

UNIVERSIDADE ABERTA



UNIVERSIDADE
AbERTA
www.uab.pt

**Planeamento de Experiências e Controlo Estatístico da
Qualidade: como interajem na optimização
de problemáticas reais**

Maria Isabel da Graça Dias

Dissertação apresentada na Universidade Aberta de Lisboa para
Obtenção do grau de Mestre em Bioestatística e Biometria

Orientadora: Professora Doutora Teresa Paula Costa Azinheira Oliveira

Lisboa 2022

A autora desta dissertação não autoriza a divulgação do todo ou de partes deste trabalho.

Agradecimentos

Eis que esta longa caminhada aqui termina. É um ciclo que se encerra e novos horizontes se avizinham.

Num lugar de destaque, agradeço ao meu marido Jorge que sempre me ouviu e aconselhou. Obrigada por teres estado sempre lá para mim!

À minha irmã Natália pelas suas imensas palavras de incentivo ao longo deste imenso caminho.

À minha amiga Inês Campos, que esteve sempre presente, apoiando-me em todos os momentos deste caminho, com o seu entusiasmo e palavras de motivação! O convívio e a amizade fazem parte de qualquer projeto.

À Professora Teresa Oliveira, o meu muito obrigada por ter aceitado orientar este trabalho e ter-me dado a liberdade de poder escolher.

A todos o meu infinito agradecimento.

Isabel Dias

Abril 2022

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

STATEMENT OF INTEGRITY

Declaro ter atuado com integridade na elaboração da presente dissertação/tese. Confirmando que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorri à prática de plágio ou a qualquer outra forma de falsificação de resultados.

Mais declaro que tomei conhecimento integral do Regulamento Disciplinar da Universidade Aberta, publicado no Diário da República, 2.ª série, n.º 215, de 6 de novembro de 2013.

I hereby declare having conducted my thesis with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of falsification of results in the process of the thesis elaboration.

I further declare that I have fully acknowledged Disciplinary Regulations of the Universidade Aberta (regulation published in the official journal Diário da República, 2.ª série, N.º 215, de 6 de novembro de 2013).

Universidade Aberta, 2 de Julho de 2022 [Data/Date]

Nome completo/Full name: Maria Isabel da Graca Dias

Assinatura/Signature:

Maria Isabel da Graca Dias

manuscrita ou digital / handwritten or digital

RESUMO

As metodologias estatísticas – Planeamento de Experiências (DOE – Design of Experiments) e Controlo Estatístico do Processo (CEP) foram exploradas intensamente numa aplicação a dados reais. A análise dos dados foi efectuada através dos *softwares* para análise estatística, Minitab e SPSS.

Este trabalho foi efectuado na empresa Γ , e iniciou-se devido ao facto de se ter detectado um número anormalmente elevado de reclamações no produto “flocos de trigo”.

Inicialmente, na linha de produção começou-se a detectar uma grande quantidade de finos. No entanto a recolha de finos não era pesada/avaliada de forma sistemática e não permitia uma visão objectiva e quantificada do problema.

A receita dos flocos de trigo foi alterada no final de T. Após se ter iniciado a produção contínua desta nova receita, verificou-se que as perdas de produto sob a forma de finos, eram muito mais elevadas do que na receita anterior. Com esta alteração, os flocos apresentavam-se mais frágeis, mais facilmente desenvolviam aglomerados nos moinhos, e o produto tinha visivelmente menor qualidade relativa à sua aparência.

O objetivo desta dissertação foi a exploração das metodologias estatística e computacional ilustras à luz de uma problemática real, e envolveu o estudo dos factores que um grupo multidisciplinar entendeu como poderem ser os mais determinantes, no equipamento mais crítico para a qualidade da massa de flocos de trigo. Este grupo seleccionou dois equipamentos: as cozedoras e o secador da massa dos flocos.

Na tentativa de se escolher os melhores *settings* (parâmetros) de cada um dos equipamentos foi aplicada uma técnica estatística designada por Planeamento de Experiências. Foi escolhido um DOE aleatório, factorial 2^3 para estudo de ambos os equipamentos.

Após se ter encontrado os *settings* mais promissores para melhorar a qualidade da massa e assim evitar a formação de finos, foram feitos estudos de capacidade do processo.

Os estudos de capacidade do processo pretenderam quantificar se a capacidade e a performance do processo melhoraram com a introdução dos novos *settings* nas cozedoras.

Estes estudos apontaram para uma melhoria significativa da capacidade e da performance da linha de processamento.

Palavras-chave: Planeamento de experiências, capacidade de processo, performance de processo, trigo, *brainstorm*.

ABSTRACT

The statistical methodologies – Design of Experiments (DOE) and Statistical Process Control (SPC) were intensively explored in an application to real data. Data analysis was performed using software for statistical analysis, Minitab and SPSS.

This work was carried out in company Γ , and it started due to the fact that an abnormally high number of complaints was detected in the product “wheat flakes”.

Initially, on the production line, a large amount of fines began to be detected. However, the collection of fines was not weighed/evaluated in a systematic way and did not allow an objective and quantified view of the problem.

The wheat flakes recipe was changed at the end of T. After starting the continuous production of this new recipe, it was found that product losses in the form of fines were much higher than in the previous recipe. With this change, the flakes were more fragile, more easily developed agglomerates in the mills, and the product had a visibly lower quality relative to its appearance.

The objective of this dissertation was to explore the statistical and computational methodologies illustrated in the light of a real problem, and involved the study of the factors that a multidisciplinary group understood as being the most decisive, in the most critical equipment for the quality of the wheat flakes dough. This group selected two pieces of equipment: the cookers and the dough flakes dryer.

In an attempt to choose the best settings (parameters) for each of the equipment, a statistical technique called Design of Experiments was applied. A random, factorial 2^3 DOE was chosen to study both equipment.

After finding the most promising settings to improve the quality of the dough and thus avoid the formation of fines, process capability studies were carried out.

The process capability studies aimed to quantify whether the capability and performance of the process improved with the introduction of the new settings in the cookers.

These studies pointed to a significant improvement in the capability and performance of the processing line.

Keywords: Design of Experiments, process capability, process performance, wheat, brainstorm.

