, 1995).

A escolha dos agentes de corpo foi definida baseada, primeiramente, na aplicabilidade ao produto, ou seja, agentes de corpo hidrossolúveis foram eliminados visto ser o chocolate uma emulsão com uma fase sólida dispersa em uma fase oleosa, que é a manteiga de cacau. Dentre os agentes de corpo compatíveis, optou-se pela utilização do lactitol que é um poliol obtido a partir da hidrogenação de carboidratos. Tais “açúcares - álcoois” são largamente utilizados em produtos alimentícios para diabéticos e apresentam dulçor equivalente a 35% da sacarose e valor calórico de 2,4 Kcal/g. O lactitol manifesta sinergismo com edulcorantes intensos e outros edulcorantes de “corpo”. Por seu sabor suave e agradável e excelente estabilidade térmica, pode ser utilizado no preparo de bebidas, sorvetes, *sherbets*, sopas instantâneas etc. O lactitol realça o sabor de chocolates e promove o aumento da vida-de-prateleira devido a sua

baixa higroscopicidade. A associação de lactitol com polidextrose pode resultar em maior redução do valor calórico. Seu metabolismo é semelhante ao de uma fibra alimentar; quase 100% da dose administrada não é absorvida. Não existe referência ao produto na legislação brasileira, mas a resolução MERCOSUR/GMC n° 19/93 que aprovou a lista geral harmonizada de aditivos para o MERCOSUL, permitiu o uso do lactitol (Cândido e Campos, 1995).

A polidextrose, outro agente de corpo selecionado, é um carboidrato obtido através da condensação polimérica da dextrose, catalizada por ácido cítrico e à vácuo. Esse agente de corpo pode ser consumido por diabéticos e seu valor calórico, reportado pela legislação brasileira, é de apenas 1 Kcal/g, o que representa 75% de redução calórica se comparado à sacarose. No Brasil, seu uso foi liberado pela Portaria n° 53-DIPROD/MS de 04/04/91 na função de estabilizante para alimentos dietéticos em quantidade suficiente para obter o efeito desejado. As polidextroses não apresentam poder edulcorante, portanto não são classificados como adoçantes (Cândido e Campos, 1995). Na Tabela 6 apresenta-se a formulação do chocolate dietético após a substituição total do açúcar, presente na formulação da Tabela 4, pelos ingredientes selecionados para a substituição (proporção de 70% de lactitol e 30% de polidextrose). Pelo fato do lactitol possuir poder adoçante de apenas 35% em relação à sacarose, do total substituído (35,198%) apenas 12,319% conferirão sabor doce ao produto. A diferença entre o total de sacarose a ser substituído (50,283%) e o total de dulçor fornecido pelo lactitol (12,319%) deverá ser suprido pela sucralose. Portanto, dividindo-se a diferença de dulçor a ser adicionado (37,964%) pelo poder dulçor da sucralose (600 vezes o da sacarose) encontra-se o total de sucralose a ser adicionado à fórmula (0,063%).

**Tabela 6 - Formulação chocolate dietético.**

INGREDIENTES	%
Lactitol	35,198
Manteiga de cacau	21,481
Polidextrose	15,085
Liquor de cacau	12,519
Leite em pó desnatado	10,062
Soro de leite em pó	5,000
Lecitina de soja	0,444
Poliglicerol Poliricinoleato (PGPR)	0,137
Sucralose	0,063
Vanilina	0,011

Ao se fazer a substituição total do açúcar, presente na formulação tradicional de chocolate (Tabela 4), deparou-se com uma restrição legal (Portaria nº318-SVS/MS de 24/11/95) que limita o uso da sucralose em alimentos dietéticos prontos para o consumo em, no máximo, 0,045%. No entanto, de acordo com pesquisas anteriores realizadas pelo fabricante da sucralose, observou-se que, em concentrações inferiores ao limite máximo permitido, o poder dulçor é compensado pela sinergia entre os outros ingredientes com poder adoçante (lactitol). Com base nessas pesquisas, decidiu-se fixar o percentual de utilização da sucralose em 0,042% e acrescentar a diferença em um ingrediente de menor influência em termos de dulçor, no caso o liquor de cacau . A formulação modificada do chocolate dietético vem apresentada na Tabela 7.

**Tabela 7 - Formulação modificada do chocolate dietético**

INGREDIENTES	%
Lactitol	35,198
Manteiga de cacau	21,481
Polidextrose	15,085
Liquor de cacau	12,540
Leite em pó desnatado	10,062
Soro de leite em pó	5,000
Lecitina de soja	0,444
Poliglicerol Poliricinoleato (PGPR)	0,137
Sucralose	0,042
Vanilina	0,011

Para a verificação prévia de seu desempenho, foi realizada uma rodada experimental com a formulação modificada. O produto resultante foi analisado sensorialmente quanto à característica de qualidade sabor doce. Para tanto, utilizou-se um teste de diferença pareado simples (Capítulo 4, item 4.3.1.2) onde a amostra resultante da rodada prévia foi comparada com um produto similar, à base de sucralose, existente no mercado. Solicitou-se, aos painelistas, verificar se existia diferença entre o par de amostras quanto à característica de qualidade sabor doce.

Para a apresentação das amostras aos painelistas, foi adotado o procedimento geral (Capítulo 4, item 4.3.1.2), pois reduz o tempo do teste, principalmente quando cada painalista testa mais de um par de amostras de cada vez.



Os resultados obtidos em painel sensorial (Tabela 1- Anexo1) demonstram não haver diferença significativa, em termos de dulçor, entre as duas amostras, não havendo necessidade de fazer ajustes nas proporções do edulcorante e do agente de corpo, lactitol, que também possui poder adoçante equivalente a 35% da sacarose. Após essa verificação prévia, foi mantida como formulação base para as rodadas experimentais, a formulação modificada do chocolate dietético (Tabela 7).

#### 6.1.2.1 Eleger as variáveis de resposta associadas a cada característica de qualidade

Variáveis de resposta qualitativas e quantitativas foram selecionadas com o objetivo de avaliar as características de qualidade de interesse para o consumidor e para a empresa. Outras variáveis de resposta foram selecionadas para incorporar características de qualidade importantes que não são identificadas pelo consumidor, tais como granulometria, viscosidade e umidade. A totalidade das variáveis de resposta consideradas no experimento vem apresentadas nas Tabelas 8 e 9.

**Tabela 8 - Variáveis de resposta qualitativas**

Variáveis de resposta	Tipo	Importância relativa(I.R)	Alvo (Tj)	Unidade Soma das Ordens Totais	LIE	LSE
$Y_1=Flavor$ (sabor e aroma)	Menor é melhor	1,5	12	12 a 72	12	72
$Y_2=Textura$	Menor é melhor	1,5	12	12 a 72	12	72

LIE= Limite inferior de especificação; LSE= Limite superior de especificação.

**Tabela 9 - Variáveis de resposta quantitativas**

Variáveis de resposta	Tipo	Importância relativa (I.R)	Alvo (Tj)	Unidade	LIE	LSE
$Y_3=Granulometria$	Menor é melhor	1,0	28	Micra	28	32
$Y_4=Viscosidade$	Nominal é melhor	0,5	4,5	Pas	4,3	4,7
$Y_5=Umidade$	Menor é melhor	1,0	0,8	%	0,8	1,0
$Y_6=Valor calórico$	Menor é melhor	0,5	360	Kcal/100g	360	390
$Y_7=Custo$	Menor é melhor	1,0	6,0	US\$/Kg	6,0	6,5

#### 6.1.2.2 Identificação dos parâmetros do processo.

As variáveis de processo que mais afetam as variáveis de resposta são o tempo e a temperatura de concheamento. Todavia, para cada tipo de chocolate (ao leite, meio amargo, amargo e branco) há uma temperatura ideal para o processamento, dependendo do teor de sólidos do leite presente na formulação. Dessa forma, fixou-se a temperatura de concheamento em 60° Celsius, considerada como ideal para o tipo chocolate ao leite. Somente o tempo de concheamento foi selecionado para sofrer variações devido à grande influência do mesmo sobre o desempenho das características de qualidade desejadas em um bom chocolate.

Durante a etapa de concheamento do chocolate, ocorrem as modificações de sabor mais importantes no produto. O sabor amargo é reduzido e outros matizes de sabor desejados se tornam mais pronunciados. A natureza do desenvolvimento de sabor durante o concheamento ainda não está completamente explicada quimicamente, ainda que muito já se tenha descoberto sobre concentrações de voláteis totais, ácidos graxos livres, pirazinas e compostos sulfurados. A primeira alteração química durante a fase de conchagem é a perda de ácidos graxos voláteis de cadeia curta. O ácido acético está presente por ser o produto final da etapa de fermentação das amêndoas de cacau, que dão origem à manteiga de cacau e ao liquor de cacau presente nas formulações de chocolates. A etapa de concheamento é de extrema importância na produção de chocolates pois durante a mesma, processos físicos e químicos ocorrem simultaneamente (Beckett, 1988).

Dentre esses processos destacam-se o desenvolvimento do sabor desejado do chocolate (sabor característico) e também a conversão de um produto em pó arenoso em uma suspensão fluida de açúcar, cacau e partículas de leite em pó em uma fase líquida de manteiga de cacau. O conteúdo de umidade da massa de chocolate decresce de aproximadamente 1,6% a 0,6-0,8%. Ao se eliminar essa umidade, muitas substâncias de sabor não desejado também são eliminadas.

