



DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM ESTATÍSTICA, MATEMÁTICA E COMPUTAÇÃO
ÁREA CIENTÍFICA: ESTATÍSTICA COMPUTACIONAL

Planeamento de Experiências e Controlo de Qualidade na Indústria:

Revisão e aplicação metodológica

Manuel Ana Mário Alberto

Dissertação apresentada na Universidade Aberta para obtenção do grau de
mestre em Matemática, Estatística e Computação.

Orientadora:

Prof^ª. Doutora Teresa Paula Costa Azinheira Oliveira

Lisboa, 2013

*À minha mulher Gracinda Alberto, aos meus filhos
Yasmin Alberto e André Alberto, pelo seu carinho,
compreensão e por muitas e boas razões.*

Agradecimentos

À minha orientadora, professora Doutora Teresa Paula Costa Azinheira Oliveira, pela ajuda, paciência, sugestões bastante construtivas e sobretudo pela correcção ortográfica e reconstituição das ideias, que sem as quais seria impossível a realização deste trabalho.

À toda equipa do corpo docente da Universidade, pelo dinamismo e dedicação fiel aos ensinamentos durante toda a trajectória.

À todos os colegas do mestrado pelo apoio fornecido durante o curso.

Aos Srs. Kiala Gabriel (actualmente Secretário de Estado para Indústria), Sebastião Lukinda (actualmente Vice Ministro do MAPESS), Dra. Bernarda da Silva (actualmente Ministra da Indústria), Dr. Vicente Soares, Administrador da Indústria SEIS, que sem os quais seria impossível a pesquisa na referida Indústria.

Ao Dr. Neto, Director geral da Indústria SEIS, a Dra. Mariana Fragoso, responsável pela produção e controlo da qualidade e, em geral à toda equipa da Indústria SEIS, pelo acolhimento e espírito de abertura durante a pesquisa.

Aos meus pais, meus irmãos, amigos e todos aqueles que de forma directa ou indirecta, contribuíram para realização deste trabalho.

À todos, o meu eterno agradecimento.

Índice

Agradecimentos	II
Índice	III
Lista de figuras e gráficos	VIII
Lista de tabelas e quadros	X
Lista de abreviaturas e símbolos	XIII
Resumo	XVI
Summary	XVII
CAPÍTULO I	1
PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIAS E CONTROLO DA QUALIDADE: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1. Introdução ao Planeamento de Experiências e ao Controlo da Qualidade	2
1.1. Evolução histórica	2
1.1.1. Perspectiva histórica	6
1.2. Generalidades	13
1.3. Problemática e objectivos	18
CAPÍTULO II	20
METODOLOGIA DO PLANEAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIÊNCIAS NA INDÚSTRIA	20
2..Planeamento de experiências na indústria	21
2.1. Introdução	21
2.2. Alguns Conceitos importantes	22
2.3. Metodologias de Planeamento e Experiências na Indústria.	25
2.4. Análise de variância	25
2.5. Planeamento Factorial Completo 2^k	26

2.6. Procedimento para a construção de uma matriz do Planeamento Factorial Completo 2^k	27
2.7. Planeamento Factorial Fraccionado 2^{k-p}	34
CAPÍTULO III	38
OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO	38
3.1. Introdução	39
3.2. Metodologias de superfícies de resposta	40
3.2.1. Método da inclinação máxima ascendente	42
3.3. Desenhos de factores a três níveis.	43
3.4. Planeamento Factorial Completo 3^k	44
3.5. Matrizes de Planeamento	45
3.6. Função Perda	49
CAPÍTULO IV	52
CONTROLO ESTATÍSTICO DA QUALIDADE	52
4. Controlo da Qualidade	53
4.1. Introdução	53
4.1.1. Alguns conceitos fundamentais.....	55
4.2. Cartas de controlo	56
4.2.1. Aplicação das Cartas de Controlo	60
4.2.2. Estabelecimento de uma Carta de Controlo	60
4.3. Medida de avaliação do desempenho das cartas de controlo.	60
4.4. Recolha de dados (Amostras)	61
4.4.1. Regras para detecção de causas especiais.	62

4.4.2. Interpretação das Cartas de Controlo	63
4.5. Tipos de cartas de controlo.....	64
4.5.1. Cartas de controlo da média e da amplitude.	65
4.5.2. Cartas de Controlo da Média e do Desvio Padrão.....	66
4.5.3. Cartas de Controlo da Média e da Variância.....	67
4.5.4. Cartas de controlo da Mediana e da Amplitude.	68
4.5.5. Carta de Observações Individuais e da Amplitude.	69
CAPÍTULO V	73
PLANEAMENTO E EXPERIÊNCIA NA INDÚSTRIA SEIS “LÍQUIDOS ALIMENTARES” ..	73
5. Aplicação prática do planeamento de experiências na indústria SEIS.....	74
5.1. Introdução	74
5.2. Caracterização da Indústria em estudo.	74
5.3. Problema em estudo.....	75
5.4. Processo de fabricação do sumo.	75
5.5. Etapas ou fases de processamento do produto.....	76
5.5.1. Níveis de produção ou fases:.....	78
5.5.2. Problemas que podem ocorrer durante o processo de fabricação.	80
5.6. Planeamento de experiências.	81
5.6.1. Escolha dos factores.....	81
5.6.3. Definição da variável-resposta.....	83
5.7. Construção de matrizes de planeamento.	84
5.8. Optimização do processo.	90
5.8.1. Planeamento factorial 2^k	93

5.9. Planeamento para o ajuste de um modelo de primeira ordem.....	97
5.9.1. Metodologia da superfície de resposta do processo.....	98
CAPÍTULO VI.....	102
APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO DA QUALIDADE.....	102
6. Aplicação das cartas de controlo da média e do desvio padrão	103
6.1. Recolha da amostra.....	103
CAPÍTULO VII	108
ESTUDO DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”	108
7. Estudo da variável bolhas de ar no interior embalagem.....	109
7.1. Optimização do processo	114
7.2. Planeamento factorial 2^k	115
7.3. Planeamento factorial 2^3	120
7.3.1. Metodologia da superfície de resposta do processo.....	128
7.3.2. Metodologia da superfície de resposta do processo.....	135
7.3.2.1. Análise canónica de superfície de resposta	138
7.3.2.1.1. Localização do ponto estacionário.....	138
CAPÍTULO VIII.....	143
APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”	143
8..Análise da característica de qualidade <i>QR</i>	144
8.1. Aplicação das cartas da média e do desvio padrão.	144
8.1. Recolha da Amostra.....	144

8.2. Algumas considerações operacionais.....	146
CAPÍTULO IX.....	150
CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	150
9.1. Conclusões	151
9.2. Limites do estudo e trabalhos futuros	155
BIBLIOGRAFIA	157
Bibliografia	158
ANEXOS	162
Anexo I:.....	163
Anexo II	164
Anexo III	167
Anexo IV.....	168
Anexo V	172

Lista de figuras e gráficos

Figura 1.1. Abordagem sistemática para execução do DOE.....	15
Gráfico 2.1. Efeito principal x_i , com relação a resposta y_i	30
Gráfico 2.2. Experiência factorial com interacção	31
Gráfico 2.3. Experiência factorial sem interacção	31
Gráfico 2.4. Gráfico de probabilidade normal	32
Figura 3.1. Tjactória de inclinação máxima ascendente.....	43
Figura 3.2. Função de perda (característica Nominal-é-melhor).....	50
Fig. 4.1. Processo (esquemáticamente)	55
Figura 4.2. (gráfico da carta de controlo).....	58
Figura 4.3. gráfico das regras para a detecção de causas especiais.....	63
Fig.5.1. Parâmetros do processo	78
Figura 5.2. Fluxograma para execução do <i>DOE</i> no processo de fabricação do sumo	79
Figura 5.3. Escala de variação das variáveis-resposta	83
Gráfico 5.1. Gráfico de probabilidade normal	90
Gráfico 5.2. Superfície de resposta de 1ª ordem	92
Figura 5.4. Planeamento 2^2 com pontos centrais	98
Gráfico 5.3. Contorno para equação 5.17	100
Figura 6.1. Carta de controlo da Média.....	106
Figura 6.2. Carta de Controlo da Média (sob controlo estatístico) de CQ.....	107

Figura 6.3. Carta de controlo do Desvio Padrão de CQ.....	107
Gráfico 7.1. Contorno de Superfície de resposta	114
Gráfico 7.2. Probabilidade Normal	120
Gráfico 7.3. Gráfico de Probabilidade Normal	124
Gráfico 7.4. Gráfico de Probabilidade Normal	127
Gráfico 7.5. Metodologia de superfície de resposta de 1ª ordem.....	129
Figura 7.1. Inclinação máxima ascendente	130
Figura 7.2. Planeamento Composto Central	131
Gráfico 7. 6. Efeito de variáveis principais e interacções	134
Gráfico 7.7. Superfície de resposta de 2ª ordem	136
Gráfico 7.8. Contorno do modelo de 2ª ordem (Quant. de azoto x Quant. de líquido).....	136
Gráfico 7.9. Optimização para a quantidade 1,5l.....	137
Gráfico 8.1. Carta de Controlo da Média de CR.....	146
Gráfico 8.2. Carta de controlo do Desvio Padrão de CR.....	146
Figura1: Preparação da polpa.....	168
Figura2: Tanque de mistura do produto	168
Figura3: Pasteurizador	169
Figura4: máquina de soldadura	170
Figura5: máquina de enchimento	171
Figura6: linha de distribuição do produto	169
Figura7: Embalagem de sumo.....	171

Lista de tabelas e quadros

Tabela 2.1. Matriz dum planeamento factorial completo 2^3	27
Tabela 2.2. Teste factorial 2^3	36
Tabela 3.1. Matriz de planeamento factorial 3^2	45
Tabela 3.2. Matriz L_4 de Taguchi	45
Tabela 3.3. Matriz factorial 2^{3-1}	46
Tabela 3.4. Planeamento factorial 2^3	46
Tabela 3.5. Matriz de Planeamento clássico.	48
Quadro 4.1. Tipos de cartas de controlo	65
Quadro 4.2. Valores de \tilde{A}_2	69
Quadro 4.3. Resumo dos limites das cartas para controlo de variáveis	71
Quadro 4.4. Estimacão dos parâmetros do processo	71
Quadro 4.5. Resumo dos limites das cartas para controlo de variáveis	72
Tabela 5.1. Níveis de funcionamento dos factores de processo	85
Tabela 5.2. Níveis dos factores fixados durante o processo.....	85
Tabela 5.3. Matriz de Planeamento Factorial 2^3	85
Tabela 5.4. Resposta Soma do Planeamento.....	86
Tabela 5.5. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações	88
Tabela 5.6. Tabela de ANOVA para o Factorial completo 2^3	89
Tabela 5.7. Níveis de temperatura e de pressão	91

Tabela 5.8. Níveis de Temperatura para o Factorial Composto Central	93
Tabela 5.9. Níveis de Pressão para o Factorial Composto Central	93
Tabela 5.10. Rendimento de Temperatura do factorial composto central.....	94
Tabela 5.11. ANOVA para o Planeamento Factorial 2^2	96
Tabela 5.12. Tabela de inclinação máxima descendente	100
Tabela 5.13. Característica de Qualidade a estudar	101
Tabela 6.1. Tabela das amostras	103
Tabela 6.2. Tabela dos resultados das amostras.....	104
Tabela 6.3. Tabela das médias amostrais	105
Tabela 6.4. Tabela dos limites das cartas	106
Tabela 7.1. Variação funcional dos factores	110
Tabela 7.2. Matriz de Planeamento factorial completo 2^4	110
Tabela 7.3. Respostas do Planeamento.....	111
Tabela 7.4. Algoritmo de Yates para o cálculo de efeitos e de variações.....	112
Tabela 7.5. ANOVA para o factorial completo 2^4	113
Tabela 7.6. Variação de níveis de temperatura	115
Tabela 7.7. Variação de níveis de Pressão	116
Tabela 7.8. Variação de níveis quantidade.....	116
Tabela 7.9. Matriz de Planeamento Factorial Completo 2^4	116
Tabela 7.10. Resposta do Planeamento factorial completo 2^4	117
Tabela 7.11. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações	118
Tabela 7.12. Anova para o factorial completo 2^4	116
Tabela 7.13. Variação de níveis de pressão	121
Tabela 7.14. Variação de níveis de Quantidade	121
Tabela 7.15. Matriz de Planeamento Factorial 2^3	121

Tabela 7.16. Resposta Soma do Planeamento factorial completo 2^3	122
Tabela 7.17. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações	122
Tabela 7.18. ANOVA do planeamento factorial completo 2^3	123
Tabela 7.19. Variação de níveis das Q_L e Q_A	125
Tabela 7.20. Rendimento do Planeamento 2^2	125
Tabela 7.21. ANOVA para o Planeamento Factorial Completo 2^2	126
Tabela 7.22. Tabela de inclinação máxima descendente	128
Tabela 7.23. Planeamento Composto Central com pontos axiais	133
Tabela 7.24. ANOVA da tabela 7.21	133
Tabela 7.25. ANOVA do modelo da equação 7.6.....	135
Quadro 7.1. Ponto estacionário do processo	139
Quadro 7.2. Condições de operação do processo.....	142
Tabela 8.1. Característica de Qualidade a estudar	144
Tabela 8.2. Tabela de resultados amostrais.....	144
Tabela 8.3. Médias amostrais.....	145
Tabela 8.4. Limites das Cartas de controlo	145
Quadro 8.1. Variável-resposta “QQ”	147
Quadro 8.2. Variável-resposta “QR”	147

Lista de abreviaturas e símbolos

Anova: Analysis of variance (Análise da Variância)

SEIS: Indústria de refrigerantes

S/N: relação sinal ruído

DOE: Desenho de Experiências

μ : média dos resultados

ε : erro experimental

MRS: Metodologia de Superfície de Resposta

LIC: Limite inferior de controlo estatístico

LC: linha central

LSC: Limite superior de controlo estatístico

SPSS: **S**tatistical **P**ackage for the **S**ocial **S**ciences (Software Estatístico)

CCD: Desenho Composto Central (Central Composite Design)

CEQ: Controlo Estatístico da Qualidade

PPF: Planos Fraccionários Fraccionais.

ELC: Electrical Communication Laboratories.

JUSE: União Japonesa de Cientistas e Engenheiros.

TQM: Gestão de Qualidade Total.

A_2, A_3 : Factores para construção das cartas de controlo de variáveis.

ARL: “Average Run Length”: é uma medida de equilíbrio do erro de Tipo I, que representa o controlo excessivo ou alarme falso ou então do erro de Tipo II, que é o controlo inadequado.

PAA: Plano de Amostragem por Aceitação.

B_3, B_4, B_5, B_6 : Factores para a construção das cartas de controlo de variáveis

c_4 : Factor para a construção das cartas de controlo de variáveis

D_3, D_4 : Factores para a construção das cartas de controlo de variáveis

d_2, d_3 : Factores para a construção das cartas de controlo de variáveis

$F_{1,v}$: Função da Distribuição de Fisher com 1 e graus de liberdade

G_v : Função da Distribuição t-student, com graus de liberdade

MR: Amplitude móvel

m : Número de amostras

n : Dimensão da amostra

n_i : Dimensão da amostra i

S : Desvio padrão amostral

R : Amplitude da amostra

S^2 Variância amostral

\bar{S}^2 : Média das variâncias de amostras

SPC: controlo estatístico do processo

\bar{X} : Média da amostra

$\overline{\bar{X}}$: Média global da amostra

\tilde{X} : Mediana da amostra

$\overline{\tilde{X}}$: Média das medianas

α : Risco do produtor (Erro do tipo I)

β : Risco do consumidor (Erro do tipo II)

μ : Média do processo.

σ^2 : Variância do processo.

μ_ω : Media da estatística ω .

σ_ω : Desvio Padrão da estatística ω .

E_i : Efeito estimado.

N : Número total de observações.

$N(\mu_\omega, \sigma_\omega^2)$: Distribuição Normal.

χ^2 : Quantil 1.

Resumo

O presente trabalho apresenta uma breve revisão e aplicação da metodologia de Planeamento de experiências e Controlo da Qualidade no processo na Indústria. Esta pesquisa incidiu no processo de fabrico de sumo e foram definidas duas variáveis resposta: *a presença de bolhas de ar no interior das embalagens e defeitos da colagem das embalagens*, que são as ocorrências frequentes provocadas por diferentes causas, conhecidas e desconhecidas. O principal objectivo desta pesquisa é a identificação das causas dos defeitos durante o processo de fabrico do produto em estudo e, conseqüentemente procurar a sua diminuição.

Para se atingir o objectivo preconizado, aplicou-se a técnica de planeamento factorial completo 2^k para a identificação dos principais factores que influenciam o processo de produção. De entre os diferentes factores que envolvem o processo, destacam-se a velocidade, a pressão, a temperatura, o tempo e a quantidade.

Identificados os factores, fez-se a optimização do processo para definição dos melhores níveis. Para a primeira variável usou-se a técnica de Planeamento factorial Composto; ao passo que para segunda variável, para além dessa técnica, usou-se ainda a técnica de Planeamento Composto Central. Para verificação dos resultados, usou-se a metodologia de superfície de resposta.

Palavras-chave: Planeamento de experiências, Controlo da qualidade, cartas de controlo, Planeamentos factoriais 2^k , 2^{k-p} , planeamento composto central, metodologia de superfície de resposta.

Summary

In this work a brief revision and an application of Experimental Design and Quality Control methodologies in industry is presented. This research is essentially based in the process of manufacturing juice, and has been defined into two ways.

In the process of manufacturing, the presence of air balls within the packages and general defects of the package, due to unknown causes were detected. The main objective of this research is to identify the causes of such defects during the manufacturing process of the product and consequently to try to minimize them.

In order to achieve this objective, a study has begun with the identification of the main factors that influence the production process. In between the different factors of the production process, speed, pressure and temperature, time and quantity are some of the most prominent factors.

The causes were identified, and complete factorial design 2^k . To verify the results, the methodology of response surface has been used.

Key Words: Experimental Design, Quality Control, Control Charts, factorials design 2^k , fractional factorial designs 2^{k-p} , Central Composite Design, Response Surface methodology.

“Toda a gente é a favor de uma boa Qualidade e é contra a má Qualidade.”

(António R. Pires)

CAPÍTULO I

PLANEAMENTO DE EXPERIÊNCIAS E CONTROLO DA QUALIDADE: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Introdução ao Planeamento de Experiências e ao Controlo da Qualidade

1.1. Evolução histórica

A história relata que o conceito de Qualidade foi sempre essencial ao homem e aplicado de diferentes formas, fazendo parte integrante, de produtos e serviços em geral.

Aspectos relacionados com a normalização e o Controlo da Qualidade constituíram sempre uma preocupação para as antigas grandes civilizações, tais como o Egipto, a antiga Grécia, Roma, Índia, Japão e China, embora nos primórdios mais oculta e na actualidade mais visível (TAVARES, 2001).

Numa perspectiva Social, nas primeiras Comunidades (primitivas) as preocupações com a qualidade também sempre existiram. Neste período as pessoas produziam para o seu consumo próprio e, a qualidade podia ser entendida como produto simples e bom, sobrevivência, abrigo e bem-estar, que eram conseguidas através de uma habilidade própria, muita energia e persistência (PIRES, 2007). No seu meio dominante estiveram sempre presentes os conceitos “Produção e Consumo”, ou seja, existiu sempre o produtor e o consumidor. Estes usavam a sua criatividade para o fabrico de forma artesanal os utensílios de trabalho. Observava-se, entre outras, a preocupação da sua parte para o melhoramento das metodologias de trabalho, em dedicar melhor serviço e procurar formas ou meios adequados para a conservação dos produtos.

A forma da distribuição das tarefas mostra, embora de forma oculta, a busca pela Qualidade, o que aponta que a preocupação com a Qualidade de bens e serviços não é recente. Também nestas Comunidades os consumidores tinham o cuidado de inspeccionar os bens e serviços, embora, esta voltava para o produto acabado, não produzindo assim Qualidade, apenas encontrando produtos defeituosos (ROSE, 1996).

Na perspectiva mais comercial, as preocupações com a qualidade podem encontrar-se nos mais remotos tempos da produção de ferramentas para a satisfação de necessidades individuais (PIRES, 2007).

Maiores necessidades de produção foram conseguidas através da constituição de oficinas de artesãos, onde tipicamente existiam três elementos, ou seja: o mestre da oficina que desempenhava já as tarefas de direcção, o ajudante em que o mestre delegava algumas tarefas, nomeadamente as de verificar o trabalho do terceiro elemento, o aprendiz (PIRES, 2007).

Muitas das funções que hoje podemos identificar numa empresa moderna, anteriormente estavam concentradas na figura do artesão, que prevaleceu nos primeiros aglomerados populacionais durante muito tempo, assumindo um papel importante. Este não só identificava as necessidades dos clientes, como também ele próprio executava as tarefas inerentes às actividades produtivas. Concebia o produto, fabricava-o, vendia-o e prestava assistência após venda (PIRES, 2007). Com a Revolução Industrial desencadeada na Europa no séc. XVIII, surgem as primeiras fábricas que rapidamente ultrapassam as unidades artesanais. Iniciou-se uma nova era nos serviços artesanais, que exigia mais rigor e Qualidade. Esta revolução industrial, veio incorporar na indústria, em rápido crescimento, grandes quantidades de artesãos, bem como camponeses sem grande instrução, sem mínimo treino para as actividades fabris, começassem a desempenhar as funções de trabalhadores fabris (MONTGOMERY, 2009).

Dada a incapacidade de colaborarem minimamente na organização do seu próprio trabalho, devido a falta de instrução, as ordens e instruções tinham de ser forçosamente simples e fáceis de entender e executar (PIRES, 2007).

A produção em massa no fim do séc. XIX permitiu a colocação no mercado de produtos à preços mais baixos, alargando a sua acessibilidade aos vários estratos Sociais (MONTGOMERY, 2009). Este fenómeno contribuiu para um aumento substancial de procura e criou a necessidade de melhorar a capacidade de resposta e eficiência da produção. Ainda face à produção em massa e, uma vez que as unidades fabris se

confrontavam com o problema de baixa produção, Frederick W. Taylor introduziu alguns princípios de gestão científica de modo que o produto pudesse ser fabricado facilmente, o que levou a melhorar de forma substancial a produtividade (PEREIRA e REQUEIJO, 2008). Com a separação das tarefas de Planeamento e Controlo das tarefas de execução conseguiu grandes resultados, principalmente ao nível da produtividade (PIRES, 2007).

Na longa história da aplicação de métodos estatísticos para melhoria da Qualidade, que consistia em controlar a Qualidade durante a produção, os trabalhos desenvolvidos por Walter A. Shewhart em 1924, sobre as cartas de Controlo, assumem um papel de relevo.

Nesta mesma época ainda, Harold F. Dodge e Harry G. Romig desenvolvem a Amostragem de Aceitação, como alternativa à inspeção a 100%, a qual consiste na inspeção e classificação de uma amostra de unidades seleccionadas aleatoriamente de um lote maior (MONTGOMERY, 2009).

Nos anos 50, foram introduzidos pela primeira vez nos Estados Unidos os métodos de Planeamento de Experiências para produtos e processos, sendo que as aplicações iniciais ocorreram na indústria química. Mas a semente deste método estatístico foi lançada antes por Ronald A. Fisher que começou a desenvolver na Agricultural Experimental Station de Rothmasted, em Inglaterra, toda uma teoria científica de experimentação com aplicação prática na área agrícola (OLIVEIRA, T., 2004). Fisher durante muitos anos foi responsável pela estatística e análise de dados na Estação Agrícola Experimental em Londres – Inglaterra. Podem ainda ser citadas, diversas individualidades famosas que contribuíram durante esses anos para os vários desenvolvimentos, entre outros, F. Yates, L. Tippett, E. Person, D. J. Fineey, C. Rao, G. Snedecor, W. Cochran, M. Bartlett, J. Tukey, H. Scheffé, D. R. Cox e George Box (PEREIRA e REQUEIJO, 2008).

A aplicação do Planeamento de Experiências melhorou a capacidade de produção e o desempenho industrial permitindo atingir menor custo e menor tempo de desenvolvimento do produto. Este método é uma técnica estatística utilizada na análise dos problemas de qualidade e da melhoria contínua do desempenho de qualquer processo

produtivo. O seu surgimento tornou mais eficiente e vigilante o processo de fabricação e o Controlo da Qualidade.

Nas últimas décadas a Qualidade nas indústrias tem vindo a converter-se num factor de competitividade e ano pós ano os clientes vão exigindo níveis de qualidade crescentes. Para responder a essa exigência, as indústrias utilizam técnicas que realmente ajudam a Qualidade a aproximar-se da Excelência. Uma das técnicas mais usuais na engenharia da Qualidade é a técnica desenvolvida pelo Genichi Taguchi no Japão durante as décadas de 60 e 70, conhecida vulgarmente como método de Taguchi (Wu, A.; Wu, Y. 1997). Este método permitiu a indústria Japonesa dar um passo gigantesco e conduziu em muitos aspectos a indústria ocidental, com maior destaque em sectores como o sector automóvel, a electrónica e a informática. As técnicas de Planeamento de Experiências e Controlo de Qualidade revelam-se ferramentas intimamente correlacionadas e imprescindíveis.

As empresas no Sector industrial fazem experiências na aplicação destas técnicas, o que mostra a confiança e a vantagem da aplicação deste método, que se vê reflectida nos benefícios palpáveis que se obtêm pela sua utilização. O Planeamento de Experiências tem seguido também uma evolução para adequar-se às exigências da gestão da Qualidade total nos actuais seus conceitos.

Na actualidade o Planeamento de Experiências é aplicado em vários domínios, com maior destaque para agricultura, a engenharia, a física, a química, a sociologia, a psicologia, a medicina, a biologia, genética, etc. (OLIVEIRA, T., 2004)

O processo de produção nas indústrias envolve muitos custos e dispêndio de tempo, sendo imprescindível a utilização de métodos ou técnicas estatísticas de optimização de custos e recursos.

Neste trabalho investigaremos, entre outras coisas, como a aplicação do Planeamento de Experiências pode permitir a sistematização de experiências, a redução do tempo e minimização de custos.

O primeiro capítulo aborda a evolução do conceito “Qualidade” em diferentes fases e o contributo dado por diferentes pesquisadores e instituições, na metodologia de planeamento de experiências até à actualidade. O segundo e terceiro capítulos fazem uma abordagem das diferentes técnicas de planeamento de experiências desenvolvidas pelo Genichi Taguchi e o contributo dado por outros estudiosos. O quarto capítulo faz uma abordagem do controlo estatístico de processo através da aplicação das cartas de controlo.

O quinto, sexto, sétimo e o oitavo capítulos apresentam detalhadamente uma aplicação da metodologia do planeamento de experiências para o estudo das duas variáveis resposta e a aplicação das cartas de controlo para o estudo das características de qualidade relacionadas a estas mesmas variáveis resposta. Finalmente no último capítulo são apresentadas as conclusões, tecidas as considerações finais e apresentadas perspectivas de investigação futura.

1.1.1. Perspectiva histórica

Como já foi anteriormente referido, a história vem demonstrando ao longo dos tempos a necessidade da aplicação dos conceitos estatísticos para o melhoramento da Qualidade nas indústrias.

Durante a 1ª Guerra mundial, as falhas ocorridas no equipamento militar deram origem a estudos que tinham como objectivo determinar as respectivas causas. Um dos problemas detectados foi a falta de cumprimento das especificações, assumindo a função de inspecção um papel ainda mais crucial por ter de garantir que o material militar fora de especificação não podia ser usado. Isto originou Departamentos gigantescos de inspecção em várias unidades fabris, caracterizando a fase da Qualidade conhecida por Inspeção (PEREIRA e REQUEIJO, 2008).

Desde 1940 foram introduzidos diversos conceitos estatísticos, que têm sido úteis à engenharia no campo da melhoria da Qualidade.

Taguchi destaca-se com aplicação de matrizes ortogonais no Planeamento de Experiências e o fraccionamento destas matrizes, fruto da sua inspiração aos Planos Factoriais Fraccionados (*PFF*). Estes Planos Factoriais Fraccionados (*PFF*) permitem reduzir substancialmente o número de experiências a executar sem grande perda de informação. A implementação adequada desta metodologia permite um melhor conhecimento das variáveis e dos factores que influenciam significativamente um processo, possibilitando a identificação dos níveis destes factores, que conduzem a um comportamento próximo do objectivo que se pretende atingir.

Com o aproximar da 2ª Guerra Mundial, intensifica-se a necessidade de garantir a segurança e uniformidade dos equipamentos, o que originou a implementação de procedimentos que conduzissem a aumentos de produtividade. No entanto, na maioria das empresas, a Qualidade resumia-se praticamente à Inspeção, embora algumas empresas americanas começassem nesta altura a utilizar as Cartas de Controlo.

Com o término da 2ª Guerra Mundial, as forças aliadas para melhorar o sistema de comunicação, propuseram aos japoneses a criação de um Centro de Investigação semelhante aos Laboratórios de Bell nos EUA. Fundou-se assim o ELC (*Electrical Communication Laboratories*) sendo Taguchi o responsável da produção e da Qualidade. Taguchi constatou que existiam muitos recursos despendidos na engenharia de experiências e na fase de testes, mas que pouca ênfase era colocada na sistematização e melhoria dessas fases.

Taguchi começou a desenvolver novos métodos para optimização dos processos de engenharia de experiências e desde então muitos fabricantes japoneses começaram a fazer o uso dos seus métodos para melhorar a Qualidade do produto e processo com grande sucesso. Este método conseguiu transformar significativamente a engenharia de Qualidade nos EUA. O método consiste em desenhar e parametrizar a Qualidade de um produto ou processo com base no Planeamento de Experiências, enquanto que as outras práticas coincidem apenas à inspeção final do produto.

Em 1946 forma-se a Japanese Union of Scientists and Engineers (JUSE) (União Japonesa de Cientistas e Engenheiros). A JUSE ciente dos desenvolvimentos da Qualidade nos EUA, contactou Edwards Deming e Joseph Juran a fim de convidá-los a ministrar seminários aos engenheiros e gerentes industriais sobre Controlo Estatístico de Qualidade para indústria japonesa (PEREIRA e REQUEIJO, 2008). Estes seminários influenciaram positivamente as empresas Japonesas, as quais começaram a incorporar os princípios de Qualidade em todos os níveis da Organização o que conduziu a melhorias notáveis na Qualidade e no custo de produtos que rapidamente se tornaram competitivos.

Esta garantia da Qualidade consistia no Planeamento e execução de acções que garantissem a confiança na produção de bens e serviços de acordo com as exigências dos clientes.

De forma a garantir a fidelidade dos seus clientes, as empresas apostavam mais na satisfação das necessidades e exigências do consumidor, levando a tornarem-se cada vez mais flexíveis para a constante mudança de produtos. Este anseio pelo alcance da excelência levou as organizações a adoptar a filosofia da Gestão pela Qualidade Total (TQM – *Total Quality Management*).

Edwards Deming propôs ainda o ciclo PDCA (plan-Do-Check-Act, Planear-Desenvolver/Executar-Controlar/Verificar-Actuar) que é evidentemente uma das metodologias mais conhecidas e valiosas para a obtenção da melhoria contínua (PEREIRA e REQUEIJO, 2008).

Em 1950 e 1951, o professor Kaoru Ishikawa introduziu a técnica de diagrama causa-e-efeito, que procurava relacionar graficamente as causas com os efeitos que as mesmas produzem. De referir que este Diagrama embora de extrema utilidade, apenas permite selecção qualitativa das causas que podem provocar determinado efeito baseado nos juízos feitos pelos investigadores. Para determinar de forma quantitativa se as mesmas estão a ter um efeito verdadeiramente significativo, no sentido estatístico, deve recorrer-se as técnicas como o Planeamento de Experiências. Ishikawa acentuou os aspectos do trabalho em grupo e as ferramentas que lhe estão associadas (PIRES, 2007)

Em 1951 Feigenbaum publica a primeira edição de seu livro Total Quality Control (Controlo Estatístico de Qualidade) onde introduziu o conceito de Controlo de Qualidade Total, que consiste num sistema de controlo do processo de produção, com objectivo de fornecer produto e serviço que satisfaça plenamente o cliente ao menor custo e com maior Qualidade. Este conceito defendia o lema de “fazer bem à primeira”, ou seja, a Qualidade só seria possível se a preocupação com a mesma começasse na fase da concepção e desenvolvimento de produtos e processos. No entanto, todos os Departamentos da empresa estavam responsáveis pela qualidade não sendo desta forma imputado exclusivamente ao Departamento da Qualidade (PEREIRA e REQUEIJO, 2008).

Neste ano também, a JUSE instituiu o Prémio Deming, tanto para individualidades que se distinguiram na área da Qualidade, como para as empresas que se destacassem na implementação dos métodos e técnicas de Qualidade (MONTGOMERY, 2009). Esta iniciativa foi também um dos factores que contribuiu bastante o aumento da motivação das empresas para o melhoramento do seu nível de desempenho. Destacam-se ainda Box e Wilson com a publicação do trabalho fundamental sobre o uso de Planeamento de Experiências e a metodologia de superfície de resposta para optimização do processo, com foco na indústria química.

Em 1984 a American Statistical Association (ASA – Sociedade Americana de Estatística) estabelece o Ad Hoc Committee on Quality and Productivity (Comité Ad Hoc sobre Qualidade e Produtividade) e em 1988 o Congresso americano instituiu o Prémio Malcolm Baldrige National Quality Award nos EUA, o que também contribuiu para mais ampla disseminação dos conceitos da Gestão pela Qualidade Total no seio das organizações norte-americanas (MONTGOMERY, 2009).

Ainda em 1988 foi fundada a EFQM (European Foundation for Quality Management) que em 1991 desenvolveu um modelo europeu bastante semelhante ao modelo de atribuição do Prémio Deming e ao Malcolm Baldrige National Quality Award.

Em 1989 surge a revista Quality Engineering (Engenharia da Qualidade) e coincide com a iniciativa Seis-sigma da Motorola. A Motorola recolheu os frutos do investimento

na metodologia 6 Sigma, vencendo o Malcolm Baldrige National Quality Award. Reconhecidos os resultados desta metodologia, a Motorola começou a ensiná-la aos seus colaboradores, treinando-os para a integração nas suas várias fábricas espalhadas pelo mundo. Foi desta forma que em 1992 esta organização certificou o primeiro Black Belt (BAIRRÃO, 2010).

Juran popularizou a “aptidão ao uso” (Juran, J. M. and Gryna, F. M. 1988).

Crosby assentou os aspectos ligados à “conformidade”, “qualidade não custa nada” e “zero defeitos” (Crosby, A. W., 2003).

Ohno criou o conceito de JIT (*Just In Time*). As suas técnicas de produção foram a base do que hoje se chama *produção magra* “*lean production*” (Ohno, T, 1977).

Os Japoneses conseguiram impor-se no mercado internacional no princípio da década 70, devido à Qualidade e preços competitivos dos seus produtos, ultrapassando mesmo, no final da década, a Qualidade dos produtos dos EUA e de outros países ocidentais (PEREIRA e REQUEIJO 2008).

Outras figuras ainda que se destacaram nas últimas décadas nesta matéria são o Box e Montgomery, que tem contribuído com as suas obras para uma ampla difusão do Planeamento de Experiências e de outros métodos estatísticos usados no Planeamento, no Controlo e na melhoria contínua da Qualidade.

Weibull e Epstein ficarão sempre associados à fiabilidade (Pires, 2007).

Roming e Dodge ficarão associados ao controlo por amostragem (Caravantes, 2000).

Garvin, Parassamaru estão associados à estruturação de conceitos na área da qualidade de serviços (Pires, 2007).

MONTGOMERY (2009) define a Qualidade como adequação ao uso. Considera ainda dois aspectos gerais da adequação ao uso: a qualidade de projecto e qualidade de

ajustamento. Salieta ainda que a Qualidade é inversamente proporcional à variabilidade, ou seja, se a variedade nas características importantes de um produto decresce, a qualidade do produto aumenta.

A evolução dos conceitos pode ser esquematicamente resumida na seguinte sequência (segundo Pires, 2007):

- Inspeção: actividades de medição, comparação, verificação.
- Controlo da qualidade: actividades que se centram na monitorização, nomeadamente na análise dos desvios e reposição dos parâmetros dos processos nas condições desejadas.
- Garantia da qualidade: actividades planeadas e sistemáticas que de uma forma integrada podem garantir que a qualidade desejada está a ser alcançada.
- Qualidade total: cultura de empresa capaz de assegurar a satisfação dos clientes.