GLOSSÁRIO

CEP – Controlo Estatístico do Processo

CDA – Certificado De Análise

DOE – Planeamento de Experiências ou *Design of Experiments*

GQT – Gestão da Qualidade Total

I&D – Departamento de Investigação e Desenvolvimento

LIP – Limite Inferior de Produção

LSCP - Limite Superior de Controlo do Processo

LICP - Limite Inferior de Controlo do Processo

LC – Linha Central

LIE - Limite Inferior de Especificação

LSE - Limite Superior de Especificação

LSP – Limite Superior de Produção

LIP – Limite Inferior de Produção

OOS – *Out Of Specification* ou Produto Fora de Especificação

um – Unidades Monetárias

Índice

Agradecimentos	2
RESUMO	4
ABSTRACT	5
GLOSSÁRIO	6
Índice	7
Índice de Figuras	10
Índice de Gráficos	12
Índice de Tabelas	14
1. Introdução	15
1.1. O problema em análise	15
1.1.1. Descrição do problema e motivação	15
1.1.2 Relevância do trabalho efectuado	16
1.1.3 Dados obtidos na empresa	16
1.1.4 Software utilizado	17
1.2 Enquadramento do processo fabril	17
1.2.1 Resumo histórico da Empresa Γ	17
1.2.2 Breve descrição dos flocos de trigo	17
1.2.3 O processo produtivo.....	18
1.3 Estrutura da dissertação	22
2. Evolução do controlo de qualidade nas indústrias alimentares	23
2.1 A importância da qualidade global nas indústrias de produção de géneros alimentícios	23
2.2 Os custos da qualidade	23
2.2.1 O ponto óptimo da qualidade.....	25
2.2.2 Indicadores de qualidade.....	26
2.3 A filosofia de Gestão pela Qualidade Total	27
2.4 Modelos de melhoria contínua	28
3. Metodologia de aplicação de Planeamento de Experiências a dados provenientes da indústria alimentar	30
3.1 Aplicações do Planeamento de Experiências	30
3.2 Fundamentos do Planeamento de Experiências	30
3.3 Conceitos do Planeamento de Experiências	33
3.4 O Planeamento de Experiências na qualidade de processos	33

3.5 O Planeamento factorial completo com três factores e dois níveis.....	37
3.6 Análise de variância	41
3.6.1 Análise de resíduos	44
4. Controlo estatístico do processo	47
4.1. Introdução	47
4.2 Variação do processo	47
4.2.1 Causas comuns e causas especiais de variação	48
4.3 As cartas de controlo como ferramenta essencial para o controlo do processo.....	49
4.4 A capacidade e performance de um processo	52
4.4.1 Definição de capacidade de um processo	52
4.4.2 Definição de performance de um processo.....	56
5. Análise da situação que fomentou este estudo	58
5.1. Análise financeira.....	58
5.2 Análise da quantidade de finos produzida	59
5.3 Análise de reclamações.....	60
5.4 Análise dos flocos de trigo	61
5.4.1 Análise dos flocos de trigo antes do teste em trânsito na cadeia de abastecimento	61
5.4.2 Análise dos flocos de trigo após o teste em trânsito na cadeia de abastecimento.....	65
6. Análise das matérias primas	71
6.1. Análise química da principal matéria prima - o <i>Triticum aestivum</i>	71
6.1.1 O índice de <i>Hagberg FN</i>	71
6.1.2 O teor de proteína	72
6.2 Discussão dos resultados obtidos.....	73
7. Optimização do processo de produção de flocos de trigo.....	75
7.1 Tempestade de ideias ou <i>brainstorming</i>	75
7.2 Definição da estratégia de trabalho	77
7.3 A metodologia de Planeamento de Experiências aplicada nas cozedoras.....	78
7.3.1 Escolha dos factores e dos níveis.....	78
7.3.2 Matriz de planeamento	79
7.3.3. Análise de variância	80
7.3.4 Qualidade de ajustamento do modelo e análise dos coeficientes	83
7.3.5 Modelo de regressão	84
7.3.6 Representação gráfica dos efeitos da DOE	85
7.3.7 Representação geométrica	87
7.3.8 Análise de resíduos	87

7.3.9	Análise do impacto da mudança de settings das cozedoras.....	88
7.4	A metodologia do Planeamento de Experiências aplicada ao secador da massa.....	89
7.4.1	Escolha dos factores e dos níveis.....	89
7.4.2	Matriz de planeamento	90
7.4.3	Análise de variância	91
7.4.4	Qualidade de ajustamento do modelo e análise dos coeficientes	93
7.4.5	Modelo de regressão	94
7.4.6	Representação gráfica dos efeitos do DOE.....	94
7.4.7	Representação geométrica	95
7.4.8	Análise de resíduos	96
8.	Capabilidade e performance do processo	98
8.1.	Introdução	98
8.2	Análise da capabilidade e performance do processo de manufactura de flocos de trigo antes de se ter efectuado o estudo de Planeamento de Experiências	99
8.2.1	Verificação dos pressupostos.....	99
8.2.2	Análise dos dados distribuidos ao longo da média.....	102
8.2.3	Histograma das capacidades	103
8.2.4	Análise da capabilidade e performance do processo	103
8.3	Análise da capabilidade e performance do processo de manufactura de flocos de trigo após se ter efectuado o estudo de Planeamento de Experiências	104
8.3.1	Verificação dos pressupostos.....	104
8.3.2	Análise dos dados distribuidos ao longo da média.....	106
8.3.3	Histograma das capacidades	107
8.3.4	Análise da capabilidade e performance do processo	107
9.	Considerações finais.....	109
9.1	Sinopse do trabalho desenvolvido	109
9.2	Principais resultados	110
9.3	As aprendizagens e competências adquiridas	111
9.4	Limitações do estudo, potencialidades da abordagem seguida e trabalhos futuros	112
	Referências bibliográficas	113
	ANEXO 1 – Resultados complementares relativos a DOE das cozedoras.	117
	ANEXO 2 – Resultados complementares relativos a DOE do secador da massa.	118
	ANEXO 3 – Tabela com os valores de d_2 e sua relação com a dimensão do subgrupo (extraído de Pereira e Requeijo, 2008, pag. 729).....	119

Índice de Figuras

Figura 1.1 – As diversas etapas da produção de flocos de trigo. As setas a vermelho assinalam os locais onde os flocos de trigo vão sendo esmigalhados (finos) em partículas de diversas dimensões.

Figura 2.1 – Representação esquemática dos custos da qualidade, visíveis e escondidos, sob a forma de um *iceberg*, com o intuito do leitor ter uma real percepção das suas dimensões.