Volatilizam-se, aproximadamente, 30% de ácido acético e até 50% de aldeídos de baixo ponto de ebulição. É necessária a eliminação parcial destas substâncias ácidas voláteis para conferir ao chocolate acabado o seu sabor pleno.

A ventilação forçada adicional no concheamento ajuda na eliminação da umidade e, conseqüentemente, dos ácidos voláteis. Segundo Strecker *apud* Beckett (1988), durante o concheamento há formação significativa de aminoácidos livres, os quais estão diretamente ligados ao desenvolvimento do sabor no chocolate. Os aminoácidos livres juntamente com outros ingredientes são os precursores do sabor dos quais se deriva a variedade de sabores durante o aquecimento por meio das reações de Maillard.

– *Identificação dos fatores controláveis no processo e na formulação.*

Os fatores controláveis selecionados para sofrerem variações planejadas em suas proporções foram três ingredientes da formulação modificada do chocolate dietético (Tabela 7),  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , e uma variável de processo ( $Z$ ) conforme apresentado na Tabela 10. A soma das proporções dos três ingredientes considerados para sofrerem variações planejadas no experimento é 71,764% ( $p=0,71764$ ); ou seja,  $x_1 + x_2 + x_3 = 71,764\%$ . Demais ingredientes da formulação foram mantidos constantes.

**Tabela 10 - Fatores controláveis experimentados**

Fator	Unidade
$x_1$ (% lactitol)	Kg
$x_2$ (% manteiga de cacau)	Kg
$x_3$ (% polidextrose)	Kg
$Z$ (tempo de concheamento)	h

– *Identificação dos fatores mantidos constantes*

Parâmetros do processo cujos efeitos sobre as variáveis de resposta não se desejava pesquisar foram mantidos constantes. São eles: temperatura de concheamento, operador, temperatura ambiente e demais ingredientes da formulação do chocolate dietético, conforme apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Fatores controláveis mantidos constantes**

Designação	Valor	Unidade
Temperatura da concha	60	°C
Temperatura ambiente	25	°C
Liquor de cacau	12,540	%
Leite em pó desnatado	10,062	%
Soro de leite em pó	5,000	%
Lecitina de soja	0,444	%
PGPR	0,137	%
Sucralose	0,042	%
Vanilina	0,011	%

#### 6.1.2.3 Identificação das possíveis interações entre os fatores controláveis

Existe uma interação esperada entre a manteiga de cacau ( $x_2$ ) e a polidextrose ( $x_3$ ). A polidextrose é uma molécula grande que tende a aumentar a viscosidade da massa de chocolate. Um aumento na concentração de polidextrose faz com que maiores quantidades de manteiga de cacau sejam necessárias para se obter a viscosidade desejada. Conseqüentemente, tal fato pode acarretar aumento substancial do valor calórico e do custo final do produto.

#### 6.1.2.4 Identificar o intervalo de variação dos fatores controláveis.

Os intervalos de variação dos fatores controláveis a serem testados no experimento são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Intervalo de variação dos fatores controláveis.**

Fator	Faixa de variação	Unidade
$x_1$ (% lactitol)	29 a 43	%
$x_2$ (% manteiga de cacau)	18 a 23	%
$x_3$ (% polidextrose)	10 a 20	%
<b>Z</b> (tempo de concheamento)	10 e 12	horas

#### 6.1.2.5 Definir o número de níveis dos fatores controláveis.

As variáveis da formulação ( $x_1$  a  $x_3$ ) foram testadas a cinco níveis. A variável de processo ( $Z$ ) foi testada a dois níveis. Na Tabela 13 apresentam-se os níveis codificados estabelecidos para cada fator de controle do experimento.

**Tabela 13 - Número de níveis dos fatores controláveis.**

Fator	Nº de Níveis	Níveis
$x_1$ (% lactitol)	5	-1,41, -1, 0, +1, 1,41
$x_2$ (% manteiga de cacau)	5	-1,41, -1, 0, +1, 1,41
$x_3$ (% polidextrose)	5	-1,41, -1, 0, +1, 1,41
$Z$ (tempo de concheamento - h)	2	-1, +1

#### 6.1.2.6 Restrições experimentais

O alto custo das matérias-primas foi o fator que mais restringiu a realização dos experimentos, limitando o número de rodadas experimentais e não permitindo replicações dos tratamentos experimentais.

#### 6.1.2.7 Identificar a necessidade de rodadas prévias

Com o intuito de checar as condições do equipamento, instruir o operador a respeito do seu uso e fazer uma análise sensorial prévia do produto, conforme descrito no item 6.1.2 do presente Capítulo, foi realizada uma rodada prévia com a formulação apresentada na Tabela 7. Por ocasião da rodada prévia, constatou-se a necessidade de ajustes no termostato do equipamento, para que a temperatura de concheamento pudesse ser mantida constante (60° Celsius).

## 6.2 ETAPA 2 - PLANEJAMENTO FINAL DOS EXPERIMENTOS.

### 6.2.1 Escolha do modelo estatístico

O projeto experimental selecionado, no espaço das variáveis independentes, foi o **Projeto Composto Central de Segunda Ordem (CCD – Central Composite Design)**. O CCD permite capturar efeitos lineares, quadráticos e interações entre os ingredientes da formulação a partir de um número reduzido de rodadas experimentais.

O CCD utilizado no experimento apresentou a seguinte distribuição de pontos experimentais:

1- Uma porção fatorial  $2^k$  ( $k=2$ ), acrescida de um ponto central, totalizando 5 rodadas experimentais.

2- Uma porção “estrela”, constituída de quatro pontos axiais equidistantes do centro da porção fatorial, acrescida de um ponto central, permitindo a verificação de efeitos não lineares.

3- Dois blocos para a inclusão da variável de processo  $Z_{cod}$  (tempo de concheamento): um primeiro bloco composto pela porção fatorial completa e um ponto de centro, com  $Z_{cod}$  a nível baixo, e um segundo bloco composto pela porção “estrela” e um ponto de centro, com  $Z_{cod}$  a nível alto.

A matriz experimental, expressa em termos de variáveis independentes, vem apresentada na Tabela 14.

**Tabela 14 - Matriz experimental expressa em termos de variáveis independentes ( $w_i$  e  $z_{cod}$ )**

Rodadas	$w_1$	$w_2$	$z_{cod}$	
1	-1	-1	-1	Bloco 1 Porção “Cubo”= Projeto fatorial $2^2$ completo + 1 ponto central
2	-1	1	-1	
3	1	-1	-1	
4	1	1	-1	
5	0	0	-1	
6	-1,41	0	1	Bloco 2 Porção “Estrela”= Quatro pontos axiais + 1 ponto central
7	1,41	0	1	
8	0	-1,41	1	
9	0	1,41	1	
10	0	0	1	

O balanceamento dos blocos no experimento foi possibilitado pela repetição do ponto central, um em cada bloco. O fator de processo, tempo de concheamento, foi testado a apenas dois níveis, o que impossibilita seu ajuste a modelos quadráticos ou de maior grau. As variáveis de formulação, representadas por  $w_1$  e  $w_2$ , foram testadas a 5 níveis, possibilitando ajuste a modelos de mais alta ordem.

## 6.2.2 Projeto de experimentos com formulações

### 6.2.2.1 Obtenção da matriz experimental expressa em variáveis dependentes – Transformação inversa

De posse da matriz experimental expressa em termos de variáveis independentes ( $w_i$ ), definidas para o projeto composto central, fez-se necessário obter uma matriz experimental expressa em proporções dos ingredientes da formulação para viabilizar a realização das rodadas experimentais. Para a obtenção dessa matriz, realizou-se uma transformação inversa nas variáveis independentes ( $w_1$  e  $w_2$ ) da matriz experimental apresentada na Tabela 14, conforme descrito no Capítulo 3, item 3.2.3.3.

A transformação inversa é dada pela seguinte expressão:

$$[\mathbf{X}\%] = [\mathbf{X}_c\%] + [\mathbf{W}][\mathbf{T}'_1][\mathbf{H}] \quad (6.1)$$

onde:

$[\mathbf{X}\%]$  é a matriz experimental, de dimensão (10×3), expressa em termos de variáveis dependentes ( $x_1, x_2, x_3$ ).

$[X_c\%]$  é a matriz, de dimensão (10×3), cujas linhas são as coordenadas do ponto central da região experimental, expressa em termos das variáveis dependentes  $x_i$  [expressão (6.7)];

$[W]$  é a matriz, de dimensão [10×(3-1)], expressa em termos das variáveis independentes  $w_i$  [expressão (6.8)];

$[\mathbf{T}'_1]$  é a transposta da matriz  $\mathbf{T}_1$  [expressão (6.5)].

$[H]$  é a matriz diagonal, de dimensão (3×3), das semi-amplitudes ( $h_i$ ), das faixas de variação dos ingredientes da formulação [expressão (6.6)].

A partir das informações contidas na Tabela 12, obtêm-se as médias ( $x_{0i}$ ) e as semi-amplitudes ( $h_i$ ) das faixas de variação das proporções dos três ingredientes da formulação; os resultados são apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Médias ( $x_{0i}$ ) e semi-amplitudes ( $h_i$ ) das faixas de variação dos fatores controláveis (proporções dos ingredientes da formulação).**

Fator	Média( $x_{0i}$ )	Semi-amplitude ( $h_i$ )
$x_1$ (% lactitol)	36,0	7,0
$x_2$ (% manteiga de cacau)	20,5	2,5
$x_3$ (% povidextrose)	15,0	5

A partir das informações contidas na Tabela 15, obtêm-se:

(i) A matriz ortogonal de transformação  $\mathbf{T}_1$  [expressão (6.5)]:



Os elementos das  $(q-1)$  colunas da matriz  $\mathbf{T}_1$  são determinados a partir das semi-amplitudes  $(h_i)$ , com  $(1 \leq i \leq q)$ , e da expressão (6.2), onde  $t_{ij}$  é o elemento não normalizado da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna.