A evolução dos conceitos de qualidade tem estado ainda muito referenciada ao entendimento de alguns autores e, essencialmente, na ênfase que colocam em aspectos particularmente importantes da qualidade.

A engenharia de Qualidade é um termo geral que pode ser interpretado de uma maneira diferente de acordo a cada profissional. Taguchi define-a como uma série de abordagens para prever e evitar dificuldades que possam ocorrer no mercado depois da venda e consumo pelo cliente.

Taguchi define duas áreas em engenharia de Qualidade:

1. *Off-line* (fora da linha): Aplicada na investigação e desenvolvimento de produtos e processos. A sua aplicação é realizada recorrendo a uma pequena amostra

proveniente de uma fase experimental, que tem níveis de Qualidade com uma variância elevada quando comparada com as peças já obtidas em linha de produção.

2. *On-line* (na linha): Aplicada durante a produção.

Nos anos 50, Taguchi começou a utilizar o conceito Sinal-Ruido para avaliar a Qualidade de sistemas de medida posto que um sistema de comunicação poderia ser considerado como instrumento de medida. Posteriormente indicou que o mesmo conceito e aproximação poderiam utilizar-se para medir a Qualidade das funções de um produto, (MARUZEN, 1958). A utilização deste conceito estende-se a partir do campo original da aplicação e introduz-se em várias indústrias para a medida de Qualidade de produtos. Na engenharia de Qualidade, Taguchi usa o conceito de relação Sinal-Ruido para avaliar a Qualidade de um produto ou de um processo de fabricação (Wu, A.; Wu, Y. 1997).

Há três etapas na optimização de produtos ou processos:

1. Desenho de Sistema;
2. Desenho de Parâmetros;
3. Desenho de Tolerâncias.

O *Desenho de Sistema*: consiste na criação de um novo sistema, utilização de conhecimentos científicos e tecnológicos para determinar a combinação correcta dos factores (ROSS, 1991). É um sistema que requer criatividade e inovação.

Desenho de Parâmetros: realiza-se com propósito de tornar um sistema robusto com múltiplos factores na fabricação e durante o uso. Neste Sistema, Taguchi propõe um método sistemático e eficiente para determinar os melhores parâmetros, objectivando desempenho e custo optimizados e seleccionando a melhor combinação de parâmetros de controlo de forma a tornar o processo robusto em relação aos factores de ruído (TAGUCHI, 1986).

Desenho de Tolerâncias: consiste em análise de Tolerâncias do processo bem como as fontes de variação de Qualidade. Usa-se o Desenho de Tolerâncias para ajustar as

Tolerâncias dos factores que têm maior influência na variação, se os valores - alvos da Qualidade não forem atingidos.

1.2. Generalidades

Planeamento de Experiências consiste num conjunto de procedimentos nos quais se efectuam propositadamente alterações de certas variáveis ou parâmetros do processo (os factores) para observar as mudanças que ocorrem, numa ou mais características de unidade experimental, procurando identificar as respectivas causas.

Nos procedimentos da experiência é inevitável cometer erros, resultados de diferentes causas, como por exemplo a variabilidade do material a ser testado, as condições do meio onde são realizados os testes ou as falhas nos equipamentos (OLIVEIRA, T. 2004). O Planeamento de Experiências é aplicado às variadas actividades científicas e industriais visando a redução de custo e também da ocorrência de erros durante a fase de testes.

O Planeamento de Experiências é uma das técnicas que actualmente vem sendo usada em grande escala. Através dela, pesquisadores podem determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, tendo como resultado:

- Redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos;
- Redução do tempo do processo;
- Redução do custo operacional;
- Melhoria do rendimento do processo.

Para que os resultados obtidos de ensaios experimentais possam ser analisados através de métodos estatísticos, de forma a chegar-se a conclusões objectivas, o Planeamento de

Experiências deve ser baseado numa metodologia também estatística, que é a única forma objectiva de avaliar os erros experimentais que afectam esses resultados.

O Planeamento de Experiências assume um papel crucial na redução sistemática da variabilidade e conseqüente melhoria contínua de desempenho de produtos, permitindo ainda identificar quais os factores controláveis que afectam determinadas características de Qualidade e quais os melhores níveis desses factores, de forma a aumentar a resistência do produto aos factores de ruído.

O Planeamento de Experiências permite ainda reduzir substancialmente o número de experiências a executar sem grande perda de informação.

Os três princípios básicos de um Planeamento de Experiências são:

- Réplica;
- Aleatoriedade;
- Partição em Blocos.

Réplica: consiste na execução de um mesmo teste por mais de uma vez sob condições preestabelecidas. Fazer uma Experiência com réplicas é importante por dois motivos: Por um lado, pelo facto de permitir a obtenção da estimativa do erro experimental. A estimativa desse erro é básica para verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente diferentes. Por outro lado, se a média de uma amostra for usada para estimar o efeito de um factor, a replicação permite a obtenção de uma estimativa mais precisa desse factor (OLIVEIRA, T, 2004).

Aleatoriedade: é uma técnica de Planeamento Experimental puramente estatística, em que a sequência das experiências é aleatória e a escolha dos materiais que serão utilizados também é aleatória. Uma das exigências do uso da metodologia estatística para o Planeamento Experimental e para a análise dos resultados é que as variáveis estudadas e os erros experimentais observados apresentem um carácter aleatório, o que é conseguido pelo emprego desta técnica.

Partição em Blocos: é uma técnica muito importante utilizada nas indústrias, que tem por objectivo o aumento da precisão. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar sistematicamente a variabilidade resultante da presença de factores que perturbam o sistema, mas que não se tem interesse em estudá-los.

Qualquer Planeamento de Experiências requer, antes da sua execução uma abordagem sistemática para que a sua aplicação conduza à resultados satisfatórios. Embora não exista uma sistematização fixa, genericamente, tal abordagem deve incluir os pontos destacados no seguinte fluxograma.

Diagrama: sistemática de Planeamento de Experiências.

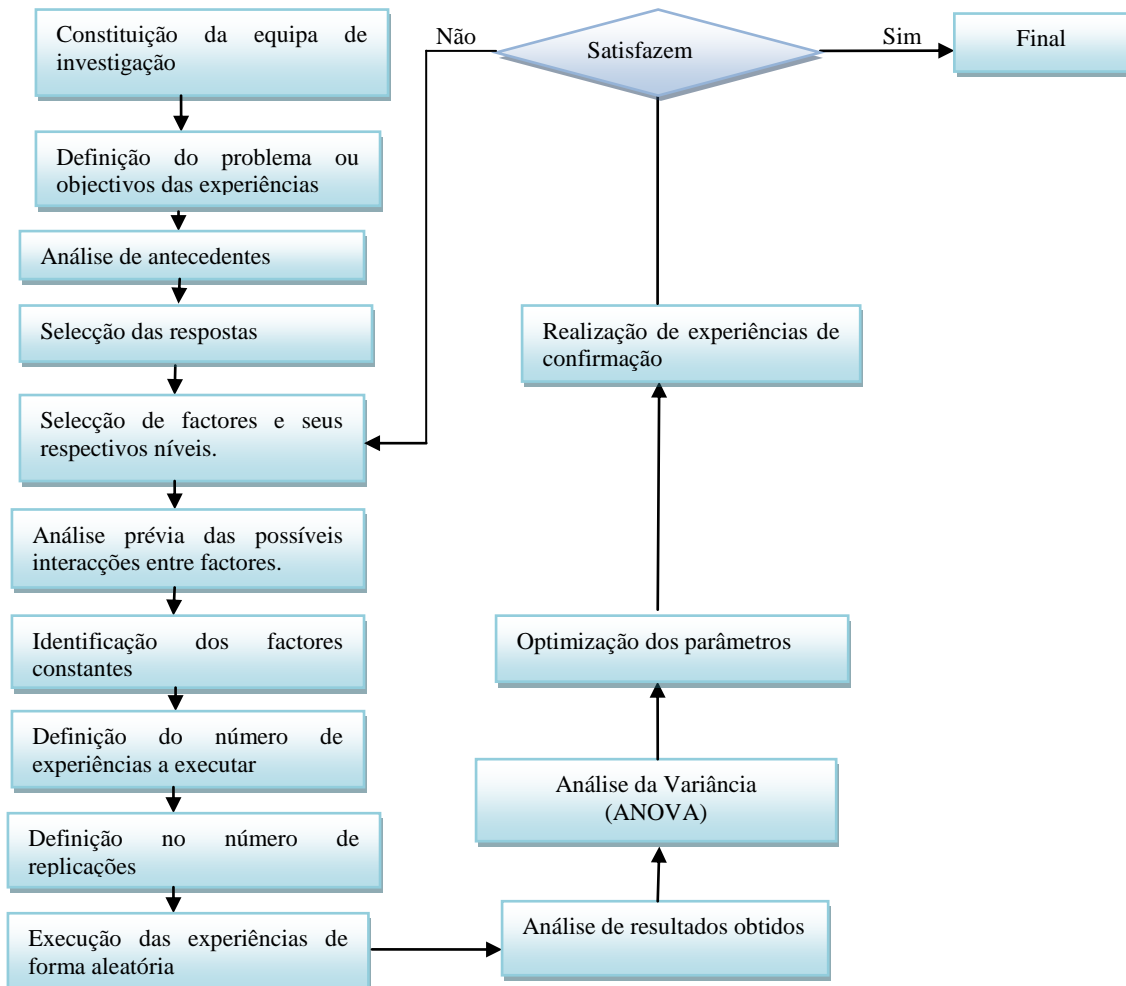


Figura 1.1. Abordagem sistemática para execução do DOE (Adaptação: PEREIRA & REQUEIJO, 2008)

No primeiro passo, embora o Planeamento de Experiências possa ser aplicado por uma só pessoa, em casos industriais é conveniente que a metodologia seja aplicada por uma equipa formada por elementos pertencentes a áreas relacionadas com o problema em estudo. No terceiro passo, dá-se exemplo de dados recolhidos diariamente na linha de produção, experiências executadas anteriormente e a opinião dos especialistas envolvidos no processo. Após isso, segue a fase da determinação da resposta a ser otimizada. A resposta pode ser entendida como uma variável dependente, cujo valor é afectado por factores ou parâmetros do processo que funcionam como variáveis independentes. Após a escolha da resposta a utilizar, é necessário decidir que característica de Qualidade melhor se adapta à resposta escolhida ao estudo em causa.

Depois da escolha da resposta, segue-se o passo da identificação dos factores que possam ter impacto negativo no rendimento ou Qualidade do sistema. Segundo TAGUCHI (1990), os factores de ruído, que na linha de produção, não são controláveis ou são muito difíceis de controlar, têm obrigatoriamente de ser simulados e controlados durante a execução das experiências. Sempre que a inclusão dos factores de ruído seja difícil ou dispendiosa, aconselha-se replicação das experiências (PEREIRA e REQUEIJO, 2008).

Existem três tipos de ruído:

- *Ruído externo*: são os relacionados com os factores ambientais, tais como, a temperatura, a humidade, etc.
- *Ruído interno*: são os que causam variação no interior do produto e se caracterizam por mudanças que o produto ou o processo sofrem com o tempo, tais como, desgaste de componentes, fadiga, etc.
- *Ruído peça a peça*: são diferenças entre produtos individuais devido a imperfeições no processo de fabrico.

Partindo de que a aplicação adequada do Planeamento de Experiências contribui para o “*Fazer-bem-à-primeira*”, o Controlo deve começar com a identificação das necessidades do cliente ou consumidor e em função a essas, realizar uma selecção

adequada dos integrantes da equipa de investigação, da matéria-prima e factores de Controlo, entre outros.

Em TAGUCHI, *et al.* (1990) os autores afirmam que “A Qualidade de um produto determina-se pela perda económica imposta à sociedade a partir do momento em que o produto está pronto para ser distribuído”. Isto quer dizer que o Controlo da Qualidade não acaba com a venda do produto, isto é, no instante em que o produto fica à disposição do consumidor, qualquer alteração nas suas características ou restrições funcionais afectará a sua Qualidade e, isto proporciona prejuízos à Empresas. Para minimizar essa perda, Taguchi considera que é fundamental fabricar um produto que seja insensível a todo e qualquer ruído provocado pelos factores não controláveis que afectam o desempenho do processo.

Após a realização das experiências deve utilizar-se, por princípio, a Análise de Variância para tratamento dos resultados obtidos. A Análise de Variância ou ANOVA (assunto que abordaremos com mais detalhes nos próximos capítulos), permite determinar de forma objectiva quais os factores ou interacções que afectam significativamente as respostas, sendo depois possível determinar a combinação de níveis que conduz à maximização dos objectivos pré-estabelecidos.

Segundo PEREIRA e REQUEIJO (2008), na aplicação do Planeamento de Experiências em contextos empresariais, há três factores que devem ser observados:

- Para que o *DOE* seja bem sucedido, tem de respeitar os passos anteriormente descritos, no que se refere ao Planeamento e Execução das experiências.
- Os Planeamentos Experimentais e respectivas concretizações não têm de ser complexos para serem bem sucedidos. Pelo contrário, desenhos simples mas bem planeados e executados têm conduzido a conclusões extremamente valiosas, por vezes surpreendentes.
- O número de desenhos a utilizar. Ou seja, é muito raro uma só matriz experimental conduza logo a resultados positivos. O correcto é proceder-se à experimentação de

forma iterativa e sequencial, em que os resultados de um conjunto de experiências podem descartar alguns factores ou adicionar outros na fase experimental seguinte.

Produtos e processos exigem que se dê a maior atenção à fase de concepção e desenvolvimento, à semelhança do que é actualmente preconizado pelos defensores da Gestão pela Qualidade Total.

Para minimizar o efeito das fontes de ruído, Taguchi defende uma abordagem integrada para a concepção e desenvolvimento dos produtos e processos robustos que envolvem as fases de concepção do sistema, dos parâmetros e das tolerâncias. A concepção do sistema é o projecto tradicional da engenharia.

1.3. Problemática e objectivos

O processo de produção nas indústrias caracteriza-se com altas perdas quando o índice de defeitos é elevado. Para que o produto corresponda às exigências do cliente, deve, em geral, ser produzido por um processo que seja estável. E o *CEP* bem aplicado fornece significativos retornos às indústrias. De salientar que a sua aplicação não só é feita quando a empresa está com problemas e depois abandonado, mas sim deve tornar-se parte da cultura da organização para a melhoria da Qualidade que se concentra na redução e variabilidade.

O caso prático que se investigará neste trabalho, reflecte no processo de fabrico de sumo MIMO, onde visamos uma aplicação de Planeamento de Experiências e do Controlo da Qualidade, para melhorar a produtividade e a sua Qualidade. Como já foi referido, durante a experiência podem ocorrer erros provocados por diferentes causas, conhecidas ou desconhecidas, sendo fundamental que sejam identificadas de forma profunda as causas da ocorrência destes erros (OLIVERA, T., 2004). O método de Taguchi é uma das ferramentas mais usuais nestes casos, por traduzir-se na redução de custos, de tempo e de número de experiências e ainda por ser uma das ferramentas usuais para estabelecer a

relação entre a causa e o efeito. Por último, iremos propor a aplicação do controlo estatístico de qualidade através da aplicação das Cartas de Controlo de Qualidade e a amostragem por aceitação como alternativa à inspecção a 100%.

Como um dos objectivos propomos investir na aplicação da metodologia do Planeamento de Experiências para melhorar as características de Qualidade dos produtos, reduzir o número de ensaios e otimizar o uso de recursos e custos da Empresa. A este objectivo geral, juntam-se os seguintes objectivos específicos:

1. Permitir uma sistematização, redução do tempo das experiências e normalização das tarefas.
 - 1.1. Definir um procedimento de experiências a fim de permitir a identificação na regulação dos parâmetros mais adequados com uma diminuição do número de testes.
 - 1.2. Reduzir substancialmente o número de testes a executar sem grande perda de informação.
2. Determinar quais os factores controláveis que afectam determinadas características da qualidade e quais os melhores níveis desses factores.

CAPÍTULO II

METODOLOGIA DO PLANEAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIÊNCIAS NA INDÚSTRIA

2. Planeamento de experiências na indústria

2.1. Introdução

Durante o processo de fabricação de produtos nas indústrias existem vários factores e níveis que influenciam as características de Qualidade dos produtos; Com isso, há necessidade de se estudar o efeito destes factores em diferentes níveis e ter-se conhecimento dos que mais afectam o processo, com finalidade de os regular. À medida em que os factores influentes aumentam, também aumenta o número de experiências a executar e, isto torna o processo difícil devido ao elevado custo e dispêndio de tempo, o que leva as empresas à adopção da aplicação de diferentes tipos de Planeamento para evitar os custos.

As Experiências industriais são realizadas em diferentes empresas para a resolução de problemas críticos e evitar a variabilidade durante o processo de fabricação, decidir entre diferentes processos de fabricação diferentes conceitos de produto, entender a influência de determinados factores, etc. O Planeamento de Experiências é uma técnica usada para satisfazer basicamente alguns objectivos, dentre os quais: obter a maior precisão estatística possível na resposta, o que contribui na redução do número de produtos com defeitos e responder a uma série de questões relacionadas aos níveis e parâmetros que influenciam o desempenho do produto final.

A sua aplicação requer antes, conhecimento ou domínio do problema da parte dos pesquisadores envolvidos no estudo. O conhecimento do pesquisador sobre o problema irá permitir a sua melhor aplicação e conseqüentemente a obtenção de resultados satisfatórios (MONTGOMERY, 2009; PEREIRA E REQUEIJO, 2008).

2.2. Alguns Conceitos importantes

Experiência: é um teste no qual se efectuam, propositadamente, alterações de certas variáveis ou parâmetros do processo (os factores) para observar as mudanças que ocorrem numa ou mais características da unidade experimental a entidade na qual são feitas as medições de uma ou mais características.

Factores: são as variáveis que podem assumir vários valores que afectam o resultado da variável Resposta.

Factor controlável: é uma variável cujos valores são alterados pelos investigadores com o intuito de se determinar o efeito numa ou mais respostas. Os valores assumidos designam-se por níveis (ou tratamentos), podendo estes serem qualitativos ou quantitativos.

Efeito de um factor: é a mudança produzida na resposta por uma mudança no nível do factor.

Efeito principal: variação da resposta média causada pela mudança de nível de um factor experimental.

Interacção entre factores: é o que ocorre quando o efeito de um factor depende do nível em que está o outro.

Níveis: são os possíveis valores de cada factor.

Factores primários: são factores que afectam com grande impacto a variável de resposta.

Factores secundários: são factores cujo impacto na variável de resposta não é significante ou não tem interesse em quantificar.

Factor experimental: factor cujo efeito sobre a variável-resposta queremos quantificar, através dos dados experimentais.

Resposta: é o resultado de uma experiência, ou seja, no contexto da Gestão da Qualidade a resposta será a característica da Qualidade em que os investigadores estão interessados em otimizar. Nota-se que numa mesma experiência, podem ser medidas várias respostas da unidade experimental.

Replicação: é a repetição de uma experiência ou ensaio sob condições análogas.

Variável: é o resultado de um ensaio que geralmente é usado para medir o desempenho do sistema.

Variável-resposta: variável aleatória associada ao produto ou processo sob estudo, cujo desempenho queremos melhorar.

Factor de controlo: é o factor experimental cujo ajuste (mudança de nível) não afecta ou tem mínimo impacto no custo unitário de fabricação (custo unitário totalmente variável).

Factor de ruído: é o factor associado ao ambiente de fabricação ou de uso, cujo ajuste pelo fabricante é impossível ou que implica aumento considerável do custo unitário de fabrico.

Factor aninhado: é o factor de controlo que só existe ou se define dentro de um determinado nível de outro factor de controlo.

Relação sinal/ruído: É um indicador relativo do nível de robustez do produto/processo sob estudo.

Tratamento: é uma dada combinação de níveis dos factores de controlo e ruído, correspondente a uma experiência.

Erro experimental: é a incerteza associada ao valor da resposta e atribuída a factores externos, distintos aos factores de controlo.

Aleatorização: é uma técnica do *DOE* clássico cujo objectivo é “espalhar” o erro experimental ao acaso entre as várias rodadas ou “tratamentos” da observação (isto é, diferentes combinações dos factores e eventuais repetições das mesmas).

Partição em Blocos: variação controlada de um factor externo (distinto dos factores de controlo), cujo nível é mantido constante dentro de cada “bloco” (determinado número de rodadas ou tratamentos).

Planeamento factorial completo: são experiências em que cujos tratamentos cobrem todas as possíveis combinações dos níveis dos factores.

Planeamento factorial fraccionado: são experiências em que cujos tratamentos cobrem apenas uma fracção (matematicamente seleccionada) dentre as possíveis combinações de níveis dos factores experimentais.

Micrometro: é uma unidade de comprimento do Sistema Internacional de Unidades.

Pasteurização: é uma técnica de esterilização.

Caldeira é um recipiente metálico que tem a função de produzir o vapor através do aquecimento da água.

Ácido cítrico: é um ácido orgânico que é usado como conservante natural de alimentos e de bebidas.

Ácido ascórbico: é a denominada vitamina C.

Esterilização: é o processo de destruição de todas as formas de microorganismos, como bactérias, para um aceitável nível de segurança.

2.3. Metodologias de Planeamento e Experiências na Indústria.

Uma das formas de se alcançar as características de competitividade ou factores críticos e atender as necessidades dos consumidores é aplicação da metodologia de Planeamento de Experiências durante o desenvolvimento do processo de fabricação (MONTGOMERY, 2009).

Os conceitos de Planeamento de Experiências são usados pelas indústrias que buscam melhorar a Qualidade dos produtos de forma contínua para o asseguramento da satisfação dos clientes (PEREIRA & REQUEIJO, 2008). Diversas técnicas de Planeamento de experiências são usadas para a busca e asseguramento da Qualidade. Neste trabalho, destacar-se-ão dentre outras, as técnicas de Planeamento Factorial Completo 2^k e a de Planeamento Composto Central, devido a sua ampla aplicação na solução de diferentes problemas industriais.

Quando uma equipa de investigação pretenda estudar um número elevado de factores, mas que não haja recursos suficientes para suportar os custos e, isto lhes leva a decidir em realizar apenas uma fracção dessas experiências, a técnica de 2^{k-p} tem sido geralmente o recurso.

Para evitar que no fim do estudo se tirem conclusões erradas, antes da aplicação técnica na fase dos testes, exige-se que se conheça a fundo o problema em estudo, por todos elementos envolvidos na pesquisa, de forma a garantir que tudo seja feito em concordância com o planeado (Secção 1.2). Com esta técnica procura-se obter a maior precisão das conclusões tiradas a partir da análise de resultados.

2.4. Análise de variância

Após a realização dos ensaios, deve-se utilizar, por princípio, a análise de variância para a comparação dos resultados obtidos. Análise de variância é uma técnica estatística

que permite determinar de forma objectiva quais os factores ou interacções afectam significativamente as respostas.

2.5. Planeamento Factorial Completo 2^k .

O Planeamento Factorial Completo é uma técnica bastante utilizada quando se tem dois ou mais factores, devido a sua vantagem de permitir uma combinação de todos os factores em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise de um factor sujeito a todas as combinações dos demais.

Esses Planeamentos são extremamente úteis para medir os efeitos (ou influências) de uma ou mais variáveis na resposta de um processo. O usual é usar um Planeamento com dois níveis ou no máximo três. Neste trabalho trataremos o caso de factorial com dois níveis. A representação do Planeamento Factorial com dois níveis é 2^k , onde 2 significa o número de níveis e k o número de factores.

O processo experimental desta técnica consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para em seguida, determinar e interpretar os efeitos principais e de interacção dos factores investigados e desta forma, poder identificar as melhores condições experimentais do produto ou processo de fabricação.

Para ilustrar o procedimento desta técnica, considera-se um ensaio com três factores (x_1 , x_2 e x_3), cada um destes parâmetros será testado com dois níveis alto (+1) e baixo (-1). Este exemplo é apresentado por vários autores que estudam as técnicas de planeamento de experiências.

A matriz de Planeamento para o Experimento Factorial Completo 2^3 é representada na tabela 2.1. A resposta de cada ensaio ou tratamento é descrita pela coluna Y_i . A ordem da realização do ensaio é definida de forma aleatória. Temos um Planeamento Factorial Completo, onde são realizadas oito experiências com 7 graus de liberdade.

Tabela 2.1. Matriz dum planeamento factorial completo 2^3

Número de Testes	Factores de Controlo			Ordem do teste	Resposta do (Y_i)
	A	B	C		
1	- 1	-1	-1	6	Y_1
2	+1	-1	-1	8	Y_2
3	- 1	+1	-1	1	Y_3
4	+1	+1	-1	2	Y_4
5	- 1	-1	+1	5	Y_5
6	+1	-1	+1	3	Y_6
7	-1	+1	+1	4	Y_7
8	+1	+1	+1	7	Y_8

2.6. Procedimento para a construção de uma matriz do Planeamento Factorial Completo 2^k .

Na matriz de Planeamento as colunas representam um conjunto de factores investigados ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_K$) e as linhas representam os diferentes níveis ou as combinações (ensaios que devem ser realizados) variando os níveis dos factores em valor alto (+1) e baixo (-1).

1. Para X_1 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, +1, -1, +1, ..., ou seja, o sinal desta coluna alterna em grupos de $2^0 = 1$.
2. Para X_2 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1, ..., o sinal desta coluna alterna em grupos de $2^1 = 2$.
3. Para X_3 , a coluna será definida pela combinação dos níveis -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, ..., o sinal desta coluna alterna em grupos de $2^2 = 4$.
4. Para X_4 , a coluna será definida pela combinação de níveis -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, +1, +1, +1, +1, ..., onde tem-se o sinal alternando em grupos de oito $2^3 = 8$.

5. O procedimento será igual para X_5, X_6, \dots, X_k . Para X_k o sinal alterna em grupos de $2^{(k-1)}$, ou seja $2^{(k-1)}$ vezes (-1) seguido de $2^{(k-1)}$ vezes (+1).

Esta forma de organizar o ensaio é chamada de ordem padrão (*standard order*). Neste arranjo, todas as colunas da matriz são ortogonais entre si. Com este tipo de Planeamento é possível determinar os efeitos principais e de interacção que as variáveis independentes (factores) produzam nas respostas.

O modelo estatístico do ensaio factorial 2^3 é dado pela equação:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta_{ij}) + (\tau\gamma_{ik}) + (\beta\gamma_{jk}) + (\tau\beta\gamma_{ijk}) + \varepsilon_{ijk}, \quad (2.1)$$

Onde:

μ : média dos resultados,

τ_i : efeito principal do factor x_1 ,

β_j : efeito principal do factor x_2

γ_k : efeito principal do factor x_3

$\tau\beta_{ij}$: efeito de interacção entre os factores x_1 e x_2 .

$\tau\gamma_{ik}$: efeito de interacção entre os factores x_1 e x_3 .

$\beta\gamma_{jk}$: efeito de interacção entre os factores x_2 e x_3 .

$\tau\beta\gamma_{ijk}$: efeito de interacção entre os factores x_1, x_2 e x_3 .

ε_{ijk} : o erro experimental.

O método generalizado que pode ser utilizado para estimar os efeitos principais e de interacção dos factores é apresentado a seguir, de acordo o descrito por MONTGOMERY (1991).

Quando o nível de um determinado factor é alterado de (-1) para (+1) e os demais factores são conservados constantes, a mudança da resposta média observada corresponde

aos efeitos principais. O procedimento consiste em multiplicar os resultados da coluna y_i pelos valores ± 1 associados a coluna x_i , da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja estimar (tabela 2.2). De seguida, os valores obtidos devem ser somados e divididos pela metade do número de testes realizados, conforme se ilustra na equação 2.2.

$$E_i = \frac{\sum y_i * x_i}{(N / 2)} \quad (2.2)$$

Onde E_i é o efeito estimado, N é o número total de observações, $\sum y_i * x_i$ é a soma dos resultados y_i do ensaio multiplicados pela coluna x_i .

Para determinar o efeito da interacção, primeiro devem ser construídas as colunas das interacções da matriz do Planeamento. Estas colunas são formadas por meio da multiplicação das colunas dos efeitos principais.

Exemplo: Para estimar o efeito de interacção E_{12} , serão multiplicadas as colunas dos factores x_1 e x_2 . Em seguida, os valores ± 1 associados a coluna x_1x_2 da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito de interacção, de acordo como anunciamos anteriormente na equação (2.2).

Existem ainda outros métodos que podem ser usados para calcular os efeitos e as variações dos factores e das interacções (por exemplo, o algoritmo de Yates para o planeamento 2^k ou ainda para outros tipos de planeamento. Este algoritmo é muito usual dada a sua simplicidade e pelo facto de poder ser aplicado sem ajuda de um Software. Este algoritmo (Yates) está escrito de forma detalhada em (Pereira e Requeijo, 2008) e, todos os cálculos realizados neste trabalho relacionados a este algoritmo, basearam-se nesta bibliografia. Pode-se ainda fazer este cálculo com o uso de aplicativos estatísticos, tais como Statistica e o Minitab).

Nesta fase de ensaios, embora seja fácil estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil definir qual é realmente o factor de controlo que produz a diferença significativa nas

respostas, na maioria das vezes é necessário o uso de gráficos lineares (que representam os efeitos principais e de interacção) e o de probabilidade normal (MONTGOMERY, 2009). Nessa fase do desenvolvimento experimental, podem ser usados diferentes Softwares para construção de gráficos.

Para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interacção é necessário definir duas propriedades, conforme seguem:

- O sinal (\pm) indica a direcção do efeito, ou seja, se a resposta aumenta ou diminui com a variação do nível (-1) para (+1);
- A magnitude indica a intensidade do efeito.

De seguida, tem-se a representação gráfica do Efeito principal E_i . Este gráfico ilustra a variação média das respostas em função da mudança do nível (-1, +1) de um factor (x_i), mantendo os outros factores constantes (gráfico 2.1).

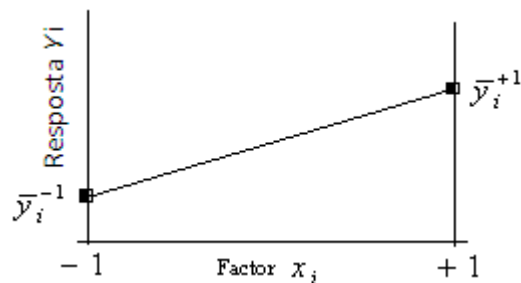


Gráfico 2.1. Efeito principal X_i , com relação a resposta Y_i .

Os gráficos dos efeitos de interacção descrevem a variação média de um factor em função de outros factores. Vamos de seguida apresentar a construção de dois gráficos onde ilustraremos a interacção dos factores x_1 e x_2 em duas situações distintas.

Por exemplo, a figura a seguir (Gráfico 2.2) realça que o efeito provocado pela mudança de nível do factor x_1 na resposta depende do nível do factor x_2 pelo que, existe uma interacção entre os dois factores (x_1 e x_2). A figura (Gráfico 2.3) mostra que o efeito provocado pela mudança de nível do factor x_1 na resposta é independente do nível do factor x_2 pelo que, não existe interacção entre os dois factores (x_1 e x_2).

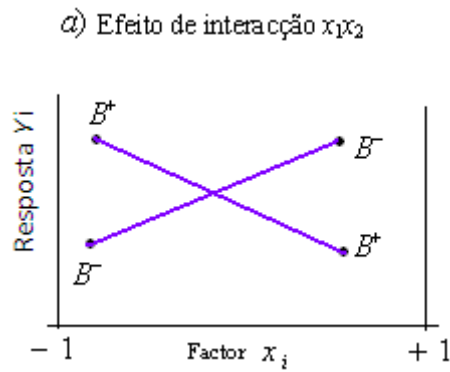


Gráfico 2.2. Experiência factorial com interação

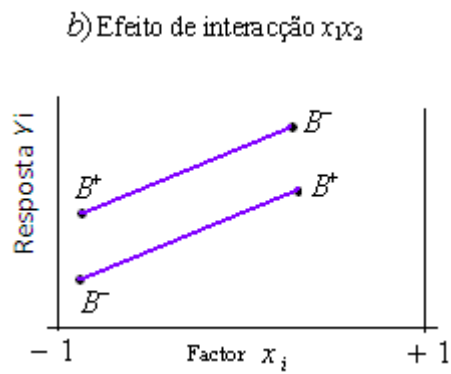


Gráfico 2.3. Experiência factorial sem interação

Outro tipo de gráfico que pode ser utilizado na análise de testes é o de probabilidade normal.

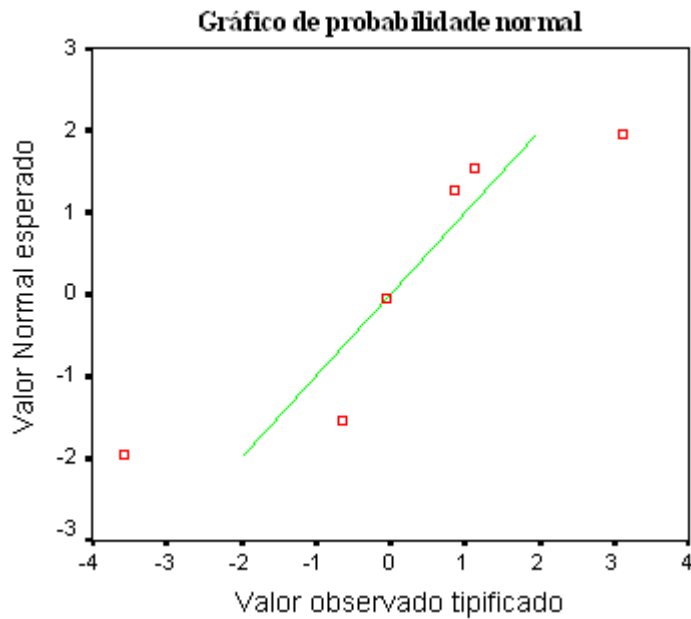


Gráfico 2.4. Gráfico de probabilidade normal

Esses gráficos são utilizados nas situações em que não seja possível repetir um teste factorial 2^k , e seja importante obter uma estimativa independente do erro experimental para avaliar a importância dos efeitos principais e de interação (DEVOR, 1992). Esse tipo de erro é proveniente de factores incontroláveis que produzem uma variação nas respostas ao realizar os testes sob condições pré-estabelecidas. Os erros podem ser classificados em dois grupos, a seguir:

- **Erros sistemáticos:** são os causados por fontes identificáveis. Esse tipo de erro faz com que os resultados experimentais estejam acima ou abaixo do valor real, influenciando a exactidão (*accuracy*) da medida. Essa flutuação pode ser causada pelo instrumento utilizado para controlar o teste (exemplo: relógio, micrómetro, régua, etc.), método de observação, efeitos ambientais ou pelas simplificações do modelo teórico (exemplo: eliminar um factor importante para o sistema).
- **Erros aleatórios:** são as flutuações que ocorrem de uma repetição para outra, porém, todos os possíveis resultados estão dentro de um intervalo de

valores. Esse tipo de erro afecta a precisão (*precision*) das medidas. Há autores que defendem de que, nem sempre podem ser identificadas as fontes que causam o erro aleatório. Entretanto, esse tipo de erro no ensaio pode ser tratado quantitativamente através de métodos estatísticos, de modo que os seus efeitos na grandeza física medida possam ser, em geral, determinados (DEVOR, 1992).

As principais vantagens da técnica factorial 2^k é que através da análise dos ensaios, podem ser indicadas as principais tendências e determinar a direcção promissora para os ensaios subsequentes (MONTGOMERY, 2009). Ainda com esse tipo de experiência é possível quantificar o erro experimental.

Duma forma geral, durante a aplicação de diferentes técnicas, verifica-se sempre a existência de certas limitações o que também acontece no caso da técnica do Planeamento Factorial 2^k . Esta técnica Factorial oferece as seguintes limitações:

- Com este tipo de técnica de Planeamento de Experiências, não é possível obter informações dos factores em níveis intermediários; Caso se queira obter as informações devemos recorrer a outros tipos de Planeamentos como o caso do método de Adição de Pontos Centrais (caso que abordaremos nas próximas secções).
- Em alguns testes não é possível realizar réplicas, porque na maioria das vezes os custos de experimentação são elevados e se torna difícil estimar os erros experimentais (DEVOR *in* ANDERSON, 1957).
- Torna-se inviável a utilização desta técnica nas empresas quando existe um número maior de factores;
- Durante a sua aplicação existe o risco de construir e planear testes super dimensionados, uma vez que, são considerados vários factores para realizar os testes;

Uma das soluções encontradas para essas limitações, é a construção de Planeamentos de Experiências industriais, com a aplicação da técnica Factorial Fraccionado 2^{k-p} . Esta técnica será abordada na secção a seguir.