Figura 2.2 – Custos associados à manufactura de um género alimentício.

Figura 2.3 – Representação esquemática do ponto óptimo de qualidade, apresentando a tendência dos custos de qualidade relacionados com o decréscimo de produção de géneros alimentícios defeituosos.

Figura 2.4 – Representação esquemática do Ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act).

Figura 2.5 – Representação esquemática da metodologia DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve, Controlo).

Figura 3.1 – Abordagem sistemática para aplicação de DOE (Alberto, 2013, Pereira e Requeijo, 2008).

Figura 4.1 - Curvas de distribuição Normal ao longo do tempo, num processo estável e noutra instável.

Figura 4.2 – Dispersões de curto e longo prazo (Duret e Pillet, 2009).

Figura 4.3 – Processos com diferentes Cp e sua relação com a qualidade do processo relativamente às especificações do produto.

Figura 4.4 - Relação e posicionamento de diversas e hipotéticas curvas de distribuição normal e os seus índices (Djekci e Tomasevic, 2018).

Figura 5.1 – Análise IPA (*Identify, Prioritize, Assign*) efectuada aos dados de reclamações do primeiro semestre de T+1, para o produto flocos de trigo.

Figura 5.2 – Paletes de flocos de trigo que foram submetidas a um teste de movimentação ao longo da cadeia de abastecimento.

Figura 5.3 – Máquina agitadora dos flocos de trigo, possuindo crivos de duas dimensões distintas: o primeiro de 8mm, e o segundo por baixo, de 3.35mm.

Figura 5.4 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados do final da linha de produção no mesmo espaço de tempo, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote (perspectiva da fábrica), ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Figura 5.5 – Disposição das diferentes camadas de caixas e sua denominação de forma a poder ser identificadas a sua exacta posição em cada palete.

Figura 5.6 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados de duas paletes que continham os produtos 6x1kg após o teste em trânsito, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote, ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Figura 5.7 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados de duas paletes que continham os produtos 9X500g após o teste em trânsito, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote, ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Figura 5.8 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados de duas paletes que continham os produtos 6X500g após o teste em trânsito, com o objectivo de visualizar exactamente o que o

consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote, ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Figura 5.1 – Resultado de uma tempestade de ideias que teve como objectivo apresentar o maior número possível de factores que possam eventualmente para a produção de finos na linha de produção de flocos de trigo.

Figura 7.2 – Local de retirada de amostras de finos para análise diária da percentagem produzida relativamente à velocidade da linha de produção. Estes finos são separados do fluxo de produto que é movimentado na cinta transportadora imediatamente antes do depósito de espera para embalagem.

Figura 7.3 - Representação geométrica dos dados analisados neste DOE factorial 2^3 .

Figura 7.4 - Representação geométrica dos dados analisados neste DOE factorial 2^3 .

Figura 8.1 – Processo de medição do teor de finos no produto final já embalado.

Índice de Gráficos

Gráfico 3.1 – Gráfico dos efeitos principais, no caso de um planeamento de experiências 2^k .

Gráficos 3.2 – Gráficos de efeitos de interação.

Gráfico 3.3 – Exemplo de distribuição de resíduos sob a forma de um histograma.

Gráfico 3.4 – Ilustração de um exemplo de um gráfico de probabilidades com distribuição Normal.

Gráfico 3.5 - Resíduos versus sequência das experiências.

Gráfico 3.6 - Resíduos *versus* os valores estimados.

Gráfico 4.1 – Exemplo de uma carta de controlo. LSC – Limite Superior de Controlo, LC – Linha Média, LIC – Limite Inferior de Controlo (Carreira, 2006).

Gráfico 4.2 – Representação esquemática da localização dos diversos limites com que as empresas de manufactura trabalham.

Gráfico 5.1 – Representação gráfica da quantidade de finos produzida entre Janeiro do ano T a Agosto de T+1.

Gráfico 5.2 – Representação gráfica da média mensal da percentagem de finos produzida entre Junho do ano T a Maio de T+1. LSE significa Limite Superior de Especificação.

Gráficos 5.3 – Representação sob a forma de Box Plot dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas de flocos de trigo para dois diferentes pesos de caixas: 500g e 1kg, e para os crivos de 3.35mm (a) e 8mm (b).

Gráficos 5.4 - Representação sob a forma de *Box Plot* dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas individuais de flocos de trigo por palete (6x1kg): palete situada no topo (TP), e a palete colocada em baixo (BP). Os resultados da percentagem de finos foram obtidos nos crivos de 3.35mm e 8mm.

Gráficos 5.5 - Representação sob a forma de *Box Plot* dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas individuais de flocos de trigo por palete (9x500g): palete situada no topo (TP), e a palete colocada em baixo (BP). Os resultados da percentagem de finos foram obtidos nos crivos de 3.35mm e 8mm. De notar que OOS significa produto fora de especificação.

Gráficos 5.6 - Representação sob a forma de *Box Plot* dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas individuais de flocos de trigo por palete (6x500g): palete situada no topo (TP), e a palete colocada em baixo (BP). Os resultados da percentagem de finos foram obtidos nos crivos de 3.35mm e 8mm. De notar que OOS significa produto fora de especificação.

Gráfico 6.1 - índices de *Hagberg FN* foram analisados entre Junho do ano T e Maio do ano T+1. Neste encontram-se assinaladas as diversas variedades de trigo usadas ao longo do tempo, bem como o período de colheita.

Gráfico 6.2 – Os teores de proteína foram analisados entre Junho do ano T e Maio do ano T+1. Neste encontram-se assinaladas as diversas variedades de trigo usadas ao longo do tempo, bem como o período de colheita.

Gráfico 6.1 – Valores da percentagem de finos avaliada diariamente ao longo do mês de Junho do ano T+1. Nos dias que não têm resultados, a linha encontrava-se parada para limpeza e manutenção. LSP – Limite Superior de Produção.

Gráfico 7.2 – Gráfico Pareto dos efeitos standardizados para a variável resposta: efeito na diminuição do teor de finos produzidos ao longo do processo de manufactura dos flocos de trigo.

Gráfico 7.3 – Representação gráfica entre as possíveis interações dos diversos factores A, B e C.

Gráfico 7.4 – Representação gráfica do efeito dos diversos factores A, B e C quando os níveis são alterados.