Para 3 ingredientes tem-se os seguintes elementos das  $(q-1)$  colunas:

$$\begin{aligned} t_{11} &= -h_2 & t_{12} &= -h_1 h_3 \\ t_{21} &= h_1 & t_{22} &= -h_2 h_3 \\ t_{31} &= 0 & t_{32} &= h_1^2 + h_2^2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

originando a matriz apresentada abaixo:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} -h_2 & -h_1 h_3 \\ h_1 & -h_2 h_3 \\ 0 & h_1^2 + h_2^2 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Normalizando-se a matriz ortogonal  $\mathbf{T}_1$  na expressão (6.3), obtém-se a seguinte matriz:

$$\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \frac{-h_2}{\sqrt{h_2^2 + h_1^2}} & \frac{-h_1 h_3}{\sqrt{(h_1 h_3)^2 + (h_2 h_3)^2 + (h_1^2 + h_2^2)^2}} \\ \frac{h_1}{\sqrt{h_2^2 + h_1^2}} & \frac{-h_2 h_3}{\sqrt{(h_1 h_3)^2 + (h_2 h_3)^2 + (h_1^2 + h_2^2)^2}} \\ 0 & \frac{h_1^2 + h_2^2}{\sqrt{(h_1 h_3)^2 + (h_2 h_3)^2 + (h_1^2 + h_2^2)^2}} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

A matriz ortogonal  $\mathbf{T}_1$  resultante para os dados numéricos do estudo de caso vem dada na expressão (6.5).

$$[\mathbf{T}_1] = \begin{bmatrix} -0,34 & -0,53 \\ 0,94 & -0,19 \\ 0 & 0,83 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

(ii) A transposta da matriz ortogonal  $\mathbf{T}_1$ .

Obtém-se a transposta da matriz ortogonal  $\mathbf{T}_1$ , permutando-se as linhas da matriz ortogonal  $\mathbf{T}_1$  pelas colunas de mesmo índice como se segue:

$$[\mathbf{T}_1^T] = \begin{bmatrix} -0,34 & 0,94 & 0 \\ -0,53 & -0,19 & 0,83 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

(iii) A matriz diagonal, de dimensão (3×3), das semi-amplitudes  $h_i$ :

$$[\mathbf{H}] = \begin{bmatrix} 7,0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,5 & 0 \\ 0 & 0 & 5,0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

(iv) A matriz de dimensão (10×3), das coordenadas do ponto central ( $x_{0i}$ ), onde todas as linhas são iguais:

$$[\mathbf{X}_c\%] = \begin{bmatrix} 36,0 & 20,5 & 15,0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 36,0 & 20,5 & 15,0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Através da Tabela 14, colunas 2 e 3, obtém-se a matriz de dimensão (10×2), expressa em termos das variáveis independentes ( $w_i$ ):

$$[\mathbf{W}_1 \mathbf{W}_2] = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 0 \\ -1,41 & 0 \\ 1,41 & 0 \\ 0 & -1,41 \\ 0 & 1,41 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Substituindo-se as expressões (6.6) a (6.9) na expressão (6.1), obtém-se a matriz experimental  $[\mathbf{X}\%]$ , apresentada na Tabela 16.

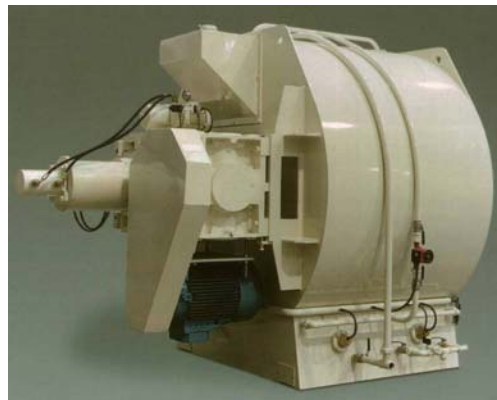
**Tabela 16 - Matriz experimental expressa em termos de variáveis originais.**

Matriz $x\%$ dos ingredientes das formulações;				$p= 0,71764$	Variável de processo ( $Z$ )
Rodadas	$x_1(\%)$	$x_2(\%)$	$x_3(\%)$	Soma(%)	Tempo de concheamento ( $h$ )
1	40,415	19,238	12,111	71,764	10
2	35,193	18,572	18,000	71,764	10
3	37,073	22,580	12,111	71,764	10
4	31,851	21,914	18,000	71,764	10
5	36,133	20,576	15,055	71,764	10
6	38,489	18,220	15,055	71,764	12
7	33,777	22,932	15,055	71,764	12
8	39,815	21,045	10,904	71,764	12
9	32,451	20,106	19,207	71,764	12
10	36,133	20,576	15,055	71,764	12

### 6.2.3 Execução dos experimentos

As rodadas experimentais foram executadas segundo o planejamento proposto na Tabela 16. Para a sua execução, utilizou-se a máquina *Universal Lloveras UL20* fabricada por S.A Martin Lloveras (Espanha), a qual, como pode ser visto na Figura 30, é um equipamento

compacto que realiza as operações de moagem, mistura, refino e conchagem simultaneamente. Esse equipamento consiste de uma câmara cilíndrica com fundo duplo, aquecida ou refrigerada conforme a necessidade. O equipamento possui um ventilador (exaustor) que favorece a retirada do vapor d'água e os ácidos voláteis da câmara de refino.

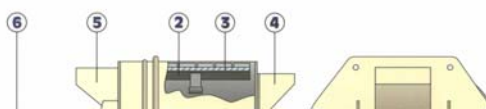


**Figura 29 – Máquina Universal Lloveras UL20.**

Fonte: Catálogo S.A. Martin Lloveras.

O equipamento é composto das seguintes partes componentes:

- 1-Cuba de trabalho;
- 2-Lâminas ajustáveis;
- 3-Setor de refino;
- 4-Entrada de matérias primas;
- 5-Ventilador para extração de vapor e gases;
- 6-Sistema de tensão hidráulica;
- 7-Bomba de circulação de água.
- 8-Elementos de calefação;
- 9-Saída de produto.



**Figura 30 – Esquema do interior do equipamento.**

Fonte: Catálogo S.A. Martin Lloveras.

A parte interior da cuba de trabalho (item nº1 da Figura 30) é constituída por uma superfície estriada contra a qual as lâminas, especialmente desenhadas, exercem pressão. A pressão das lâminas é ajustada manualmente e os limites máximo e mínimo estão preestabelecidos para que não haja sobrecarga da mesma. As lâminas estão fixadas em um eixo central com ângulo tal que mantêm a massa em constante movimento e impedem que a massa de chocolate gire na mesma direção da máquina, permitindo que os ingredientes sejam bem homogeneizados (Figura 31).

**Figura 31 – Disposição das lâminas no interior do equipamento.**

Fonte: Catálogo S.A. Martin Lloveras.

A forte turbulência e a poderosa corrente de ar através da massa fazem com que ocorra uma considerável diminuição no tempo de conchagem (Beckett, 1988). Como já foi citado anteriormente, é durante essa operação que acontecem as transformações mais importantes no chocolate. A escolha desse equipamento se deve ao fato de ser um equipamento compacto, capaz de realizar todas as etapas de fabricação ao mesmo tempo, não necessitando de grande área para a sua instalação.

### 6.3 ETAPA 3 – SELEÇÃO DAS MELHORES RODADAS EXPERIMENTAIS QUANTO À CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE *FLAVOR*

De posse das amostras obtidas a partir das dez rodadas experimentais, optou-se por realizar uma avaliação sensorial através do *Teste Pareado* de diferença de preferência-qualidade (Capítulo 4, item 4.3.1.2), onde os painelistas foram solicitados a identificar a amostra preferida quanto à característica de qualidade *flavor*, para possibilitar a eliminação das amostras (rodadas experimentais) que apresentaram desempenho inferior ao padrão apresentado. O padrão apresentado foi um produto similar que ocupa posição de liderança no mercado de chocolates dietéticos (*benchmarking*).

Esse procedimento tem como objetivo atender à concorrência, ou seja, o fato de um produto atender as necessidades dos clientes, no caso os diabéticos, não significa que os clientes irão comprá-lo; um produto concorrente pode ser melhor ou fornecer mais valor. Assim, atender à concorrência torna-se um critério importante para quem desenvolve o produto (Juran, 1995).

A eliminação de algumas amostras também favorece a avaliação sensorial das amostras remanescentes, visto que na avaliação sensorial de chocolate deve-se apresentar não mais do que seis amostras, pois os painelistas podem perder a sensibilidade das papilas gustativas quando um número superior de amostras é apresentado.

O resultado da avaliação sensorial das dez amostras correspondentes às dez rodadas experimentais e a amostra padrão (Anexo 1- Tabelas 2 a 11), demonstra que das dez amostras analisadas apenas quatro tiveram desempenho superior à amostra padrão (amostras 1, 3, 7 e 8) e que 2 amostras não diferiram, a um nível de significância de 5% , da amostra padrão (amostras 5 e 10). Portanto, as amostras selecionadas pelo método de comparação aos pares

para serem incluídas na otimização experimental correspondem as rodadas experimentais **1, 3, 5, 7, 8 e 10**. A Tabela 17 apresenta a matriz dos ingredientes das rodadas experimentais selecionadas.