2.7. Planeamento Factorial Fraccionado 2^{k-p}

Durante a realização de testes industriais, é comum verificar-se a necessidade de estudar o efeito de um ou mais factores de controlo ao mesmo tempo (ABRAHAM *et al.*, 1999). Uma das soluções para este tipo de problema é a aplicação das técnicas de Planeamento de Experiências Factoriais Fraccionados 2^{k-p} . Estas técnicas permitem analisar os efeitos sobre resposta de interesse, de k factores com dois níveis cada um, em 2^{k-p} combinações de testes, realizando-se apenas uma parte (metade do ensaio quando p é igual a um, ou um quarto do ensaio quando p é igual a dois), do ensaio sem comprometer significativamente a precisão das conclusões decorrentes da análise de resultados uma vez que chega a oferecer-nos quase a mesma informação. Simultaneamente, os custos e tempo de duração dos ensaios são reduzidos significativamente e, garante ainda eficiência na obtenção de informações confiáveis (MONTGOMERY, 2009). Quando são utilizadas as técnicas de Experiências Factoriais Fraccionados 2^{k-p} , os efeitos de interacção de ordem superior são desprezíveis.

DEVOR *in* ANDERSON (1957), aponta que a utilização da técnica de Factoriais Fraccionados desempenha um papel importante e, algumas das razões pelas quais é útil o seu uso, são:

- A primeira é a dispersão dos efeitos. Quando existem vários factores de Controlo, torna-se provável que o processo seja influenciado apenas por alguns efeitos principais e de interacção de ordem inferior.

- A segunda é denominada propriedade de projecção. Neste caso, os ensaios Factoriais Fraccionados podem ser planeados em matrizes maiores que podem ser construídas a partir de um subconjunto de factores significativos.
- A terceira característica desse tipo de técnica é a experimentação sequencial. Ocorre quando é possível combinar as corridas de dois ou mais testes Factoriais Fraccionados.

Partindo dessas três ideias, são descritos outros aspectos que devem ser considerados ao realizar testes industriais com essas técnicas (MONTGOMERY, 2009).

Considere-se um estudo com três factores de controlo (1, 2 e 3), com dois níveis para cada. A equipa encarregada de realizar o teste, determinou que é inviável economicamente realizar as oito combinações ($2^3 = 8$) da matriz. No entanto, é possível realizar um teste com quatro observações ($2^3/2 = 2^{3-1} = 4$). Esse exemplo é apresentado por MONTGOMERY (2009).

O quadro a seguir apresenta todas as combinações possíveis do Planeamento Factorial Completo 2^3 . As colunas 12, 13, 23 e 123 foram estimadas pela multiplicação das colunas que contêm os factores 1, 2 e 3. Por conveniência, as combinações (linhas da matriz) foram separadas pelos sinais de positivo e negativo da coluna de interacção de maior ordem, ou seja, pela interacção 123. Essa coluna da matriz é denominada de relação definidora do teste. Nesse tipo de teste a equipa responsável pode optar pela execução das combinações referentes à parte positiva (testes número 1, 2, 3 e 4), o que é mais usual, ou executar a outra parte (corridas 5, 6, 7 e 8). No primeiro caso a combinação dos testes é representada por $I = 123$. Caso seja seleccionada a parte negativa, deve-se recordar que a relação definidora do teste será $I = -123$.

Tabela 2.2. Teste do planeamento factorial completo 2^3

Combinções Tratamento	Efeito factorial							Y_i
	I	1	2	3	12	13	23	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	Y_1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	Y_2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	Y_3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	Y_4
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	Y_5
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	Y_6
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y_8

A seguir, com objectivo de ilustrar o processo de Planeamento Experimental com a técnica Factorial Fraccionado será utilizada a parte positiva do teste apresentada no quadro 2.2. Nessa matriz são identificadas as seguintes combinações lineares para estimar os efeitos principais dos factores 1, 2 e 3, conforme se segue:

$$l_1 = 1/2(-1 + 2 - 3 + 4)$$

$$l_2 = 1/2(-1 - 2 + 3 + 4)$$

$$l_3 = 1/2(-1 - 1 - 3 - 4)$$

e para os efeitos de interacção de 12, 13 e 23, obtém-se:

$$l_{12} = 1/2(+1 - 2 - 3 + 4)$$

$$l_{13} = 1/2(+1 - 2 + 3 - 4)$$

$$l_{23} = 1/2(+1 + 2 - 3 - 4)$$

Há casos em que as combinações lineares sejam iguais, ou seja, os efeitos principais dos factores sejam iguais com os de algumas combinações lineares. Quando isso acontece torna-se impossível identificar claramente quais são os efeitos principais de cada factor porque estão misturados com os efeitos produzidos pela combinação de dois factores. Neste caso, é possível notar que estaria a realizar-se o efeito das combinações de factores com as interações. E esta propriedade é conhecida como efeito de Confundimento (ROLAND *et al.*, 2004).

A técnica de Confundimento é uma técnica de Planeamento usada para acomodar um ensaio Factorial Completo em Blocos, onde o tamanho do Bloco é menor que o número de tratamentos de uma réplica (MONTGOMERY, 2009).

Nos ensaios deve-se utilizar a maior resolução possível porque com isso é possível desprezar os efeitos de interacção de mais alta ordem.

O conceito de resolução de Planeamento é uma forma útil de classificar Planeamentos Factoriais Fraccionados. Essa resolução depende da estrutura dos efeitos confundidos. As Resoluções *III*, *IV* e *V*, são especialmente importantes.

- *Resolução III*: os efeitos principais não estão confundidos com outros efeitos principais, mas estão com interacções de dois factores, e interacções de dois factores também estão confundidos umas com as outras.

Exemplo: O planeamento 2^{3-1} com $I = ABC$.

- *Resolução IV*: os efeitos principais não estão confundidos nem entre si nem com interacções de dois factores, mas as interacções de três factores estão confundidas com interacções de dois factores.

Exemplo: O planeamento 2^{4-1} com $I = ABCD$

- *Resolução V*: tanto os efeitos principais como as interacções de dois factores não estão confundidos entre si, mas as interacções de três factores estão confundidas com interacções de dois factores.

Exemplo: O planeamento 2^{5-1} com $I = ABCDE$.

CAPÍTULO III

OPTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

3.1. Introdução

Um dos objectivos principais do *DOE* é encontrar condições de operação de processos que maximizem ou minimizem a resposta de um sistema. Uma vez que, nem sempre o início do processo é evidente, deve-se com isso, procurar uma metodologia que direcione o *DOE* nesse sentido, ou melhor, ser desenvolvido de forma eficaz na direcção da maior melhoria possível para sistema de respostas (ROLAND *et al.*, 2004).

A região óptima (Nominal ou alvo) para a experimentação de um processo é usualmente determinada depois de conduzir-se uma sequência de ensaios e uma sucessão de modelos obtidos. Em muitas aplicações, o objectivo da experimentação é apenas a obtenção de modelos empíricos que melhorem uma resposta de interesse (PEREIRA & REQUEIJO, 2008). Na optimização experimental, diferentes técnicas são utilizadas para se encontrar o modelo que melhor se ajusta à realidade do processo em estudo. As experiências conduzidas num conjunto de condições resultam num determinado modelo de ajuste, que indica por onde se deve iniciar a procura pelas melhores condições para o próximo ensaio experimental.

As soluções decorrentes da utilização de Factoriais 2^k e 2^{k-p} podem não ser óptimas do ponto de vista teórico, mas podem revelar-se muito interessantes em termos práticos, particularmente quando a organização nunca aplicou qualquer método científico de experimentação. Esses Factoriais 2^k e 2^{k-p} têm-se revelado extremamente úteis na caracterização de processo e identificação dos factores que influenciam significativamente as características da Qualidade, possibilitando assim uma melhoria de desempenho (PEREIRA & REQUEIJO, 2008).

O primeiro passo da optimização consiste na identificação dos factores (variáveis) que têm maior influência na resposta. Às vezes isso é chamado de caracterização de um processo (MONTGOMERY, 2009). Assim, na fase inicial da investigação deve sempre recorrer-se a um Factorial 2^k e 2^{k-p} que permita reduzir um primeiro conjunto de factores a um subconjunto constituído pelas variáveis mais importantes (PEREIRA & REQUEIJO, 2008).

Uma vez identificado o subconjunto apropriado de variáveis de um processo, o próximo passo é a otimização de processo, ou seja, a determinação do conjunto de condições de operação para as variáveis do processo que resulte no melhor desempenho do mesmo.

3.2. Metodologias de superfícies de resposta

MONTGOMERY (2009) define a metodologia de superfície de resposta (*MSR*) como um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas úteis na modelagem e na análise em aplicações em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e o objectivo é otimizar a resposta. Este método foi desenvolvido por GEORGE BOX, da Universidade de Princeton – EUA, com a colaboração de outros autores, na década de 1950, tendo sido aplicado inicialmente na indústria química com considerável sucesso. Mas só a partir da década 1980, a *MSR*, passou a ser aplicada por empresas, sobretudo em indústrias Japonesa e a Americana. A causa do estudo deveu-se a necessidade de utilizar um procedimento para determinar as condições óptimas dos factores de Controlo que interferem na resposta de um sistema (MYERS *et. al.*, 1989).

Nas últimas décadas, a *MSR* tem tido vasta aplicação numa ampla variedade de contextos industriais, muito além de suas origens em processos químicos, inclusive na fabricação de semicondutores e de artigos electrónicos, corte de metais e processos de junção, entre muitos outros. Esta técnica contribui nas indústrias para o melhoramento da Qualidade dos produtos ou processos de fabricação, no aumento da produtividade e reduz o tempo de desenvolvimento de produtos (GUEDES, 1996).

O êxito obtido pelas indústrias motivou outros sectores a planear e analisar estatisticamente as experiências. Em dias de hoje, esta técnica é aplicada em diferentes áreas, com maior destaque, para Engenharia, Indústrias de alimentos, de medicamentos, ciências sociais, biologia, agricultura, agronomia, *etc.* (OLIVEIRA, T. 2004).

Algumas das principais razões para o estudo de problemas de um sistema com a metodologia de superfícies de resposta, são as seguintes:

- Decidir quais as condições dos factores (X_1, X_2, \dots, X_k) que determinam o melhor valor para a resposta y_1 ;
- Necessidade de conhecer as características da função resposta, que se aproxima das condições reais da operação dos sistemas. Nas empresas, essas informações podem ser utilizadas para mudar as condições de operação dos processos de fabricação sem aumentar os custos de produção e melhorar o sistema de controlo do processo;
- Interesse em identificar o relacionamento que existe entre os parâmetros (que podem ser representados por variáveis quantitativas tipo tempo, velocidade, pressão, temperatura, etc.) e as respostas.

A função matemática que descreve a superfície de resposta é dada pela equação:

$$\eta = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (3.1)$$

Onde X_1, \dots, X_k são os factores experimentais e ε é o resíduo ou erro experimental, ou seja, é a dispersão dos resultados em torno da função matemática aproximada aos pontos.

Na maioria dos problemas de *MRS*, não se conhece a forma de relação entre a variável-resposta e as variáveis independentes. Assim, o primeiro passo na *MRS* é achar uma aproximação conveniente para a verdadeira relação y e as variáveis independentes. Em geral utiliza-se um polinómio de ordem baixa em alguma região das variáveis independentes, então a função de aproximação é o modelo de primeira ordem. Se há curvatura no sistema, então devemos utilizar um polinómio de ordem mais elevada, como o modelo de segunda ordem.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_1 x_i + \dots + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3.2)$$

Em muitos problemas de *MRS* utilizam-se um desses polinómios aproximadores ou ambos.

Através dos gráficos é possível observar um plano de valores de uma resposta gerado pelo modelo de regressão. A inspecção da superfície de resposta torna a interpretação dos resultados numa experiência muito simples.

3.2.1. Método da inclinação máxima ascendente

Quando uma experiência é planeada para um processo novo, sobre o qual se conhece pouco, existe uma maior probabilidade de que as condições experimentais supostas no primeiro momento estejam distantes da real região de óptimo. No entanto, faz sentido utilizar-se um ajuste de primeira ordem. Usualmente uma Experiência Factorial Fraccionário 2^{k-p} , com replicações utilizando-se o conjunto actual de parâmetros do processo, pode servir de ensaio original.

Em circunstâncias acima referenciadas, o objectivo da experiência é caminhar rapidamente para a vizinhança geral do óptimo. Vai utilizar-se um procedimento experimental simples e eficiente. Quando se está afastado do óptimo, admite-se que um modelo de primeira ordem seja uma aproximação adequada da verdadeira superfície numa pequena região dos x 's.

O método de inclinação máxima ascendente é um procedimento para deslocarmos sequencialmente ao longo da trajectória de maior inclinação ascendente – isto é, na direcção do aumento máximo da resposta. Naturalmente se desejar-se a minimização, então designamos esse procedimento como método da inclinação máxima descendente. O método de primeira ordem ajustado é:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i \quad (3.3)$$

E a superfície de resposta de primeira ordem – isto é, os contornos de linhas de resposta é uma série de rectas paralelas.

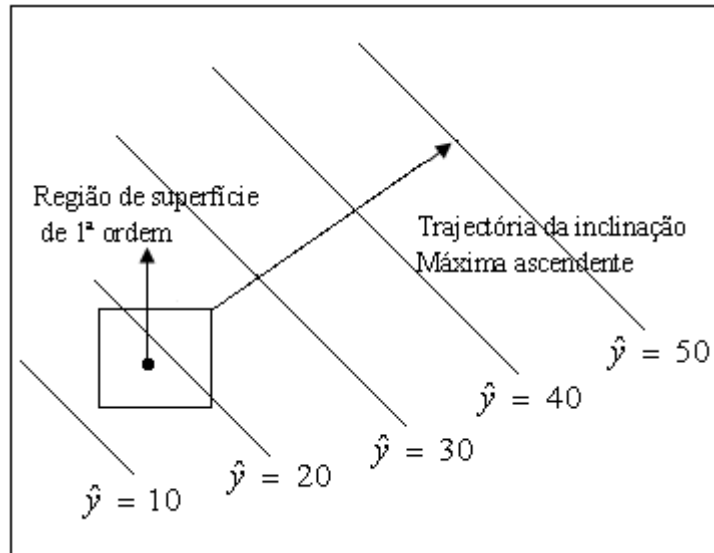


Figura 3.1. Trajetória de inclinação máxima ascendente
(Fonte: MONTGOMERY, 2009)

A direcção da inclinação mais acentuada é a direcção em que o modelo de primeira ordem ajustado cresce mais rapidamente. Esta direcção é normal aos contornos da superfície de resposta ajustada.

As experiências são feitas ao longo da trajetória de inclinação máxima, até que não se observe mais qualquer aumento na resposta ou até que seja atingida a região resposta desejada.

3.3. Desenhos de factores a três níveis.

Para além de os Factoriais 2^k e 2^{k-p} serem os mais usuais na fase inicial da execução do Planeamento de Experiências, há outros investigadores que em certas situações específicas podem ter interesse em realizar experiências com todos os factores a três níveis.

Um Planeamento Factorial a três níveis pode ser Completo ou Fraccionado. Num Factorial Completo 3^k todas as combinações possíveis dos níveis dos k factores são experimentadas, ao passo que num Factorial Fraccionado 3^{k-p} apenas é experimentada uma fracção do Factorial Completo como vimos no caso do factorial fraccionado a dois níveis.

Num Factorial Completo à medida que aumenta o número de factores, aumenta também, mas de forma considerável, o número de Experiências a executar.

3.4. Planeamento Factorial Completo 3^k .

Tal como referimo-nos anteriormente, num Factorial Completo 3^k , todos os factores têm três níveis e todas as combinações possíveis dos níveis dos k factores são experimentados. Neste factorial, cada combinação de níveis é representada por k dígitos, onde o primeiro dígito indica o nível do factor A , o segundo o do factor B e o último, o do factor k .

Os factores e as interacções são representados por letras maiúsculas. Os níveis dos factores podem ser representados por -1 , 0 e $+1$ ou por 0 , 1 e 2 . O planeamento 3^k mais simples é aquele em que são estudados apenas dois factores, ou seja o 3^2 onde são realizadas 9 experiências.

Tabela 3.1. Matriz de planeamento factorial 3^2

Exp. ^a	Níveis		
	Combinação	Factores	
		A	B
1	00	0	0
2	10	1	0
3	20	2	0
4	01	0	1
5	11	1	1
6	21	2	1
7	02	0	2
8	12	1	2
9	22	2	2

3.5. Matrizes de Planeamento

Taguchi definiu matrizes ortogonais para o Planeamento de Experiências, as quais são denotados por L_N , onde N representa o número de experiências a realizar. A matriz de Taguchi mais simples para estudar dois factores a dois níveis é a L_4 . N° de combinações = 2^2 (n° de linhas) e n° de colunas é igual a $4 - 1 = 3$.

Tabela 3.2. Matriz L_4 de Taguchi (fonte: PEREIRA & REQUEIJO, 2008)

Experiência	Matriz L_4		
	Coluna		
	1 A	2 B	3 C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

É habitual utilizar-se uma matriz L_4 para estudar três factores realizando apenas quatro experiências. Neste caso, temos L_4 fraccionado 2^{3-1} , correspondendo a seguinte matriz clássica.

Tabela 3.3. Matriz factorial 2^{3-1} (Fonte: PEREIRA & REQUEIJO, 2008)

Factorial fraccionado 2^{3-1}			
Ordem Padrão	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>
(1)	–	–	+
<i>b</i>	+	–	–
<i>a</i>	–	+	–
<i>ab</i>	+	+	+

Se compararmos as duas matrizes, conclui-se que as colunas não estão pela mesma ordem, ou seja, a 1ª coluna da matriz de Taguchi corresponde à 2ª coluna da matriz clássica apresentada pela ordem padrão. Na verdade, a 1ª coluna das matrizes de Taguchi é sempre aquela que apresenta o nível 1 nas primeiras $N/2$ experiências e o nível 2 nas restantes.

Com a correspondência de níveis antes definida, nas matrizes de Taguchi as interações de dois factores têm sinais trocados em relação ao que acontece no *DOE* clássico, mas porém as matrizes continuam ortogonais. A matriz L_8 segue-se à L_4 e permite a afectação de sete factores e/ou interações com um grau de liberdade cada. Suponha-se que se pretende estudar o efeito de três factores (*A*, *B* e *C*) e das suas interações numa determinada resposta recorrendo a um factorial 2^3 .

Tabela 3.4. Planeamento factorial 2^3

Matriz L_8							
Coluna/ Factor ou interacção							
Experiência	1 <i>A</i>	2 <i>B</i>	3 <i>AB</i>	4 <i>C</i>	5 <i>AC</i>	6 <i>BC</i>	7 <i>ABC</i>
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

No caso da matriz (Figura 3.4), na sua aplicação prática, o número de colunas nem sempre depende do número de factores em estudo, uma vez que as colunas são constituídas pelos elementos como factores e/ou as suas interações e, durante a execução do Planeamento de Experiências, nem sempre todas as interações são estudadas. Pois os

pesquisadores estudam apenas as que acham conveniente. Para melhor ilustração, consideremos o seguinte exemplo:

1. Um grupo de peritos marinhos ligados aos bombeiros está interessado em estudar a causa de um afogamento ocorrido numa das praias de uma Cidade em que vitimou uma jovem. Suponhamos, que não se sabe a que período do dia tenha ocorrido o incidente. Após uma longa discussão durante a formulação do problema, estes definem como factores da origem do afogamento, os seguintes:

A: Calemas;

B: Falta de prática de natação da banhista;

C: Falta de sinalização sobre os perigos na praia;

D: Inobservância de conselhos dos bombeiros;

Neste caso, ao construir a matriz de planeamento se não houver nenhum interesse por parte dos pesquisadores em estudar a interacção *BC*, é claro que ter-se-á uma matriz sem esta coluna expressa. Mas isto requer antes, um conhecimento profundo sobre o problema em estudo, para evitar o risco de ignorar interacções que muitas das vezes interferem na resposta. Outro problema ainda a considerar, é que os factores estabelecidos ou fixados no início da investigação podem ser alterados ou ainda excluídos em diferentes fases da aplicação dos testes de acordo a cada realidade e, outros ainda podem ser introduzidos. Podemos aqui continuar com o exemplo anterior: Suponhamos que no decorrer da investigação, estes concluem que durante o período da ocorrência do incidente não havia calemas na praia e ainda detecta-se presença de álcool no organismo. Essa descoberta levaria a exclusão do factor “*A*” e a introdução de um outro factor no caso o “*E*: Excesso de álcool no organismo”.

A Matriz a seguir apresentada (Figura 3.5) é uma matriz de um planeamento factorial 2^3 (planeamento clássico). Esta matriz permite a afectação de 7 factores e interacções com 1 grau de liberdade para cada factor.

Tabela 3.5. Matriz de Planeamento clássico.

Experiência	Factorial 2^3						
	Coluna/ Factor ou interacção						
	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
(1)	-	-	-	+	+	+	-
<i>c</i>	+	-	-	+	-	-	+
<i>b</i>	-	+	-	-	+	-	+
<i>bc</i>	+	+	-	-	-	+	-
<i>a</i>	-	-	+	-	-	+	+
<i>ac</i>	+	-	+	-	+	-	-
<i>ab</i>	-	+	+	+	-	-	-
<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+

No desenho de parâmetros recomenda-se a utilização das matrizes ortogonais L_{12} e L_{18} (Wu, Y.; e Wu, A., 1997). A matriz L_{12} para os factores de 2 níveis e L_{18} para os factores de 3 níveis. Recomenda-se ainda o uso da matriz L_{32} para simulações.

Nos métodos de Taguchi é aconselhável escolher a matriz em função do número de factores e de interacções que os investigadores pretendem analisar.

Imaginemos, no exemplo anterior, que se pretenda executar um planeamento de experiências com todos os factores, ou seja 4 factores e estudados a 2 níveis cada. Os pesquisadores teriam que realizar 16 Experiências. Se se tratar de um Planeamento com réplicas, isto pode acarretar custos elevados. Ainda, que não fosse (com réplicas), muitas das vezes acabam-se por repetir algumas rodadas devido a diferentes situações que envolvem o processo. Neste caso, realizaria-se um Planeamento Factorial Completo 2^k .

Suponhamos agora, que não haja recursos suficientes para o efeito, os pesquisadores podem optar por utilizar uma matriz com Planeamento Factorial Fraccionado (2^{k-p}) para evitar um elevado número de experiências e ao mesmo tempo, custos elevados. Nos casos em que os pesquisadores não se interessam pela perda de custos ou tempo, podem sim realizar todas as experiências. Mas, a verdade é que tanto um Planeamento como o outro chega a oferecer a mesma quantidade e credibilidade na informação, pois os resultados não diferem significativamente.

3.6. Função Perda

A busca contínua pela Qualidade de produtos leva a adoção de diferentes métodos e medidas para satisfação dos consumidores e, ao mesmo tempo evitar prejuízos nas indústrias. É neste âmbito, que Taguchi introduziu o conceito de função perda ou Prejuízo, a qual está relacionada com a sua definição da qualidade do produto (MONTGOMERY, 2009). Este conceito é um instrumento valioso para gerenciar os processos que conduzem os níveis de serviços ao cliente. Taguchi aponta que, mesmo que o produto esteja dentro dos limites de especificação, há um custo definido para a sociedade se a característica não estiver precisamente no valor nominal; quanto mais distante do nominal, maior será o custo (PEREIRA & REQUEIJO, 2008).

Considerando uma característica Y para a qual se pretende um valor ao valor alvo ou nominal y_0 . Taguchi define a perda como sendo proporcional ao quadrado do desvio da característica desse valor nominal. A perda aumenta à medida que Y se afasta de y_0 e é nula quando $y = y_0$.

Se as especificações da característica forem definidas por $y_0 \pm \Delta$, verifica-se que a perda é igual a A quando Y atinge $y_0 + \Delta$ ou $y_0 - \Delta$.

A função perda na sua forma mais simples é definida por:

$$L(Y) = k(Y - y_0)^2 \quad (3.4)$$

Onde $K = A/\Delta^2$, sendo que $L(A) = A$ quando $Y = y_0 \pm \Delta$

Sendo:

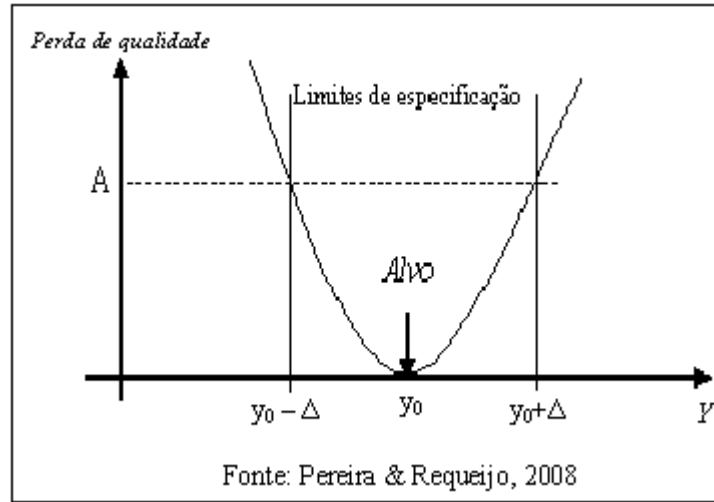
L = perda devido ao desvio da característica

k = coeficiente de perda

Y = valor da característica de qualidade

y_0 = valor nominal ou valor alvo

Figura 3.2. Função de perda (característica Nominal-é-melhor)



O gráfico demonstra a função perda associada com a percepção de estar dentro ou fora dos limites de especificação estabelecidos. O valor alvo ou nominal, y_0 , representa o nível ideal do parâmetro de processo. Os dois limites de especificação $y_0 - \Delta$ e $y_0 + \Delta$, são os limites de especificação simétricos padronizados. O eixo vertical é a medida do valor de perda devido ao desvio da característica do nível desejado.

Se considerarem n unidades, a perda média para uma característica para a qual se pretende um valor o mais próximo possível do valor alvo ou nominal (Tipo *N*, *Nominal-é-melhor*) é definida por:

$$L = \frac{k}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - y_0)^2 \quad (3.5)$$

Como

$$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - y_0)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{Y})^2 + (\bar{Y} - y_0)^2 = \frac{n-1}{n} S^2 + (\bar{Y} - y_0)^2$$

$$\text{Conclui-se que: } L = \frac{A}{\Delta^2} \left[\frac{n-1}{n} S^2 + (\bar{Y} - y_0)^2 \right] \quad (3.6)$$

Para uma característica do tipo *Menor-é-melhor*, para a qual se deseja o menor valor possível, é geralmente especificado um limite superior (*LSE*) que não deve ser ultrapassado. Neste caso a perda é definida por:

$$L = \frac{A}{(LSE)^2} \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j^2 \right) = \frac{A}{(LSE)^2} \left(\bar{Y}^2 + \frac{n-1}{n} S^2 \right) \quad (3.7)$$

Para o caso *Maior-é-melhor*, tendo o limite inferior de especificação (*LIE*) acima do qual o seu valor deverá posicionar-se, a perda é calculada pela equação,

$$L = A(LIE)^2 \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_j^2} \right) \quad (3.8)$$

Taguchi atribui grande importância à função perda, na qual se baseia, essencialmente, o controlo *on-line*. Entre outros aspectos, a função perda é usada para comparar o desempenho de um processo em momentos distintos, para justificar melhorias a introduzir no processo, para determinar se é ou não necessária a inspecção a 100% ou ainda avaliar o custo resultante de se diminuïrem as tolerâncias das características da Qualidade (PEREIRA & REQUEIJO, 2008).

CAPÍTULO IV

CONTROLO ESTATÍSTICO DA QUALIDADE

4. Controlo da Qualidade

4.1. Introdução

O aumento da oferta no mercado faz com que também o nível de exigência para o aumento da qualidade pelos clientes, tenda a aumentar, o que também leva a uma maior concorrência por parte das indústrias produtoras (fornecedores). Esta concorrência faz com que haja um esforço por parte de empresas em manter o funcionamento do processo produtivo com um mínimo de variabilidade em volta dos valores nominais das características de Qualidade, de forma a satisfazer as necessidades dos consumidores.

Porém, ainda que o processo seja bem concebido e aplicado, o resultado final (*output*) apresenta sempre uma variabilidade devido a presença de vários factores que afectam o processo, como foi referido no capítulo 2. Estes factores geralmente têm a ver com o equipamento, matéria-prima, mão-de-obra, meio ambiente e ainda os métodos de trabalho. Mas ainda que seja quase impossível a eliminação total da variação provocada por causas acima referidas, Taguchi defende que deve-se procurar sempre reduzi-la ao máximo.

PEREIRA e REQUEIJO (2008) apontam a utilização de algumas das ferramentas da qualidade, nos casos mais complexos o planeamento de experiências e os métodos de Taguchi para controlar a variação causada durante a produção. Os autores evidenciam a importância de: *Fluxograma, Folhas de Registo e Verificação, Histograma, Diagrama de Pareto, Diagrama de Causa-e-Efeito, Gráfico de Dispersão e Cartas de Controlo*. A utilização destas sete ferramentas, tem-se revelado bastante útil na resolução de diferentes problemas nas empresas.

A estas sete ferramentas, juntam-se ainda as sete de planeamento e gestão, que são: *Diagrama de Alfinides, Diagrama de Relações, Diagrama em Árvore, Diagrama Matricial, Matriz de Prioridades, Diagrama de Contigência ou Gráfico de Decisão do Processo e Diagrama de Actividades*.

O Controlo Estatístico de Processo, através das Cartas de Controlo desenvolvidas por Walter Shewhart, permite detectar as causas que afectam um processo (variabilidade) e assumem um papel crucial na prevenção da ocorrência de produtos defeituosos e na redução de custos.

As causas distinguem-se em causas comuns de variação e causas especiais de variação.

- *Causas comuns, naturais ou aleatórias* são fontes de variações estáveis e repetitivas que podem ser descritas por uma distribuição estatística bem definida. Um problema que apresenta apenas causas comuns, diz-se que o processo está sob controlo.
- *Causas especiais* são esporádicas e provocam uma alteração na distribuição. A presença dessas causas indicam que o resultado do processo não é estável, logo, o mesmo está fora do Controlo Estatístico.

O Controlo Estatístico do Processo é um conjunto de técnicas que visam garantir que os produtos, com as características da qualidade desejadas, estão a ser produzidos em processos que têm capacidade suficiente para as garantir sistematicamente, monitorar os processos de modo que as características da qualidade sejam conseguidas.

Se alguma causa de variação anormal surgir, ela deve ser identificada e caracterizada e serão tomadas, atempadamente, medidas que reponham o processo nas condições normais de operação, ainda sem se ter produzido fora das especificações (PIRES, 2007).

As técnicas de Controlo Estatístico do Processo embora mais conhecidas em processos fabris, sublinha-se também que as actividades de suporte às operações de qualquer organização, podem ser controlados, com vantagem, através do CEP.

Neste capítulo, faremos a apresentação das cartas de controlo de variáveis e cartas de controlo de atributos mais utilizadas na prática.

4.1.1. Alguns conceitos fundamentais

Controlo: Deve ser entendido como o conjunto de acções necessárias para monitorar um processo e reconduzi-lo às suas condições normais de operação sempre que este se afaste de um padrão de comportamento normal; isto implica a existência de feedback do processo e de acções correctivas.

Processo: Deve ser entendido como o conjunto dos equipamentos, das pessoas, do ambiente e das restantes condicionantes do funcionamento das actividades associadas à transformação de uma entrada numa saída. Este conceito pode ser aplicado a processos de fabrico, de fornecimento de serviços, a operações de apoio, ou esquematicamente:



Fig. 4.1. Processo (esquematicamente)

Causas assinaláveis da variação: Devem ser entendidas como causas identificadas que provocam situações de funcionamento anormais.

Causas aleatórias de variação: Devem ser entendidas como as componentes da variação que não são controladas, quer por razões técnicas, quer por razões económicas, e que, portanto, são características do processo e responsáveis pela variação normal.

Processo sob controlo: Deve ser entendido como processo em que não existem causas assinaláveis de variação.

Controlo com especificação: Deve ser entendido como o controlo estatístico de um processo *conhecido*, para verificar se ele continua sob controlo.

Controlo sem especificação: Deve ser entendida como o controlo estatístico que é efectuado sem um conhecimento prévio da sua capacidade e que visa a determinar se esse processo desconhecido está sob controlo.

Carta de Controlo: Deve ser entendida como um gráfico constituído por linha central e limites de controlo.

Limites de Controlo: Devem ser entendidos como as linhas representativas dos limites da variação normal.

4.2. Cartas de controlo

A implementação de qualquer método numa determinada pesquisa para que ocorra com o êxito desejado, requer antes que haja um conhecimento profundo por parte dos integrantes da equipa de investigação e, saber as vantagens e desvantagens da sua aplicação.

PEREIRA e REQUEIJO (2008) apontam algumas vantagens decorrentes da implementação adequada de Cartas de Controlo, sendo a destacar:

- *A prevenção de ocorrência de produto não conforme:* ao serem implementadas ao longo do processo produtivo, as cartas ajudam a prevenir a ocorrência de produto não conforme, o que está de acordo com a filosofia de fazer-bem-logo-à-primeira.
- *A distinção entre causas de variação comuns e especiais:* as Cartas de Controlo, ao permitirem distinguir entre causas comuns e especiais, indicam se a resolução dos problemas deve ser efectuada a nível da produção ou a nível da gestão do topo, o que evita confusões e custos excessivos resultantes de esforços mal dirigidos.
- *A facilidade de utilização das cartas pelo operador no seu posto de trabalho:* as Cartas de Controlo dão às pessoas que lidam directamente com o processo informação fiável sobre quando há necessidade de implementar acções correctivas e quando não há; tal evita ajustamentos desnecessários, os quais, muitas vezes, prejudicam o desempenho do processo.

- *A consistência e previsão da Qualidade e custos:* quando o processo está sob controlo, é possível estimar os parâmetros do processo e determinar a sua capacidade de produzir de acordo com as especificações; o comportamento do processo é portanto previsível e tanto o produtor como o cliente podem confiar em níveis de qualidade e custos associados estáveis.
- *O menor custo por unidade reduzida:* a melhoria contínua do processo permite aumentar a proporção de produto dentro dos requisitos especificados, diminuindo portanto a quantidade de produto não conforme; como consequência, o custo por unidade de produto bom diminui e a produtividade aumenta.
- *A utilização de uma linguagem comum:* as Cartas de Controlo fornecem informação sobre o processo que pode ser entendida por todas as partes interessadas no seu desempenho como, por exemplo, operadores de turnos diferentes, fornecedor e cliente, pessoal de produção e os outros Departamentos de empresa.

No capítulo 1 defendemos que a implementação do *DOE* requer um conhecimento profundo da parte de todos os integrantes da equipa da investigação. A aplicação das Cartas de Controlo para que ocorra com o êxito desejado, é também necessário que os seus integrantes tenham uma formação adequada sobre o uso das mesmas e um conhecimento sobre as vantagens e desvantagens da sua aplicação.