Gráfico 7.5 – Análise de resíduos. (a) – Gráfico de probabilidades de distribuição Normal. (b) – Resíduos versus valores previstos. (c) – Histograma dos resíduos. (d) – Resíduos versus sequência das experiências.

Gráfico 7.6 – Gráfico Pareto dos efeitos estandardizados para a variável resposta: efeito no teor de finos produzidos ao longo do processo de manufactura dos flocos de trigo.

Gráfico 7.7 – Representação gráfica entre as possíveis interações dos diversos factores A, B e C.

Gráfico 7.8 – Representação gráfica do efeito dos diversos factores A, B e C quando os níveis são alterados.

Gráfico 8.1 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 3.35mm.

Gráfico 8.2 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

Gráfico 8.3 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 8mm.

Gráfico 8.4 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 8mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

Gráficos 8.5 – Dados observados ao longo da media. (a) - para o crivo de 3.5 mm e (b) – para o crivo de 8 mm).

Gráficos 8.6 – Histograma das capacidades para (a) – crivo de 3.35mm e (b) – crivo de 8mm.

Gráficos 8.7 – Capacidade e performance do processo para os crivos de 3.35mm (a) e de 8mm (b).

Gráfico 8.8 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 3.35mm.

Gráfico 8.9 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

Gráfico 8.10 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 8mm.

Gráfico 8.11 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

Gráficos 8.12 – Dados observados ao longo da média. (a) - para o crivo de 3.5 mm e (b) – para o crivo de 8 mm.

Gráficos 8.13 – Histograma das capacidades para (a) – crivo de 3.35mm e (b) – crivo de 8mm.

Gráficos 8.14 – Capacidade e performance do processo para os crivos de 3.35mm (a) e de 8mm (b) após alteração dos settings das cozedoras.

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Classificação dos diversos tipos de Planeamento de Experiências, sua aplicação, a sua estrutura e tipo de informações obtidas.

Tabela 3.2 – Matriz de planeamento de experiências para o caso de um planeamento factorial 2^3 (adaptado de Montgomery, 2009; Borror, 2008).

Tabela 3.3 – tabela ANOVA para um planeamento factorial completo a dois factores (A e B) e dois níveis (a, b) (Borror, 2008).

Tabela 6.1 – Valores de especificação para finos, nos dois crivos de 8mm e 3.35mm, para flocos de trigo.

Tabela 7.1 – Enumeração dos dois níveis utilizados para cada factor previamente escolhidos, para se proceder a um DOE completo 2^3 .

Tabela 7.2 – Matriz de planeamento do DOE factorial 2^3 , efectuado em duplicado.

Tabela 7.3 – Matriz de planeamento utilizada neste estudo, onde se encontra a variável resposta – percentagem de finos, obtida em cada experiência, segundo uma matriz aleatória.

Tabela 7.4 – Análise de variância para um DOE factorial completo, 2^3 .

Tabela 7.5 - Valores de R^2 e R^2 ajustado do nosso modelo

Tabela 7.6 – Tabela dos coeficientes.

Tabela 7.7 – Enumeração dos dois níveis utilizados para cada factor previamente escolhidos, para se proceder a um DOE completo 2^3 .

Tabela 7.8 – Matriz de planeamento do DOE factorial 2^3 , efectuado em duplicado.

Tabela 7.9 – Matriz de planeamento utilizada neste estudo, onde se encontra a variável resposta – percentagem de finos, obtida em cada experiência, segundo uma matriz aleatória.

Tabela 7.10 – Análise de variância para um DOE factorial completo, 2^3 .

Tabela 7.11 - Valores de R^2 e R^2 ajustado do nosso modelo.

Tabela 7.12 – Tabela dos coeficientes.

Tabela 8.1 – Carta de controlo para o teor de finos em flocos de trigo, existente no Sistema de informação interno da empresa Γ , relativamente ao produto final embalado e pronto para ser paletizado.

Tabela 8.2 – Resumo dos índices de capacidade, performance obtidos em ambos os tipos de crivos, antes e depois da alteração dos settings das cozedoras, em resultado do DOE já abordado no capítulo 7.

1. Introdução

1.1. O problema em análise

1.1.1. Descrição do problema e motivação

Este trabalho pretendeu abordar um problema industrial real, relacionado directamente com uma indústria alimentar. A voz do consumidor é constantemente ouvida em tempo real de forma a entender o tipo e número de reclamações de modo a poder actuar o mais rápido possível nos processos industriais. Contactos directos por telefone, carta, mensagens no site da empresa disponibilizado para os consumidores, redes sociais são alguns exemplos que permitem às empresas a melhoria contínua dos seus produtos.

A análise aprofundada do número de reclamações que é feita trimestralmente na empresa Γ alertou para um número atípico e crescente relacionado com a aparência dos flocos de trigo (género alimentício produzido na empresa Γ , que ao longo do texto também pode ser denominado de “massa”, sendo esta um produto intermédio de flocos de trigo), incidindo sobretudo na quantidade de finos que se encontravam em cada pacote adquirido pelos consumidores finais.

A aplicação que se desenvolveu, incidiu sobre o processo de manufactura de flocos de trigo produzido numa empresa fora de Portugal, empresa que denominaremos de Γ .

O processo de manufactura dos flocos de trigo passa por diversas etapas, em que algumas contribuem para uma massa mais ou menos quebradiça. Esta, ao longo do processo vai-se partindo em partículas de maiores ou menores dimensões, denominadas de *finos*. Estes finos vão sendo removidos em diversos locais específicos da linha de processamento através de crivos. Diariamente, estes são pesados para se associar ao custo de manufactura deste produto.

O facto de se trabalhar com matérias-primas que se alteram ao longo do ano e que passam por várias etapas em diversas máquinas em que não são ajustados os seus parâmetros específicos, nesta dissertação, denominados de *settings*, contribuem para elevadas perdas de flocos de trigo sob a forma de finos. E ainda, a reformulação dos flocos de trigo contendo agora menos teor de açúcar e sal, teve um forte impacto no incremento de finos. A alteração da receita deveu-se a obrigações legislativas da União Europeia, que impõem um teor máximo de sal e açúcar cada vez mais baixo.

Num determinado ano foram produzidas 180 toneladas de finos, que corresponderam a um custo de 50 000 um (unidades monetárias). Assim, a rentabilidade deste produto diminuiu fortemente e constitui um problema real com que a empresa Γ se depara no seu dia-a-dia.