**Tabela 17 - Matriz dos ingredientes das rodadas experimentais selecionadas.**

Matriz $x\%$ dos componentes da formulação; $p=$ 0,71764				
Rodadas	$x_1(\%)$	$x_2(\%)$	$x_3(\%)$	Soma(%)
1	40,415	19,238	12,111	71,764
3	37,073	22,580	12,111	71,764
5	36,133	20,576	15,055	71,764
7	33,777	22,932	15,055	71,764
8	39,815	21,045	10,904	71,764
10	36,133	20,576	15,055	71,764

#### 6.4 ETAPA 4 – OBTENÇÃO DOS VALORES DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS DAS RODADAS EXPERIMENTAIS SELECIONADAS NA ETAPA 3

As rodadas experimentais cujo desempenho foi superior ou igual ao padrão, selecionadas na Etapa 3, foram analisadas em um painel sensorial, utilizando o *Teste de Ordenação* (Capítulo 4, item 4.3.1.2). O objetivo desse teste é a comparação de todos os tratamentos entre si, e não a comparação de um tratamento específico com os demais. Nesse teste, as amostras foram apresentadas aos painelistas, dos quais solicitou-se uma ordenação das amostras em ordem decrescente de preferência (ou seja, a melhor amostra em primeiro lugar e assim sucessivamente). Para um total de seis amostras, em um painel com doze avaliadores, o valor mínimo da soma das ordens totais resultante é 12 (LIE) e o valor máximo da soma das ordens totais resultante é 72 (LSE), para qualquer amostra. Dessa forma, a amostra que apresentar a menor soma das ordens é tida como predileta em termos sensoriais.

Como o objetivo não é a obtenção da melhor rodada experimental com a utilização de apenas um critério e sim a otimização experimental multivariada, a soma das ordens totais das variáveis de resposta qualitativas das rodadas experimentais selecionadas na Etapa 3 foi utilizada na determinação dos modelos de regressão, como apresentados na seção 6.5. A soma

das ordens totais das variáveis de resposta qualitativas (Anexo 1- Tabelas 12 e 13) é apresentada na Tabela 18.

**Tabela 18 - Soma das ordens totais das variáveis de resposta qualitativas.**

Rodada	Y <sub>1</sub> (flavor)	Y <sub>2</sub> (textura)
1	20	22
3	26	25
5	51	41
7	58	59
8	33	37
10	60	58

Os valores das variáveis de resposta quantitativas das rodadas experimentais selecionadas foram obtidos através de análises laboratoriais e cálculos teóricos. Os valores de viscosidade, umidade e granulometria foram obtidos através da média de três leituras consecutivas das amostras. Utilizou-se o viscosímetro TermoHaake (40°C) para a análise da viscosidade, a umidade foi medida pelo método Karl Fischer e a granulometria em micrômetro.

Para o cálculo do valor calórico das amostras das rodadas experimentais selecionadas, foram consideradas as médias dos valores apresentados das calorias do leite em pó desnatado e do soro de leite em pó e para os demais ingredientes, os valores calóricos apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19 - Valor calórico dos ingredientes**

Ingredientes	Valor calórico (Kcal/g)
Lactitol	2,4
Manteiga de cacau	9,0
Polidextrose	1,0
Liquor de cacau	3,5
Leite em pó desnatado	1,8 a 2,0
Soro de leite em pó (11%)	3,5 a 4,0
Lecitina de soja	0
Poliglicerol Poliricinoleato (PGPR)	0
Sucralose	0
Vanilina	0

Fontes: Minifie (1989) e Campos (2000).



O custo das amostras das rodadas experimentais selecionadas foi obtido com os dados apresentados na Tabela 20.

**Tabela 20 - Preço dos ingredientes**

Ingredientes	Preço (U\$/Kg)
Lactitol	5,23
Manteiga de cacau	10,96
Polidextrose	4,20
Liquor de cacau	5,88
Leite em pó desnatado	5,20
Soro de leite em pó (11%)	1,59
Lecitina de soja	0,54
Poliglicerolpoliricinoleato (PGPR)	2,03
Sucralose	243,00
Vanilina	14,33

Os valores das variáveis de resposta quantitativas, obtidos através das análises laboratoriais e dos cálculos teóricos, a serem utilizados na determinação dos modelos de regressão, como apresentados na seção 6.5 são apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21 - Valores das variáveis de resposta quantitativas**

Rodada	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>
1	28	4,3	0,8	364,007	6,180
3	29	4,6	0,9	386,064	6,371
5	30	4,9	1,0	368,716	6,226
7	32	4,7	1,0	384,266	6,361
8	26	4,1	0,7	377,623	6,296
10	30	4,4	0,8	368,716	6,226

## 6.5 ETAPA 5 - ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados foram analisados através de Análise de variância –ANOVA e Regressão Múltipla, com a utilização do *software* estatístico NCSS.

### 6.5.1 Modelagem individual das variáveis de resposta qualitativas e quantitativas

Nesta etapa, foram construídos modelos de regressão relacionando as variáveis de resposta qualitativas ( $Y_1$  e  $Y_2$ ) e quantitativas ( $Y_3$  a  $Y_7$ ) com os fatores controláveis do experimento. A modelagem identificou os melhores parâmetros para os modelos através do método dos mínimos quadrados. Os dados utilizados na modelagem estão apresentados na Tabela 13 (fatores controláveis) e Tabelas 18 e 21 (valores observados das variáveis de resposta qualitativas e quantitativas). Os modelos são construídos em função das variáveis independentes  $w_1$ ,  $w_2$  e  $z_{cod}$ . Somente termos com  $p$ -values iguais ou inferiores a 0,05 foram incluídos nos modelos de regressão. A Tabela 22 apresenta os modelos de regressão obtidos para as variáveis de resposta qualitativas, bem como suas medidas de ajuste. A Tabela 23 traz os modelos de regressão para as variáveis quantitativas, bem como suas medidas de ajuste. Observa-se que as variáveis  $Y_6$  e  $Y_7$  são determinísticas, o que justifica o  $R^2=1,0$  obtidos nos modelos.

**Tabela 22 - Modelos de regressão ( $\hat{Y}_i$ ), coeficientes de determinação( $R^2$ ) e coeficientes de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) para as variáveis de resposta qualitativas**

Variável de resposta ( $Y_i$ )	Modelo de regressão ( $\hat{Y}_i$ )	$R^2$	$R_{aj}^2$
$Y_1$	$\hat{Y}_1 = 53,632 + 21,639w_2 + 6,872z_{cod}$	0,9591	0,9318
$Y_2$	$\hat{Y}_2 = 49,314 + 16,065w_2 + 8,314z_{cod}$	0,9997	0,9983

**Tabela 23 - Modelos de regressão ( $\hat{Y}_i$ ), coeficientes de determinação( $R^2$ ) e coeficientes de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) para as variáveis de resposta quantitativas.**

Variável de resposta ( $Y_i$ )	Modelo de regressão ( $\hat{Y}_i$ )	$R^2$	$R_{aj}^2$
$Y_3$	$\hat{Y}_3 = 30,000 + 0,539w_1 + 0,595w_1^2 - 2,040w_2^2$	0,9993	0,9981
$Y_4$	_____	_____	_____
$Y_5$	_____	_____	_____
$Y_6$	$\hat{Y}_6 = 368,966 + 11,028w_1 - 6,326w_2 - 6,072 \times 10^{-3} w_2^2$	1,00	1,00
$Y_7$	$\hat{Y}_7 = 6,226 + 9,558 \times 10^{-2} w_1 - 4,954 \times 10^{-2} w_2$	1,00	1,00

A modelagem individual das variáveis de resposta  $Y_4$  e  $Y_5$  não apresentou nenhum termo significativo. Tal fato provavelmente é resultante da seleção prévia feita sobre as rodadas experimentais.

### 6.5.2 Otimização individual das variáveis de resposta e transformação inversa

Este item apresenta as otimizações individuais das variáveis de resposta qualitativas ( $Y_1$  e  $Y_2$ ) e quantitativas ( $Y_3$  a  $Y_7$ ). O critério de otimização considerado foi a distância ao alvo, ou seja, a distância dos valores preditos das variáveis de resposta (Tabelas 22 e 23) de seus respectivos valores alvo ( $T_j$ ), apresentados nas tabelas 8 e 9.

Os modelos de regressão obtidos na modelagem individual foram utilizados na composição da função de perda individual, que consiste na utilização da expressão (6.14) para cada variável de resposta individualmente, buscando a melhor combinação dos níveis para os fatores controláveis na região experimental. A otimização individual utilizou o *What's Best* que é um programa de otimização linear e não-linear, disponível no *site* [www.lindo.com](http://www.lindo.com).

Os resultados da otimização individual estão apresentados a seguir. Para cada variável de resposta, são apresentados: (i) a função de perda individual; (ii) os níveis ótimos dos fatores controláveis, em termos de variáveis independentes; (iii) os níveis ótimos dos fatores controláveis em termos das variáveis da formulação; (iv) o valor assumido pela variável de resposta no ponto ótimo. A determinação dos níveis ótimos dos fatores controláveis em termos das variáveis da formulação foi obtida através da transformação inversa apresentada no Capítulo 3, item 3.2.3.3.