Uma Carta de Controlo é também definida por um gráfico que mostra a evolução ao longo do tempo de uma estatística (ω) referente a uma determinada característica de Qualidade. Neste gráfico são expressos os limites, superior (*LSC*), limite inferior (*LIC*) e a linha central (*LC*). PEREIRA e REQUEIJO (2008) defendem que num processo sob controlo estatístico o padrão deve ser perfeitamente aleatório no intervalo compreendido entre os limites de controlo:

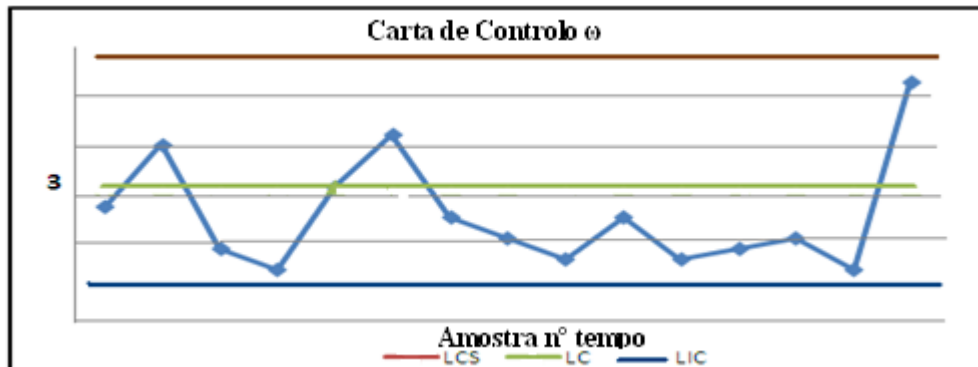


Figura 4.2. (gráfico da carta de controlo)

Qualquer ponto que não esteja no intervalo $[LIC, LCS]$ diz-se que o processo está fora do controlo estatístico. Há ainda casos em que os pontos representados no gráfico apresentam uma tendência especial ou sistemática e não num comportamento aleatório, embora todos os pontos estejam dentro dos limites, o que também pode indiciar a existência de causas especiais.

Quando for detectada uma causa especial de variação, deve investigar-se a razão da sua presença e estabelecer acções reparadoras correspondentes.

Autores como MONTGOMERY (2006), PEREIRA e REQUEIJO (2008), entre outros, defendem duas fases para a implementação das Cartas de Controlo, ou seja, Fase1, na qual ainda são desconhecidos os parâmetros do processo e a Fase2, na qual os parâmetros do processo já são estimados.

Um dos objectivos principais na Fase1, é a verificação da estabilidade do processo e, a estimação da média e da variância do processo (MONTGOMERY, 2006). Com as estimativas dos parâmetros do processo, é possível verificar se todas as unidades produzidas satisfazem a especificação técnica.

Os limites de acção e a linha central de uma carta de controlo de Shwehart, são definidas segundo MONTGOMERY (2006), assumindo que os valores da estatística ω seguem uma distribuição aproximadamente Normal $N(\mu_w, \sigma_w^2)$, por:

$$\begin{aligned}
 LSC_w &= \mu_w + L\sigma_w \\
 LC_w &= \mu_w \\
 LIC_w &= \mu_w - L\sigma_w
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Nestas equações, μ_w e σ_w representam respectivamente a média e o desvio padrão da estatística ω . L é considerado como a distância dos limites de controlo à linha central em unidades de Desvio Padrão e normalmente considera-se $L = 3$, dado que $\alpha = 0,23\%$. Considerando que as observações seguem aproximadamente uma distribuição Normal $N(\mu_\omega, \sigma_\omega^2)$, a probabilidade de existir um ponto fora dos limites de controlo, quando o processo se encontra sob controlo estatístico, é de 0,27%, quer dizer, a probabilidade de um ponto se situar dentro dos limites de controlo é de 99,73%.

De acordo com os princípios recomendados por Shewhart, sempre que um ponto se situar fora dos limites de controlo, assume-se que tal é devido a causas especiais de variação, ou seja, considera-se que o valor correspondente a esse ponto não pertence à distribuição da estatística que se está a controlar (PEREIRA e REQUEIJO, 2008). Existe no entanto um risco $\alpha = 0,27\%$ de um ponto pertencente à distribuição de ω estar fora dos limites de controlo. Esta probabilidade é designada por risco do erro do tipo I, risco do produtor ou nível de significância. Este risco (erro do tipo I) verifica-se quando se admite que o processo está fora de controlo, quando na verdade este está sob controlo. Já quando um processo se encontra fora do controlo e admite-se que se encontra sob controlo, verifica-se o risco tipo II (o risco do consumidor). No segundo caso, o risco é maior uma vez que o produto fora das especificações estabelecidas, acabaria por chegar em mãos dos consumidores. Verifica-se assim, que quando se afastam os limites de controlo da linha central, diminui a possibilidade de ocorrência de um erro tipo I e, aumenta a probabilidade de ocorrência de um erro tipo II. Por isso, a escolha dos limites de controlo deve basear-se numa decisão devidamente cautelosa.

4.2.1. Aplicação das Cartas de Controlo

O CEP e, nomeadamente as Cartas de Controlo não devem ser aplicados ao Controlo de todas as características do produto e parâmetros do processo, mas apenas às características críticas e de influência.

4.2.2. Estabelecimento de uma Carta de Controlo

Duma forma geral, para se estabelecer a carta de controlo, tem-se como primeiro passo a escolha das características a analisar no processo e depois a identificação dos factores que exercem influência nas referidas características. Esses factores devem ser escolhidos de forma a fornecer os dados ou a informação necessária à análise e Controlo do Processo.

Escolhe-se de seguida a Carta de Controlo a utilizar e conseqüentemente a escolha da linha central que pode reflectir o valor desejado no processo. Por último estabelece-se o método de recolha da amostra (secção 4.4) e calcular os limites de Controlo.

4.3. Medida de avaliação do desempenho das cartas de controlo.

O valor 370, designado ARL (*Average Run Length*) tem sido a medida mais utilizada para avaliar o desempenho de uma Carta de Controlo, sendo que para diminuir o número de falsos alarmes é desejável que o seu valor seja o maior possível quando processo se encontra sob controlo estatístico e menor possível quando se encontra fora do controlo estatístico, permitindo uma maior rapidez em detectar uma alteração do parâmetro do processo (MONTGOMERY, 2006).

Para os processos em que as observações são independentes e para as cartas de Shewhart, o $ARL_{Em\ Controlo}$ em função de (probabilidade de ocorrer erro tipo I) e o $ARL_{Fora\ de\ Controlo}$ em função de (probabilidade de ocorrer erro tipo II) são calculados a partir das equações (4.2) e (4.3) respectivamente.

$$ARL_{Em \text{ controlo}} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{0,0027} = 370 \quad (4.2)$$

$$ARL_{Fora \text{ de Controlo}} = \frac{1}{1 - \beta} \quad (4.3)$$

Como se fez referência (secção 4.2) um dos aspectos críticos no Planeamento das Cartas de Controlo é a selecção dos limites de controlo: é que se os limites ficam mais afastados da Linha central, a probabilidade de se cometer um erro do tipo I, diminui e aumenta a probabilidade de cometer o erro do tipo II, se os limites se aproximam da linha central, sucede o contrário, ou seja, aumenta a probabilidade de se cometer o erro do tipo I e diminui a probabilidade de cometer o do tipo II (MONTGOMERY “2006”; PEREIRA e REQUEIJO “2008”). Esse aspecto torna impossível diminuir simultaneamente os dois riscos.

4.4. Recolha de dados (Amostras)

Durante a aplicação das Cartas de Controlo, a recolha de dados deve ser realizada de forma conveniente uma vez que o contrário levaria ao risco de as conclusões retiradas estarem erradas, indicando situações que não estão a ocorrer. As unidades componentes de uma amostra devem obedecer a determinados requisitos, definindo a dimensão da amostra e sua frequência. As amostras são seleccionadas com o objectivo de maximizar a probabilidade de detectar as diferenças entre subgrupos, e minimizar a probabilidade de detectar diferenças dentro do próprio subgrupo. Existem vários métodos para a selecção de amostras.

Como a formação de lotes influencia muito na decisão final, MADRAS (1990) e SENAI (2000), estabelecem por exemplo, que não se deve misturar produtos de fontes diferentes tais como processos, turnos de produção, matérias-primas ou máquinas. As amostras devem ser homogéneas a menos que existam em estudos anteriores, evidências de que a variação entre os lotes é suficientemente pequena e que a mesma não teria qualquer influência nas conclusões.

PEREIRA e REQUEIJO (2008) defendem ainda que a formação de amostras constituídas por peças produzidas por máquinas diferentes, só se justificará com base, por exemplo, em testes de hipóteses sobre os parâmetros, que evidenciarem que não há diferenças significativas entre as máquinas; caso contrário deverá ser implementada uma carta para cada máquina.

Quanto maior for a dimensão da amostra, mais fácil se torna a detecção da ocorrência de pequenas alterações do processo. Mas quando as alterações do processo são substanciais, pode recorrer-se a amostras com dimensões mais reduzidas (PEREIRA e REQUEIJO, 2008). Quanto à frequência de amostragem, as amostras devem ser recolhidas o número de vezes que for necessário para garantir a sua representatividade.

4.4.1. Regras para detecção de causas especiais.

Um ponto fora dos limites de controlo ou um comportamento não aleatório indiciam a existência de causas especiais de variação. É nesse âmbito que o *Western Electric*, publicou um livro em 1959 onde constam oito regras que indiciam a presença de causas especiais de variação que indicam a ocorrência de uma situação fora de controlo estatístico. Várias regras foram ainda publicadas ao longo de anos que não diferem substancialmente entre si (PEREIRA e REQUEIJO, 2008). Para aplicação das mesmas, considera-se que o intervalo compreendido entre os limites de controlo $LC \pm 3\sigma_w$ está dividido em seis zonas iguais, cada uma com uma largura equivalente a equações, $1\sigma_w$ e designadas por A, B, C, C, B, A, em que a zona C é simétrica em relação à linha central. Neste trabalho foram adoptadas as regras incluídas na norma **ISO 8258: 1991**, que são:

Regra 1 - Um qualquer ponto fora dos limites de acção ($\text{lim} \pm 3\sigma_w$)

Regra 2 - Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C do mesmo lado da linha central.

Regra 3 - Seis pontos consecutivos no sentido ascendente e descendente.

Regra 4 - Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente.

Regra 5 - Dois de três pontos consecutivos na zona A, do mesmo lado da linha central.

Regra 6 - Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, do mesmo lado da linha central.

Regra 7 - Quinze pontos consecutivos na zona C acima e abaixo da linha central.

Regra 8 - Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.

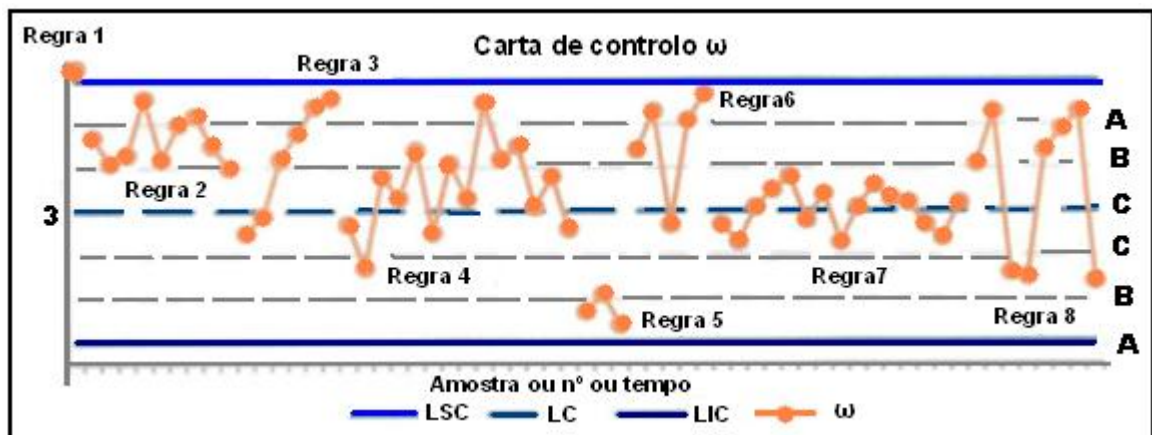


Figura 4.3. gráfico das regras para a detecção de causas especiais (Fonte: Agostinho, 2011).

A partir de qualquer gráfico de controlo é fácil detectar um ou mais pontos que estejam fora dos limites de acção. No entanto as regras aqui representadas destinam-se a aumentar a sensibilidade das cartas de Shewhart para detectar causas especiais de variação. Deve-se ponderar quanto à sua aplicação, pois a implementação simultânea de várias regras, pode aumentar o número de falsos alarmes, o que acarretaria custos de Qualidade.

4.4.2. Interpretação das Cartas de Controlo

Ocorrência de situações típicas fora dos limites de Controlo: Podem ocorrer:

(i) Movimentos cíclicos (acima, abaixo)

Se for na carta das médias pode significar a existência de efeitos sazonais e/ou rotação de operadores; Se for na Carta das amplitudes pode significar fadiga do operador e/ou problemas de manutenção.

(ii) Tendências (uma única direcção)

Má Tendência pode indicar desgaste da ferramenta; Boa Tendência indicia melhoria do desempenho.

(iii) Descentramentos

Podem significar mudanças no set-up¹, alterações nas condições ambientais (não controladas).

(iv) Pontos isolados fora de controlo (picos)

Podem significar defeitos no material, arranques ou paragens.

4.5. Tipos de cartas de controlo.

As Cartas de Controlo podem dividir-se em dois grupos, as Cartas de Controlo de variáveis e as Cartas de Controlo de atributos, que podem ser definidos da seguinte forma:

- Cartas de Controlo de variáveis: são todas as características que podem ser expressas numa escala contínua. Estas cartas devem ser usadas nos casos em que seja economicamente viável o controlo de características medidas numa escala contínua.

Para este caso, dada a dispersão da população não depender unicamente da medida de tendência central devem ser construídas duas cartas de controlo, uma para controlar o

¹ Tempo decorrido para troca (ferramenta, máquina, equipamento, etc.) de um processo em curso até ao início de um outro.

parâmetro de localização e outra para controlar o parâmetro de dispersão da população (PEREIRA E REQUEIJO, 2008).

- Cartas de Controlo de atributos: são características que não podem ser expressas numa escala contínua, assumem apenas valores discretos, como por exemplo o número de unidades não conformes detectadas numa linha de produção.

No caso de variáveis discretas, como o Desvio Padrão é, apenas função da média e da dimensão da amostra, ao contrário da carta de atributo de variável, aqui é construída apenas uma carta de controlo.

Quadro 4.1. Tipos de cartas de controlo

Carta de controlo	
Variáveis	Atributos
Média e amplitude (Carta \bar{X} e Carta R)	Proporção de unidades não conformes Carta p
Média e Desvio Padrão Carta \bar{X} e Carta S	Número de unidades não conformes Carta pn
Média e Variância Carta \bar{X} e Carta S^2	Número de defeitos Carta c
Mediana e Amplitude Carta \tilde{X} e Carta R	Número de defeitos por unidade Carta u
Observações individuais e Amplitudes Móveis Carta X e Carta MR	

4.5.1. Cartas de controlo da média e da amplitude.

Para determinação dos limites para estas cartas recolhem-se primeiramente as amostras m que devem ter a mesma dimensão n . Os valores da média e da amplitude de cada amostra são obtidos através das fórmulas 4.4 e 4.5.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} = \text{Média da amostra } i \quad (4.4)$$

$$R_i = X_{\max} - X_{\min} = \text{Amplitude da amostra } i \quad (4.5)$$

Quando os parâmetros do processo não são conhecidos, os limites de controlo são determinados, usando as seguintes fórmulas:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} = LC_{\bar{X}} \quad (4.6)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} = LC_R \quad (4.7)$$

Pode-se reparar que a média global ($\bar{\bar{X}}$) e a amplitude média (\bar{R}) correspondem, aos valores da linha central (LC) da carta da média e da linha central da carta da amplitude, respectivamente. Com esses valores, teremos os seguintes limites para a carta da média:

$$\begin{aligned} LSC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \\ LC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} \\ LIC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \end{aligned} \quad (4.8)$$

E para a carta da amplitude, temos os seguintes:

$$\begin{aligned} LSC_R &= D_4 \bar{R} \\ LC_R &= \bar{R} \\ LIC_R &= D_3 \bar{R} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Os valores D_3 e D_4 são tabelados (Anexo III) e dependem unicamente da dimensão da amostra.

4.5.2. Cartas de Controlo da Média e do Desvio Padrão.

Estas cartas aplicam-se geralmente nos casos em que a dimensão da amostra é superior a 10. O cálculo da média amostral efectua-se a partir da equação 4.9. Para a construção das cartas de controlo da Média e do Desvio Padrão, temos as seguintes fórmulas:

$$LC_{\bar{X}} = \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i}{m} \quad (4.10)$$

Onde S_i é definida da seguinte forma:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X}_i)^2}{n-1}} \quad (4.11)$$

Para o cálculo dos limites de controlo da carta da Média, usar-se-ão as seguintes fórmulas:

$$\begin{aligned} LSC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S} \\ LC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} \\ LIC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Quanto aos limites de controlo da carta de Desvio Padrão, têm-se:

$$\begin{aligned} LSC_S &= B_4 \bar{S} \\ LC_S &= \bar{S} \\ LIC_S &= B_3 \bar{S} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Os valores A_3 , B_3 e B_4 , dependem apenas da dimensão da amostra e encontram-se na tabela III do anexo.

4.5.3. Cartas de Controlo da Média e da Variância.

À semelhança dos casos anteriores, neste também, a carta de controlo da média calcula-se com base na equação do limite central (4.8). Quanto as linhas centrais e os limites são definidos da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 LSC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} + 3\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}} \\
 LC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} \\
 LIC_{\bar{X}} &= \bar{\bar{X}} - 3\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}}
 \end{aligned}
 \tag{4.14}$$

$$\begin{aligned}
 LSC_{S^2} &= \frac{\bar{S}^2}{n-1} \chi_{\alpha/2;n-1}^2 \\
 LC_{S^2} &= \bar{S}^2 \\
 LIC_{S^2} &= \frac{\bar{S}^2}{n-1} \chi_{(1-\alpha/2);n-1}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Nas equações 4.15, $\chi_{\alpha/2;n-1}^2$ e $\chi_{(1-\alpha/2);n-1}^2$ representam, respectivamente, os valores críticos superior e inferior da distribuição do χ^2 (percentis à direita) com $(n - 1)$ graus de liberdade, para um nível de significância igual a α . Os procedimentos de construções e análise das cartas são análogos aos da carta de controlo da Média e Desvio Padrão.

4.5.4. Cartas de controlo da Mediana e da Amplitude.

A carta da Mediana pode ser utilizada como opção à carta da Média (geralmente $n \leq 10$). O método para construção da carta é em tudo análogo ao das cartas \bar{X} e R , com algumas particularidades de que são usadas em amostras com um número ímpar de observações, para que a mediana seja facilmente determinada e representam-se no gráfico as observações individuais de cada amostra (PEREIRA e REQUEIJO, 2008).

Os limites de controlo são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
 LSC_{\tilde{X}} &= \bar{\tilde{X}} + \tilde{A}_2 \bar{R} \\
 LC_{\tilde{X}} &= \bar{\tilde{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \tilde{X}_i}{m} \\
 LIC_{\tilde{X}} &= \bar{\tilde{X}} - \tilde{A}_2 \bar{R}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
 LSC_R &= D_4 \bar{R} \\
 LC_R &= \bar{R} \\
 LIC_R &= D_3 \bar{R}
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Os valores da constante \tilde{A}_2 para $n = 3, 5, 7$ e 9 são os seguintes:

Quadro 4.2. Valores de \tilde{A}_2

n	3	5	7	9
\tilde{A}_2	1,187	0,691	0,508	0,412

4.5.5. Carta de Observações Individuais e da Amplitude.

Quando a dimensão da amostra é igual a 1 ($n = 1$), usa-se nestas situações a Carta de Controlo de Observações Individuais (X) e amplitudes móveis (MR , *Moving Range*). Estas cartas são úteis entre outros casos, quando não é possível a recolha de amostras com mais de uma observação.

A linha central e os limites da carta das Observações Individuais e de Amplitudes Móveis são dados da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 LSC_X &= \bar{X} + \frac{3\overline{MR}}{d_2} \\
 LC_X &= \bar{X} \\
 LIC_X &= \bar{X} - \frac{3\overline{MR}}{d_2}
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
 LSC_{MR} &= D_4 \overline{MR} \\
 LC_{MR} &= \overline{MR} \\
 LIC_{MR} &= D_3 \overline{MR}
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

Nestas equações, d_2 , D_3 e D_4 , tomam valores correspondentes a uma dimensão de amostra igual ao número de observações usadas para calcular cada amplitude móvel.

No caso de a característica da Qualidade a estimar ser uma variável contínua, tem que se ter em conta algumas condições na utilização das cartas de controlo, pois duas situações poderão ocorrer, os dados referentes à variável serem independentes ou auto-correlacionados. Na primeira situação (independentes), os métodos tradicionais de Shewhart são os adequados para resolução do problema, ao passo que na segunda, utilizam-se outras técnicas específicas como a aplicação das cartas de controlo com os limites modificados.

Quadro 4.3. Resumo dos limites das cartas para controlo de variáveis
(Parâmetros do processo não conhecidos)

		LIC	LC	LSC
Carta \bar{X} e R Média e Amplitude	Carta \bar{X}	$\bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$
	Carta R	$D_3 \bar{R}$	\bar{R}	$D_4 \bar{R}$
Carta \bar{X} e S Média e Desvio Padrão	Carta \bar{X}	$\bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S}$	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S}$
	Carta S	$B_3 \bar{S}$	\bar{S}	$B_4 \bar{S}$
Carta \bar{X} e S^2 Média e Variância	Carta \bar{X}	$\bar{\bar{X}} - 3\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}}$	$\bar{\bar{X}}$	$\bar{\bar{X}} + 3\sqrt{\frac{\bar{S}^2}{n}}$
	Carta S^2	$\frac{\bar{S}^2}{n-1} \chi_{(1-\alpha/2);n-1}^2$	\bar{S}^2	$\frac{\bar{S}^2}{n-1} \chi_{\alpha/2;n-1}^2$
Carta \tilde{X} e R Mediana e Amplitude	Carta \tilde{X}	$\tilde{\bar{X}} - \tilde{A}_2 \bar{R}$	$\tilde{\bar{X}}$	$\tilde{\bar{X}} + \tilde{A}_2 \bar{R}$
	Carta R	$D_3 \bar{R}$	\bar{R}	$D_4 \bar{R}$
Cartas X e MR Observações individuais e Amplitudes Móveis	Carta X	$\bar{X} - \frac{3}{d_2} \overline{MR}$	\bar{X}	$\bar{X} - \frac{3}{d_2} \overline{MR}$
	Carta MR	$D_3 \overline{MR}$	\overline{MR}	$D_4 \overline{MR}$

Quadro 4.4. Estimação dos parâmetros do processo

Carta	Média	Desvio Padrão
Cartas \bar{X} e R	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2$
Cartas \bar{X} e S	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{S} / c_4$
Cartas \bar{X} e S^2	$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{S}^2$
Cartas \tilde{X} e R	$\hat{\mu} = \tilde{\bar{X}}$	$\hat{\sigma} = \bar{R} / d_2$
Cartas X e MR	$\hat{\mu} = \bar{X}$	$\hat{\sigma} = \overline{MR} / d_2$

Quadro 4.5. Resumo dos limites das cartas para controlo de variáveis
(com parâmetros do processo conhecidos)

		LIC	LC	LSC
Carta \bar{X} e R Média e Amplitude	Carta \bar{X}	$\mu - A\sigma$	μ	$\mu + A\sigma$
	Carta R	$D_1\sigma$	$d_2\sigma$	$D_2\sigma$
Carta \bar{X} e S Média e Desvio Padrão	Carta \bar{X}	$\mu - A\sigma$	μ	$\mu + A\sigma$
	Carta S	$B_5\sigma$	$c_4\sigma$	$B_6\sigma$
Carta \bar{X} e S^2 Média e Variância	Carta \bar{X}	$\mu - A\sigma$	μ	$\mu + A\sigma$
	Carta S^2	$\frac{\sigma}{n-1} \chi^2_{(1-\alpha/2);n-1}$	σ^2	$\frac{\sigma}{n-1} \chi^2_{\alpha/2;n-1}$
Carta \tilde{X} e R Mediana e Amplitude	Carta \tilde{X}	$\mu - A\sigma$	μ	$\mu + A\sigma$
	Carta R	$D_1\sigma$	$d_2\sigma$	$D_2\sigma$
Cartas X e MR Observações individuais e Amplitudes Móveis	Carta X	$\mu - 3\sigma$	μ	$\mu + 3\sigma$
	Carta MR	$D_1\sigma$	$d_2\sigma$	$D_2\sigma$

Neste capítulo apenas foram apresentadas as cartas de controlo de variáveis, que se referem a casos em que a dimensão das amostras é uma constante. Nos casos em que a dimensão da amostra é variável e não seja possível obter uma amostra constante, o cálculo dos limites tem de ser ajustado em conformidade. E isto aumenta o grau de dificuldade de implementação e de interpretação das mesmas.

Caso a variação da dimensão das amostras não seja significativa, pode-se recorrer a utilização de uma dimensão de amostra média, no cálculo das linhas centrais e dos limites de controlo.

CAPÍTULO V

PLANEAMENTO E EXPERIÊNCIA NA INDÚSTRIA SEIS “LÍQUIDOS ALIMENTARES”

5. Aplicação prática do planeamento de experiências na indústria SEIS

5.1. Introdução

Neste capítulo, far-se-á uma a aplicação dos conceitos de Planeamento de Experiências descritos ao longo dos capítulos anteriores, serão descritas as técnicas de planeamento de Experiências que serão utilizadas em cada fase de testes. Abordará todos os aspectos da aplicação prática da metodologia de planeamento factorial, apontando suas vantagens para o processo de melhoramento da Qualidade do produto. Neste capítulo, por questões de sigilo profissional as fórmulas não serão apresentadas.

5.2. Caracterização da Indústria em estudo.

A Empresa SEIS “líquidos alimentares”, S.A é uma Organização do Sector secundário que se dedica a produção de produtos alimentares (sumos em dez sabores, nomeadamente, goiaba, manga, laranja, maçã, tropical, caju, laranja, ananás, maracujá e pêsego). A mesma outrora pertenceu a HOLDING UNIVINHOS, tendo-se tornado autónoma em 01 de Novembro de 2006, data da sua publicação no diário da República, 3ª série nº 132.

Localiza-se no Município de Viana, jurisdição da zona industrial, Província de Luanda, Capital da República de Angola. Desenvolve as suas actividades em instalações próprias. A Empresa possui um grande porte de capital próprio e comporta um potencial de recurso humano constituído por um total de 36 trabalhadores, sendo 27 trabalhadores em efectivo serviço e 9 colaboradores. Desde a sua criação, a Empresa tem investido na renovação e manutenção do seu equipamento e compra de outras máquinas adequadas ao desenvolvimento do Sector industrial; investe na requalificação do seu recurso humano para garantir a Qualidade dos seus produtos e satisfação dos seus clientes. Isso deve-se sobretudo à diferentes factores, tais como, a concorrência no mercado industrial com outras

Empresas, as obrigações de melhoramento da Qualidade do produto e a exigência dos clientes.

Fruto desses esforços, a Empresa observa um aumento significativo de oferta, devido ao aumento cada vez mais da procura.

5.3. Problema em estudo.

O problema em estudo é o processo de fabricação de sumo. Entre os sumos de diferentes sabores produzidos pela Indústria, estudaremos o sumo de sabor manga “Néctar Mimo Manga”.

Neste capítulo ter-se-á em conta o seguinte:

- A flexibilidade do processo de fabricação, que permita a realização do Planeamento de Experiências sem afectar a produção da Empresa.
- A aplicação da metodologia do Planeamento de Experiências na indústria permitirá a redução dos custos decorrentes da má Qualidade.

5.4. Processo de fabricação do sumo.

A seguir será descrito o processo usado pela indústria para a fabricação do produto em estudo. As informações descritas nessa secção foram obtidas através de entrevistas aos técnicos ligados à área de Produção e de Controlo da Qualidade e, pelas anotações usuais pelos mesmos de acordo com a experiência acumulada durante cada processo de fabricação. Este processo é assegurado por uma vasta equipa de técnicos profissionais de diferentes áreas que garantem não apenas a produção e a Qualidade do produto ao nível da exigência dos clientes como também o asseguramento da saúde dos consumidores.

O Néctar Mimo Manga é um produto obtido através da mistura de água tratada, polpa de manga, ácido cítrico, ácido ascórbico, goma gelana, aroma, xarope (nas proporções indicadas pela fórmula química); pasteurizado à uma temperatura de 95 °C e arrefecido a 25 °C, vai automaticamente à enchedora asséptica A3Flex onde se realiza o processo de mistura que dá origem ao sumo de manga com as seguintes características: cor amarela, aspecto límpido. Características Físico – Químicas Acidez 0.013, ph-3.03, Brix 12, Rátio 992.

De uma forma sucinta apresentamos as variáveis que compõem o produto:

- Água,
- Polpa de Manga,
- Aroma
- Ácido Cítrico,
- Ácido Ascórbico (Vitamina C)
- Goma gelana.

Para conservação do produto, os recipientes são constituídos pelas seguintes variáveis:

- Embalagens de rolo de papel,
- Fita *LS*, para selagem vertical do pacote,
- Tampas ou cápsulas,
- Cola cap aplicadora,
- Caixa de cartão para embalar o sumo,
- Cola cardbord para colar as caixas.

5.5. Etapas ou fases de processamento do produto.

Para o processamento do produto em estudo, seguem-se os seguintes passos:

1º. A primeira actividade a ser executada, isto é, estando a corrente eléctrica para o efeito em perfeitas condições, é ligar a Caldeira, o Chiller para o arrefecimento,

compressor de ar, e confirmar a existência de água suficiente. Depois segue a fase de lavagem de todo circuito (linhas, tanques, pasteurizador, A3Flex, etc.); a mesma é feita através da soda cáustica e enxaguando com água tratada. Feito isso, faz-se a esterilização do circuito à uma temperatura de 360 °C.

2°. Após estar o equipamento preparado, requisita-se a matéria-prima e lavada ao laboratório fabril para respectiva análise. Após análise, prepara-se o xarope que é a mistura de água com açúcar, obedecendo a fórmula química estabelecida. Esta mistura é feita a partir do tanque nº 1, que tem a capacidade de 4 000L. Preparam-se depois as Micro-doses que são, a mistura de água, ácido cítrico, ácido ascórbico e goma gelana, também respeitando a fórmula estabelecida. Esta mistura é feita num outro tanque nº 5 com a capacidade de 1 000L.

3°. Coloca-se a água num dos tanques de preparação, T2 ou T3 com a capacidade de 4 000L de acordo a fórmula.

4°. Terminada a medição da água, automaticamente é doseada com o xarope e as micro-doses antes preparadas; o sumo está pronto para ser transferido para o tanque T4 que tem a capacidade de 10 000L para posteriormente ser encaminhado para o pasteurizador, onde é pasteurizado a uma temperatura de 95 °C e arrefecido até a temperatura de 25 °C.

5°. Encaminha-se para máquina de enchimento, onde o produto é empacotado, passando pelo datador, pelo aplicador de tampas e por fim pela embaladora.

Pela enorme quantidade de parâmetros do processo, variáveis do produto e os níveis de produção, podemos notar a complexidade do processo, o que sujeita a um profundo conhecimento de todo ele para alcançar-se, em todas as etapas, a reprodutibilidade e Qualidade do produto. Pois, a Qualidade requer uma atenção durante o processo todo, ou seja, desde o seu início até ao fim.

Esses parâmetros do processo podem ser alterados ao longo da fase de testes a fim de encontrar a condição propícia que conduza a produção de produto com melhor Qualidade. Nesta fase são definidas as condições e medidas, pois durante o processo de

produção caso se verifique alguma anomalia, tem de recomeçar-se o processo e, isso acarretaria custos e dispêndio de tempo. Terminada a demonstração desta etapa, indicaremos de seguida os parâmetros e os níveis ou fases do processo de produção, respectivamente, que são:

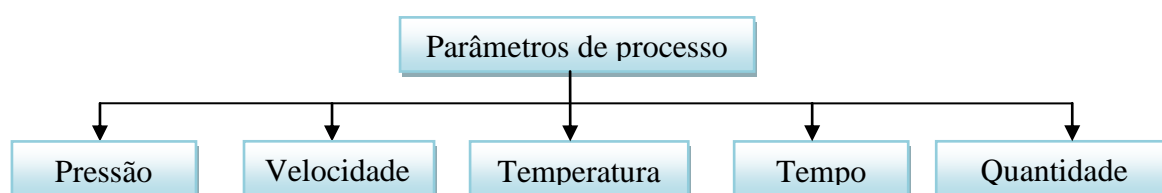


Figura 5.1. Parâmetros do processo

Pressão: é a pressão necessária (máxima e mínima) que se deve aplicar e conservar nas diferentes fases do processo da fabricação do produto sobretudo na passagem do líquido e na colagem das embalagens.

Velocidade: é a velocidade programada pelos pesquisadores com que a linha de enchimento deve circular durante o enchimento das embalagens a fim de evitar a destronização.

Temperatura: é a temperatura necessária a conservar durante o processo de produção desde a esterilização do equipamento, aquecimento e o arrefecimento do produto.

Tempo: é o tempo necessário em diferentes níveis durante o processo de fabricação do produto. Aqui os pesquisadores programam o sistema codificando o tempo de demora em cada etapa do processo.

Quantidade: é a quantidade de material necessário nas diferentes fases do processo.

5.5.1. Níveis de produção ou fases:

- Recolha,
- Planeamento de produção

- Tratamento “lavagem da matéria-prima”,
- Mistura,
- Pasteurização,
- Enchimento,
- Distribuição.

Para melhor ilustração, os níveis do processo de fabricação do produto são apresentados de seguida num fluxograma de planeamento.

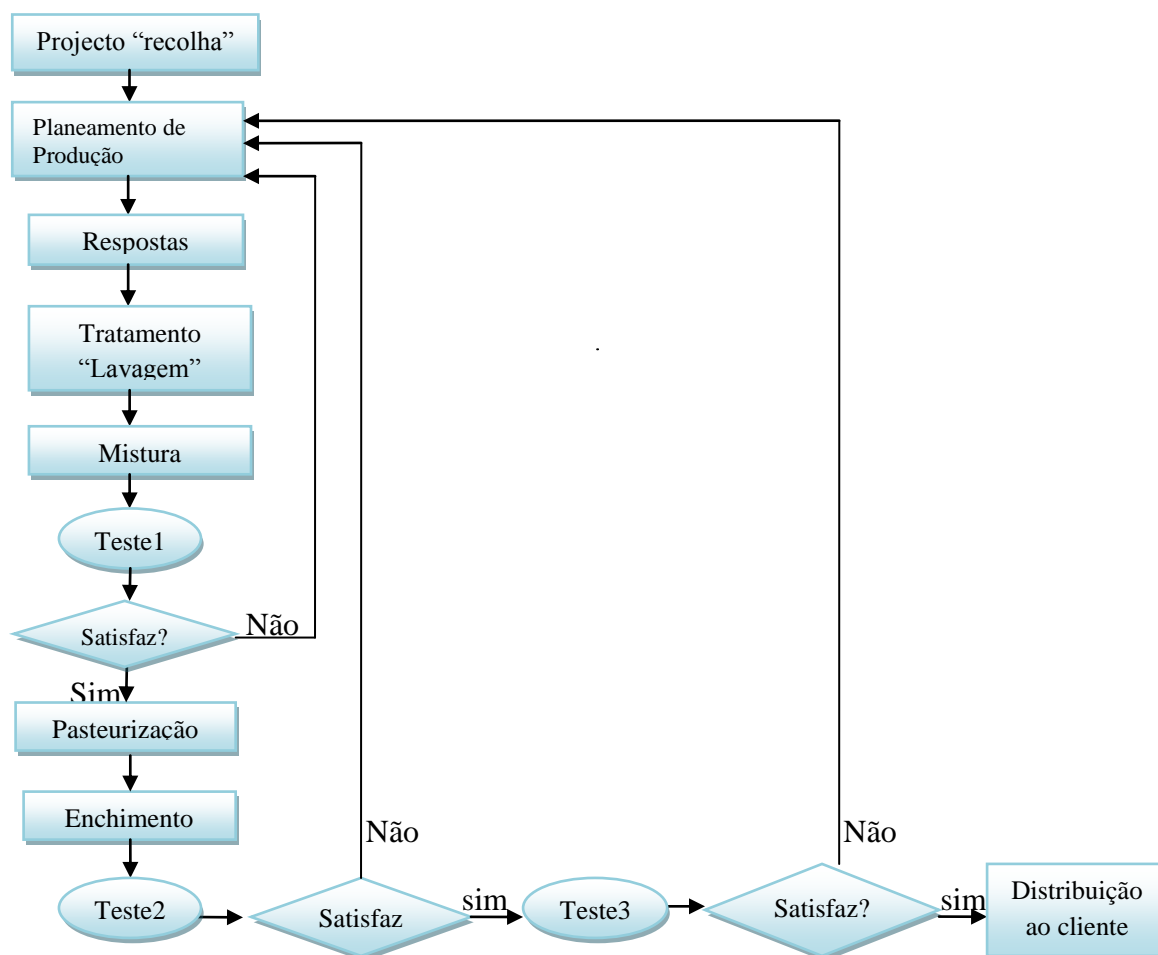


Figura 5.2. Fluxograma para execução do *DOE* no processo de fabricação do sumo

5.5.2. Problemas que podem ocorrer durante o processo de fabricação.

Durante o processo, existem diferentes factores (defeitos) que podem ocorrer e tornar inviável a fabricação do produto. Os problemas gerais que podem surgir são:

1. *Defeitos de colagem das embalagens* (problema provocado aparentemente por insuficiência de pressão e/ou de temperatura). Segundo os técnicos de produção, a temperatura e a pressão durante a soldagem regula-se tendo em conta o tipo e o estado de conservação da *LS*. Por exemplo, quanto mais estiver ressequida a fita, maior deve ser a temperatura.
2. *Uma pequena interrupção do sistema* (paragem), isto ocorre quando se verifica uma variação na quantidade de líquido a receber. Ou ainda, quando se verifica alguma anomalia na linha de enchimento e provoca uma destronização aí acontece a interrupção. É um problema que mereceu pouca atenção dos pesquisadores uma vez que quando isto acontece, o sistema tem um alarme automático que desperta atenção aos técnicos, estes regulam o sistema através do comando e a situação volta a normalidade.
3. *Bolhas de ar no interior das embalagens de sumo*. Isto ocorre quando existe desproporcionalidade na fórmula, entre a quantidade de líquido e a de azoto durante o enchimento das embalagens e/ou quando o enchimento é feito a uma temperatura superior à 27 °C. Mas quando isto ocorre, geralmente durante o período de incubação, após a transformação, o líquido fermenta e as embalagens acabam por inflamar ou até mesmo por rebentar.