Diversas tentativas para a diminuição da quantidade de finos foram sendo efectuadas ao longo dos anos, nomeadamente o constante ajuste de alguns parâmetros de certas máquinas por parte dos técnicos que com elas trabalham, mas nenhuma foi feita tendo em conta um estudo prévio e sistemático de todos os factores que podem contribuir para este problema.

Este trabalho pretende fazer um estudo sistemático de vários factores que poderão contribuir para a formação dos finos. Este iniciou-se com um estudo sobre a situação actual deste problema, nomeadamente as matérias primas mais importantes, comportamento dos flocos de trigo ao longo da cadeia de abastecimento e quantificação dos finos elaborados diariamente na linha de produção.

Seguiu-se a aplicação de Planeamento de Experiências (DOE – Design of Experiments) para a melhoria dos *settings* das cozedoras e do secador da massa deste género alimentício. Finalmente analisou-se a capacidade e a performance do processo, antes e depois da alteração dos *settings* apontados pelo DOE.

Nesta dissertação de mestrado pretendeu-se aplicar diversas técnicas estatísticas que foram sendo estudadas ao longo da sua parte teórica e pretende contribuir para um melhor entendimento do problema, dos factores que podem de alguma forma o influenciar de modo a se poder actuar de maneira mais sistemática.

1.1.2 Relevância do trabalho efectuado

A empresa Γ focada neste trabalho situa-se fora de Portugal, sendo uma empresa que manufactura géneros alimentícios com uma gama muito vasta de produtos bem conhecidos entre os portugueses.

A elevada produção anual e os custos cada vez mais elevados das matérias-primas obriga a que todas as empresas tentem reduzir os seus custos de produção o melhor possível, visto que as margens de ganho dos produtos são cada vez mais baixas devido à enorme concorrência de grandes empresas.

As pequenas empresas têm também um papel muito relevante, pois apesar de terem produções muito mais baixas têm uma estrutura mais flexível que lhes permite chegar mais rapidamente aos consumidores com produtos diferenciados que vão ao encontro e a maior parte das vezes, superam as suas expectativas. Conseguem deste modo, um nicho de mercado, com margens muito mais interessantes do que os conseguidos com grandes estruturas pesadas como é o caso da empresa Γ .

Este trabalho foca apenas um determinado produto da vasta gama produzida na empresa Γ : os flocos de trigo. Estes possuem margens de lucro extremamente baixas. Neste contexto é muito importante que ao nível de gestão da produção seja feito um controlo muito rigoroso das perdas ao longo da linha de produção. No caso dos flocos de trigo, as suas perdas são maioritariamente os finos, ou seja, os pequenos pedaços de massa que se vão partindo ao longo de todo o trajecto até chegar ao embalamento, e que vão sendo removidos por crivos colocados em posições estratégicas.

Este estudo pretende dar um contributo para o entendimento dos factores que mais influenciam a produção de finos e estudar algumas hipóteses de melhoria, ou seja decréscimo da quantidade de finos produzida, de uma forma muito sistemática e analítica, algo que até hoje nunca foi feito.

1.1.3 Dados obtidos na empresa

Os dados apresentados neste trabalho foram obtidos no ano T e um ano depois. A empresa tem um sistema interno, onde são armazenados todos os dados obtidos durante o processamento dos

flocos de trigo. Estes dados vão desde os Certificados de Análise (CDA) das matérias primas, passando por todos os pontos de controlo, paletes formadas e enviadas para o nosso local de armazenamento externo: a *empresa Σ*.

Outros dados foram obtidos através de estudos efectuados com a ajuda de uma equipa multidisciplinar, sendo relevante o Engenheiro de Sistemas bem como os técnicos ao longo das linhas de processamento.

1.1.4 Software utilizado

A análise estatística dos dados foi efectuada recorrendo ao *software Minitab* versão 17, bem como ao SPSS versão 24, e ainda do *Excel*.

O recurso a outras ferramentas informáticas, nomeadamente o R, não foi necessário. O *software* anteriormente referido, sobretudo o *Minitab*, é amplamente utilizado nas empresas devido à sua facilidade de utilização pois é bastante intuitivo.

1.2 Enquadramento do processo fabril

1.2.1 Resumo histórico da Empresa Γ

A empresa A iniciou a sua actividade em B com a produção de misturas para bolos a partir da farinha produzida localmente. Após a segunda Guerra Mundial muitos edifícios encontravam-se destruídos devido aos bombardeamentos. Uma nova empresa foi construída de raiz logo a seguir ao fim da Guerra.

Depois de passar a fase da elaboração de bolos e ainda outros géneros alimentícios, iniciou a produção de flocos de trigo e com um elevado número de diferentes receitas.

A empresa Γ fornece as maiores cadeias de supermercados do país onde está inserida, bem como indústrias que utilizam os seus produtos como ingrediente na sua manufactura.

1.2.2 Breve descrição dos flocos de trigo

Na manufactura dos flocos de trigo são utilizadas diversas matérias-primas, sendo a mais significativa a farinha de trigo. Açúcar, extracto de malte, sal, mistura de vitaminas e ferro fazem parte da receita deste tipo de flocos.

Este género alimentício destina-se a todo o tipo de consumidores e de todas as idades, excepto aqueles que forem alérgicos ao gluten.

A sua manufactura é feita seguindo escrupulosas regras de Boas Práticas de Fabrico. Auditorias internas mensais são parte integrante do trabalho de diversos membros do *staff*, permitindo colmatar

eficazmente as não conformidades encontradas. Cerca de 75 dias por ano são destinados a auditorias externas por entidades certificadoras e reguladoras, a maioria não previamente anunciadas, que verificam todo o trabalho efectuado e legitimam todos os alimentos produzidos nesta fábrica.

1.2.3 O processo produtivo

O processo de elaboração de flocos de trigo encontra-se detalhadamente descrito na figura 1.1. A manufactura dos flocos de trigo inicia-se pela mistura de todos os ingredientes numa misturadora com a capacidade de duas toneladas. Após mistura, os ingredientes seguem para um depósito de espera que irá fornecer a quantidade necessária a cada cozedora. A massa devidamente cozida segue para um secador, sendo depois conduzida para depósitos com parafusos sem-fim. Esta etapa destina-se a fornecer aos moinhos FMR apenas um determinado fluxo de massa previamente estabelecido. Nos moinhos FMR a massa é laminada e de seguida cortada, de modo a ser formados pequenos cubos de massa, as *pellets*. As *pellets* são conduzidas através de cintas vibratórias para o secador. Os pequenos cubos agora mais desidratados seguem para os moinhos onde são prensados. Estes vão de seguida para o tostador para secagem final.