*Variável de resposta  $Y_1$  (flavor) – Tipo Menor é melhor*

Se  $\hat{Y}_1 \leq T_1$ , então  $\hat{Z}(w) = 0$

Caso contrário, se  $\hat{Y}_1 > T_1$ , então a função de perda será:

$$\begin{aligned}
 (i) \quad \hat{Z}_1(w) &= [\hat{Y}_1 - T_1]^2 \\
 \hat{Z}_1(w) &= [(53,632 + 21,639w_2 + 6,872z_{cod}) - 12]^2 \\
 \hat{Z}_1(w) &= 18,0541
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

E o ajuste individual que conduz à mínima perda de qualidade é:

- (ii)  $w_2 = -1,41$ ;  $z_{cod} = -1$
- (iii)  $x_1 = 37,459\%$ ;  $x_2 = 23,401\%$ ;  $x_3 = 10,904\%$
- (iv)  $\hat{Y}_1 = 16,2490$

*Variável de resposta  $Y_2$  (textura) – Tipo Menor é melhor*

Se  $\hat{Y}_2 \leq T_2$ , então  $\hat{Z}(w) = 0$

Caso contrário, se  $\hat{Y}_2 > T_2$ , então a função de perda será:

$$\begin{aligned}
 (i) \quad \hat{Z}_2(w) &= [\hat{Y}_2 - T_2]^2 \\
 \hat{Z}_2(w) &= [(49,314 + 16,065w_2 + 8,314z_{cod}) - 12]^2 \\
 \hat{Z}_2(w) &= 40,3015
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

E o ajuste individual que conduz à mínima perda de qualidade é:

- (ii)  $w_2 = -1,41$ ;  $z_{cod} = -1$
- (iii)  $x_1 = 37,459\%$ ;  $x_2 = 23,401\%$ ;  $x_3 = 10,904\%$
- (iv)  $\hat{Y}_2 = 18,3484$

*Variável de resposta  $Y_3$  (granulometria) – Tipo Menor é melhor*

Se  $\hat{Y}_3 \leq T_3$ , então  $\hat{Z}(w) = 0$

Caso contrário, se  $\hat{Y}_3 > T_3$ , então a função de perda será:

$$\begin{aligned}
 (i) \quad \hat{Z}_3(w) &= [\hat{Y}_3 - T_3]^2 \\
 \hat{Z}_3(w) &= [(30,000 + 0,539w_1 + 0,595w_1^2 - 2,040w_2^2) - 28]^2 \\
 \hat{Z}_3(w) &= 1,5352 \times 10^{-12}
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

E o ajuste individual que conduz à mínima perda de qualidade é:

- (ii)  $w_1 = 1,4099$ ;  $w_2 = -1,3903$

$$(iii) \quad x_1 = 37,407 \% ; \quad x_2 = 23,395 \% ; \quad x_3 = 10,962 \%$$

$$(iv) \quad \hat{Y}_3 = 27,9999$$

*Variável de resposta  $Y_6$  (valor calórico) – Tipo Menor é melhor*

Se  $\hat{Y}_6 \leq T_6$ , então  $\hat{Z}(w) = 0$

Caso contrário, se  $\hat{Y}_6 > T_6$ , então a função de perda será:

$$(i) \quad \begin{aligned} \hat{Z}_6(w) &= [\hat{Y}_6 - T_6]^2 \\ \hat{Z}_6(w) &= [(368,966 + 11,028w_1 - 6,326w_2 - 6,072 \times 10^{-3}w_2^2) - 360]^2 \\ \hat{Z}_6(w) &= 3,2368 \times 10^{-10} \end{aligned} \quad (6.12)$$

E o ajuste individual que conduz à mínima perda de qualidade é:

$$(ii) \quad w_1 = -0,0061; \quad w_2 = 1,4055$$

$$(iii) \quad x_1 = 32,344 \% ; \quad x_2 = 20,081 \% ; \quad x_3 = 19,339 \%$$

$$(iv) \quad \hat{Y}_6 = 359,9999$$

*Variável de resposta  $Y_7$  (custo) – Tipo Menor é melhor*

Se  $\hat{Y}_7 \leq T_7$ , então  $\hat{Z}(w) = 0$

Caso contrário, se  $\hat{Y}_7 > T_7$ , então a função de perda será:

$$(i) \quad \begin{aligned} \hat{Z}_7(w) &= [\hat{Y}_7 - T_7]^2 \\ \hat{Z}_7(w) &= [(6,226 + 9,558 \times 10^{-2}w_1 - 4,954 \times 10^{-2}w_2) - 6,0]^2 \\ \hat{Z}_7(w) &= 0,0005 \end{aligned} \quad (6.13)$$

E o ajuste individual que conduz à mínima perda de qualidade é:

$$(ii) \quad w_1 = -1,41; \quad w_2 = 1,41$$

$$(iii) \quad x_1 = 34,807 \% ; \quad x_2 = 17,750 \% ; \quad x_3 = 19,207 \%$$

$$(iv) \hat{Y}_7 = 6,0214$$

### 6.5.3 Definir função objetivo global

A função objetivo escolhida para a otimização global foi a função de Perda Quadrática Multivariada, adaptada de Ribeiro e Elsayed (1995), que busca a melhor combinação dos níveis para os fatores controláveis na região experimental. Somente a primeira parcela da função de perda quadrática multivariada, que diz respeito à perda decorrente do desvio da variável de resposta de seu valor alvo foi considerada na otimização global. A modelagem da variância não foi possível porque as rodadas experimentais não foram replicadas.

A expressão para a função de Perda Quadrática Multivariada vem dada abaixo:

$$\hat{Z}(i) = \sum_{j=1}^J p_j \left[ (\hat{Y}_j - T_j)^2 \right] \quad (6.14)$$

Para variáveis de resposta do tipo menor é melhor, o peso  $p_j$  é dado pela seguinte expressão:

$$p_j = F_j \times IR_j \quad (6.15)$$

$Y_1 \Rightarrow$ Menor é melhor	$p_1 = 4,17 \times 10^{-4}$
$Y_2 \Rightarrow$ Menor é melhor	$p_2 = 4,17 \times 10^{-4}$
$Y_3 \Rightarrow$ Menor é melhor	$p_3 = 0,0625$
$Y_6 \Rightarrow$ Menor é melhor	$p_6 = 5,55 \times 10^{-4}$
$Y_7 \Rightarrow$ Menor é melhor	$p_7 = 4,0$

#### 6.5.4 Otimização global e transformação inversa

A otimização global contemplou cinco variáveis de resposta simultaneamente, ou seja, flavor, textura, granulometria, valor calórico e custo das formulações. Através da aplicação de um procedimento de otimização linear e não-linear (*What's Best*), usando a expressão (6.14) como função objetivo e restringindo a busca pelo ponto ótimo na região definida pelos fatores controláveis do experimento, determinou-se o ajuste ótimo desses fatores.

O ajuste ótimo que conduz à mínima perda de qualidade, expresso em termos de variáveis independentes, e o valor da Perda Quadrática Multivariada, vêm apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24 - Ajuste ótimo expresso em termos de variáveis independentes ( $w_i$  e  $Z_{cod}$ ) e o valor da Perda quadrática Multivariada [ $\hat{Z}_i(w)$ ] no ajuste ótimo.**

Variáveis independentes		Variável de processo	Valor da Perda
$w_1$	$w_2$	$Z_{cod}$	$\hat{Z}_i(w)$
-1,41	-1,1758	-1	0,1784

Na tabela 25 apresenta-se o valor assumido pelas variáveis de resposta no ajuste ótimo.

**Tabela 25 - Valores das variáveis de resposta no ajuste ótimo.**

$\hat{Y}_1$	$\hat{Y}_2$	$\hat{Y}_3$	$\hat{Y}_6$	$\hat{Y}_7$
21,3176	22,1113	27,6028	360,8486	6,1495

Aplicando-se a transformação inversa, descrita no Capítulo 3, item 3.2.3.3, nos dados da Tabela 24, obteve-se o ajuste ótimo para os fatores controláveis expresso em termos das variáveis originais e que são apresentados na Tabela 26.

**Tabela 26 - Ajuste ótimo expresso em termos das variáveis originais**

Variáveis originais			Variável de processo
$x_1$ (%)	$x_2$ (%)	$x_3$ (%)	Tempo de concheamento (h)
41,559	18,611	11,593	10

## 6.6 ETAPA 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observa-se que o melhor ajuste obtido na otimização individual de todas as variáveis de resposta não correspondem a nenhum dos extremos da região experimental, ou seja, não correspondem a nenhum dos pontos planejados no experimento. As variáveis de resposta qualitativas, *flavor* ( $Y_1$ ) e *textura* ( $Y_2$ ), foram as que incorreram em maior perda da qualidade. Pode-se considerar perda de qualidade zero para as variáveis de resposta quantitativas ( $Y_3$ ,  $Y_6$  e  $Y_7$ ). O melhor ajuste para a variável de resposta granulometria ( $Y_6$ ) foi o que mais se aproximou de um dos pontos planejados no experimento (rodada experimental 9).

A variável de processo testada apresentou ajuste ótimo no nível mais baixo, tanto nas otimizações individuais quanto na otimização global. Os ajustes ótimos individuais não coincidiram com o ajuste ótimo global dos fatores controláveis. Desta forma fica evidenciada a necessidade de um procedimento global de otimização, que considere todas as variáveis de resposta simultaneamente. O ajuste ótimo global não corresponde a nenhum tratamento experimental rodado no experimento, no entanto, apresentou um resultado muito satisfatório, pois a perda de qualidade incorrida é praticamente zero.