Vários outros factores também podem estar na origem de diferentes defeitos que possam ocorrer durante o processo. Dentre esses factores podem-se mencionar os parâmetros de processos de operação, quando são mal regulados ou programados a partir dos comandos. Mas quando isto acontece faz-se uma análise profunda para se detectar a falha e a sua possível solução.

A aplicação das técnicas de Planeamento de Experiências pode determinar com mais precisão os parâmetros de controlo que influenciam o processo de fabricação de produtos na indústria.

5.6. Planeamento de experiências.

A aplicação da metodologia de Planeamento de Experiências como uma abordagem para melhoria de processo, exige que todos os envolvidos na pesquisa, tenham uma ideia prévia e clara sobre o objectivo do Planeamento, dos factores a serem estudados e, da forma como deve ser conduzido o Planeamento de Experiências e como os resultados serão analisados.

5.6.1. Escolha dos factores.

O estudo na indústria começou com a identificação e reconhecimento do problema. De uma forma geral, foi difícil compreender que o problema existente exigia na verdade a aplicação do Planeamento de Experiências para se ultrapassar, ou melhor, que a aplicação do Planeamento de Experiências seria uma possível solução para o problema, o que causou dificuldade em formular o problema de maneira clara e objectiva de forma que fosse aceite pelo grupo de trabalho. Na verdade, antes da aplicação do método foi necessário, desenvolver todas as ideias sobre o assunto e, depois de discutidas foram traçados os objectivos específicos do Planeamento de Experiências. Dada a complexidade do processo, a equipa de trabalho foi constituída por elementos de quase todas as áreas com destaque para engenharia, Qualidade, microbiologia, gestores e operadores. Mas antes foram realizadas várias reuniões desde Administração, Direcção Geral, Direcção de Produção e Controlo da Qualidade e trabalhadores em geral com destaque para os da área de produção. As primeiras reuniões consistiram mais na recolha de informação relacionada com o processo. Depois de analisadas essas informações foi apresentado o problema que era o

elevado número de defeitos durante o processo de produção e a hipótese consistia na aplicação da metodologia de Planeamento de Experiências para a diminuição dos mesmos. O problema foi aceite embora com um certo receio de que uma possível falha na sua aplicação poderia prejudicar o funcionamento normal da produção e a economia da empresa.

Uma vez identificado e aceite o problema, traçados os objectivos, seguiu-se a identificação e escolha dos factores. Essa escolha exige um conhecimento profundo e por essa razão houve necessidade da combinação do conhecimento teórico e prático, uma vez que a sua escolha é decisiva para o alcance dos objectivos.

Após discutido este passo, foram seleccionados os seguintes factores e estabelecidos dois níveis para cada, um deles:

- Velocidade;
- Temperatura;
- Tempo;
- Pressão;
- Quantidade.

Foram seleccionados por verificar-se serem considerados como os que mais influenciam o processo de fabricação e que geralmente estão na origem dos defeitos do produto, fruto de diferentes alterações ao sistema de programação.

Quanto ao factor temperatura, dividimo-lo, em diferentes outros factores por estar de forma variada em quase todas as fases do sistema. No entanto é também o factor que decidirá a sequência dos testes. Também o factor Pressão é outro que será subdividido em dois, ou seja, teremos a Pressão de saída do líquido durante o enchimento e Pressão da máquina durante a soldagem. Isto indica que os factores escolhidos não são fixos, mas podem variar na medida em que se vá aplicando o Planeamento de Experiências em diferentes fases. Ou seja, alguns factores podem ser retirados e introduzidos outros. Após esta divisão, teremos os factores da seguinte forma:

Seleccionadas as duas variáveis-resposta, começaremos por estudar a variável “Defeitos de colagem das embalagens”. Assim sendo, seguiu-se a escolha do Planeamento de Experiências que se adequa a este problema; pelo que, a equipa optou iniciar o estudo com a construção de matrizes de Planeamento de Taguchi.

5.7. Construção de matrizes de planeamento.

Após a análise da situação anterior, far-se-á a construção de matrizes de Planeamento referidos no capítulo 2.

Considerando os cinco factores referenciados acima e, como chamamos atenção na secção 4.6.1 dividimos o factor temperatura em dois, ou seja: Temperatura de arrefecimento e Temperatura de soldagem, todos com dois níveis. Referenciamos ainda (secção 1.2) de que no início de uma é necessário que se incluam todos factores. Mas para este caso prático, não tem qualquer interesse em fazer o estudo desta variável, por exemplo, A (Velocidade), B_2 (Temperatura de arrefecimento), E (Quantidade) e E_1 (Pressão de saída do líquido). Neste caso, faremos o estudo da variável defeitos de colagem das embalagens, tendo como factores os seguintes:

B_1 : Temperatura de soldagem;

C : Tempo

F_2 : Pressão da máquina de soldagem.

Para facilitar a compreensão dos leitores, e uma vez que o estudo das variáveis é feito de forma separada, denominaremos os factores em A (Temperatura de soldagem), B (Pressão de máquina de soldagem) e C (Tempo).

Serão necessárias 8 observações. Assim, para estudar estes factores, optou-se por aplicar o Planeamento Factorial completo 2^k onde ($k = 3$) que resultará na realização de todas as experiências necessárias de forma aleatória, o que ajudará bastante em termos de

informação útil, para o que se pretende analisar. Este planeamento contém 8 iterações experimentais e 15 graus de liberdade, o que nos permitirá a estimação de todos os seus efeitos principais, com alguma capacidade de examinar as interações entre dois e três factores.

Tabela 5.1. Níveis de funcionamento dos factores de processo

Níveis	Velocidade	Temperatura		Tempo	Pressão	
		Tempet ^a de arrefecimento	Tempet ^a de soldagem		Press. de saída do líq.	Press. de soldagem
-		5 °C	450 °C	1s	20 Bar	25 Bar
+		27 °C	590 °C	1.5s	25 Bar	35 Bar

Apresentamos numa outra tabela a variação dos factores temperatura e pressão em diferentes fases, sendo a temperatura apresentada em °C e a pressão em *atm*.

Tabela 5.2. Níveis dos factores fixados durante o processo

	Temperatura (°C)	Pressão (<i>atm</i>)
Esterilização	360 °C	
Pasteurização	94 °C	
Soldadura	450 °C à 590 °C	14atm à 25atm
	160 °C (<i>LS</i>)	30atm
Peróxido	80 °C	34.1atm
Líquido	5 °C à 27 °C	12atm

Este Planeamento factorial completo 2^3 permite a estimação de três efeitos principais *A*, *B*, *C*, três interações de dois factores *AB*, *AC*, *BC* e uma interacção de três *ABC*.

Tabela 5.3. Matriz de Planeamento Factorial 2^3

Rodadas	Combinações	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
1	(1)	-	-	-	+	+	+	-
2	<i>a</i>	+	-	-	-	-	+	+
3	<i>b</i>	-	+	-	-	+	-	+
4	<i>ab</i>	+	+	-	+	-	-	-
5	<i>c</i>	-	-	+	+	-	-	+
6	<i>ac</i>	+	-	+	-	+	-	-
7	<i>bc</i>	-	+	+	-	-	+	-
8	<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+

É importante notar que num factorial 2^k , o número total de efeitos (efeitos principais e interacções) é igual a $(2^k - 1)$, onde cada um desses efeitos tem 1 grau de liberdade, que são o número de níveis menos um. A cada interacção também corresponderá a um grau de liberdade, uma vez que o número de graus de liberdade de uma interacção é sempre igual ao produto do número de graus de liberdade dos factores envolvidos na interacção. Cada uma das 8 experiências foi replicada duas vezes ($n = 2$) e, em cada replicação foram recolhidas de forma aleatória 8 caixas.

Tabela 5.4. Resposta Soma do Planeamento

Rodadas	Resposta (<i>Defeitos na colagem</i>)		
	Y_1	Y_2	(Y_1+Y_2)
1	10	10	20
2	0	0	0
3	9,5	9,5	19
4	6,0	6,0	12
5	9,0	3,0	12
6	1,5	1,5	3
7	8	8	16
8	8,67	4,33	13,5

Na tabela 5.4 apresenta-se a resposta soma obtida e avaliada na escala numérica, como foi referenciado na secção 4.6.2. Para se achar a coluna resposta usou-se o algoritmo de Yates que recomenda que no caso de replicação de experiências ($n \geq 2$), considera-se na coluna da resposta a soma dos valores obtidos para as n réplicas. Pela *tabela 5.4*, obtemos os seguintes efeitos principais e as respectivas interacções a partir das seguintes fórmulas:

$$I_A = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (5.1)$$

$$I_B = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (5.2)$$

$$I_C = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (5.3)$$

$$I_{BC} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc) \quad (5.4)$$

$$I_{AC} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc) \quad (5.5)$$

$$I_{AB} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (5.6)$$

Observa-se que:

$$I_A = I_{BC} \quad , I_B = I_{AC} \quad I_C = I_{AB}$$

Após a resposta obtida, começaremos por calcular a soma de quadrados total:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad (5.7)$$

Fazendo a substituição dos valores obtidos na tabela 5.4 (Tabela soma do Planeamento), teremos o seguinte:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} = (10.0^2 + 0^2 + \dots + 4,33^2) - \frac{(95)^2}{16}$$

$$SQ_T = 768,89 - \frac{9025}{16} = 204,826$$

Calculada a soma de quadrados total, aplicaremos o algoritmo de Yates para o cálculo dos efeitos principais e das combinações dos factores e as variações. Na tabela 5.5 a seguir as duas primeiras colunas do algoritmo correspondem, à ordem padrão do caso em estudo e aos valores da resposta obtidos nas combinações correspondentes, respectivamente (ver tabela 5.4). As três colunas a seguir, referem-se ao número de factores, ou seja $k = 3$ para este caso em estudo. As mesmas são geradas tendo em conta o seguinte procedimento: os primeiros 2^{k-1} valores da coluna 1, são as somas de pares sucessivos da coluna da resposta (que neste caso, resposta é a soma total dos valores obtidos nas duas réplicas), ($20+4 = 20$, $19+12 = 31$, ...), os 2^{k-1} valores seguintes, são diferenças de pares sucessivos da resposta coluna, subtraindo ao valor de baixo o valor de topo ($0 - 20 = -20$, $12 - 19 = -7$, ...). Feito isso, obtemos a 1 coluna; usamos o mesmo procedimento a partir da coluna 1 para obtermos a coluna 2, da coluna 2 para a 3.

Tabela 5.5. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações

Nº	(Y1+Y2)	C1	C2	C3	Efeito	SS
(1)	20	20	51	95	5,9375	564,0625
<i>a</i>	0	31	44	-39	-4,875	95,0625
<i>b</i>	19	15	-27	25	3,125	39,0625
<i>ab</i>	12	29	-12	19	2,375	22,5625
<i>c</i>	12	-20	11	-7	-0,875	3,0625
<i>ac</i>	3	-7	14	15	1,875	14,0625
<i>bc</i>	16	-9	13	3	0,375	0,5625
<i>abc</i>	13	-3	6	-7	-0,875	3,0625

O efeito total dos factores e das interacções é obtido pela divisão dos valores da coluna k (nesta tabela corresponde ao C3) por $2^{k-1}n$, onde o n representa o número de réplicas que neste caso é $n=2$, com excepção a primeira entrada que o divisor será o $2^k n$. Quanto às variações dos mesmos, a divisão é feita elevando ao quadrado os valores da coluna k e dividi-los por $2^k n$.

Aplicaremos agora a fórmula para o cálculo da variação residual, que consiste na diferença entre a Variação Total e a soma das variações dos factores e das interacções:

$$SS_{Erro} = SS_T - \sum SS_{F e Int} \quad (5.8)$$

Note que na fórmula (5.8) $\sum SS_{Factores e Int.}$ será a soma dos valores das variações dos efeitos dos factores e suas interacções da última coluna da tabela 5.5, com excepção ao primeiro valor. Neste caso, temos:

$$SS_{Erro} = 204,826 - 177,4375 = 27,39$$

Tendo o valor da variação residual, segue a Análise da Variância que será feita de acordo as fórmulas do Quadro em anexo nº III para se tirarem conclusões.

Tabela 5.6. Tabela de ANOVA para o Factorial completo 2^3

Fonte de Variação	SS	g.l	MQ	F_0
A	95,0625	1	95,0625	27,7667
B	39,0625	1	39,0625	11,4097
AB	22,5625	1	22,5625	6,59026
C	3,0625	1	3,0625	0,89452
AC	14,0625	1	14,0625	4,10751
BC	0,5625	1	0,5625	0,1643
ABC	3,0625	1	3,0625	0,89452
Erro	27,39	8	3,423611	
Total	204,826	15		

Foram analisados todos os efeitos principais e as interações. Após análise, notamos que os factores principais *A* e *B* e a sua respectiva interacção *AB* são significativos, ou seja, *A* (Temperatura de soldagem) e *B* (Pressão da máquina durante a colagem das embalagens) e *AB* (Temperatura de colagem & Pressão da máquina durante a soldagem das embalagens) é que têm influência na variável resposta. Neste caso são os que afectam a variável resposta, pois comparando as razões *F* calculadas, com o valor da distribuição *F* (valor tabelado) a nível de significância de 5%, temos: $F_{0,05;1,8} = 5,318 < F_{\text{Calculado}}$. Com base na Análise de Variância, concluímos que o Planeamento Factorial Completo com todos os factores para este caso é desnecessário e que um modelo reduzido que inclua menos variáveis é o mais apropriado.

Uma outra forma que se usou para interpretação dos resultados é o método de gráfico. Em geral são vários os métodos gráficos e simples que desempenham um papel importante na análise dos resultados. Apresentamos de seguida o gráfico de probabilidade normal.

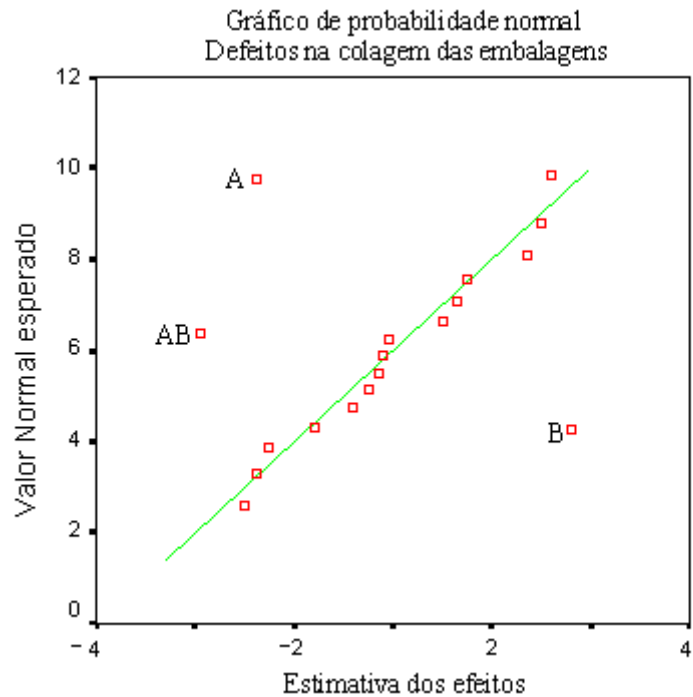


Gráfico 5.1. Gráfico de probabilidade normal

A partir do gráfico de probabilidade normal também nota-se que os efeitos principais dos factores *A* e *B* e o efeito da sua interacção *AB* são significativos. Ou seja, visivelmente podemos notar que os efeitos principais destes factores e a sua interacção, localizam-se distante da recta que passa pelos outros pontos, confirmando assim as conclusões da tabela 5.6 da ANOVA.

5.8. Optimização do processo.

Neste Planeamento de Experiências o nosso interesse é a determinação das variáveis do processo que afectam a resposta. Com isso, vamos determinar as regiões que levam à melhor resposta possível. De recordar, que a variável-resposta é “*Defeitos de colagem das embalagens*”, o que implica que procuraremos pela região mínima de defeitos, ou seja uma região onde o processo de produção apresenta poucos defeitos.

Da análise feita no Planeamento de Experiências notou-se que as variáveis mais importantes do processo são a temperatura e a pressão de colagem. Os investigadores

tinham decidido trabalhar com a variação da Temperatura e Pressão de acordo a seguinte tabela:

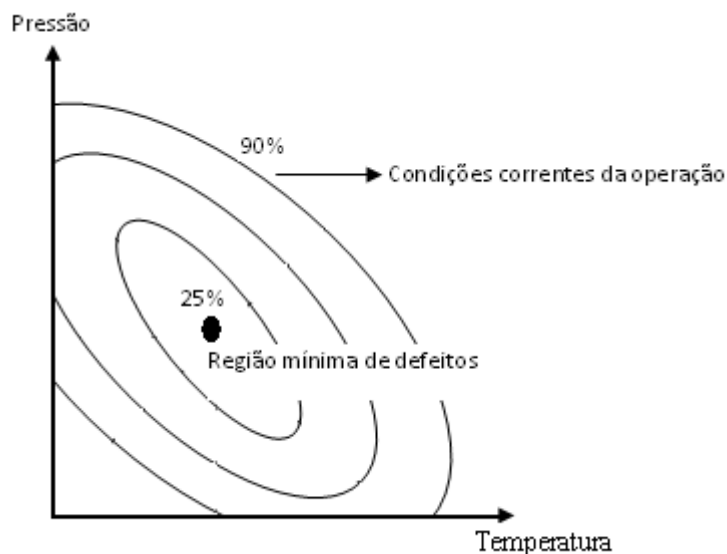
Tabela 5.7. Níveis de temperatura e de pressão

	Temperatura (°C)	Pressão (atm)
Soldadura	450 °C à 590 °C	14atm à 25atm
	160 °C (LS)	30atm

Uma alternativa de Planeamento de Experiências que é usada na empresa é a mudança de factores um de cada vez, em vez de variá-los de forma sincrónica. Concluimos que este tipo de Planeamento (que consiste num factor de cada vez) não é aconselhável, uma vez que a região óptima por este indicado, em muitas das vezes fica abaixo da região real. Tem ainda outra desvantagem, uma vez que não detecta a interacção dos factores Temperatura e a Pressão, pelo que aconselha-se ao uso de Planeamentos Factoriais como único caminho para detectar interacções, tal como fizemos referência na secção 2.5. O estudo das interacções nestes casos é muito útil pela razão de que quando a interacção é muito grande, os efeitos principais correspondentes têm pouco significado, o que muitas das vezes precipita-nos em concluir que não existe efeito neste ou naquele factor.

De seguida apresentamos o gráfico da interacção dos factores Temperatura de Soldagens das embalagens & Pressão de soldagem.

Gráfico 5.2. Superfície de resposta de 1ª ordem



Neste gráfico temos as linhas de rendimento que formam os contornos de resposta. Essas linhas são apresentadas em diferentes rendimentos com objectivo de atingirmos a zona de excelência que será a região onde o processo oferecerá menos defeitos. Para este estudo a equipa fixou a região de defeitos em 25%. Estabeleceu-se este valor relacionando a quantidade produzida com a que apresentou defeitos. Após isso, fixamos a meta de reduzi-la para 5%. Mas na verdade as rodadas serão feitas de forma sequencial até quanto possível diminuirmos a resposta. Em função a isso a meta definida pode ser atingida ou não, ou ainda ultrapassar-se. Para localizar a região óptima, é necessário que se realize um Planeamento de Experiências com os factores *A* (Temperatura de soldagem) e *B* (Pressão da máquina durante a colagem das embalagens) os quais influenciam a variável-resposta segundo a análise feita. Assim sendo, variar-se-á a Pressão e a Temperatura ao mesmo tempo. Para isto, o Planeamento adequado é o Planeamento de Experiências factorial, onde observaremos os dois factores à dois níveis. Neste gráfico nos deslocaremos na direcção geral de temperatura crescente e pressão decrescente para diminuirmos os defeitos até atingirmos a zona de excelência. Após o número de rodadas planeadas, poderão ainda ser realizadas outras, caso seja necessário para localizar-se a região mínima de defeitos.

5.8.1. Planeamento factorial 2^k .

Após o Planeamento Factorial Fraccionado com todos os factores, aplicaremos agora o Planeamento de Experiências com apenas os factores que influenciam a variável-resposta, que são *A* e *B*, Temperatura e Pressão, respectivamente, cada um com dois níveis. Aplicaremos o factorial 2^2 , que o caso mais simples do factorial 2^k .

Considerando as informações da análise estatística do planeamento anterior, fixemos agora as variações da Temperatura e da Pressão da seguinte forma:

Tabela 5.8. Níveis de Temperatura para o Factorial Composto Central

Níveis	Temperatura	Notação
–	460°	T1
0	525°	T2
+	590°	T3

Tabela 5.9. Níveis de Pressão para o Factorial Composto Central

Níveis	Pressão	Notação
–	16atm	P1
0	23atm	P2
+	30atm	P3

Para determinar o efeito dos factores (Temperatura e Pressão), aplicar-se-á o factorial 2^2 . Uma das preocupações que se tem tido na aplicação deste tipo de Planeamento Factorial de dois níveis é a hipótese de linearidade dos efeitos dos factores. É que quando se aplica este tipo de Planeamento Factorial, dificilmente dá-se conta se a resposta varia de forma linear ou não em função dos factores, pelo que devemos recorrer por outras técnicas que ajudam na resolução desse tipo de problemas. Dentre elas, destaca-se o modelo de ajuste de primeira ordem, no qual, acrescenta-se quatro pontos centrais na matriz de Planeamento. Esses pontos são experiências em que os factores têm os níveis correspondentes ao nível intermédio dos níveis usados no 2^k , ou seja, têm o nível codificado igual a zero (MONTGOMERY, 2009).

A adição de pontos centrais ao Planeamento 2^k é bastante útil, uma vez que:

- Permite investigar efeitos de curvatura, isto é, permite testar se os termos quadráticos puros são necessários.

- Não altera a estimativa dos efeitos dos factores e das interacções.

O quadro seguinte apresenta a matriz de Planeamento e os resultados obtidos.

Tabela 5.10. Rendimento de Temperatura do factorial composto central

Temperatura (°C)	Pressão (atm)	Rendimento (%)
T1	P1	93
T3	P3	93,8
T1	P1	93,7
T3	P3	94,6
T2	P2	94
T2	P2	94,2
T2	P2	93,7
T2	P2	94,1

Nesta matriz temos $n_F = 4$ (que correspondem às 4 primeiras experiências) e $n_{pc} = 4$ (as outras quatro experiências para as quais a Temperatura e a Pressão adoptam o nível intermédio).

Começaremos por achar a variação total, que será:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad (5.9)$$

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} = (93^2 + \dots + 94,1^2) - \frac{(564151,21)^2}{8} = 1,53$$

As variações dos factores e da interacção entre eles serão calculadas usando a fórmula (5.11).

De forma geral e simples, o efeito e a variação de um qualquer factor X à dois níveis são dados por:

Efeito do Factor X :

$$X = \frac{(\text{Constraste})^2}{2^{k-1}n} = \frac{(\sum y)_{X^+} - (\sum y)_{X^-}}{2^{k-1}n} \quad (5.10)$$

Efeitos principais:

$$SQ_X = \frac{(\text{Contraste})^2}{2^k n} = \frac{[(\sum y)_{X^+} - (\sum y)_{X^-}]^2}{2^k n} \quad (5.11)$$

O contraste de um factor é designado pela seguinte forma:

$$\text{Contraste de } A = -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 \quad (5.12)$$

$$\text{Contraste de } B = -y_1 - y_2 + y_3 + y_4 \quad (5.13)$$

$$\text{Contraste de } AB = +y_1 - y_2 + y_3 + y_4 \quad (5.14)$$

Na equação (5.11) os termos $(\sum y)_{X^+}$ e $(\sum y)_{X^-}$ denotam as somas dos valores da resposta Y quando o factor X está, respectivamente, nos níveis $+$ e $-$ (alto e baixo).

De igual modo se calculariam as variações das interacções, correspondendo aos termos $(\sum y)_{\text{interacção}^+}$ e $(\sum y)_{\text{interacção}^-}$ neste caso, denotam às somas dos valores da resposta quando a interacção tem, respectivamente, sinal $+$ ou $-$.

Assim sendo, para o Planeamento em estudo, temos os seguintes valores:

$$SS_{Q_{\text{Temperatura}}} = \frac{[(94,6 + 93,8) - (93,7 + 93,0)]^2}{4} = 0,73$$

$$SS_{Q_{\text{Pressão}}} = \frac{[(94,6 + 93,7) - (93,8 - 93)]^2}{4} = 0,57$$

$$SS_{Q_{\text{Temperatura Pressão}}} = \frac{[(94,6 + 93,0) - (93,7 - 93,8)]^2}{4} = 0,0025$$

$$\bar{Y}_F = \frac{y_i}{n_F} = \frac{(93,0 + 93,8 + 93,7 + 94,6)}{4} = 93,78$$

$$\bar{Y}_{pc} = \frac{y_j}{n_{pc}} = \frac{(94,0 + 94,2 + 93,7 + 94,1)}{4} = 94$$

$$SS_{curvatura} = \frac{n_F n_{pc} (\bar{Y}_F - \bar{Y}_{pc})^2}{n_F + n_{pc}} = \frac{4 * 4(93,78 - 94)^2}{4 + 4} = 0,097$$

$$MS_{Erro} = \frac{\sum_1^{n_{pc}} (y_j - \bar{Y}_{pc})^2}{n_{pc} - 1} = \frac{(94 - 94)^2 + (94,2 - 94)^2 + (93,7 - 94)^2 + (93,1 - 94)^2}{4 - 1} = 0,047$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_A - SQ_B - SQ_{AB} = 0,68$$

Tabela 5.11. ANOVA para o Planeamento Factorial 2²

Fonte de Variação	SS	g.l	MS	F ₀
Temperatura	0,73	1	0,73	15,86
Pressão	0,57	1	0,57	12,39
Pemp ^a . x Pressão	0,0025	1	0,0025	0,054
Curvatura	0,002	1	0,002	0,043
Erro	0,68	3	0,046	
Total		7		

Após a ANOVA é necessário examinar se realmente a curvatura é ou não significativa. Caso o efeito da curvatura seja significativo, haverá a necessidade de ajustar-se o modelo de 2^a ordem, que se definiria pela seguinte equação:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (5.15) \text{ ver(3.2)}$$

Segundo (PEREIRA & REQUEIJO, 2008) um modelo de 2^a ordem que inclua efeitos quadráticos puros implica a estimação de $(k + 1)(k + 2)/2$ parâmetros de regressão, onde k é o número de factores analisados. A adição de n_{pc} pontos centrais e ainda os chamados pontos axiais ao factorial 2^k ou ainda 2^{k-p} permite estudar todos os coeficientes do modelo de 2^a ordem.

Este tipo de planeamento designa-se por Desenho Composto Central (designado na literatura anglo-saxónica por CCD, Central Composite Design).

Temos as seguintes hipóteses a testar:

$$H_0 : \sum_1^k \beta_{ii} = 0$$

$$H_1 : \sum_1^k \beta_{ii} \neq 0$$

A partir da ANOVA (Tabela 5.11) verificamos que ao nível de significância de 0,05 temos $F_{0,05;1;3} = 10,13 < F_0$ para A e B, concluimos que os dois factores (Temperatura e a Pressão) afectam significativamente a variável-resposta (*Defeitos de colagem das embalagens*). Mas no entanto nota-se que a curvatura não é significativa uma vez que $F_{0,05;1;3} > F_0$, pelo que, não é necessário ajustar o modelo de 2ª ordem.

5.9. Planeamento para o ajuste de um modelo de primeira ordem.

Este modelo é aplicado nos casos em que se deseja aproximar rapidamente para superfície de resposta. O modelo de 1ª ordem que ajusta ou que corresponde a esta experiência deve ser dado por:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 \quad (5.16) \text{ ver(3.3) , onde:}$$

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_1^8 y_i}{8} = \text{média de todas as observações}$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\text{Efeito de A}}{2} \text{ e } \hat{\beta}_2 = \frac{\text{Efeito de B}}{2}$$

Pode-se ilustrar esta abordagem, considerando um Planeamento Factorial 2^2 com uma observação em cada um dos pontos factoriais (-, -), (+, -), (-, +), (+, +) e n_c observações no ponto central (0, 0). Esta situação pode ser ilustrada da seguinte forma:

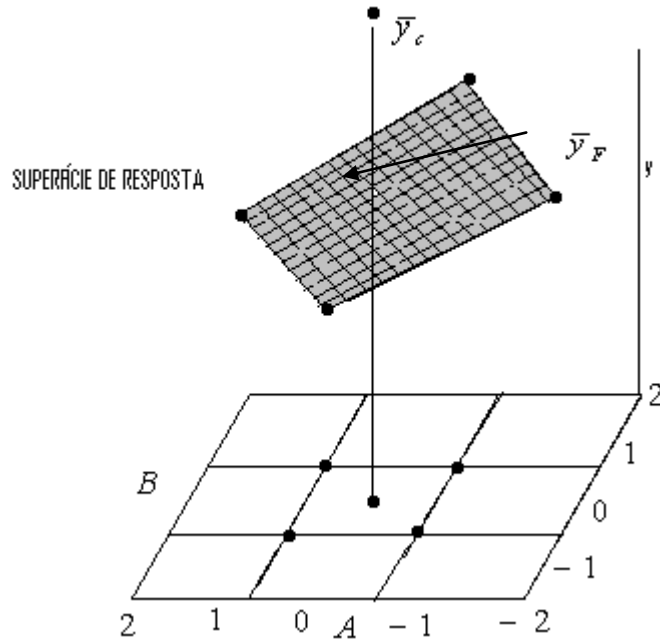


Figura 5.4. Planeamento 2^2 com pontos centrais (Fonte: Montgomery, 2009).

Para o caso em estudo e, usando a fórmula 5.12 e 5.13 obtemos os valores dos seguintes coeficientes:

$$\hat{\beta}_1 = 0.425 \text{ e } \hat{\beta}_2 = 0.4$$

$$\hat{Y} = 93,80 + 0,425x_1 + 0,4x_2 \quad (5.17)$$

Nesta equação os x_1 e x_2 denotam, respectivamente os níveis codificados dos factores Temperatura e Pressão. A ANOVA indica que o modelo (equação 5.16) pode ser usado para ajustar as condições óptimas do processo.

Feita a análise far-se-á a determinação da região ótima do processo, com base na metodologia de superfície de resposta.

5.9.1. Metodologia da superfície de resposta do processo.

O objectivo da metodologia do Planeamento de Superfície de Resposta é otimizar a resposta. Tal como se fez referência no Capítulo 3, secções 3.1 e 3.1.1, a fase inicial do

estudo começou com a aplicação do Planeamento 2^k que permitiu a redução do primeiro conjunto de factores num subconjunto de factores constituído apenas pelos factores mais importantes ou que interferem na resposta.

Aqui o objectivo é diminuir a resposta, por isso será necessária a aplicação do método de inclinação máxima descendente.

Outro aspecto ainda a recordar, é que quando se atinge a vizinhança do óptimo, é geralmente necessário ajustar-se um modelo de 2ª ordem, o que aqui não será necessário uma vez que neste caso, o efeito de curvatura não é significativo (Tabela 5.11).

A produção do processo pode ser representada como função dos níveis de Temperatura e de Pressão, ou seja:

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (5.18)$$

Nesta equação o ε representa o ruído ou erro observado na resposta Y . O valor esperado da resposta é dado por:

$$E(y) = f(x_1, x_2) \quad (5.19)$$

Para nos movermos ao longo do caminho de máxima inclinação descendente para a localização da condição óptima, começaremos por fazer o cálculo da proporção dos coeficientes da equação. Dada a equação 5.17 desejamos mover 0,425 unidades na direcção de x_1 para cada 0,4 unidades na direcção de x_2 . Assim, a trajectória de inclinação terá como coeficiente de proporcionalidade a razão $0,425/0,4 = 1,0625$. A seguir temos a tabela que ilustra os resultados da aplicação do método de inclinação máxima descendente.

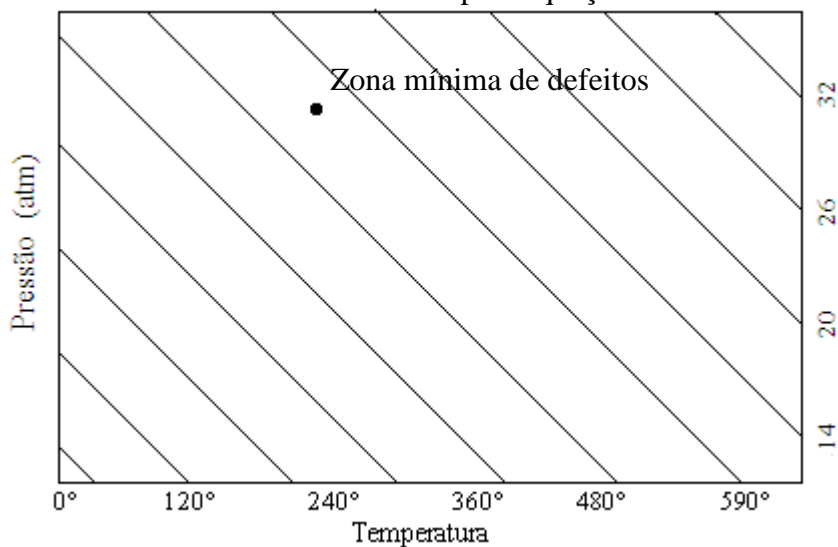
Tabela 5.12. Tabela de inclinação máxima descendente

Variáveis naturais		Variáveis codificadas		Resposta Y
Temperatura	Pressão	X ₁	X ₂	
T1	P1	-	-	92,98
T3	P3	+	-	93,78
T1	P1	-	+	93,78
T3	P3	+	+	94,63
T2	P2	0	0	93,80
T2	P2	0	0	93,80
T2	P2	0	0	93,80
T2	P2	0	0	93,80
.
.
.

Neste exemplo nota-se que na rodada temperatura de T3 (em °C) e Pressão P3 (em *atm*) é que se obtém o melhor rendimento de 94,63%, mostrando que é possível diminuir os defeitos da produção. Após encontrarmos a região óptima de operação novos testes foram feitos para confirmar a região encontrada.

Podemos assim mostrar a capacidade e a eficácia do método de Planeamento de Experiências na diminuição dos defeitos na colagem das embalagens.

Gráfico 5.3. Contorno para equação 5.17



Pode-se reparar que este modelo foi obtido suprimido o termo da interação do modelo geral. Isto pode acontecer apenas quando se tratam de matrizes ortogonais, como é

no caso concreto de Planeamento Factorial Completo 2^k . No gráfico 5.3, observa-se que as linhas de resposta são rectas por se tratar de uma resposta de primeira ordem, ou seja, contém apenas os efeitos principais x_1 e x_2 .