Os flocos de trigo à saída do tostador encontram-se mais rijos mas também mais quebradiços, sendo nesta zona que se começam a detectar a produção de finos (setas a vermelho na figura 1.1). A partir deste ponto, os finos, ou seja, as pequenas migalhas e pedaços de flocos que se vão partindo, vão sendo retirados do processo através de crivos situados em pontos chave do processo.

Os flocos são de seguida arrefecidos com ar fresco. A partir desta fase segue-se a movimentação dos flocos de trigo através de inúmeras cintas vibratórias que os transportam até ao depósito de espera para embalagem. Este tem como principal função evitar paragens da linha de produção quando a linha de embalagem se encontra parada.

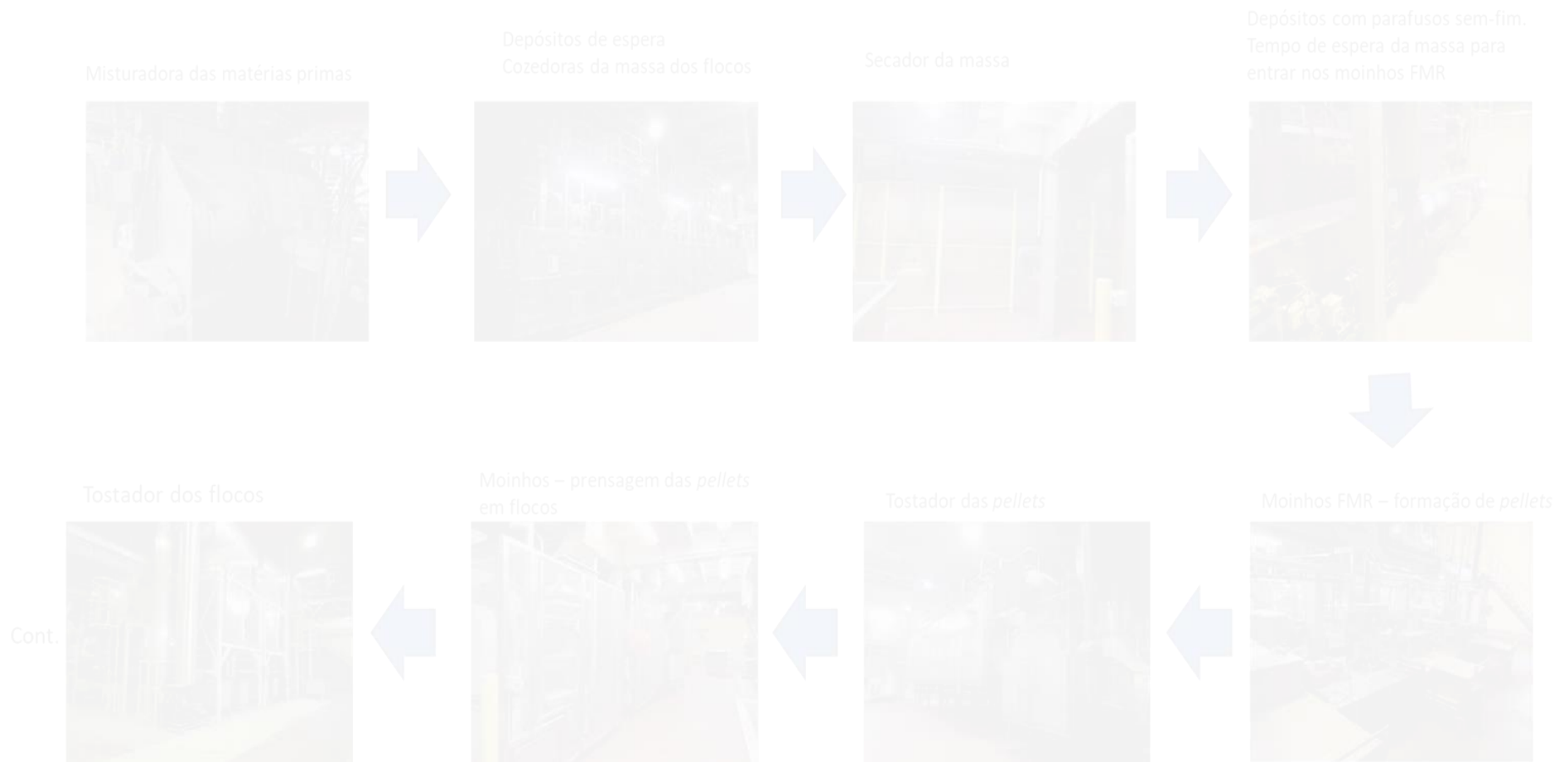
Este depósito tem cerca de 2m de altura por 4 de largura e tem a capacidade de cerca de 2 toneladas. Quando o tempo de paragem da linha de embalagem permite que o depósito se encha, os flocos de trigo que se encontram na zona mais profunda começam a partir-se em pequenos pedaços, sendo este ponto muito gerador de grandes quantidades de finos.

Os flocos de trigo são pesados, embalados em filme plástico, colocados em caixa de cartão e paletizados. As paletes são movimentadas duas a duas conforme é apresentado na figura 1.1, e assim são transportadas em camiões e armazenadas em local próprio mas fora das instalações da empresa Γ. Esta disposição e movimento das paletes propicia também a formação de finos, sobretudo nas caixas que suportam o maior peso.

Na empresa Γ são manufacturadas 43 toneladas de flocos de trigo por dia, o que equivale a cerca de 250 paletes, tendo cada uma o peso de 180kg.

De seguida é apresentado o processo de manufactura, ilustrado com toda a maquinaria envolvida em cada etapa do processo.

PROCESSO DE MANUFACTURA DOS FLOCOS DE TRIGO



Transporte dos flocos até à área de embalagem



Cont.