A formulação que conduz à mínima perda da qualidade é apresentada na tabela 27.

**Tabela 27 - Formulação de chocolate dietético otimizada**

INGREDIENTES	%
Lactitol	41,559
Manteiga de cacau	18,611
Polidextrose	11,593
Liquor de cacau	12,540
Leite em pó desnatado	10,062
Soro de leite em pó	5,000
Lecitina de soja	0,444
Poliglicerol Poliricinoleato (PGPR)	0,137
Sucralose	0,042
Vanilina	0,011



---

*Capítulo VII*

**COMENTÁRIOS FINAIS**

## 7 COMENTÁRIOS FINAIS

### 7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu um estudo de otimização experimental de uma formulação, realizado em uma indústria alimentícia. Foram contemplados quatro fatores controláveis, sendo três ingredientes da formulação e uma variável de processo. Foram selecionadas sete variáveis de resposta associadas com a qualidade do produto final.

A metodologia proposta é constituída de oito etapas principais:

1. ***Etapa 1:*** Identificação do problema
2. ***Etapa 2:*** Planejamento dos experimentos
3. ***Etapa 3:*** Seleção das melhores rodadas experimentais – Avaliação sensorial
4. ***Etapa 4:*** Obtenção dos valores das variáveis de resposta qualitativas e quantitativas das rodadas experimentais selecionadas na Etapa 3
5. ***Etapa 5:*** Análise dos resultados
6. ***Etapa 6:*** Interpretação dos resultados
7. ***Etapa 7:*** *Scale-up*

## 8. *Etapa 8*: Validação do produto

A metodologia proposta põe ênfase no planejamento da otimização, identificando os objetivos do estudo, as características de qualidade de interesse e as variáveis de resposta correspondentes. A utilização de variáveis independentes permitiu o emprego de Projetos de Experimentos padrão para solucionar problemas de formulações, facilitando a modelagem e análise dos resultados. A metodologia permitiu a definição do ajuste ótimo considerando aspectos qualitativos e quantitativos referentes à qualidade do produto.

A análise dos resultados constituiu-se, primeiramente, na avaliação do efeito dos fatores controláveis, ou seja, das proporções dos ingredientes da formulação e do tempo de concheamento, sobre todas as variáveis de resposta individualmente. Consequentemente, tornou-se possível conhecer o efeito de cada ingrediente da formulação e do tempo de concheamento sobre cada variável de resposta. Tal procedimento também permite saber sobre quais fatores agir quando necessita-se alcançar determinado valor para uma variável de resposta.

Posteriormente, realizou-se a otimização para a obtenção do ajuste ótimo individual e do valor assumido por cada variável de resposta no ponto ótimo.

A partir dos modelos individuais obtidos, realizou-se a otimização global considerando-se os valores alvos, a importância relativa e o tipo de variável para cada variável de resposta. A função objetivo escolhida para a otimização global foi a Função de Perda Quadrática Multivariada, proposta por Ribeiro e Elsayed (1995).

Os ajustes ótimos individuais não coincidiram com o ajuste ótimo global dos fatores controláveis. Desta forma, ficou evidenciada a necessidade de um procedimento global de otimização, que considere todas as variáveis de resposta simultaneamente.

O ajuste ótimo global não corresponde a nenhum dos pontos testados da região experimental.

A partir dos resultados obtidos no estudo de caso, acredita-se que a proposta metodológica apresentada neste trabalho possa auxiliar as empresas do setor alimentício a alcançar níveis de qualidade mais elevados, obtendo produtos com maior qualidade, menor custo e com um menor tempo de desenvolvimento, o que justifica o investimento no

aprendizado desta técnica. Além disso, a utilização desta técnica despertou o interesse no sentido de se buscar soluções para os problemas baseados em procedimentos científicos e não mais na base da tentativa e erro.

Finalmente, a metodologia proposta fornece diretrizes para as etapas necessárias à otimização experimental de formulações onde características de qualidade sensoriais são avaliadas.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Para que se tenha conhecimento do que é realmente importante para o consumidor e quais as respectivas importâncias relativas, sugere-se a aplicação, em trabalhos futuros, de Pesquisa de Mercado e do QFD – Desdobramento da Função Qualidade. Estas técnicas estão presentes na metodologia proposta mas não foram aplicadas ao estudo de caso. A pesquisa de mercado proporcionará uma correta definição da qualidade demandada pelos consumidores, tornando possível incorporar ao processo as preferências do consumidor, associando a isto alta qualidade e baixo custo. A utilização do QFD, que organiza os itens da qualidade demandada e os desdobra por meio de matrizes, apontando quais as características de qualidade são prioritárias para a qualidade e em quais delas seria pertinente a otimização experimental, complementarará a Pesquisa de Mercado, permitindo a correta associação da qualidade demandada pelos consumidores com as características de qualidade.

A execução da formulação otimizada nas mesmas condições em que foram conduzidos os experimentos e posterior *scale-up* no chão de fábrica proporcionará a verificação da conformidade com os requisitos do projeto, validando o produto para posterior liberação do mesmo para a produção. Portanto, acredita-se que a aplicação integral da metodologia proposta proporcionará uma melhor qualidade de projeto.

## REFERÊNCIAS

AKAO, Y. Introdução ao Desdobramento da Qualidade – Tradução Zelinda Tomie Fujokawa e Seiichiro Takahashi, Belo Horizonte, MG. Fundação Christiano Ottoni: Escola de Engenharia.

ALMEIDA, T.C.A. *et al.* Avanços em Análise Sensorial. São Paulo: Varela, 1999.

AMARAL, D. DOE (*Design of Experiments*). Escola de Engenharia de São Carlos, 1999).([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)).

ANZALDÚA, A.M. *La Evaluación Sensorial de los Alimentos en la teoría y la Práctica*. Espanha: Editorial Acribia, 1994.

BARBETTA, P.A. Melhorias de Sistemas Computacionais através de Experimentos Estatisticamente Planejados. Universidade Federal de Santa Catarina, 1999). ([www.inf.ufsc.br/~barbetta/projetos/projetos.html](http://www.inf.ufsc.br/~barbetta/projetos/projetos.html)).

BECKETT, S.T. *Fabricación y Utilización industrial del chocolate*. Zaragoza (Espanha): Editorial Acribia, 1994.

BOX, G.E.P; DRAPER, N.R. *Empirical Model Building and Response Surfaces*. New York: John Willey and Sons, Inc., 1987.

BUCIONE, A. Alimentos *Ligth e Diet*: Atualizações em definições e ingredientes. In: Seminário Produtos *Diet e Light*. Campinas: Centro de Tecnologia de Cereais e Chocolate, 2000, p.43-65.

CAMPOS, M.B. Chocolates sem adição de açúcar: matérias-primas, formulações, processo de produção e análise sensorial. In: Seminário Produtos *Diet e Light*. Campinas: Centro de Tecnologia de Cereais e Chocolate, 2000, p.66-88.

CÂNDIDO, L.M.B; CAMPOS, A. M. Alimentos para fins especiais: Dietéticos. São Paulo: Livraria Varela, 1995.

CASAROTTO, N.F.; FÁVERO, J.S.; CASTRO, J.E.E. Gerência de Projetos/ Engenharia simultânea. São Paulo: Editora Atlas, 1999.

CATÁLOGO: Máquina Universal Lloveras UL20 – S.A. Martin Lloveras-Espanha.

CATEN, C.S. Método de Otimização de Produtos e Processos medidos por múltiplas características de qualidade. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

CHAVES, J. B. P. Avaliação Sensorial de Alimentos – Métodos de Análises. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 1980.

CORNELL, J.A. *Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*. New York: John Wiley, 1990a.

CORNELL, J.A. *How to Run Mixture Experiments for Product Quality*. Milwaukee: ASQC, 1990, v.5.

CUNHA, G.D. Desenvolvimento de Produtos- Apostilas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia da UFRGS, 1999.

ECHEVESTRE, M.E.S. Planejamento da Otimização Experimental de Processos Industriais. Escola de Engenharia. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

EUREKA, W.E. e RYAN, N.E. QFD: Perspectivas Gerenciais do Desdobramento da Função Qualidade. Rio de Janeiro. Qualitymark Editora, 1992

FALCONI, V.C. TQC- Controle da Qualidade Total (no estilo japonês). Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte - MG: Bloch Editora, 1992.

FERREIRA, A.M. Desdobramento da Qualidade em Serviços: o caso da Biblioteca da Escola de Engenharia da UFRGS. Porto Alegre, 1997. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

FOGLIATTO, F.S. A Metodologia de Projeto e Avaliação de Experimentos Aplicada à Indústria de Processos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, CPGEC, 1994.

FOGLIATTO, F.S.; ALBIN, S.L.; SILVA, A.M.S. *A Method for Sensory Data Collection and Analysis in Product Development*. In: XX ENEGEP, 2000, São Paulo. Anais do XX ENEGEP. São Paulo: USP, 2000.v. CD-Rom.

FOGLIATTO, F.S., ALBIN, S.L. Um método hierárquico para experimentos com variáveis de resposta avaliadas em painéis sensoriais. Revista Produto & Produção, vol. 3, p. 39-55, jun. 1999.