Aplicaremos no capítulo a seguir as cartas de controlo da média e do Desvio Padrão, para o estudo sobre a Qualidade da característica do produto que é definida em função da variável resposta, como na tabela abaixo:

Tabela 5.13. Característica de Qualidade a estudar

Característica do produto	Designação no trabalho
Ausência de defeitos na colagem das embalagens	<i>CQ</i>

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO DA QUALIDADE

6. Aplicação das cartas de controlo da média e do desvio padrão

Da forma como procedeu-se na aplicação do *DOE*, a aplicação das Cartas de Controlo também começou com uma preparação dos intervenientes do processo de produção, com mais ênfase para a equipa de Controlo da Qualidade. Nesta preparação mostrou-se aos intervenientes a vantagem da utilização das Cartas de Controlo para o Controlo Estatístico de Qualidade e a consequente desvantagem caso as mesmas não sejam bem aplicadas, sem esquecer-se de salientar os factores que podem afectar o processo, como é o caso das pessoas, equipamento, materiais, métodos, ambiente, etc. Definiu-se por último a característica a ser estudada (secção 5.9.1), o tipo de informação a ser recolhida e a forma como recolhe-la.

6.1. Recolha da amostra

Este foi mais um outro passo crucial no estudo, uma vez que o método usado para a recolha da amostra, o seu tamanho e a frequência, influenciam sempre o resultado final da pesquisa. Neste contexto, a recolha fez-se de forma cuidadosa para evitar que as conclusões a serem tiradas no fim sejam conclusões erradas.

Para garantir a homogeneidade das amostras, foram recolhidas em cada um minuto cinco embalagens, durante dois minutos seguidos totalizando dez embalagens que constituem uma amostra. Depois com um intervalo de 5 minutos repetia-se o mesmo processo até constituir 20 amostras. Já nos referimos de que a produção diária depende muito da quantidade de produto solicitado pelos clientes, o que também foi um factor decisivo na determinação da frequência da amostra.

As amostras foram recolhidas de forma a maximizar a diferença entre grupos e minimizá-la dentro do grupo. No quadro a seguir, m representa o número da amostra e n a dimensão da amostra.

Tabela 6.1. Tabela das amostras

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Continuação (Tabela 6.1. Tabela das amostras)

<i>m</i>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>n</i>	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Como fez-se referência, os métodos até aqui abordados, aplicam-se nos casos em que as amostras são independentes; no caso em estudo caso amostras não fossem independentes, um outro estudo seria conduzido, pois haveria a necessidade da aplicação das Cartas especiais de Controlo.

A característica de Qualidade por analisar neste estudo em função da variável-resposta estudada é: *ausência de defeitos de colagem das embalagens*.

O valor da característica será analisado numa escala numérica de 0 à 10. Trata-se de característica do tipo Menor-é-melhor, para a qual se deseja o menor valor possível, ou seja, quanto mais o valor estiver próximo do zero (0), melhor será o resultado desejado ou esperado.

As tabelas abaixo, apresentam os resultados obtidos durante as observações do estudo da característica “CQ”.

Tabela 6.2. Tabela dos resultados das amostras

<i>N</i>^o	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>x</i>₁	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
<i>x</i>₂	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<i>x</i>₃	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
<i>x</i>₄	3	0	1	0	1	0	0	1	0	1
<i>x</i>₅	2	2	0	0	1	1	1	1	0	0
<i>x</i>₆	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0
<i>x</i>₇	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>x</i>₈	2	0	0	0	0	0	1	0	1	0
<i>x</i>₉	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>x</i>₁₀	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0

Continuação (Tabela 6.2. Tabela dos resultados das amostras)

Nº	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x_1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	4
x_2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	5
x_3	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0
x_4	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
x_5	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0
x_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
x_7	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
x_8	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
x_9	0	0	0	1	0	0	0	0	6	0
x_{10}	0	0	0	1	0	0	0	0	6	0

Para construção das Cartas de Controlo, começamos por calcular o valor das médias das amostras utilizando a fórmula (4.4) e obtemos os seguintes valores:

No caso da tabela 6.2 onde a característica de qualidade é *diminuição dos defeitos de colagem das embalagens* a medição e classificação dos defeitos é realizada numa escala contínua através do próprio sistema de produção cuja visualização é feita através de um gráfico de linhas.

Tabela 6.3. Tabela das médias amostrais

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
\bar{X}_i	0.6	0.4	0.1	0	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3

Continuação (Tabela 6.3. Tabela das médias amostrais)

Nº	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
\bar{X}_i	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3

Calculamos a média global das amostras utilizando as fórmulas (4.6) e (4.7):

$$\bar{\bar{X}} = 0.27$$

$$\bar{S} = 1.57$$

E tendo já o valor tabelado de A_3 .

$$A_3 = 0,975$$

Usando as fórmulas 4.10 e 4.11, calculamos os limites de controlo:

Tabela 6.4. Tabela dos limites das cartas

	Carta \bar{X}	Carta S
<i>LSC</i>	2.7	4.01
<i>LC</i>	0.27	2.26
<i>LIC</i>	-1.26	0.50

No caso do limite inferior para a carta da média, obteve-se um valor negativo. Neste caso, uma vez que a característica da Qualidade em estudo é Menor-é-melhor (função perda de Taguchi), não precisar-se-á em trabalhar com os valores negativos, pelo que deve-se trabalhar com o $LIC = 0$. Quanto ao limite central tanto para a Carta da Média como a do Desvio Padrão, passarão praticamente a não ter qualquer influência, uma vez que se pretende de um número mínimo possível de defeitos, sendo o LIC a ser considerado como alvo ou Nominal.

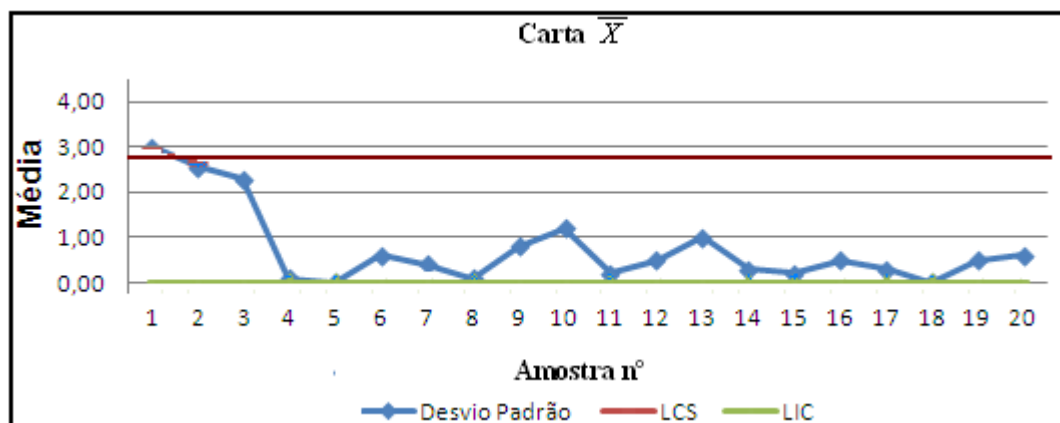


Figura 6.1. Carta de controlo da Média

Após a construção das cartas de controlo da Média e do Desvio Padrão, procede-se à análise de cada uma delas relativamente aos padrões que cada uma delas apresenta. De recordar a mesma é feita de acordo a norma **ISO 8258: 1991** (secção 4.4). No caso do gráfico da média, nota-se a existência de um ponto de causa especial de variação, pelo que o processo não se encontra dentro do controlo estatístico. Com isso, deve retirar-se a referida amostra e conseqüentemente procurar analisar a causa para ser corrigida. Após a correção serão adoptadas novas medidas para evitar a mesma ocorrência e/ou ainda calcular novos limites para a referida carta, caso a origem da causa exija.

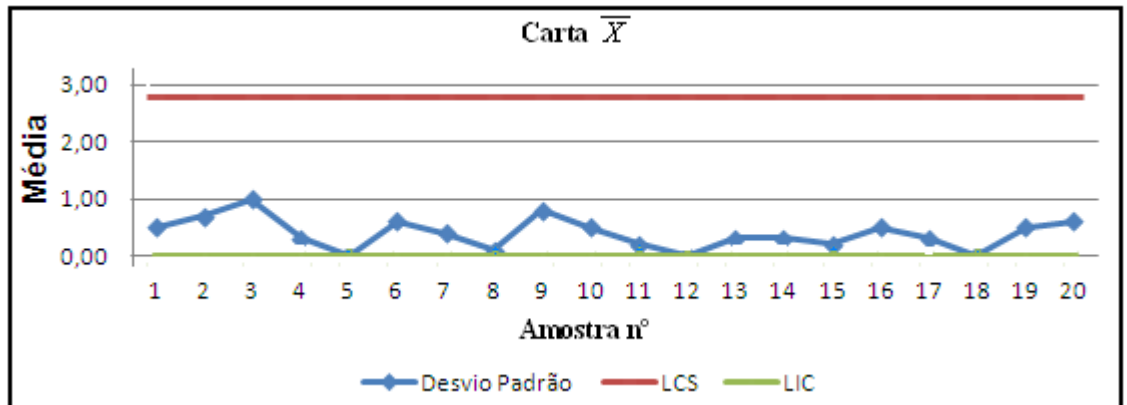


Figura 6.2. Carta de Controle da Média (sob controlo estatístico) de CQ

Depois de analisada a situação e resolvida, prosseguiu-se com o estudo construindo, uma outra carta de controlo. Pode-se reparar nesta nova carta (figura 6.2) que não há qualquer problema de alarme.

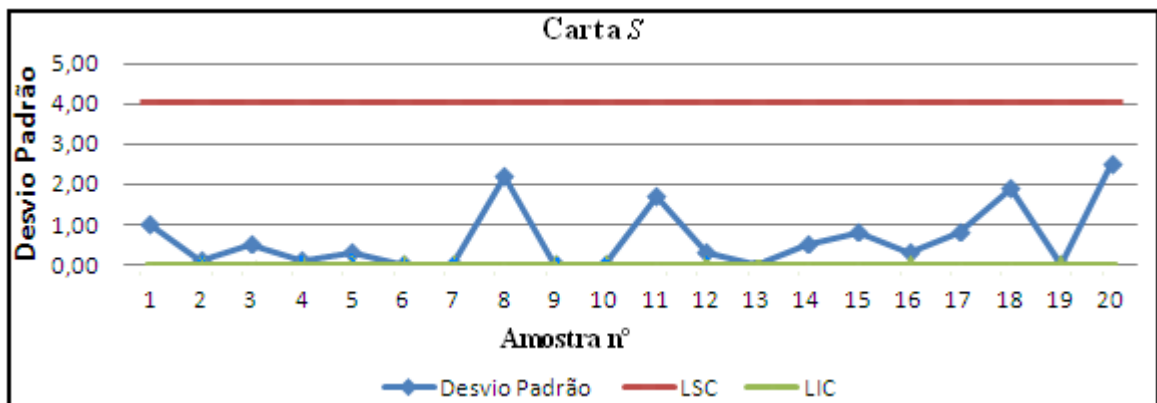


Figura 6.3. Carta de controlo do Desvio Padrão de CQ

Concluído o estudo, da característica de qualidade da variável *CQ*, segue-se o estudo da variável “*Bolhas de ar no interior da embalagem*”.

CAPÍTULO VII

ESTUDO DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

7. Estudo da variável bolhas de ar no interior embalagem

Após a conclusão do estudo da variável-resposta “CQ” segue agora o estudo sobre a variável “CR”, com a construção de matrizes de Planeamento. Tal, como aconteceu no estudo da variável anterior, o Planeamento começa com um estudo incluindo os factores intervêm nesta fase do processo. Na fase inicial conservaremos a variação dos diferentes factores de acordo ao funcionamento normal da Empresa. De recordar que temos seleccionado os seguintes factores:

- *A* (Velocidade)
- *B* (B_1 – Temperatura de soldagem, B_2 – Temperatura de arrefecimento)
- *C* (Tempo)
- *D* (D_1 – Pressão de saída do líquido, D_2 – Pressão de máquina de soldagem)
- *E* (Quantidade)

Para essa fase, é fácil notar que seria desnecessário por exemplo, factores como B_1 (Temperatura de soldagem), D_2 (Pressão de máquina de soldagem), serem incluídos no estudo. Começaremos a análise com os seguintes factores:

- *A*: Tempo;
- *B*: Temperatura de arrefecimento;
- *C*: Quantidade;
- *D*: Pressão de saída do líquido.

Os valores de diferentes factores foram codificados da seguinte forma:

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.1. Variação funcional dos factores.

Níveis	Veloc.	Quant	Temperatura		Tempo	Pressão	
			Tempet ^a de arrefecimento	Tempet ^a de soldagem		Press. de saída do líq.	Press. de soldagem
-		1/2l	5 °C	450 °C	10min	20 Bar	25 Bar
+		1l	27 °C	590 °C	20min	25 Bar	35 Bar

Para o estudo desses factores, optou-se por aplicar o Planeamento Factorial completo 2^k , onde $k = 4$ e que resultará na realização de 16 experiências. A experiência será feita com réplica ($n = 2$).

Tabela 7.2. Matriz de Planeamento Factorial completo 2^4

Rodada	Combinações	A (Velocidade)	B (Temp ^a de arref)	C (Tempo)	D (Quantidade)	E=ABCD Pressão Saída do líq.
1	(1)	-	-	-	-	-
2	a	+	-	-	-	+
3	b	-	+	-	-	+
4	ab	+	+	-	-	-
5	c	-	-	+	-	+
6	ac	+	-	+	-	-
7	bc	-	+	+	-	-
8	abc	+	+	+	-	+
9	d	-	-	-	+	-
10	ad	+	-	-	+	+
11	bd	-	+	-	+	+
12	abd	+	+	-	+	-
13	cd	-	-	+	+	+
14	acd	+	-	+	+	-
15	bcd	-	+	+	+	-
16	abcd	+	+	+	+	+

Após a construção da matriz é apresentada a tabela de respostas.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.3. Respostas do Planeamento

Rodadas	Resposta (Y1+Y2)	
	Y1	Y2
1	0,0	0,0
2	7,5	2,5
3	8,4	8,4
4	3,0	9,0
5	2,7	5,3
6	8,0	8,0
7	3,3	9,8
8	9,9	9,9
9	3,3	6,7
10	4,9	9,9
11	8,5	4,2
12	7,5	7,5
13	9,0	9,0
14	7,5	7,5
15	9,0	9,0
16	10,0	10,0

Após a resposta obtida, começaremos por calcular a soma total pela fórmula:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} \quad (5.7)$$

Fazendo a substituição dos valores obtidos da tabela 5.20 (Tabela soma do Planeamento), temos o seguinte:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} = (0,0^2 + 2,5^2 + \dots + 10,0^2) - \frac{(219,0)^2}{32}$$

$$SQ_T = 1772,7 - \frac{47961}{32} = 273,91$$

Aplicando o algoritmo de Yates, de acordo o procedimento do estudo da variável resposta anterior, obtemos o seguinte Quadro:

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.4. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações

Nº	Ordem	(Y1+Y2)	C1	C2	C3	C4	Efeito	SS
1	-1	0	10	38,8	95,5	219	6,8438	1498,78
2	<i>a</i>	10	28,8	56,7	124	26	1,625	21,125
3	<i>b</i>	16,8	24	52,5	19,9	35	2,2125	39,1613
4	<i>ab</i>	12	32,7	71	6,1	-14	-0,85	5,78
5	<i>c</i>	8	24,8	5,2	27,5	36	2,275	41,405
6	<i>ac</i>	16	27,7	14,7	7,9	1,4	0,0875	0,06125
7	<i>bc</i>	13	33	7,1	-16	-8	-0,5	2
8	<i>abc</i>	19,7	38	-1	2,5	21	1,3125	13,7813
9	<i>d</i>	10	10	18,8	17,9	28	1,75	24,5
10	<i>ad</i>	14,8	-4,8	8,7	18,5	-14	-0,863	5,95125
11	<i>bd</i>	12,7	8	2,9	9,5	-20	-1,225	12,005
12	<i>abd</i>	15	6,7	5	-8,1	19	1,1625	10,8113
13	<i>cd</i>	18	4,8	-14,8	-10	0,6	0,0375	0,01125
14	<i>acd</i>	15	2,3	-1,3	2,1	-18	-1,1	9,68
15	<i>bcd</i>	18	-3	-2,5	13,5	12	0,7625	4,65125
16	<i>abcd</i>	20	2	5	7,5	-6	-0,375	1,125

Aplicando a fórmula 5.8 para o cálculo da variação residual, que consiste na diferença entre a Variação Total e a soma das variações dos factores e das interacções, obtemos para o erro o seguinte valor:

$$SS_{\text{Erro}} = 81,87$$

De seguida e usando as fórmulas da tabela da ANOVA (Anexo nº III), obtemos a seguinte tabela da ANOVA:

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.5. ANOVA para o factorial completo 2⁴

<i>Fonte de Variação</i>	<i>SS</i>	<i>g.l</i>	<i>MS</i>	<i>F₀</i>
<i>A</i>	21,125	1	21,125	4,129
<i>B</i>	39,161	1	39,161	7,654
<i>AB</i>	5,780	1	5,780	1,130
<i>C</i>	41,405	1	41,405	8,092
<i>AC</i>	0,061	1	0,061	0,012
<i>BC</i>	2,000	1	2,000	0,391
<i>ABC</i>	13,781	1	13,781	2,693
<i>D</i>	24,500	1	24,500	4,788
<i>AD</i>	5,951	1	5,951	1,163
<i>BD</i>	12,005	1	12,005	2,346
<i>ABD</i>	10,811	1	10,811	2,113
<i>CD</i>	0,011	1	0,011	0,002
<i>ACD</i>	9,680	1	9,680	1,892
<i>BCD</i>	4,651	1	4,651	0,909
<i>ABCD</i>	1,125	1	1,125	0,220
<i>Erro</i>	81,866	16	5,117	
<i>Total</i>	273,914	31		

A partir da ANOVA confirmou-se que ao nível de significância de 0,05 tem-se $F_{0,05;1,16} = 4,494 < F_{\text{calculado}}$, para os factores principais *B*, *C* e *D*. Neste caso, são os que afectam significativamente a resposta. De salientar que neste Planeamento, apesar de o mesmo se planear a sua execução com réplica ($n = 2$), as primeiras 5 rodadas foram repetidas várias vezes. Isto porque, ao regularmos o factor velocidade (velocidade da linha de enchimento), quanto mais fosse o tempo de demora durante a paragem, mais ocorria a obstrução na linha de enchimento. Essa razão fez com que se interrompesse o processo repetidas vezes, até que se conseguiu a sua regulação. Um caso a notar neste estudo é que os factores significativos representam um valor acima de 74%, o que não indicia má escolha de factores e/ou que os níveis escolhidos não foram os mais adequados.

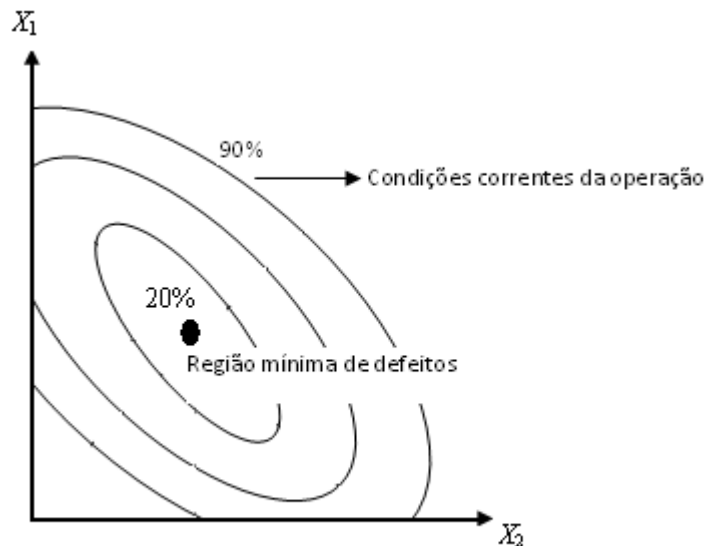
APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

7.1. Optimização do processo

Neste caso a variável-resposta em estudo é “Bolhas de ar no interior das embalagens”; tal como no primeiro aqui também procuraremos pela região mínima de defeitos. Da análise feita no Planeamento de Experiências notou-se que as variáveis mais importantes do processo são *B*, *C* e *D*.

Analisaremos a partir do gráfico o comportamento do rendimento obtido neste Planeamento de Experiências.

Gráfico 7.1. Contorno de Superfície de resposta



Neste gráfico temos as linhas de rendimento que formam os contornos de resposta. Essas linhas são apresentadas em diferentes rendimentos com objectivo de atingirmos a zona de excelência que será a região onde o processo oferecerá menos defeitos. Pela leitura do gráfico, pode-se reparar que nas condições correntes de operação, os defeitos do produto apresentam um índice de 20% e pretende-se reduzi-los até a região mínima possível (região óptima). Para localização desta região decidiu-se em aplicar mais um outro Planeamento de Experiências com apenas os factores que a afectam a variável-resposta, mais ainda, a inclusão de um outro factor que neste caso deverá surgir da divisão do factor quantidade, em outros dois que são: “*Quantidade de líquido na embalagem*” e

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

“Quantidade de azoto na embalagem”. Nota-se que o efeito principal do factor *A* (tempo), não é significativo, uma vez que o valor $F_{0,05;1,16} = 4,494 > F_{\text{calculado}}$. Por esta razão, decidiu-se não incluir este factor no novo planeamento. Decidiu-se a introdução desses factores, porque após os 16 ensaios do Planeamento Factorial completo 2^k , outros ensaios adicionais foram realizados sob diferentes condições (variação de medida dos factores). Decidiu-se dividir o factor Quantidade em outros dois, porque durante os ensaios verificou-se que em diferentes condições e apesar de os factores serem significativos não havia muita alteração no resultado. Todos os factores serão rodados em simultâneo e observados a dois níveis. Assim sendo, temos os seguintes factores:

- A: Pressão de saída do líquido;
- B: Quantidade de azoto;
- C: Temperatura de arrefecimento;
- D: Quantidade de líquido (sumo).

Como a quantidade de Azoto necessária numa determinada medida de líquido, por questões de sigilo técnico-profissional não será referida neste trabalho, o seu tratamento será feito com base numa percentagem.

7.2. Planeamento factorial 2^k

Considerando as informações da análise estatística do planeamento anterior, fixemos agora as variações dos factores da seguinte forma:

Tabela 7.6. Variação de níveis de temperatura

Níveis	Temperatura	Notação
–	5 °C	T1
+	27°C	T3

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.7. Variação de níveis de Pressão

Níveis	Pressão	Notação
-	16atm	P1
+	20atm	P3

Tabela 7.8. Variação de níveis de Quantidade

Níveis	Quantidade	
	Sumo	Azoto
-	1/2l	5%
+	1l	7%

Neste novo planeamento, temos também outro factorial completo 2^4 e serão realizadas 16 experiências com réplica $n = 2$.

Tabela 7.9. Matriz de Planeamento Factorial Completo 2^4

Rodada	Combinações	A	B	AB	C	AC	BC	C	D	AD	CD
1	(1)	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+
2	<i>a</i>	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+
3	<i>b</i>	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-
4	<i>ab</i>	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
5	<i>c</i>	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+
6	<i>ac</i>	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+
7	<i>bc</i>	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-
8	<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
9	<i>d</i>	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-
10	<i>ad</i>	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-
11	<i>bd</i>	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+
12	<i>abd</i>	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+
13	<i>cd</i>	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-
14	<i>acd</i>	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
15	<i>bcd</i>	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
16	<i>abcd</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Após a realização dos ensaios obtemos os seguintes resultados que apresentamos em forma de tabela, de acordo a escala numérica definida anteriormente.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.10. Resposta do Planeamento factorial completo 2^4

Rodadas	Resposta	
	Y1	Y2
1	0,0	0,0
2	7,5	2,5
3	8,4	8,4
4	3,0	9,0
5	0,3	0,7
6	8,0	8,0
7	3,3	9,8
8	9,0	9,0
9	9,0	9,0
10	10,0	6,8
11	8,0	7,0
12	7,5	7,5
13	9,0	9,0
14	7,5	7,5
15	9,0	9,0
16	10,0	10,0

Após a tabela resposta obtida, aplicou-se a fórmula (5.7) para calcular a soma total. Fazendo a substituição dos valores obtidos para o planeamento factorial completo da tabela 7.10, teremos o seguinte:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} = (0^2 + 7,5^2 + \dots + 10^2) - \frac{(222,6)^2}{32}$$

$$SQ_T = 311,58 - \frac{49550,8}{32} = 57,3$$

Após esses resultados aplicou-se o algoritmo de Yates para o cálculo dos efeitos principais dos factores e das interacções, obtendo-se a seguinte tabela:

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.11. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações

<i>Nº</i>	<i>Ordem</i>	<i>Y</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>Efeito</i>	<i>SS</i>
1	-1	0	10	38,8	86,8	223	6,9563	1548,46
2	<i>a</i>	10	28,8	48	136	23	1,4375	16,5313
3	<i>b</i>	16,8	17	64,8	25,2	33	2,0625	34,0313
4	<i>ab</i>	12	31	71	-2,2	-19	-1,163	10,8113
5	<i>c</i>	1	34,8	5,2	32,8	15	0,9625	7,41125
6	<i>ac</i>	16	30	20	0,2	15	0,9375	7,03125
7	<i>bc</i>	13	33	-1,2	-25	5	0,3125	0,78125
8	<i>abc</i>	18	38	-1	6,2	8,6	0,5375	2,31125
9	<i>d</i>	18	10	18,8	9,2	49	3,0625	75,0313
10	<i>ad</i>	16,8	-4,8	14	6,2	-27	-1,713	23,4613
11	<i>bd</i>	15	15	-4,8	14,8	-33	-2,038	33,2113
12	<i>abd</i>	15	5	5	0,2	31	1,9375	30,0313
13	<i>cd</i>	18	-1,2	-14,8	-4,8	-3	-0,188	0,28125
14	<i>acd</i>	15	0	-10	9,8	-15	-0,913	6,66125
15	<i>bcd</i>	18	-3	1,2	4,8	15	0,9125	6,66125
16	<i>abcd</i>	20	2	5	3,8	-1	-0,063	0,03125

Aplicando a fórmula para o cálculo da variação residual (fórmula 5.8), que consiste na diferença entre a Variação Total e a soma das variações dos factores e das interacções, obtemos:

$$SS_{\text{Erro}} = 311,58 - 254,28 = 57,3$$

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.12. ANOVA para o factorial completo 2⁴.

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>g.l</i>	<i>MS</i>	<i>F₀</i>
<i>A</i>	16,531	1	16,531	4,616
<i>B</i>	34,031	1	34,031	9,503
<i>AB</i>	10,811	1	10,811	3,019
<i>C</i>	7,411	1	7,411	2,069
<i>AC</i>	7,031	1	7,031	1,963
<i>BC</i>	0,781	1	0,781	0,218
<i>ABC</i>	2,311	1	2,311	0,645
<i>D</i>	75,031	1	75,031	20,951
<i>AD</i>	23,461	1	23,461	6,551
<i>BD</i>	33,211	1	33,211	9,274
<i>ABD</i>	30,031	1	30,031	8,386
<i>CD</i>	0,281	1	0,281	0,079
<i>ACD</i>	6,661	1	6,661	1,860
<i>BCD</i>	6,661	1	6,661	1,860
<i>ABCD</i>	0,031	1	0,031	0,009
<i>Erro</i>	57,301	16	3,581	
<i>Total</i>	311,579	31		

Com o cálculo do erro e, aplicando as fórmulas da tabela ANOVA (Quadro em anexo), obtemos a ANOVA da tabela 7.12. Com base nesta técnica, verifica-se que ao nível de significância de 5% tem-se que $F_{0,05;1,16} = 4,494 < F_{\text{calculado}}$, para os factores *A*, *B* e *D*, as interacções *AD*, *BD* e ainda a interacção entre os três factores principais. O que indica que com excepção do factor *C*, todos os factores são significativos e as suas respectivas interacções. Assim um modelo reduzido com menos factores deve ser aplicado, isto é, incluindo apenas os factores que afectam a resposta, que neste caso, são os factores *A*, *B* e *D*.

Apresentamos de seguida o gráfico de probabilidade normal construído com ajuda do software SPSS versão 11.5.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

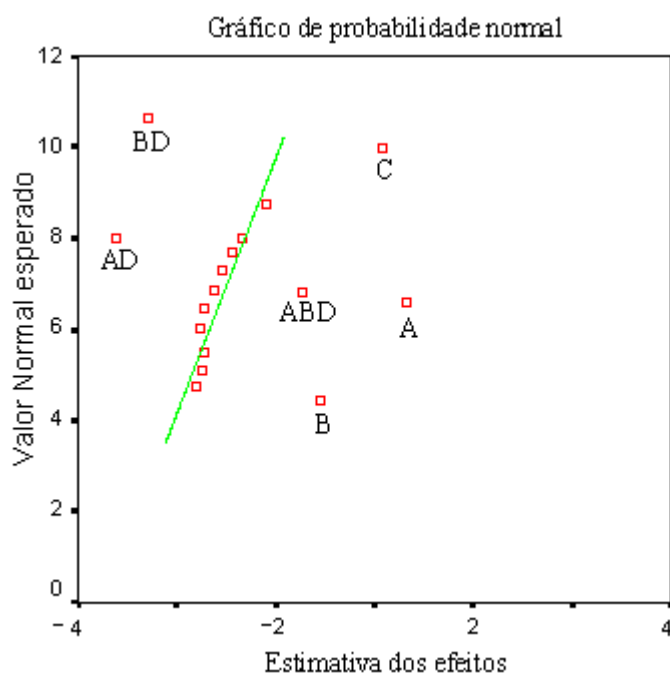


Gráfico 7.2. Probabilidade Normal

No gráfico de probabilidade normal podemos notar que os factores *A*, *C* e *D*, as interacções *AD*, *BD* e *ABD* localizam-se distantes da recta, ao contrário do factor *C* e das restantes interacções.

De seguida realizaremos um novo Planeamento de Experiências, neste caso será o Planeamento Factorial completo $2^k=2^3$. É um Planeamento de Experiências onde trabalharemos com os factores influentes na resposta e excluindo o factor *C*.

7.3. Planeamento factorial 2^3

Nas tabelas a seguir são apresentadas as variações dos diferentes factores em estudo nesta fase:

- *A*: Quantidade de Azoto;
- *B*: Quantidade de líquido;
- *C*: Pressão de líquido.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.13. Variação de níveis de pressão

Níveis	Pressão	Notação
–	18atm	P1
+	26atm	P3

Tabela 7.14. Variação de níveis de Quantidade

Níveis	Quantidade	
	Sumo	Azoto
–	1/2l	8%
+	1l	10%

A semelhança do Planeamento Factorial 2^3 inicialmente realizado no estudo da primeira variável resposta, este também resultará na realização de todas as experiências necessárias de forma aleatória. O planeamento contém 8 iterações experimentais com 15 graus de liberdade e permitirá a estimação de três efeitos principais *A*, *B* e *C*, três interações de dois factores *AB*, *AC*, *BC* e uma interação de três *ABC*.

Tabela 7.15. Matriz de Planeamento Factorial 2^3

Rodadas	Combinações	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>AB</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
1	(1)	-	-	-	+	+	+	-
2	<i>a</i>	+	-	-	-	-	+	+
3	<i>b</i>	-	+	-	-	+	-	+
4	<i>ab</i>	+	+	-	+	-	-	-
5	<i>c</i>	-	-	+	+	-	-	+
6	<i>ac</i>	+	-	+	-	+	-	-
7	<i>bc</i>	-	+	+	-	-	+	-
8	<i>abc</i>	+	+	+	+	+	+	+

Cada uma das 8 experiências foi replicada duas vezes ($n = 2$) e, em cada replicação foram recolhidas de forma aleatória 8 caixas.

De seguida apresentaremos uma tabela com a resposta soma obtida e avaliada na escala numérica, como foi referenciado na secção 4.6.2. Para se achar a coluna resposta usou-se o algoritmo de Yates.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.16. Resposta Soma do Planeamento factorial completo 2^3 .

Rodadas	Resposta		
	Y1	Y2	(Y1+Y2)
1	10,0	10,0	19
2	8,4	8,4	16,8
3	5,0	9,0	15
4	10,0	5,0	15
5	8,0	8,0	16
6	6,0	6,0	12
7	5,0	4,0	9
8	0,0	0,0	0

Após a resposta calculamos sempre a seguir a soma total. Fazendo a substituição dos valores obtidos no planeamento factorial completo da tabela 7.16, temos o seguinte:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} = (10,0^2 + 8,4^2 + \dots + 0,0^2) - \frac{(102,80)^2}{16}$$

$$SQ_T = 813,12 - \frac{102,80}{16} = 152,63$$

Aplicando agora o algoritmo de Yates para o cálculo dos efeitos principais e das combinações dos factores e das variações, obtemos a seguinte tabela:

Tabela 7.17. Algoritmo de Yates para o cálculo de Efeitos e Variações

Rodadas	(Y ₁ +Y ₂)	C ₁	C ₂	C ₃	Efeito	SS
1	20	36,8	65,8	102,8	6,425	660,49
2	16,8	29	37	-15,2	-1,9	14,44
3	14	28	-2,2	-26,8	-3,35	44,89
4	15	9	-13	-0,8	-0,1	0,04
5	16	-3,2	-7,8	-28,8	-3,6	51,84
6	12	1	-19	-10,8	-1,35	7,29
7	9	-4	4,2	-11,2	-1,4	7,84
8	0	-9	-5	-9,2	-1,15	5,29

Aplicaremos agora a fórmula (5.8) para o cálculo da variação residual que será a diferença entre a Variação Total e a soma das variações dos factores e das interacções:

$$SS_{Erro} = 21,0$$

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tendo o valor da variação residual, segue a Análise da Variância que será feita de acordo as fórmulas da Quadro em anexo III.

Tabela 7.18. ANOVA do planeamento factorial completo 2^3

Fonte de Variação	SS	g.l	MS	F_0
A	14,44	1	14,44	5,501
B	44,89	1	44,89	17,101
C	0,04	1	0,04	0,015
AB	51,84	1	51,84	19,745
AC	7,29	1	7,29	2,777
BC	7,84	1	7,84	2,987
ABC	5,29	1	5,29	2,015
Erro	21	8	2,625	
Total	138,73	15		

Com base a tabela ANOVA, verifica-se que ao nível de significância de 0,05, tem-se $F_{0,05;1,8} = 5,318 < F_{\text{calculado}}$, para as variáveis A e B e a interacção AB. Logo conclui-se que são os que afectam significativamente a resposta. Neste planeamento, nota-se que a interacção dos factores AB requer um conhecimento mais profundo dado que em cada 1l de sumo no interior da embalagem deve conter uma de quantidade de Azoto que esteja dentro proporcionalidade adequada.

Vai-se ainda aplicar método gráfico para confirmar-se a veracidade das conclusões da ANOVA.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

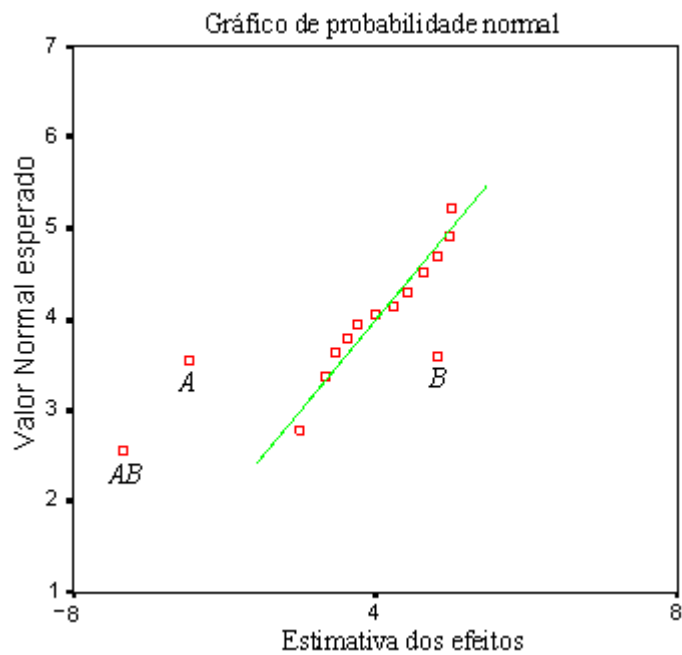


Gráfico 7.3. Gráfico de Probabilidade Normal

Pelo gráfico de probabilidade normal pode-se concluir o que se verificou com a ANOVA, pois os factores *A*, *B* e a interacção *AB*, localizam-se fora da linha de distribuição.