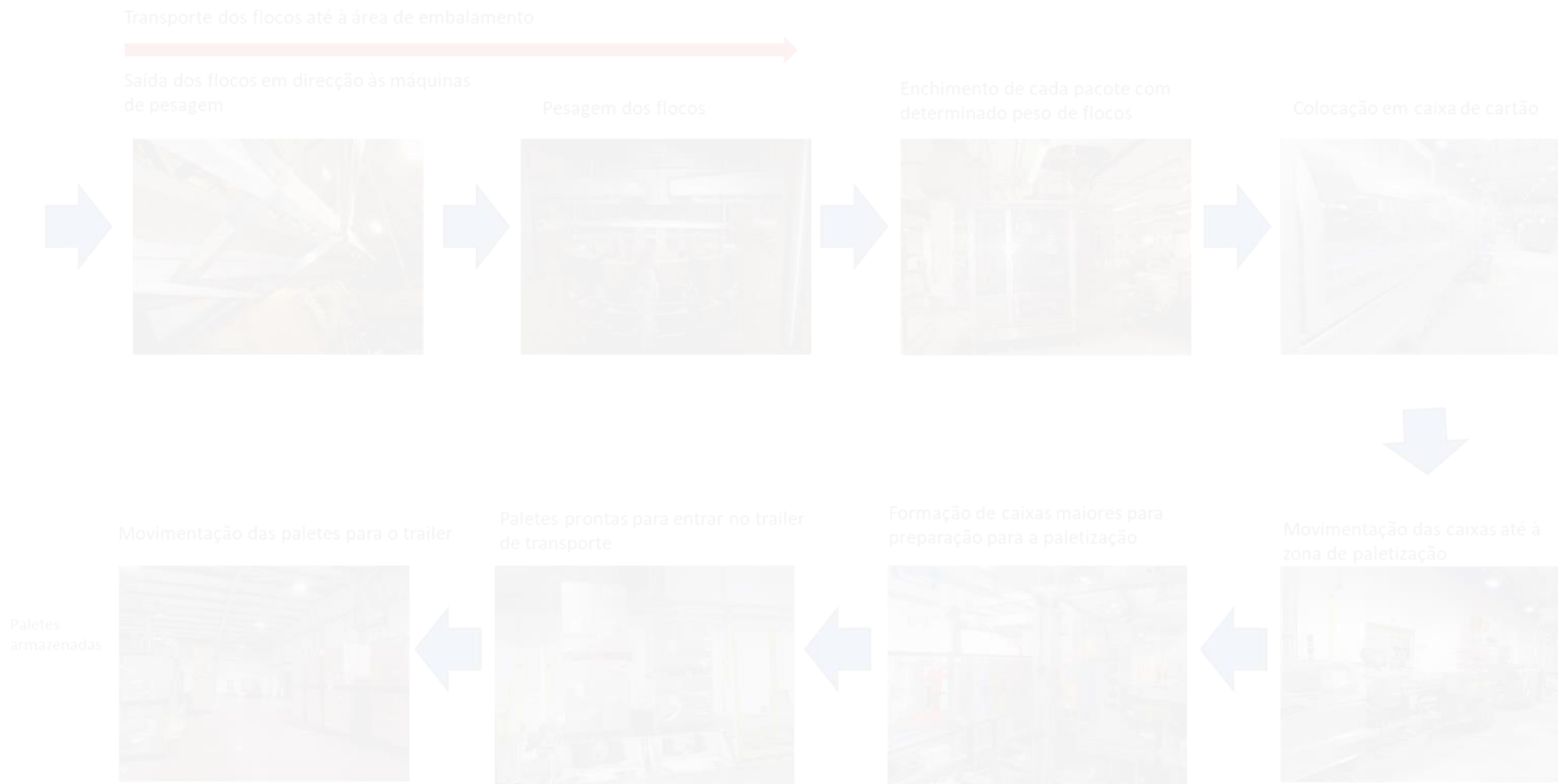


Figura 1.1 – As diversas etapas da produção de flocos de trigo. As setas a vermelho assinalam os locais onde os flocos de trigo vão sendo esmigalhados (finos) em partículas de diversas dimensões.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação tem nove capítulos. O primeiro apresenta o problema em análise, qual a sua importância para a empresa Γ e dar um enquadramento do processo de manufactura dos flocos de trigo.

O segundo capítulo apresenta um resumo das diferentes etapas que o controlo de qualidade sofreu até ao estado actual da sua implementação nas empresas. Neste é também descrito a estrutura de custos de um produto alimentar e de que forma se pode actuar no sentido da sua redução.

Os capítulos 3 e 4 têm como objectivo a pesquisa bibliográfica e explicação dos conceitos teóricos que estão por detrás das técnicas estatísticas utilizadas nesta dissertação: o Planeamento de Experiências (DOE) e o Controlo Estatístico do Processo (CEP), respectivamente.

Os capítulos 5 e 6 dizem respeito à análise da situação actual em que se encontra a empresa Γ . O capítulo 5 foca a análise de reclamações dos clientes, a análise da quantidade de finos produzida, bem como estudos em trânsito dos flocos de trigo, para se poder perceber em que estado o produto se encontrava quando chegava ao cliente final. O capítulo 6 diz respeito a uma análise da principal matéria prima, o trigo, pois as suas características químicas desempenham um papel fundamental na produção de uma maior ou menor quantidade de finos.

No capítulo 7 é descrita a estratégia de abordagem do problema que se pretende resolver. Os dados foram obtidos em cozedoras e num secador de massa. Com eles pretendeu-se otimizar os settings das máquinas através da aplicação de DOEs a factores que apontavam ser os mais representativos.

No capítulo 8 é feito um estudo da capacidade do processo antes e depois da aplicação dos DOEs, escolhidos os factores e os níveis que apontaram ser os mais representativos na diminuição da quantidade de finos produzida ao longo da linha de processamento.

Finalmente, no capítulo 9 é feito um resumo dos resultados obtidos, das aprendizagens e competências adquiridas, e ainda são apresentadas algumas ideias para trabalhos que poderão ser desenvolvidos para complementar esta dissertação.

2. Evolução do controlo de qualidade nas indústrias alimentares

2.1 A importância da qualidade global nas indústrias de produção de géneros alimentícios

As empresas, seja qual for o seu ramo de actividade, têm como principal objectivo produzir bens e serviços ao mais baixo preço. A gestão da produção envolve um complexo sistema de procedimentos e tecnologias, que tem como aspectos fulcrais os 5P's: as Pessoas, as "Plant" (instalações fabris), as "Parts" (componentes), os Processos e o Planeamento (Pereira e Requeijo, 2008).

Factores competitivos como fazer as "coisas" bem, rapidamente, a tempo, barato e mudar rapidamente o que se faz, são estratégias operacionais fundamentais para a sobrevivência das empresas em mercados cada vez mais globais. No entanto, a coexistência destes objectivos dentro de uma empresa não é fácil.