- FOGLIATTO, F.S., CATEN, C.T. Tópicos Especiais em Engenharia da Qualidade. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia da UFRGS, 1999.
- GARCIA, A.E.B. Tendências de mercado para produtos *diet e light* no setor de chocolates, balas e confeitos. In: Seminário Produtos *Diet e Light*. Campinas: Centro de Tecnologia de Cereais e Chocolate, 2000.
- GIOVANITTI-JENSEN, A.; MYERS, R.H. *Graphical Assessment of the Prediction Capability of Response Surface Designs*. *Technometrics*, 31, 159-171, 1989.
- HARTLEY, J.R. Engenharia Simultânea. Porto Alegre: Bookmann, 1998.
- HAUSER, J.R.; CLAUSING, D. *The House of Quality*. *Harvard Business Review*, v. 66, n. 3, p. 63-73, may-june, 1988.
- HEINSMAN, J.A.; MONTGOMERY, D.C. *Optimization of a household product formulation using a mixture experiment*. *Quality Engineering*, v.7, n.3, p.583-600, 1995.
- JURAN, J.M. A Qualidade desde o Projeto; Os Novos passos para o Planejamento da Qualidade em Produtos e Serviços. São Paulo: Pioneira, 1992.
- JURAN, J.M. Juran Planejando para a Qualidade. São Paulo: Pioneira, 1995.
- KHURI, A.I, CORNELL, J.A. *Response Surfaces-Designs and Analysis*. Marcel Dekker, Inc., 1996.
- KOLLER, L.S. SUCRALOSE: Aplicação em confeitos sem açúcar. In: Seminário Produtos Diet e Light. Campinas: Centro de Tecnologia de Cereais e Chocolate, 2000.
- LUCAS, J.M. *Wich response surface design is best*. *Technometrics*, 18, 411-417, 1976.
- MANUAL DE REFERÊNCIA APQP – Planejamento Avançado da Qualidade do Produto e Plano de Controle. *Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation*, Ed. IQA – Instituto de Qualidade Automotiva, 1994.
- MINIFIE, B.W. *Chocolate, Cocoa and Confectionary: Science and Technology*. New York: AVI, 1989.
- MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. New York: John Willey and Sons, 1991.
- MONTGOMERY, D.C.; VOTH, S.R. *Multicollinearity and Leverage in Mixture Experiments*. *Journal of Quality Technology*, 26, p.96-108, 1994
- MYERS, R.H. *et al. Variance dispersion properties of second-order response surface designs*. *Journal of Quality Technology*, 24, 1-11, 1992.
- MYERS, R.H, MONTGOMERY, D.C. *Response Surface Methodology-Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York: John Willey and Sons, 1995.

PASA, G.S. Método de Otimização Experimental de Formulações. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

PASETO, S.; ECHEVESTE, M.E.S. Avaliação da Qualidade numa academia de ginástica através do QFD. Porto Alegre, 1997. Monografia (Engenharia Mecânica) – DEMEC/UFRGS

PEGORARO, A.H. Uma Metodologia para Avaliação e Melhoria da Qualidade em Empresas de Serviços com o uso de Indicadores. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. ([www.eps.ufsc.br/disserta99/pegoraro](http://www.eps.ufsc.br/disserta99/pegoraro)).

RIBEIRO, J.L., DANILEVICZ, A.M.F., ECHEVESTE, M.E.S. Desdobramento da Função Qualidade-QFD e Pesquisa de Mercado. Apostilas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia da UFRGS, 1999.

RIBEIRO, J.L.D. Projeto de Experimentos. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia da UFRGS, 1999.

RIBEIRO, J.L.D., ELSAYED, E.A. *A case study on process optimization using the gradient loss function. International Journal of Production Research*, v.13, n.12, 3233-3248, 1995.

ROZENFELD, H., AGUIAR, A. Organização para Desenvolvimento de Produtos, 1999. ([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)).

ROZENFELD, H., AMARAL, D.C. Conceitos Gerais de Desenvolvimento de Produto, 2001. ([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)).

ROZENFELD, H. *et al. Teaching Scenario Development for Concurrent Engineering Practices Simulation*. Escola de Engenharia de São Carlos, 1998. ([www.numa.org.br/users/roz/papers/paper1/ICEE98.html](http://www.numa.org.br/users/roz/papers/paper1/ICEE98.html)).

RUFFONI, V. H. Aplicação de uma metodologia de Desenvolvimento de Produto em uma empresa de médio porte. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

St. JOHN, R.C. *Experiment with Mixtures, ill-conditioning, and ridge regression. Journal of Quality Technology*, 16, p.81-96, 1984.

TECHOJE. A Engenharia Simultânea e sua Importância Competitiva, 2001. ([www.techoje.com.br](http://www.techoje.com.br))

TEIXEIRA, E. *et al. Análise Sensorial de Alimentos*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1987.

TOLEDO, J.C., AZEKA, F., AMARAL, D.C. Projeto Robusto / Método Taguchi. 1998. ([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)).

TOLEDO, J.C. Gestão do processo de desenvolvimento de produto. 2001. ([www.numa.org.br](http://www.numa.org.br)).



VALERIANO, D.L. Gerência em Projetos – Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia. São Paulo: Makron Books, 1998.

WERKEMA, M.C.C., AGUIAR, S. Planejamento e Análise de Experimentos: Como identificar as principais variáveis influentes de um processo. Belo Horizonte - MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.

---

*Anexos*

---

***Anexo 1 – Tabulação dos resultados das avaliações sensoriais***

**TABELA 1- Significância da diferença entre a amostra da rodada experimental prévia (amostra 474) e o padrão quanto a característica de qualidade “sabor doce”, pelo Teste Pareado.**

<b>AMOSTRA 474</b>		
<b>PAINELISTAS</b>	<b>IGUAL</b>	<b>DIFERENTE</b>
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>5</b>

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra proveniente da rodada prévia não difere da amostra padrão sob o aspecto avaliado a um nível de significância de 5%. Consequentemente, a formulação modificada do chocolate dietético (Tabela 7, Capítulo 6) será mantida como referência para o planejamento dos experimentos.

**TABELA 2- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº1 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA nº1	AMOSTRA PADRÃO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	10	2

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto, a amostra nº1 é melhor do que o padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Consequentemente, a amostra nº1 será selecionada para a avaliação sensorial posterior onde todos os tratamentos serão comparados entre si pelo *Teste de Ordenação* (Capítulo 4, item 4.3.1.2).

**TABELA 3- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra n°2 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA n°2	AMOSTRA PADRÃO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	2	10

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto, a amostra n°2 é inferior à amostra padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Conseqüentemente, a amostra n°2 será eliminada da análise sensorial posterior que comparará todos os tratamentos entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 4- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº3 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

<b>AMOSTRAS</b>		
<b>PAINELISTA</b>	<b>AMOSTRA nº3</b>	<b>AMOSTRA PADRÃO</b>
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	10	2

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra nº3 é melhor do que o padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Consequentemente, a amostra nº3 será selecionada para a avaliação sensorial posterior, onde todos os tratamentos serão comparados entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 5- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra n°4 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA n°4	AMOSTRA PADRÃO
<b>TOTAL</b>	1	11

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra n°4 é inferior à amostra padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Conseqüentemente, a amostra n°4 será eliminada da análise sensorial posterior que comparará todos os tratamentos entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 6- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº5 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA nº5	AMOSTRA PADRÃO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
TOTAL	4	8

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra nº5 não difere da amostra padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Consequentemente, a amostra nº5 será mantida na análise sensorial posterior que comparará todos os tratamentos entre si pelo *Teste de Ordenação*.



**TABELA 7- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº6 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

<b>AMOSTRAS</b>		
<b>PAINELISTA</b>	<b>AMOSTRA nº6</b>	<b>AMOSTRA PADRÃO</b>
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	1	11

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra nº6 é inferior à amostra padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Consequentemente, a amostra nº6 será eliminada da análise sensorial posterior que comparará todos os tratamentos entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 8- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº7 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA nº7	AMOSTRA PADRÃO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	10	2

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra nº7 é melhor do que o padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Conseqüentemente, a amostra nº7 será selecionada para a avaliação sensorial posterior onde todos os tratamentos serão comparados entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 9- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº8 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA nº8	AMOSTRA PADRÃO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	11	1

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra nº8 é melhor do que o padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Conseqüentemente, a amostra nº8 será selecionada para a avaliação sensorial posterior onde todos os tratamentos serão comparados entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 10- Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra n° 9 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.**

<b>AMOSTRAS</b>		
<b>PAINELISTA</b>	<b>AMOSTRA n°9</b>	<b>AMOSTRA PADRÃO</b>
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>		12

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra n°9 é inferior à amostra padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Conseqüentemente, a amostra n°9 será eliminada da análise sensorial posterior que comparará todos os tratamentos entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 11-** Significância da diferença da preferência-qualidade entre a amostra nº10 e o padrão, quanto a característica de qualidade *flavor* pelo Teste Pareado.

AMOSTRAS		
PAINELISTA	AMOSTRA nº10	AMOSTRA PADRÃO
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
<b>TOTAL</b>	7	5

Entrando na Tabela 2.1 do Anexo 2 verifica-se que para um total de 12 comparações (painelistas), o número mínimo para considerar a diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade é 10; portanto a amostra nº10 não difere da amostra padrão, sob o aspecto avaliado, a um nível de significância de 5%. Conseqüentemente, a amostra nº10 será mantida na análise sensorial posterior que comparará todos os tratamentos entre si pelo *Teste de Ordenação*.