Após este Planeamento achamos que um outro Planeamento ainda deve ser realizado, desta vez excluindo o factor *C* uma vez que concluiu-se na experiência anterior de que não afecta a variável-resposta.

Decidiu-se aplicar um Planeamento de Experiências Factorial Completo 2^k , ou seja, o Planeamento Factorial Completo 2^2 . De recordar que objectivo principal da aplicação de cada Planeamento de Experiências é determinar a região óptima do processo. Neste Planeamento tal como noutros, definiremos níveis diferentes dos usados habitualmente na Empresa. Foi aqui definido um nível intermediário entre o valor máximo e mínimo de cada factor, como explicou-se no estudo variável anterior (ver secção 4.9).

Neste caso teremos os seguintes factores em estudo:

- Quantidade de Azoto;
- Quantidade de líquido.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.19. Variação de níveis das Q_L e Q_A

Níveis	Factores	
	Quantidade de líquido	Quantidade de Azoto (%)
-	1/2l	8
0	1l	6
+	1,5l	10

Temos de seguida a tabela dos resultados da experiência, apresentada em forma de percentagem.

Tabela 7.20. Rendimento do Planeamento 2^2

Nível	Quantidade de líquido	Quantidade de Azoto	Rendimento (%)
-	1/2l	8	94,0
+	1,5l	10	98,8
-	1/2l	8	92,7
+	1,5l	10	93,7
0	1l	6	95,0
0	1l	6	95,2
0	1l	6	94,7
0	1l	6	93,9

Nesta matriz temos $n_F = 4$ (que correspondem às 4 primeiras experiências) e $n_{pc} = 4$ (as outras quatro experiências para as quais a temperatura e a pressão assumem o nível intermédio.

A variação total é calculada usando a fórmula 5.7:

$$SQ_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abn} = (94,0^2 + \dots + 93,9^2) - \frac{(758,0)^2}{8} = 23,26 \text{ com } 7 \text{ g.l}$$

Usando a fórmula (4.9) calculam-se as variações dos factores e da interacção entre eles.

Assim sendo, para o planeamento em estudo, temos os seguintes valores:

$$SS_{Q_{QG}} = \frac{[(98,8 + 93,7) - (94 + 92,7)]^2}{4} = 8,41$$

$$SS_{Q_{QH}} = \frac{[(98,8 + 94) - (93,7 - 92,7)]^2}{4} = 10,24$$

$$SS_{Q_{QG\&QH}} = \frac{[(94 + 93,7) - (92,7 - 98,8)]^2}{4} = 3,61$$

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

$$\bar{Y}_F = \frac{y_i}{n_F} = \frac{(94 + 98,8 + 93,7 + 92,7)}{4} = 94,8$$

$$\bar{Y}_{pc} = \frac{y_j}{n_{pc}} = \frac{(95 + 95,2 + 94,7 + 93,9)}{4} = 94,7$$

$$SS_{curvatura} = \frac{n_F n_{pc} (\bar{Y}_F - \bar{Y}_{pc})^2}{n_F + n_{pc}} = \frac{4 * 4 (94,8 - 94,7)^2}{4 + 4} = 0,02$$

$$MS_{Erro} = \frac{\sum_{j=1}^{n_{pc}} (y_j - \bar{Y}_{pc})^2}{n_{pc} - 1} = \frac{(94,8 - 95)^2 + (94,8 - 95,2)^2 + (94,8 - 94,7)^2 + (94,8 - 93,9)^2}{4 - 1} = 0,34$$

$$SQ_E = SQ_T - SQ_G - SQ_H - SQ_{GH} = 1,00$$

Tabela 7.21. ANOVA para o Planeamento Factorial Completo 2²

Fonte de Variação	SS	G.l	MS	F ₀
Q. Líquido	8,41	1	8,41	25,23
Q. Azoto	10,24	1	10,24	30,72
Q. Líquido ^a . x Q. Azoto	3,61	1	3,61	10,83
Curvatura	0,02	1	0,02	0,06
Erro	1,00	3	0,33	
Total	23,28	7		

A partir da ANOVA verificamos que ao nível de significância de 0,05 termos $F_{5\%;1;3} = 10,13 < F_0$, para os dois factores em estudo e a sua respectiva interacção e concluímos que os dois factores (Quantidade de líquido e Quantidade de Azoto) e sua interacção, afectam significativamente a variável-resposta (bolhas de ar no interior da embalagem). Quanto ao efeito da curvatura vemos que não é significativo e neste caso não há necessidade de ajustar-se o modelo de 2^a ordem (ver secção 4.9).

Outro método ainda pode ser aplicado para ajudar na confirmação do teste de ANOVA é o gráfico de probabilidade normal.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

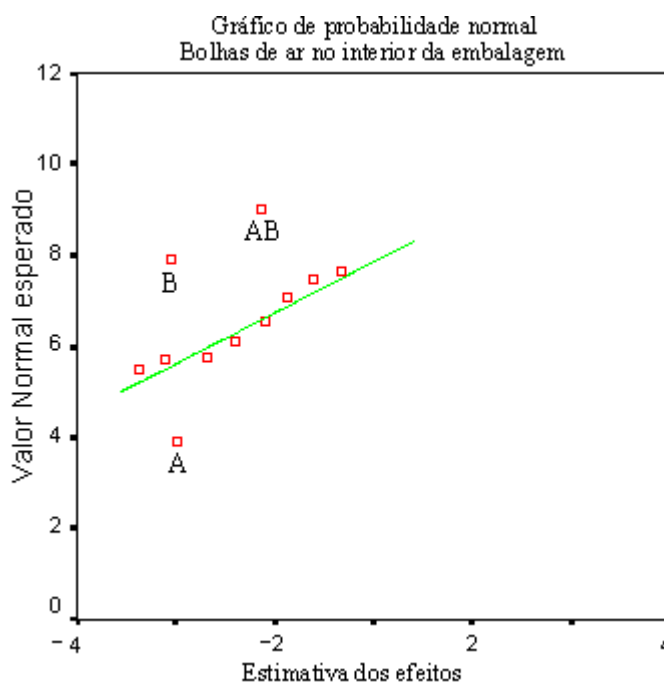


Gráfico 7.4. Gráfico de Probabilidade Normal

Pelo gráfico também pode-se notar que os factores *A* e *B* e a interacção *AB*, não se localizam ao longo da linha.

Assim de acordo com a fórmula (5.16), o modelo de 1ª ordem que ajusta ou que corresponde a esta experiência é dado por:

$$\hat{Y} = 94,75 + 1,45x_1 - 1,6x_2 \quad (7.1)$$

Nesta equação (7.1) os x_1 e x_2 denotam, respectivamente os níveis codificados dos factores *Quantidade de líquido* e *Quantidade de Azoto*. A ANOVA indica que o modelo (equação 5.16) pode ser usado para ajustar as condições óptimas do processo.

Feita a análise, far-se-á a determinação da região óptima do processo, com base na metodologia de superfície de resposta.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

7.3.1. Metodologia da superfície de resposta do processo.

Após a aplicação do planeamento factorial completo 2^k com a inclusão de níveis intermediários que permitiu o estudo e análise dos factores Quantidade de sumo e Quantidade de azoto, o objectivo agora é diminuir a resposta com a aplicação do método de inclinação máxima descendente.

A produção do processo será representada como função dos níveis de Quantidade do líquido e da Quantidade do Azoto (ver equação 7.1).

Tabela 7.22. Tabela de inclinação máxima descendente

Variáveis naturais		Variáveis codificadas		Resposta Y
Quantidade de líquido	Quantidade de Azoto	X_1	X_2	
1/2l	6	-	-	94,90
1/2l	6	+	-	97,80
1,5l	10	-	+	91,70
1,5l	10	+	+	94,60
1l	8	0	0	94,75
1l	8	0	0	94,75
1l	8	0	0	94,75
1l	8	0	0	94,75
.
.
.

Nesta tabela verifica-se que na rodada onde a Quantidade de líquido se encontra no nível alto e a Quantidade de Azoto no nível baixo é que se obtém o melhor rendimento de 97, 80%, mostrando que é possível diminuir os defeitos para 2,2%. Após encontrar-se a região óptima de operação novos testes foram feitos para confirmar a região encontrada.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

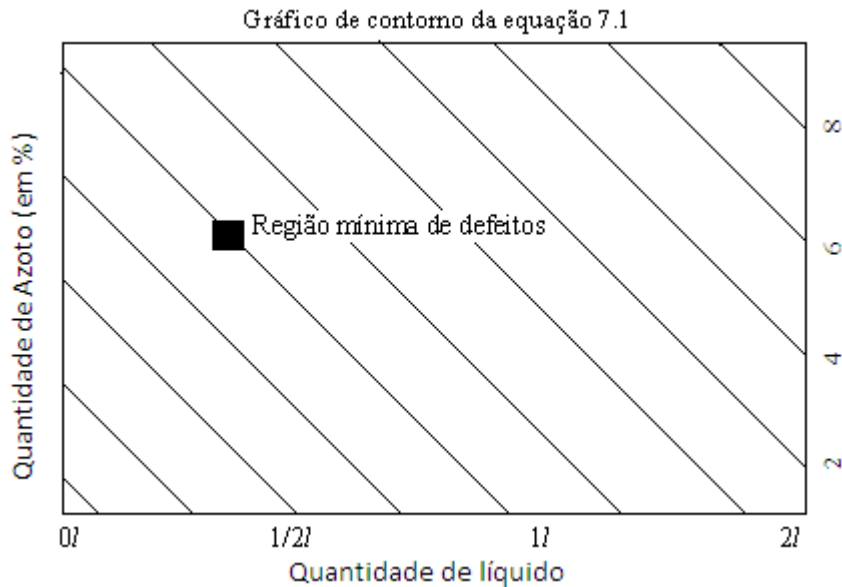


Gráfico 7.4. Metodologia de superfície de resposta de 1ª ordem.

A figura mostra o gráfico de contorno baseado no modelo da 1ª ordem, onde também as linhas de contorno representam rectas. Neste gráfico pode-se observar que no par (1l, 6) é que se atinge a região mínima de defeitos, ou seja, a região que apresenta menos defeitos. Durante a aplicação do Planeamento de Experiências nesta fase, apesar de ter que se variar os dois factores em simultâneo, porque o objectivo era encontrar a proporcionalidade adequada entre as duas quantidades, fixamos mais a nossa atenção na medida 1l do factor “Quantidade de líquido” por ser a medida do produto contido em cada embalagem. Fomos variando o factor “Quantidade de Azoto” até atingirmos a zona de excelência; Ou seja, até encontrarmos a quantidade de Azoto, proporcional à medida do líquido estabelecido. Realizaram-se as rodadas de forma sequencial até os resultados não variarem mais.

Modelo de inclinação máxima descendente

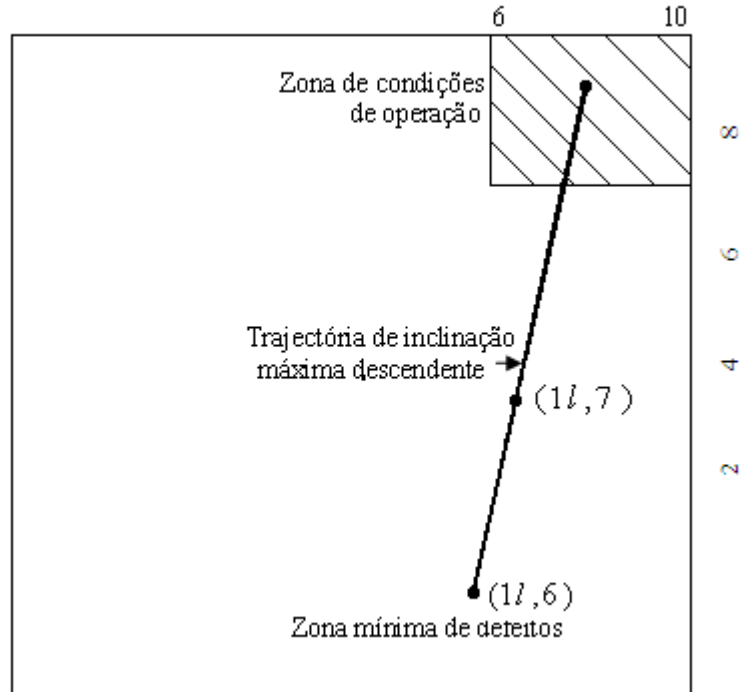


Figura 7.1. Inclinação máxima ascendente

Esta figura ilustra experiência de inclinação máxima descendente. As experiências foram feitas ao longo da trajectória de inclinação máxima descendente, até não se observar mais qualquer diminuição na resposta, ou seja, até que se atingiu a região desejada da resposta (região mínima de defeitos). Ao longo da trajectória, foram observadas diferentes experiências em diferentes pontos, tendo-se alcançado a região mínima no ponto (11, e intervalo 6 à 10).

Ao examinarmos o gráfico e, a partir equação (7.1), podemos notar que para nos mover dessa região ao longo da trajectória de inclinação máxima descendente, devemos deslocar 1,45 unidades na direcção de X_1 para cada $-1,6$ unidades na de X_2 . Assim, a trajectória de inclinação terá como coeficiente de proporcionalidade a razão $1,45/(-1,6) = -0,91$.

De recordar que uma vez a curva não é significativa, não há necessidade de se ajustar o modelo de 2ª ordem.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Mas após atingir-se a zona mínima de defeitos, os pesquisadores decidiram explorar a mesma de forma pormenorizada, a fim de aprofundar conhecimento sobre as conclusões finais; daí, decidiu-se mesmo assim, aplicar um Planeamento de Experiências fundamentado no modelo de superfície da resposta de 2ª ordem.

Para esse tipo de casos a técnica de Planeamento Composto Central é a mais adequada. Esta técnica consiste em acrescentar pontos axiais ao Factorial Composto 2² com pontos centrais. Os pontos axiais podem ser determinados pela fórmula:

$$\alpha' = (n_F)^{1/4} = \sqrt{2} = \pm 1,414 \text{ (nível codificado)}$$

Para transformar esses valores codificados em variáveis naturais será usada a seguinte equação:

$$x_i = \frac{(\xi_i - n_c)}{\Delta x_i} \quad (7.2)$$

Nesta equação ξ_i representa o nível da variável natural no processo de produção, n_c é o ponto central usado na experiência Δx_i , o valor do incremento na variável independente.

Geometricamente, esse tipo de Desenho Composto, pode-se representar da seguinte forma:

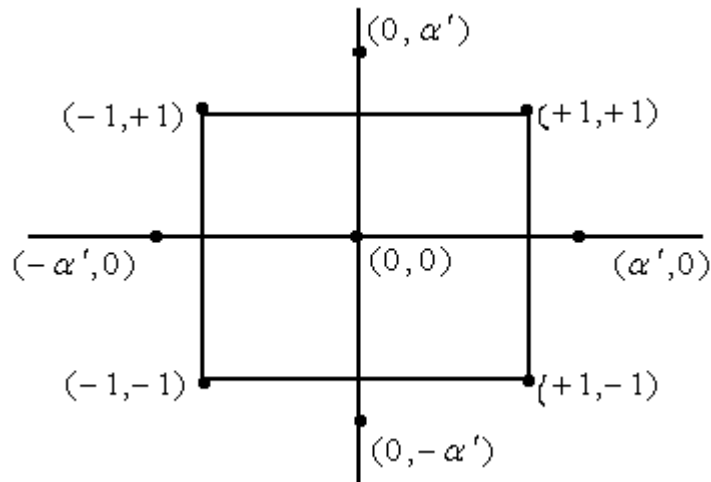


Figura 7.2. Planeamento Composto Central

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Um modelo de segunda ordem, pode representar-se da seguinte forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon \quad (7.3) \text{ ver (3.2)}$$

Nesta equação, os coeficientes β_{11} e β_{22} medem efeitos quadráticos puros. Esse modelo não pode ser ajustado a um planeamento 2^2 , porque para se ajustar um modelo quadrático, todos os factores devem ser rodados no mínimo em três níveis, por essa razão como recurso usa-se o Planeamento Composto Central.

Para estimar os coeficientes (β) desta equação, usar-se-á o método dos mínimos quadrados.

$$\beta = (X'X)^{-1} X'y \quad (7.4)$$

Onde β é a matriz com os coeficientes, X é a matriz experimental codificado e y é a resposta.

Segundo MONTGOMERY (2009), a linearidade do modelo matemático pode ser verificada ao estimar a diferença entre a média das respostas para os pontos dos factores coeficientes (\bar{y}_f) e a média dos resultados obtidos em n_c rodadas no ponto central (\bar{y}_c). Se a diferença entre coeficientes ($\bar{y}_f - \bar{y}_c$) for pequena, então os pontos centrais estarão no plano que passa pelos pontos factoriais ou próximos a ele e, não há curvatura. Por outro lado, se ($\bar{y}_f - \bar{y}_c$) for grande, então a curvatura existe (MONTGOMERY, 2009).

Para PEREIRA E REQUEIJO (2008), estatisticamente, a existência ou não da curvatura na região central, calcula-se a soma quadrática nesse ponto, dada pela seguinte equação:

$$Q_{\text{quadrática pura}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C} \quad (7.5)$$

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

O teste F para a falta de ajuste é calculado como:

$$F_0 = \frac{MQ_{falta\ de\ ajuste}}{MQ_{erro\ puro}} \quad (7.6)$$

Apresentaremos a seguir a matriz de planeamento onde constam também os respectivos resultados.

Tabela 7.23. Planeamento Composto Central com pontos axiais

Observação	Variáveis codificadas		Variáveis naturais		Resposta (Y em %)
			Quantidade de líquido	Quantidade de Azoto	
1	-1	-1	1l	6	95,0
2	1	-1	1/2l	6	96,0
3	-1	1	1l	10	93,4
4	1	1	1/2l	10	94,7
5	-1,414	0	0.417l	8	95,0
6	1,414	0	1.083l	8	92,9
7	0	-1,414	1,5l	5	94,8
8	0	1,414	1,5l	11	96,0
9	0	0	1,5l	8	95,7
10	0	0	1,5l	8	93,7
11	0	0	1,5l	8	98,2
12	0	0	1,5l	8	96,0

Na tabela a seguir, apresentaremos a tabela ANOVA para este planeamento de experiências.

Tabela 7.24. ANOVA da tabela 7.21

Fonte de variação	SS	G.L	MS	F_0
Quantidade de líquido	5,05	1	5,05	20,20
Quantidade de Azoto	3,08	1	3,08	12,32
Interacção	3,90	1	3,90	15,60
Curva do plano	2,79	1	2,79	11,16
Erro	0,75	3	0,25	
Total	3,65	7		

De acordo aos resultados obtidos nesta ANOVA, podemos notar que o modelo de primeira ordem não é uma aproximação adequada para o ajuste dos níveis óptimos do processo de fabrico do sumo. A curvatura na superfície indica que se está próximo da região óptima, pelo que, análises adicionais devem ser feitas para localizar esta região com

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

mais precisão. Pois, ao nível de significância de $(\alpha = 0,05)$ há indícios de que a interação provoca uma curvatura na superfície do sistema ($F_{0,05;1,3} = 5,591 < F_0$).

Para melhor ilustração podemos ainda utilizar o diagrama de Pareto, onde também é visualizado o comportamento das variáveis, a interação e a curvatura.

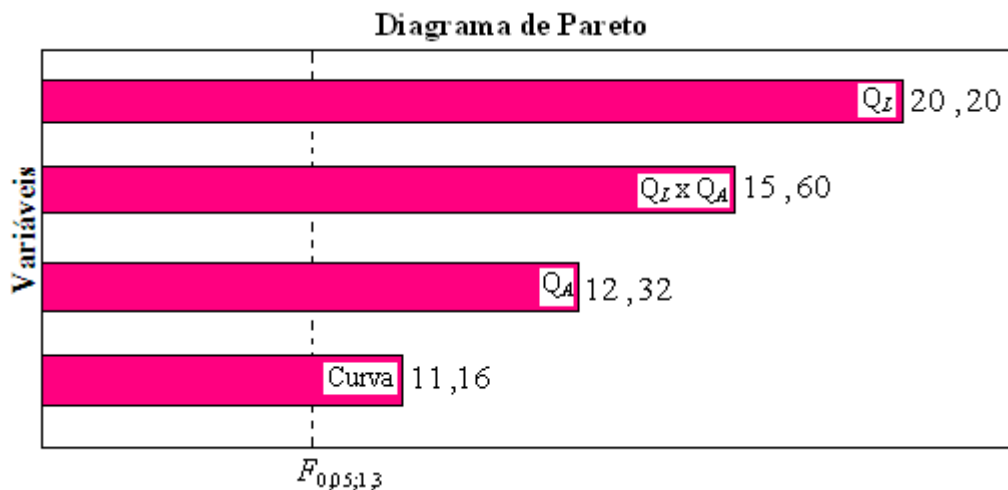


Gráfico 7. 6. Efeito de variáveis principais e interações

MONTGOMERY (2009), recomenda que quando o investigador está relativamente próximo do óptimo, em geral é necessário à aplicação de um modelo de segunda ordem para aproximar a resposta, em virtude da curvatura na verdadeira superfície de resposta.

Aplicando agora o método de mínimos quadrados e a soma quadrática das respostas das rodadas, apresentadas na tabela 7.14, construiremos o modelo ajustado para superfície de resposta (Cálculo: ANEXO I)

$$y = 83,78 - 12,59x_1 + 11,79x_2 + 3,77x_1^2 + 15,46x_2^2 + 24,25x_1x_2 \quad (7.6)$$

Onde x_1 e x_2 representam respectivamente a Quantidade líquido e a Quantidade de Azoto.

De seguida apresentamos a tabela de ANOVA para este modelo matemático.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 7.25. ANOVA do modelo da equação 7.6

Fonte de variação	SS	G.L	MS	F_0
Ponto central x Ponto axial	3,60	1	3,60	6
Quantidade de líquido	3,00	1	3,00	5
Quantidade de Azoto	7,32	1	7,32	12,2
(Quantidade de líquido) ²	8,05	1	8,05	13,41
(Quantidade de Azoto) ²	10,17	1	10,17	16,95
Quantidade L x Quantidade A	6,00	1	6,00	10
Erro	3	5	0,6	
Total	41,14	11		

Nesta ANOVA, pode-se reparar que ao nível de significância de $\alpha = 0,05$, apresenta que a falta de ajuste do ponto central e do ponto axial não é significativa na superfície de resposta. Quanto aos coeficientes não quadráticos, no caso da “Quantidade de líquido”, também nota-se que é pouco significativo, mas no entanto, durante os testes observou-se que o seu nível baixo depende do nível baixo do factor “Quantidade de Azoto” que é significativo. A ANOVA apresenta ainda que os termos quadráticos puros e o coeficiente quadrático misto (Quantidade de líquido x Quantidade de Azoto) são significativos.

Pode-se concluir assim que o modelo matemático apresentado acima é adequado para ajustar as condições óptimas de operação de processo de fabrico do produto.

7.3.2. Metodologia da superfície de resposta do processo.

A figura abaixo ilustra a superfície de resposta tridimensional. Observa-se a partir do gráfico, que as combinações nos níveis máximos ou mínimos influenciam de forma significativa o resultado da variável-resposta.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

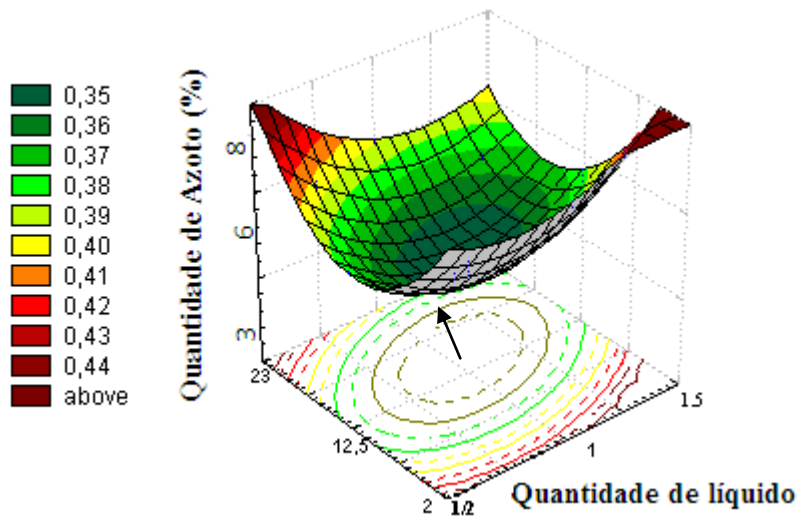


Gráfico 7.7. Superfície de resposta de 2ª ordem

No gráfico de superfície de resposta de 2ª ordem (Gráfico 7.7) pode-se observar o ponto estacionário (x_0) é um ponto mínimo, que quer dizer, no espaço coordenada formado pelos pontos (x_1, x_2) , os dois pontos minimizam a variável resposta. Neste caso GALDÁMEZ (2002) chama atenção da necessidade de analisar os pontos próximos ao ponto estacionário, nas direcções dos eixos (w_1, w_2) . Esta análise é na verdade a análise canónica, que será abordada na secção seguinte.

Gráfico de Contornos
Planeamento composto central (polinómio de 2ª ordem)

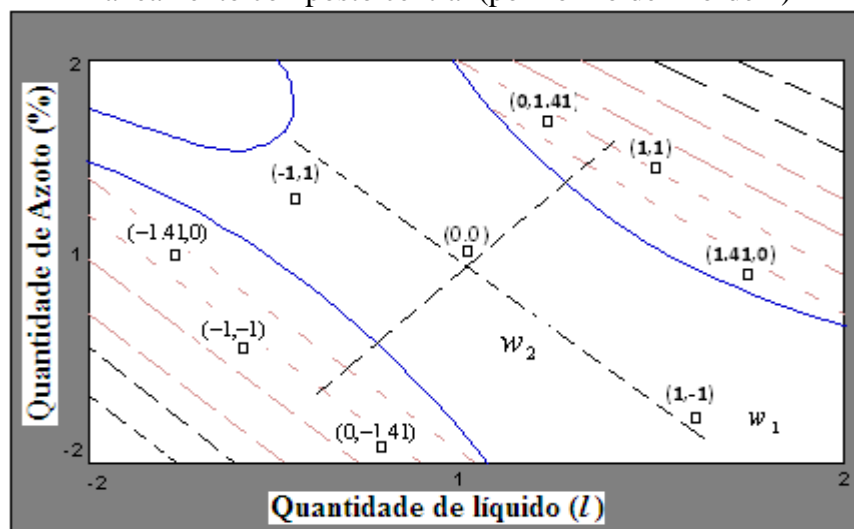


Gráfico 7.8. Contorno do modelo de 2ª ordem (Quant. de azoto x Quant. de líquido)

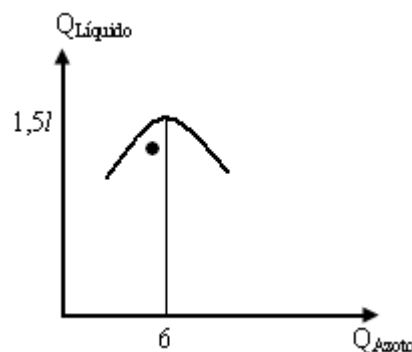
APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

O gráfico 7.8 corresponde aos contornos bidimensionais gerados a partir de um modelo ajustado. Aqui também observa-se que os dois pontos minimizam a resposta, ou seja o ponto estacionário (x_0) é um ponto mínimo. É necessário agora investigar os pontos próximos do ponto estacionário (MONTGOMERY, 2009), nas direcções dos dois eixos. Este processo é estudado na secção 7.3.2.1.

Aqui o objectivo é explorar a zona de excelência para que se tenha um conhecimento profundo e mais detalhado sobre a mesma zona. Para se atingir ao esse objectivo, precisamos encontrar uma proporcionalidade adequada das medidas de Q_L e Q_A a fim de confirmarmos a regulação paramétrica adequada encontrada para os dois factores.

Durante as rodadas, o factor Quantidade de líquido foi fixado em três pontos (medidas). Ou seja, estabelecemos as medidas em quantidades de 1/2l, 1l, e 1,5l sendo a primeira e última, medidas experimentais ao passo que a de 1l é a usual e comercializada na Empresa. A partir do gráfico do contorno do modelo de 2ª ordem, pode-se observar a região de condições óptimas. Todas as experiências feitas nesta zona ofereceram um produto com poucos defeitos.

Gráfico 7.9. Optimização para a quantidade 1,5l



O gráfico 7.9: Para otimizar as quantidades de líquido e de azoto, fixamos a quantidade de líquido e variamos apenas a de azoto, que segundo o gráfico observou-se que a execução do processo nas quantidades de (1l, 6%) é o melhor conjunto de operações que resulta na diminuição de defeitos.

7.3.2.1. Análise canónica de superfície de resposta

O primeiro passo para transformar o modelo ajustado para um modelo canónico é a determinação do ponto estacionário (x_0) do processo de fabricação e a resposta do modelo ajustado nesse ponto.

7.3.2.1.1. Localização do ponto estacionário.

O ponto estacionário caso exista será um conjunto de pontos (x_1, x_2, \dots, x_k) para os mesmos, as derivadas parciais se anulam nesses pontos, ou seja:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = \frac{\partial y}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial y}{\partial x_k} = 0 \quad (7.7)$$

Este ponto denominar-se-á ponto estacionário, o qual pode representar um máximo, mínimo ou ponto de sela (*minimax*).

- Se todas as raízes forem negativas, então, o centro x_0 do sistema é um ponto máximo;
- Se todas as raízes forem positivas, então, o centro x_0 do sistema é um ponto mínimo;
- Caso esses pontos tenham sinais diferentes, então, o ponto x_0 é um ponto de sela (*minimax*).

A solução geral desse modelo matemático é obtida a partir do modelo de segunda ordem (ver equação 7.2) escrita na forma matricial, como segue:

$$y = \beta_0 + x'b + x'Bx \quad (7.8)$$

Nesta equação tem-se o seguinte:

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12}/2 & \dots & \beta_{1k}/2 \\ & \beta_{22}/2 & \dots & \beta_{2k}/2 \\ & & \dots & \vdots \\ \text{simétrico} & & \dots & \vdots \\ & & & \beta_{kk} \end{bmatrix}$$

Na representação matricial b é um vector ($k \times 1$) dos termos lineares, B é uma matriz simétrica ($k \times k$), cujos elementos da diagonal são coeficientes quadráticos puros (β_{ii}) e os elementos fora da diagonal correspondem a metade dos termos de interacção ($\beta_{ij}, i \neq j$) do polinómio algébrico.

A derivada da equação 5.26 em função ao valor x é dada pela seguinte forma:

$$y'(x) = b + 2Bx = 0 \quad (7.9)$$

A solução desta equação é o ponto estacionário dado pela seguinte forma:

$$x_s = -\frac{1}{2} B^{-1}b \quad (7.10)$$

Assim temos o seguinte valor do ponto estacionário (cálculo em anexo I):

$$x_0 = (1,09; -1,02)$$

Quadro 7.1. Ponto estacionário do processo

Ponto estacionário		Variáveis naturais	
x_1	x_2	Quantidade de líquido	Quantidade de azoto
1,09	-1,02	1l	6%

O valor da resposta desse ponto é dado pela seguinte fórmula:

$$y = \beta_0 + \frac{1}{2} x'b \quad (7.11)$$

Aplicaremos a equação (5.19) para transformarmos esses valores codificados em variáveis naturais.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

$$1,09 = \frac{(\xi_1 - \Delta Q_A)}{6} \Rightarrow \xi_1 = 6,54 + \Delta Q_A \quad (7.12)$$

$$-1,02 = \frac{(\xi_2 - \Delta Q_L)}{6} \Rightarrow \xi_2 = 6,12 + \Delta Q_L \quad (7.13)$$

O passo seguir reserva-se para análise canónica de superfície de resposta.

Faremos a análise canónica com objectivo de caracterizarmos o tipo de resposta. Começaremos por determinar o modelo ajustado na forma canónica, utilizando os coeficientes quadráticos puros e mistos do polinómio de segunda ordem.

Dada a equação, $y = y_0 + \lambda_1 w_1^2 + \dots + \lambda_k w_k^2$ (7.14), precisamos determinar os auto-valores da determinante da seguinte equação:

$$[B - \lambda I] = 0 \quad (7.15)$$

Desenvolvendo e calculando encontramos os seguintes valores: $\lambda_1 = 36,77$ e $\lambda_2 = 1,68$

$$y = 97 + 36,77 w_1^2 + 1,68 w_2^2 \quad (7.16)$$

Se repararmos a equação 7.16, podemos notar que os coeficientes das duas variáveis são positivos e, neste caso, temos um ponto mínimo, algo que também pode-se confirmar no gráfico de contorno (gráfico 7.7).

Nesta fase serão ainda construídas as equações matemáticas que descrevem o relacionamento entre as variáveis independentes e as variáveis do espaço w_i e as do espaço x_i .

Para este cálculo GALDÁMEZ (2002), recomenda o uso da seguinte combinação e o relacionamento das variáveis da seguinte forma:

$$w = M' * (x - x_0) \quad (7.17)$$

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Nesta equação, M é uma matriz ortogonal de dimensão $(k \times k)$. As colunas de M são os auto-valores normalizados associados à (λ_i)

Para este caso resolveremos o seguinte sistema de equações:

$$M = \begin{bmatrix} \beta_{11} - \lambda & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} - \lambda \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = 0 \quad (7.18)$$

e $x = (x_1, x_2)$

Os β_i são os coeficientes do modelo ajustado e λ_i as raízes do modelo canónico.

$$\begin{cases} w_1 = 0,9387x_2 - 0,3449x_1 + 0,03141 \\ w_2 = 0,3449x_2 + 0,9387x_1 + 0,267306 \end{cases} \quad (7.19)$$

As variáveis x_1 e x_2 denotam respectivamente as Quantidades de líquido e Quantidade de Azoto.

Essas equações permitem a determinação das coordenadas (w_1, w_2) dos pontos que satisfazem as condições óptimas do processo de fabricação do produto em estudo.

Como o método utilizado é para determinar ou explorar de forma mais profunda os valores que optimizam a função resposta, é importante aqui ressaltar que a análise da superfície de resposta é realizada em direcção aos dois pontos da coordenada (w_1, w_2) , pois como o ponto estacionário representa um mínimo (equação 7.16), os coeficientes que multiplicam os dois pontos da coordenada influenciarão fracamente a resposta, o que mostra que nas duas direcções teremos a resposta minimizada (GALDÁMEZ, 2002). E, isto contribui para o melhoramento da característica de Qualidade em estudo.

Todas as experiências em qualquer ponto nas duas direcções apresentavam estabilidade na característica da Qualidade já definida nas rodadas anteriores, o que garantiu segurança no processo na fase inicial.

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

A resolução do modelo canónico a partir da equação (7.16) para uma função optimizada, demonstra que as raízes numa das direcções são iguais a $\pm 1,62i$ e, considerando nula a segunda coordenada, obtemos os seguintes pares $(1,62i;0)$ e $(-1,62i;0)$. Repare-se que para primeira coordenada temos números imaginários, pelo que tivemos de usar a fórmula (7.2) para transformar os valores das coordenadas em duas variáveis naturais para obtermos a experiência em (x_1, x_2) e minimizarmos a função resposta. Substituindo as raízes no sistema de equações 7.19, obtém-se o conjunto de valores que minimiza a função resposta no espaço formado pelos eixos x_1 e x_2 (GALDÁMEZ, 2002). Os níveis codificados (x_1, x_2) para os factores são apresentados na tabela a seguir.

Quadro 7.2. Condições de operação do processo

Factores	(w_1, w_2)	$(-1,62i; 0)$	Ponto estacionário	$(1,16i; 0)$	Ponto usado na Empresa	
	(x_1, x_2)	$(1,386; -1,695)$	$(1,09; -1,02)$	$(-1,632; 1,436)$		
Q_L		$1/2l$	$1l$	$1,5l$	$1l$	$1l$
Q_A		4%	6%	6,5%	5,5%	5,5%

CAPÍTULO VIII

**APLICAÇÃO DAS CARTAS DE
CONTROLO PARA O ESTUDO DA
CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA
VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR
NO INTERIOR DA EMBALAGEM”**

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

8. Análise da característica de qualidade *QR*.

8.1. Aplicação das cartas da média e do desvio padrão.

Após a conclusão do estudo e ser identificada a região óptima de operação do processo, definiu-se a seguinte característica de qualidade a estudar: “**ausência de bolhas de ar no interior das embalagens**”. Esta característica será estudada com ajuda da aplicação das cartas de controlo, que neste caso serão as cartas da média e do desvio padrão, com objectivo de analisar se as características de qualidade desejadas foram alcançadas.