**TABELA 12- Soma das Ordens Totais para a característica de qualidade “*flavor*”.**

PAINELISTA	AMOSTRAS					
	n°1	n°3	n°5	n°7	n°8	n°10
1	1	2	4	6	3	5
2	2	3	4	5	1	6
3	1	2	5	4	3	6
4	2	3	5	4	1	6
5	3	1	5	4	2	6
6	2	3	4	5	1	6
7	1	3	6	4	2	5
8	2	1	6	5	3	4
9	1	2	3	4	5	6
10	3	1	2	5	6	4
11	1	2	3	6	4	5
12	1	3	4	6	2	5
<b>SOMA DAS ORDENS</b>	20	26	51	58	33	60

As amostras **n°1, 3, 5, 7, 8 e 10** correspondem às amostras codificadas como amostra **291, 494, 622, 799, 728 e 849** respectivamente, na avaliação sensorial pelo Teste de Ordenação. Ver Anexo 3, Tabela 3.3.

Utilizando-se apenas o critério sensorial para a seleção da melhor amostra quanto à característica de qualidade avaliada (*flavor*), entra-se na Tabela 2.2 do Anexo 2 e observa-se que para um total de seis tratamentos e doze repetições (painelistas), encontra-se os limites 28–56. Assim, observa-se que a soma das ordens das amostras n° 1 e 3 são menores que 28, o que significa que estas duas amostras são as melhores. As amostras n° 7 e 10 apresentam soma das ordens maiores do que 56, o que significa que estas duas amostras são as piores. As amostras n° 5 e 8 apresentam soma das ordens dentro dos limites e por isso não se pode concluir que as mesmas sejam diferentes. Para estabelecer-se, finalmente, qual a melhor amostra entre as duas melhores amostras (n° 1 e 3), uma nova avaliação deve ser realizada reordenando estas duas amostras.

**TABELA 13- Soma das Ordens Totais para a característica de qualidade “textura”.**

PAINELISTA	AMOSTRAS					
	n°1	N°3	n°5	n°7	n°8	n°10
1	1	2	6	5	3	4
2	2	3	4	6	1	5
3	1	2	4	5	3	6
4	2	3	5	6	1	4
5	3	1	6	4	2	5
6	3	2	1	5	4	6
7	1	5	6	4	2	3
8	2	1	6	4	3	5
9	1	2	4	3	6	5
10	2	1	3	5	6	4
11	1	3	2	6	4	5
12	3	1	4	6	2	5
<b>SOMA DAS ORDENS</b>	22	25	41	59	37	58

As amostras **n°1, 3, 5, 7, 8 e 10** correspondem às amostras codificadas como amostra **192, 944, 262, 979, 722 e 498** respectivamente, na avaliação sensorial pelo Teste de Ordenação. Ver anexo 3, Tabela 3.4.

Utilizando-se apenas o critério sensorial para a seleção da melhor amostra quanto à característica de qualidade avaliada (textura), entra-se na Tabela 2.2 do Anexo 2 e observa-se que para um total de seis tratamentos e doze repetições (painelistas), encontra-se os limites 28–56. Assim, observa-se que a soma das ordens das amostras n° 1 e 3 são menores que 28, o que significa que estas duas amostras são as melhores. As amostras n° 7 e 10 apresentam soma das ordens maiores do que 56, o que significa que estas duas amostras são as piores. As amostras n° 8 e 5 apresentam soma das ordens dentro dos limites e por isso não se pode concluir que as mesmas sejam diferentes. Para estabelecer-se, finalmente, qual a melhor amostra entre as duas melhores amostras (n° 1 e 3), uma nova avaliação deve ser realizada reordenando estas duas amostras.

## *Anexo 2 - Tabelas Estatísticas*

**Tabela 2.1-** Comparação pareada: Números mínimos, de seleções corretas, da amostra ímpar, necessários para indicar diferenças significativas.

Numero Total De comparações	Número de seleções corretas ao nível de:		
	(5%)	(1%)	(0,1%)
	(9:1)	(99:1)	(999:1)
6	6	-	-
8	7	8	-
10	9	10	-
12	10	11	-
14	11	12	14
16	13	14	15
18	14	15	17
20	15	16	18
25	18	20	22
30	21	23	25
35	24	26	28
40	27	29	32
45	30	32	35
50	33	35	38
60	38	41	44
70	44	46	50
80	50	52	56
90	55	58	62
100	60	63	67
200	113	116	121
300	165	169	175
400	218	223	230
500	270	276	284
600	332	338	347
700	374	480	490
800	427	434	445
900	479	487	499
1000	531	539	552



Tabela 2.2: Ordens totais necessárias para significância, ao nível de 5% de probabilidade, comparação de tratamentos entre si

número de repetições	número de de tratamentos ou amostras ordenadas										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	4-14	4-17	4-20	4-23	5-25	5-28	5-31	5-34
4	-	5-11	5-15	6-28	6-22	7-25	7-29	8-32	8-36	8-39	9-43
5	-	6-14	7-18	8-22	9+26	9-31	10-35	11-39	12-43	12-48	13-52
6	7-11	8-16	9-21	10-26	11-31	12-36	13-41	14-46	15-51	17-55	18-60
7	8-13	10-18	11-24	12-30	14-35	15-41	17-46	18-52	19-58	21-63	22-69
8	9-15	11-21	13-27	15-33	17-39	18-46	20-52	22-58	24-64	25-61	27-77
9	11-16	13-23	15-30	17-37	19-44	22-50	24-57	26-64	28-71	30-78	32-85
10	12-18	15-25	17-33	20-40	22-48	25-55	27-63	30-70	32-78	35-85	37-93
11	13-20	16-28	19-36	22-44	45-52	28-60	31-68	34-76	36-85	39-93	42-101
12	15-21	18-30	21-39	25-47	28-56	31-65	34-74	38-82	41-91	44-100	47-109
13	16-23	20-32	24-41	27-51	31-60	35-69	38-69	42-88	45-98	49-107	52-117
14	17-25	22-34	26-44	30-54	34-64	38-74	42-84	46-94	50-104	54-114	57-125
15	19-26	23-37	28-47	32-58	37-68	41-79	46-89	50-100	54-111	58-122	63-132
16	20-28	25-39	30-50	35-61	40-72	45-83	49-95	54-106	59-117	63-129	68-140
17	22-29	27-41	32-53	38-64	43-56	48-88	53-100	58-112	63-124	68-136	73-148
18	23-31	29-43	34-56	40-68	46-00	52-92	57-105	61-118	68-130	73-143	79-155
19	24-33	30-46	37-58	43-71	49-84	57-97	61-110	67-123	73-136	78-150	84-163
20	26-34	32-48	39-61	45-95	52-88	58-102	65-115	71-129	77-143	83-157	90-170

Fonte: Chaves (1981) - Reproduzida de Kramer (1963)

---

## *Anexo 3 – Modelos de Planilhas de Coleta de Dados*

### 3.1- Teste Pareado (Teste de diferença simples)

Provedor:.....

Data:.....

#### **Instruções:**

Você está recebendo duas amostras, uma amostra codificada como padrão (P) e a outra codificada com três dígitos (474) .

Deguste cuidadosamente cada uma das amostras e assinale o atributo correspondente à amostra codificada (474), comparativamente à amostra padrão (P), quanto à característica de qualidade “**sabor doce**”.

Amostra 474	Atributo	
	Igual ao padrão (P)	Diferente do padrão (P)

Observações:.....

.....

.....

### 3.2- Teste Pareado (Teste de diferença de preferência-Qualidade)

Provedor: .....

Data:.....

#### Instruções:

Você está recebendo duas amostras, uma amostra codificada como padrão (P) e a outra codificada com três dígitos .

Deguste cuidadosamente cada uma das amostras e assinale a amostra de sua preferência quanto à característica de qualidade “*FLAVOR*”.

<b>Amostra</b>	<b>Preferência</b>
Padrão (P)	
573	

### 3.3- Teste de Ordenação

Provedor: .....

Data:.....

#### Instruções:

Você está recebendo 6 amostras de um novo produto que está sendo desenvolvido. Deguste cuidadosamente cada uma das amostras e ordene-as em ordem decrescente de preferência.

Característica de qualidade avaliada: *flavor*

<b>Código das amostras</b>	<b>Ordenação</b>
291	
494	
622	
799	
728	
849	

Observações:.....

.....

.....

.....

### 3.4- Teste de Ordenação

Provedor: .....

Data:.....

#### Instruções:

Você está recebendo 6 amostras de um novo produto que está sendo desenvolvido. Deguste cuidadosamente cada uma das amostras e ordene-as em ordem decrescente de preferência.

Característica de qualidade avaliada: *textura*

<b>Código das amostras</b>	<b>Ordenação</b>
192	
944	
262	
979	
722	
498	

Observações:.....

.....

.....

.....

### 3.5- Planilha de realização das rodadas experimentais

Ensaio : .....

Data: .....

Operador: .....

ingredientes rodadas		Fatores Fixos						Fatores Controláveis			
		LIQUOR DE CACAU %	L.P.D.* %	SORO** %	LECITINA %	PGPR**** %	SUCRALOSE %	VANILINA %	LACTITOL %	MANTEIGA***** %	POLIDEXTROSE %
Tempo de concheamento	10 Horas	1	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		2	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		3	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		4	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		5	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		6	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		7	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		8	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		9	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		
		10	12,540	10,062	5,000	0,444	0,137	0,042	0.011		

OBSERVAÇÕES: .....

\* Leite em pó desnatado; \*\* Soro de leite em pó desmineralizado (11% de proteína); \*\*\* Lecitina de soja;

\*\*\*\* Poliglicerol Ricinoleato; \*\*\*\*\* Manteiga de cacau.