Tabela 8.1. Característica de Qualidade a estudar

Característica do produto	Designação no trabalho
Ausência de bolhas de ar no interior na embalagem	<i>CR</i>

Este caso é análogo ao anterior, onde a característica da Qualidade em estudo é do tipo Menor-é-melhor existindo apenas o limite superior de especificação, sendo o limite inferior igual a zero.

8.1. Recolha da Amostra

Usando o mesmo procedimento como no caso anterior, fez-se a recolha do mesmo número de amostras m e mesma dimensão n conforme as tabelas abaixo.

Tabela 8.2. Tabela de resultados amostrais

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
x_2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
x_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
x_4	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1
x_5	2	2	0	0	1	1	1	1	0	0
x_6	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
x_7	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
x_8	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
x_9	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
x_{10}	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Tabela 8.2. Tabela de resultados amostrais (continuação)

Nº	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x_1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
x_2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
x_3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
x_4	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
x_5	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0
x_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
x_7	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
x_8	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
x_9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
x_{10}	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1

Tal como se fez referência na secção 5.6.3. (Tabela 6.2), para os dados da tabela 8.2. uma vez que a característica de qualidade neste caso também é contínua a sua medição fez-se através de um processo microbiológico numa escala contínua.

Com esses dados obtiveram-se as seguintes médias amostrais:

Tabela 8.3. Médias amostrais

Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
\bar{x}	0,6	0,4	0,1	0	0,4	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3

E buscando os valores B_3 e B_4 na tabela (Anexo III), temos:

$$B_3 = 0.22$$

$$B_4 = 1.777$$

Tabela 8.4. Limites das Cartas de controlo

	Carta \bar{X}	Carta S
LSC	0.60	2.79
LC	0.27	1.57
LIC	0	0.35

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

Para construção das cartas de controlo, para Média e Desvio Padrão, aplicaremos o mesmo procedimento do caso CQ.

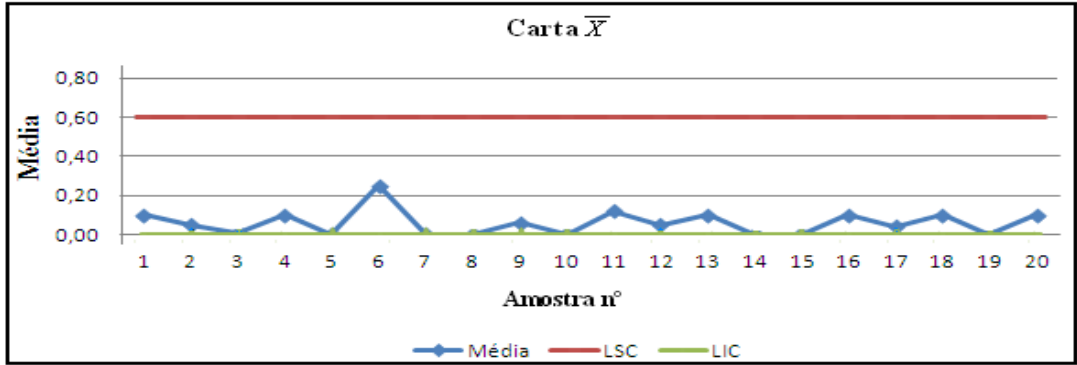


Gráfico 8.1. Carta de Controlo da Média de CR

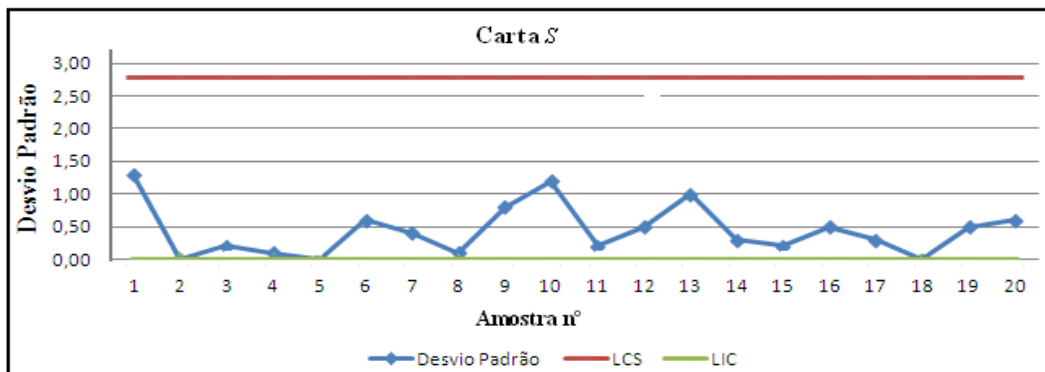


Gráfico 8.2. Carta de controlo do Desvio Padrão de CR

Nas cartas de controlo, tanto de Média como do Desvio Padrão, não se verifica nenhum caso de alarme, logo o processo está sob controlo.

8.2. Algumas considerações operacionais

Os capítulos de 5 a 8 centralizaram-se na experiência industrial, concretamente no processo de fabrico do sumo de manga. Durante a aplicação da metodologia de Planeamento de experiências foram estudados 6 factores no início e sendo introduzidos

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

outros ao longo do estudo. Teve como alvo as variáveis-respostas: *defeito de colagem nas embalagens* e *bolhas de ar no interior da embalagem*, sendo estudadas de forma separada.

No caso da primeira variável, efectuou-se o estudo e foram analisados os seis factores a dois níveis, tendo-se concluído o mesmo com apenas dois factores (*temperatura de soldagem das embalagens* e *a pressão de soldagem*) à 3 níveis cada, por serem os que afectam a mesma variável. Quanto à segunda, foram também analisados no início os seis factores em diferentes rodadas tendo sido introduzidas ao longo do estudo, outros dois (*Quantidade de líquido* e *Quantidade de Azoto*), sendo as duas últimas as que afectam a variável-resposta.

Seguiu-se o estudo com os dois factores estudados a 3 níveis cada.

Em ambos estudos, após a identificação dos factores influentes foi possível aplicar a metodologia da superfície de resposta, para determinação da região óptima em cada caso.

Mais abaixo apresentados os quadros que resumem os dois estudos.

Quadro 8.1. Variável-resposta “QQ”

Níveis	Níveis usados pela Empresa		Níveis óptimos	
	Factores		Factores	
	Temperatura	Pressão	Temperatura	Pressão
Nível baixo (-)	450 °C	25	460 °C	16
Nível alto (+)	590 °C	35	590 °C	30

Quadro 8.2. Variável-resposta “QR”

Factores	(w_1, w_2)	$(-1,62i; 0)$	Ponto estacionário	$(1,16i; 0)$	Ponto usado na Empresa	
	(x_1, x_2)	$(1,386; -1,695)$	$(1,09; -1,02)$	$(-1,632; 1,436)$	1l	1l
Q_L		1/2l	1l	1,5l		
Q_A		4%	6%	6,5%	5,5%	5,5%

Após aplicação de todo processo das cartas de controlo e depois de verificadas todas as causas, concluiu-se que o uso eficaz das cartas de controlo, exige uma revisão periódica. Como fizemos referência ao longo do trabalho, diferentes causas comuns ou especiais, podem afectar a produção no dia-a-dia. Essa revisão pode ser semanal,

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

quinzenal, etc. No caso da indústria onde realizou-se o presente estudo, uma vez que a produção depende sobretudo da solicitação dos clientes, propomos que fosse todas as vezes que tivesse que produzir. A revisão deve ser feita com uma amostra suficiente, ou seja de 20 a 30 amostras ou subgrupos e com um número suficiente de observações.

O controlo estatístico do processo aplicado ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, através da metodologia do Planeamento de Experiências, visou a garantia da Qualidade do produto em todas as fases da execução. Este pode compreender-se como a totalidade dos meios e actividades através das quais um produtor pretende eliminar, em todas as fases do processo produtivo, as causas que originam defeitos (RIVERAS VILLAS, 1995). Mas, devido ao facto de os processos de produção não serem perfeitos, mesmo com um rigoroso Planeamento e manutenção, devemos utilizar métodos de controlo para verificar a Qualidade do produto final; pois mesmo que o processo esteja dentro dos limites de controlo, através de gráficos é possível verificar que existe sempre uma certa variação.

Após a produção, o produto é posto em período de quarentena para a última análise microbiológica. Nesta fase, recomendou-se a amostragem por aceitação (inspecção a 100%). Esta tem por objectivo aceitar ou rejeitar um lote de um produto homogéneo de acordo com a sua especificação. Esses planos de amostragem para aceitação são utilizados para tomar uma decisão acerca da aceitação, ou rejeição, de um lote e não para estimar a Qualidade do produto. Os lotes rejeitados são trabalhados ou sucateados dependendo do tipo e natureza do defeito.

A excelência pela qualidade foi sempre o objectivo principal da Indústria. A mesma tem sempre uma série de abordagens para prever e evitar dificuldades que possam ocorrer no mercado depois da venda e consumo pelo cliente. Isto pode confirmar-se através das recomendações visíveis nas embalagens, tais como:

- Conservar no frigorífico depois de aberta a embalagem.
- Beber fresco.
- Agitar antes de servir:

APLICAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLO PARA O ESTUDO DA CARACTERÍSTICA DE QUALIDADE DA VARIÁVEL RESPOSTA “BOLHAS DE AR NO INTERIOR DA EMBALAGEM”

MONTGOMERY (2009) classifica amostragem de aceitação em dois tipos, amostragem por atributos e amostragem por variáveis. O plano de amostragem por variáveis baseia-se numa escala numérica enquanto o plano de amostragem por atributos baseia-se nas características relacionadas ao produto.

CAPÍTULO IX

CONSIDERAÇÕES, CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

9.1. Considerações e Conclusões

Na realização de qualquer experiência é geralmente inevitável a existência de erros provenientes das mais diversas causas: a variabilidade do material a ser testado, as condições do meio onde se realiza a experiência, os erros humanos ou instrumentais. São muitos e diversos os factores passíveis de contribuir para o aumento da variabilidade dos resultados finais (OLIVEIRA. T, 2004).

O Planeamento de Experiências é aplicado às variadas actividades científicas e industriais visando, dentre outras situações a redução da ocorrência deste erro experimental durante a fase de testes, pois através do seu uso, é possível determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo (MONTGOMERY, 2009).

O presente trabalho desenvolvido ao longo desta pesquisa teve como tema principal o Planeamento de Experiências e Controlo da Qualidade na indústria: Revisão e aplicação metodológica, aplicado na indústria SEIS “indústria de líquidos alimentares” e centralizou-se no processo de fabrico de sumo Néctar sabor Manga, com a finalidade de diminuir a taxa de defeitos apresentados no produto durante o processo de fabricação (Secção 5.3).

O Planeamento de Experiências consiste num conjunto de procedimentos nos quais se efectuam propositadamente alterações de certas variáveis de entrada ou parâmetros do processo (os factores) para observar as mudanças que ocorrem, numa ou mais características de unidade experimental (*output*), procurando identificar as respectivas causas (MONTGOMERY, 2009). Neste trabalho, a metodologia de Planeamento de Experiências aplicada, não só permitiu à identificação das causas de origem dos defeitos, como também definiu as técnicas que foram aplicadas em cada etapa da evolução do estudo. A sua escolha deveu-se pelo facto de ser uma técnica que permite o estudo de dois ou mais factores ao mesmo tempo.

Ao longo dos tempos, o sector industrial passou por um conjunto de mudanças tecnológicas. Hoje o mundo assiste a uma evolução constante neste sector: Factores como “elevado nível da modernidade tecnológica”, fruto da busca constante pela melhoria da

oferta”, “busca contínua pela melhoria dos serviços” e “satisfação das necessidades do cliente” são apontados como estando na origem dessa evolução (PIRES, 2007). No âmbito desses factores, o mundo conheceu um enorme esforço por parte de diferentes instituições singulares e colectivas e ainda diferentes individualidades que deram o seu contributo para o desenvolvimento tecnológico industrial, apontando diferentes vias para a solução de diversos problemas.

No presente trabalho, após a selecção dos factores, deu-se seguimento ao estudo com a aplicação da técnica do Planeamento de Experiências através de matrizes, com vista a identificar os factores que interferem na resposta e a consequente análise da forma para o tratamento dos mesmos para uma possível regulagem. A aplicação desta técnica, foi decisiva e bastante útil na medição da influência que os factores exercem sobre as variáveis-resposta do processo. De recordar que foram definidas como variáveis-resposta em estudo a “presença de bolhas de ar no interior da embalagem” e “defeitos na colagem das embalagens”.

O elevado número de factores em estudo levaria à realização de maior número de experiências e, isto aumentaria os custos para Empresa. Para evitar essa situação, a aplicação do Planeamento de Experiências começou com o uso do Planeamento Factorial Completo 2^k , o que permitiu a identificação dos factores influentes do processo. Formou-se depois um subconjunto constituído apenas por esses factores para melhor regulamentação dos mesmos. Trata-se de uma técnica muito usada, por permitir a combinação de todos os factores ao mesmo tempo (MONTGOMERY, 2009).

E para medir o grau de afectação e estudar o relacionamento existente entre os factores e a variável resposta, foram aplicadas outras técnicas estatísticas, como a de ANOVA e a técnica de gráfico de probabilidade normal.

Uma hipótese orientou este trabalho: aplicação da metodologia do Planeamento de Experiências pode melhorar as características de Qualidade dos produtos, reduzir o número de ensaios e otimizar o uso de recursos e custos da Empresa (Secção 1.3).

Para a confirmação desta hipótese, fez-se a otimização do processo para determinar as condições ótimas para a operação e também a regulação mais adequada dos parâmetros. Teve como principal instrumento de trabalho, o Software SPSS versão 11.5.

Durante o estudo, foram medidas duas variáveis como se fez referência, sendo a primeira a ser estudada, foi a variável “defeitos de colagem das embalagens. Neste estudo, usou-se o modelo de primeira ordem, ao passo que para o estudo da segunda variável para além do modelo de primeira ordem, foi também aplicado o de segunda ordem, para confirmação da região mínima de defeitos (região óptima do processo) e aprofundamento do conhecimento sobre as condições ótimas do processo. Em todas as etapas do Planeamento, para além das rodadas planeadas, foram também realizadas rodadas adicionais ao longo da evolução de cada etapa, para a confirmação dos resultados sobretudo quando a realidade do processo exigisse.

Ainda na fase do estudo da primeira variável resposta, a pesquisa começou como definiu-se no fluxograma (Figura 3), ou seja, após a definição da resposta, seguiu-se o passo de analisar e estudar os factores que interferem na resposta. Depois da identificação dos factores influentes, aplicou-se o Planeamento de Experiências incluindo todos os factores operacionais, tendo depois concluir-se que dois deles (Temperatura e Pressão) afectam de forma significativa a resposta.

Realizou-se depois um Planeamento Composto Central com apenas esse subconjunto de factores, tendo sido acrescentados quatro pontos centrais, estudados a três níveis cada, respectivamente, níveis baixo, intermédio e alto. Foram rodados os dois factores em simultâneo até que ficaram definidas as condições ótimas operacionais. Depois de serem determinadas as condições, fixaram-se estes dois factores. Os resultados obtidos foram confirmados realizando, rodadas adicionais incluindo todos factores operacionais, sem alteração dos níveis operacionais já estabelecidos para os restantes factores e, com ajuda de outras técnicas de Planeamento de Experiências, foram estabelecidas as condições operacionais.

O estudo da segunda variável resposta, também começou com todos os factores operacionais. Mas, nesta fase, ao contrário da primeira, foram introduzidos ao longo das rodadas outros dois factores que a equipe achou necessários. O conjunto de factores ficou reduzido a um subconjunto de dois factores como a Quantidade de líquido e Quantidade de Azoto, influentes na resposta. Durante as rodadas, o factor Quantidade de líquido foi fixado em três pontos. Ou seja, estabeleceram-se as medidas em quantidades de 1/2l, 1l, e 1,5l variado apenas o segundo factor até que foram definidas as condições as óptimas.

Na metodologia de superfície de resposta foi possível, através do gráfico, a localização do ponto estacionário que representa um mínimo o que quer dizer que o par (w_1, w_2) minimiza a resposta. Esse ponto foi ainda confirmado através do uso do cálculo matemático.

Quanto ao controlo estatístico do processo, foram aplicadas as cartas de controlo de variáveis para a Média e o Desvio Padrão. Aplicou-se ainda a técnica de amostragem por aceitação como alternativa à inspecção a 100% para verificação da Qualidade do produto final.

No presente trabalho, o objectivo principal a que nos propusemos foi investir na aplicação da metodologia do Planeamento de Experiências para melhorar as características de Qualidade dos produtos, diminuir os seus defeitos com um reduzido número de ensaios e otimizar o uso de recursos e custos.

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmam a eficácia da aplicação da metodologia de Planeamento de Experiências para a solução de diversos problemas no Sector da produção industrial. A sua aplicação muniu a Indústria de técnicas científicas que visam o melhoramento do seu processo de produção, mostrando a sua eficiência no cumprimento das etapas alinhadas para o alcance dos objectivos traçados. Os seus resultados foram satisfatórios que proporcionaram o seu uso da parte dos engenheiros da indústria, para redução sistemática dos defeitos e melhoria da Qualidade.

Para que os resultados obtidos durante a pesquisa fossem analisados de forma a chegar-se a conclusões objectivas, o Planeamento de Experiências foi baseado numa

metodologia estatística, que é a única forma objectiva de avaliar os erros experimentais que afectam esses resultados.

9.2. Limites do estudo e trabalhos futuros

O presente estudo desenvolveu-se numa indústria localizada em Angola um país ainda em vias de desenvolvimento. E, nesses países, verifica-se que o nível intelecto é por vezes considerado um factor de ameaça em muitos Sectores, facto que muitas das vezes dificulta a aceitação de um pesquisador. E mesmo quando é aceite por influência de terceiros, não tem sido fácil a recolha de dados. Não obstante este facto, os dados recolhidos e aqui apresentados foram suficientes para desenvolver a pesquisa e atingir aos objectivos preconizados sem muitas dificuldades.

Ainda no caso específico de Angola, esse estudo nunca antes havia sido desenvolvido. A falta de conhecimento prévio por parte dos funcionários da Empresa fez com que no início, o processo fosse vagaroso, sobretudo na fase da elaboração do problema, onde pensou-se mais em custos e não em bons resultados tal como aconteceu neste caso específico. Houve também um certo receio no fornecimento de dados por parte da Empresa, sobretudo quando se tratassem de quantidades. Esses dados que se fossem fornecidos, talvez outros caminhos se abrissem para outros desafios em futuras investigações.

Recorde-se que esse tipo de trabalho é pioneiro e embrionário no ramo de pesquisa em Angola, pelo que, futuros estudos na área para o enriquecimento da abordagem do tema são aconselháveis. Por isso, nos trabalhos futuros, outras áreas que não foram aqui exploradas, poderão merecer um grande interesse, como por exemplo estudo sobre outros tipos de cartas de controlo, sobretudo no caso em que as amostras tenham dimensões diferentes, aplicação de matrizes de planeamento com factores a três níveis e ainda uso da técnica de confundimento por blocos.

Duma forma geral, a pesquisa ocorreu de forma satisfatória, uma vez que os resultados foram satisfatórios, pois, por lado o pesquisador pode ter um contacto directo com aplicação prática na indústria da metodologia de planeamento de experiências, por outro, a empresa beneficiou pela implementação de um novo método de trabalho que consiste na aplicação de matrizes de planeamento para observação de vários factores em simultâneo e a consequente regulação e aplicação das cartas de controlo para detecção de casos especiais que inviabilizam o processo.

Faltou ainda a realização de entrevistas finais com o Director geral da Empresa e o Administrador, uma vez que no momento conclusivo do processo estes encontravam-se fora do país.

Mas mesmo assim, os dados apresentados neste trabalho não revogam a plausibilidade dos resultados aqui apresentados. Dada a complexidade do tema, surgiram ao longo da investigação muitos outros assuntos, mas que não estavam directamente ligados ao objectivo do nosso trabalho, mas que também podiam ser investigados. Em trabalhos futuros procuraremos uma forma de colmatar muitas das dificuldades aqui apresentadas.

BIBLIOGRAFIA

Bibliografia

Bibliografia

AGOSTINHO, I. A. L. (2011). Aplicação do Controlo Estatístico do Processo numa Indústria de Derivados de Tomate. Dissertação de Mestrado, FCT, Universidade Nova de Lisboa.

ANDERSON, V. L. & R. A. McLean. (1974). Design of Experiments: A Realistic Approach. MARCEL Dekker, Inc., New York.

BARROS-NETO, B.; SCARMINO, I.; BURNS, R. (1995). Planejamento e Otimização de Experimentos, Campinas, Editora da Unicamp.

BRUNS, R.E.; NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S. (2001). Como Fazer Experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas; Editora da Unicamp; 04:180-184.

CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. (2003). Planejamento de Experiências Usando o Statistica. E-pappers Serviços Editoriais 1ª Edição, Rio de Janeiro.

CALAGERE, ALVARO J. A(2001): Introdução ao delineamento de experiências, 1ª Edição, Editora. Edgar Blucher SP.

CARPINETTI, L. C. R(2003). Planejamento e Análise de Experimentos. Editora Carlos EESC/SEP.

COLOMBARI, R. R.; (2004). Aplicação de Delineamento de Experimentos para o Processo de Solda à Projecção. Dissertação de Mestrado (UFI) – Brasil.

ESTEVES, E. (2009) *Controlo Estatístico da Qualidade*. Departamento de Engenharia Alimentar, Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, Faro, 54 p.

FERREIRA, R. C. R; SIQUEIRA, J. R. C. (2001). Planejamento e Otimização de Experimentos via método Taguchi: uma aplicação no Processo de Cromação de Anéis. Dissertação de Mestrado (IEM) – Brasil.

GALDÁMEZ, E. V. C. (2002). Aplicação das Técnicas de planejamento e de Análise de Experimentos na Melhoria da Qualidade de um Processo de fabricação de produtos plásticos. Dissertação de Mestrado (USP) – Brasil. Disponível <<http://www.teses.usp.br/teses>>.

HICKS, C. R. & TURNER, K.V. Jr. (1999). Fundamental Concepts in the Design of Experiments. FIFTH EDITION. Oxford University Press.

HILL, M. M.; HILL, A. (2009). Investigação por Questionário, 2ª Edição, 4ª impressão. Edições Sílabo, Lisboa.

JÚNIOR, L. A. P.; (2010). Planejamento de Experiências com Várias Replicações em Paralelo em Grades Computacionais. Dissertação de Mestrado (USP) – Brasil.

KUEHL, ROBERTO. (1994). Statistical Principles of Research Design and Analysis. Documento; Publicação: Duxbury Press, Belmont, California.

LIMA, L. H. (2008). Proposta de metodologia para Análise de Robustez de cadeias de suprimentos baseado em Taguchi, Resposta de Superfície e simulação com aplicação em Indústria de Eletrônicos. Dissertação de Mestrado (Universidade Católica do Pará) – Brasil.

LINDMAN, HAROLD R. (1992). Analysis of Variance in Experimental Design. Springer-Verlag, Editora: New York : Springer-Verlag, ©1992.

MACEDO, R. (2007). Aplicação em Metodologia de Planejamento de Experimentos para formulação de Massas Cerâmicas para Telhas. Dissertação de Mestrado (UFRGN) – Brasil.

MAROCO, J. (2007). ANÁLISE ESTATÍSTICA Com utilização do SPSS, 3ª Edição. Edições Sílabo, Lisboa.

MELO, K. C. (2004). Utilização das Cartas de Controle de média para avaliação de peso em Sorvetes. Dissertação de Mestrado (Universidade Católica de Góias) – Brasil.

MILLIKEN, GEORGE A. & DALLAS E. JOHNSON. (2009). Analysis of Messy Data. Volume I: Designed Experiments. Editora: Boca Raton: CRC Press, London.

MOITA, N. C. (2007). Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos. Dissertação de Mestrado (UTL) – Lisboa.

MONTEIRO, S. (2007). Planos Factoriais Fraccionados de base dois. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Portugal. Disponível na Biblioteca Nacional de Portugal.

MONTGOMERY, D. C. (2009). Introdução ao Controlo Estatístico de Qualidade, 4ª Edição, Editora: LCT, Brasil.

MONTGOMERY, D. C. (1996). Design and Analysis of Experiments. 4ª edição. Editora: New York : Wiley, New York.

OLIVEIRA, Teresa P. C. A. (2004). Estatística Aplicada – Universidade Aberta, Lisboa.

PEDRINI, D. C.; CATEN, C. S. T.; SOARES, A. B.; CAMPOS, M. S. (2002). Gráficos de Controle para Média e Desvio-padrão com tamanho de amostra variável: uma aplicação em uma indústria do Setor metalúrgico. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Brasil.

PEDROSA, A. C.; GAMA, S. M. A. (2004). Introdução Computacional à PROBALIDADE E ESTATÍSTICA. Porto Editora.

PEREIRA, Z. L; REQUEIJO, J. G. (2008). QUALIDADE: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos. Coedição de FCT e UNL. Lisboa

PIRES, A, R. (2007). Qualidade – Sistemas de Gestão da Qualidade, 3ª Edição. Edições Sílabo. Lisboa

RAMOS, L. C. (2008). Uma abordagem Bayesiana para o método de Controle “on-line” de Taguchi para atributos (USP) – Brasil.

REIS, E. (2001). Estatística Multivariada Aplicada, 2ª Edição, Edições Sílabo, Lisboa.

REIS, E; MELO, Paulo; ROSA Andrade; TERESA Calapez. (2008). Estatística Aplicada, Vol.2, Edições Sílabo, Lisboa

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. E.(2006). Planejamento de Experiências e Otimização de processos. 1. ed. Campinas: Editora da UNICAMP. 238 p.

ROSS, Phillip. J. (1991) Aplicações das técnicas de Taguchi na engenharia de qualidade, Editora: : Makron Books.

SANTOS, S. N. (2007). Uso do Planejamento de Experimentos na melhoria do produto e processo no Setor de próteses de quadril em uma Empresa de produtos cirúrgicos. Dissertação de Mestrado (UT) – Brasil.

Taguchi, G, Elsayed, E.A., Hsiang, T. Taguchi (1990) - Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção. São Paulo: Mc Graw Hill.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. (1996). Otimização estatística de processo: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni. (Disponível na biblioteca da EESC - USP).

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. (1996). Planejamento e análise de Experimentos: como identificar as principais variáveis influentes em um processo. Belo Horizonte: Ufmg. (Disponível na biblioteca da EESC - USP).

ANEXOS

Anexo I:

Carta de Controlo da _____														
Característica da Qualidade: _____														
Ficha técnica nº1														
Pesquisador: Manuel Alberto (Pesquisador)														
Data: Outubro de 2011														
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Defeitos	\bar{x}	\bar{S}	Observação
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														

Anexo II

Matriz A					
β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
1	-1	-1	1	1	1
1	1	-1	1	1	-1
1	-1	1	1	1	-1
1	1	1	1	1	1
1	-1,414	0	1,999396	0	0
1	1,414	0	1,999396	0	0
1	0	-1,414	0	1,999396	0
1	0	1,414	0	1,999396	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0

Y
96
97
95
96
96,8
98,7
97,6
97,8
96,3
95
97
96

Matriz transposta de A (A^T)											
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	-1	1	-1,414	1,414	0	0	0	0	0	0
-1	-1	1	1	0	0	-1,414	1,414	0	0	0	0
1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	0	0	2	2	0	0	0	0
1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

$X^T * Y$
1159,2
100,6866
94,2828
777,3
870,8
97

Matriz Produto ($X^T * X$)					
12	0	0	8	8	0
0	8	0	0	0	0
0	0	8	0	0	0
8	0	0	12	4	0
8	0	0	4	12	0
0	0	0	0	0	4

Inversa da matriz $X^T * X$, $(X^T * X)^{-1}$					
0,25	0	0	-0,125	-0,125	0
0	0,125	0	0	0	0
0	0	0,125	0	0	0
-0,125	0	0	0,156	0,031	0
-0,125	0	0	0,031	0,156	0
0	0	0	0	0	0,25

$\beta_i = (X^T * X)^{-1} * X^T Y$
83,78
12,59
11,79
3,77
15,46
24,25

O polinómio da segunda ordem é dado pela seguinte forma:

$$y = 83,78 - 12,59x_1 + 11,79x_2 + 3,77x_1^2 + 15,46x_2^2 + 24,25x_1x_2$$

Onde x_1 e x_2 representam respectivamente a Quantidade líquido e a Quantidade de Azoto.

Ponto estacionário

$$x_0 = -\frac{1}{2} B^{-1} * b$$

Onde B é uma matriz em cujos elementos da diagonal são constituídos pelos coeficientes quadráticos puros e os outros b_{11} e b_{12} pelo valor médio dos coeficientes quadráticos mistos; b é uma matriz formada pelos coeficientes lineares do polinómio.

b
-12,59
11,79

B	
3,77	12,13
12,13	15,46

Substituindo esses valores na equação e calculando-a, temos o seguinte ponto estacionário.

$$x_0 = (1,09; -1,02)$$

- Dada a seguinte equação $[B - \lambda I] = O$ começaremos por determinar os autovalores da determinante. Neste caso temos:

$$\begin{bmatrix} 3,77 - \lambda & 12,13 \\ 12,13 & 15,46 - \lambda \end{bmatrix} = 0$$

Desenvolvendo o cálculo, obtemos a seguinte equação quadrática, a qual determinaremos as suas raízes: $\lambda^2 - 19,23\lambda + 15,28 = 0$

Desenvolvendo a equação, obtemos as seguintes raízes: $\lambda_1 = 36,77$ e $\lambda_2 = 1,68$

Anexo III

Varição	SS	<i>g.l</i>	MQ	F ₀
A	SS _A	<i>a</i> - 1	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS _B	<i>b</i> - 1	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
AB	SS _{AB}	(<i>a</i> - 1)(<i>b</i> - 1)	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
C	SS _C	<i>c</i> - 1	$MS_C = \frac{SS_C}{(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AC	SS _{AC}	(<i>a</i> - 1)(<i>c</i> - 1)	$MS_{AC} = \frac{SS_{AC}}{(a-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS _{BC}	(<i>b</i> - 1)(<i>c</i> - 1)	$MS_{BC} = \frac{SS_{AC}}{(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS _{ABC}	(<i>a</i> - 1)(<i>b</i> - 1)(<i>c</i> - 1)	$MS_{ABC} = \frac{SS_{AC}}{(a-1)(b-1)(c-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Erro	SS _E	<i>abc</i> (<i>n</i> - 1)	$MS_E = \frac{SS_E}{abc(n-1)}$	
Total	SS _T	<i>abcn</i> - 1		

Anexo IV

Figura1: Preparação da polpa



Imagem: Manuel Alberto

Figura2: Tanque de mistura do produto



Imagem: Manuel Alberto

Figura3: Pasteurizador



Imagem: Manuel Alberto

Figura4: máquina de soldadura



Imagem: Manuel Alberto

Figura5: máquina de enchimento

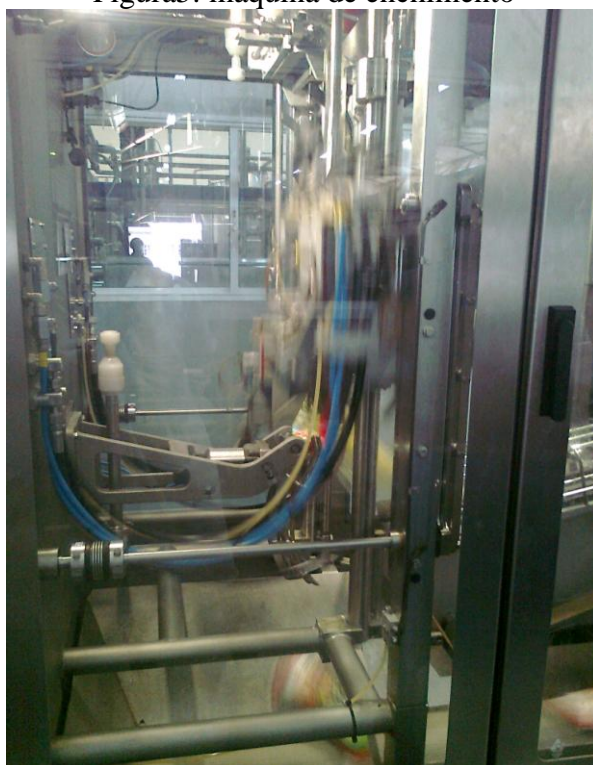


Imagem: Manuel Alberto

Figura6: linha de distribuição do produto



Imagem: Manuel Alberto

Figura7: Embalagem de sumo



Imagem: Manuel Alberto

Anexo V

Factores para Cartas de Controlo Constantes para Cartas Tradicionais de Variáveis

Factores para construção das cartas de controlo de variáveis

Dimensão Amostra	Carta da Média				Carta do Desvio Padrão						Carta da Amplitude					
	Factores Limites Controlo				Factores Linha Central						Factores para Limites de Controlo					
	A	A ₂	A ₃	A ₄	d ₂	c ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	
2	2,121	1,881	2,659		1,128	0,7979	0	3,267	0	2,606	0,853	0	3,686	0	3,267	
3	1,732	1,023	1,954		1,693	0,8862	0	2,568	0	2,276	0,888	0	4,358	0	2,574	
4	1,500	0,729	1,628		2,059	0,9213	0	2,266	0	2,088	0,880	0	4,698	0	2,282	
5	1,342	0,577	1,427		2,326	0,9400	0	2,089	0	1,964	0,864	0	4,918	0	2,114	
6	1,225	0,483	1,287		2,534	0,9515	0,030	1,970	0,029	1,874	0,848	0	5,078	0	2,004	
7	1,134	0,419	1,182		2,704	0,9594	0,118	1,882	0,113	1,806	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924	
8	1,061	0,373	1,099		2,847	0,9650	0,185	1,815	0,179	1,751	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864	
9	1,000	0,337	1,032		2,970	0,9693	0,239	1,761	0,232	1,707	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816	
10	0,949	0,308	0,975		3,078	0,9727	0,284	1,716	0,276	1,669	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777	
11	0,905	0,285	0,927		3,173	0,9754	0,321	1,679	0,313	1,637	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744	
12	0,866	0,266	0,886		3,258	0,9776	0,354	1,646	0,346	1,610	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717	
13	0,832	0,249	0,850		3,336	0,9794	0,382	1,618	0,374	1,585	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693	
14	0,802	0,235	0,817		3,407	0,9810	0,406	1,594	0,399	1,563	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672	
15	0,775	0,223	0,789		3,472	0,9823	0,428	1,572	0,421	1,544	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653	
16	0,750	0,212	0,763		3,532	0,9835	0,448	1,552	0,440	1,526	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637	
17	0,728	0,203	0,739		3,588	0,9845	0,466	1,534	0,458	1,511	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622	
18	0,707	0,194	0,718		3,640	0,9854	0,482	1,518	0,475	1,496	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608	
19	0,688	0,187	0,698		3,689	0,9862	0,497	1,503	0,490	1,483	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597	
20	0,671	0,180	0,680		3,735	0,9869	0,510	1,490	0,504	1,470	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585	
21	0,655	0,173	0,663		3,778	0,9876	0,523	1,477	0,516	1,459	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575	
22	0,640	0,167	0,647		3,819	0,9882	0,534	1,466	0,528	1,448	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566	
23	0,626	0,162	0,633		3,858	0,9887	0,545	1,455	0,539	1,438	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557	
24	0,612	0,157	0,619		3,895	0,9892	0,555	1,445	0,549	1,429	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548	
25	0,600	0,153	0,606		3,931	0,9896	0,565	1,435	0,559	1,420	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541	

Para $n > 25$

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \quad A_5 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}} \quad c_4 \approx \frac{4(n-1)}{4n-3} \quad B_3 = 1 - \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \quad B_4 = 1 + \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \quad B_5 = c_4 - 3\sqrt{1-c_4^2} \quad B_6 = c_4 + 3\sqrt{1-c_4^2}$$