O conceito de *Right First Time* (Fazer Bem à Primeira) reforçou a importância de conceber e desenvolver adequadamente os produtos e de prevenir a ocorrência de defeitos em detrimento da sua detecção no produto final. A qualidade é definida pelo cliente. O cliente quer produtos e serviços que, ao longo da sua existência, conseguem ir ao encontro das suas necessidades e expectativas, mediante um custo que representa valor (Gomes, Figueiredo e Figueiredo, 2014, Gomes e Figueiredo, 2020).

A qualidade total diz respeito ao conjunto de princípios e métodos organizados numa estratégia global visando mobilizar toda a empresa para obter maior satisfação do cliente ao menor custo. O controlo integral da qualidade exige: vontade, envolvimento, exemplo da direcção, adesão de todo o pessoal, actividades de prevenção, avaliação da qualidade e os cinco zeros olímpicos (zero defeitos, zero stocks, zero avarias, zero atrasos e zero papeis) (Gaudreau et al., 2021).

Este controlo tem de ocorrer na concepção do produto, na sua fabricação e na sua distribuição.

2.2 Os custos da qualidade

O custo da qualidade é na realidade o custo da má qualidade. Este é a diferença entre o custo actual do produto e o custo (inferior) que ele teria se não existissem produtos defeituosos, falhas em produtos e defeitos na sua manufactura (Laverne, 2022). As empresas têm de investir fortemente no decréscimo destes custos de forma a conseguirem vingar num mundo fortemente competitivo e global.

A figura 2.1 apresenta os custos sob a forma de um *iceberg*, que pretende dar uma real perspectiva da dimensão dos custos escondidos relativamente aos custos que facilmente são identificados por uma breve análise dos processos de fabrico.



Figura 2.1 – Representação esquemática dos custos da qualidade, visíveis e escondidos, sob a forma de um *iceberg*, com o intuito do leitor ter uma real percepção das suas dimensões (imagem retirada da internet no dia 16/02/2022, site: https://www.google.co.uk/search?q=custos+da+n%C3%A3o+qualidade&safe=strict&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjqh_zpjKvdAhUKBsAKHU0DD_AQ_AUICigB&biw=1366&bih=651#imgsrc=rzSn5zmBbSBdcM:).

Custo da não qualidade é todo o investimento empregado em atividades para garantir que os produtos saiam dentro das especificações pré-estabelecidas. Vale apenas salientar que os custos com os produtos “conformes” não entram nesta classificação, limitando essa especificação aos custos da produção, identificação, restauração e reparo das causas dos defeitos.

Os custos da qualidade têm a seguinte classificação (Juran, 1999):

Custos de Prevenção: são todos os custos incorridos na precaução das não conformidades. Aqui encontram-se incluídos os custos com a manutenção preventiva, treino dos colaboradores e compra ou remodelação de máquinas e equipamentos para minimizar as possibilidades de falhas. Os custos de prevenção são na realidade os custos de obtenção de produtos com a qualidade que se pretende.

Custos de Avaliação: são todos os custos incorridos na fase de controlo de qualidade. Como exemplos destes custos temos os custos com a inspeção das matérias-primas, com os ensaios laboratoriais, os custos de manutenção dos equipamentos, os custos relacionados com os colaboradores necessários para efectuar o controlo de qualidade, entre outros.

Custos de Falhas Internas: são os custos incorridos com os produtos não conformes que foram detectados durante as diversas etapas do processo de controlo de qualidade. Neste caso temos como exemplo os custos relacionados com tempo desperdiçado com re-trabalho dos géneros alimentícios produzidos (por ex. colocados em caixas com códigos errados, em pacotes que não estão devidamente fechados, colocados em caixas erradas, entre muitos outros); custos incorridos devido à completa destruição de produtos manufacturados, devido ao facto de, por exemplo estarem fora das especificações exigidas pelo Documento de Manufatura (como por exemplo terem o teor de sal ou açúcar acima ou abaixo dos seus limites exigidos), ou terem sido detectados corpos estranhos pelos detectores de metais ou raios-x (ex: metal das máquinas)

Custos de Falhas Externas: são os custos incorridos com os produtos não conformes que já tenham sido entregues aos consumidores finais. Estes custos estão relacionados com os mecanismos de recolha de produtos defeituosos que já se encontram distribuídos no mercado, custos com as perdas de negócios decorrentes da falta de credibilidade gerada, multas cobradas pelos órgãos fiscalizadores, análise de reclamações e ainda os custos relacionados com a perda da boa imagem da empresa.

A figura 2.2 ilustra um resumo dos custos da qualidade (Juran, 1999).

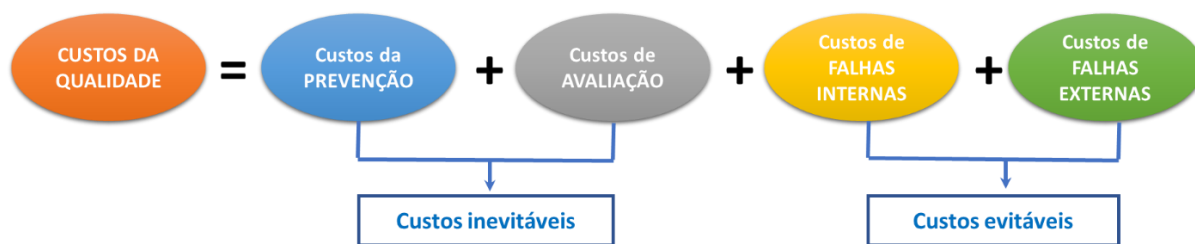


Figura 2.2 – Custos associados à manufactura de um género alimentício.

Os denominados custos de prevenção e de avaliação são os "custos inevitáveis", enquanto que os custos de falhas (internas e externas) são custos "custos evitáveis". Tendo em vista que estes últimos podem ser drasticamente reduzidos ao investir na melhoria da qualidade, Juran (1999) considerava-os como sendo o "ouro da mina", ou seja, um caminho com grande potencial para se reduzir os custos de produção.

Deste modo, é crucial para as empresas, a quantificação e análise das categorias de custos especificamente associados a investimentos e perdas no processo de obtenção da qualidade, e sobretudo inventariar todos os custos da falta de qualidade, de forma a focar os seus esforços no aumento da sua eficiência (Mausa, 2022).

2.2.1 O ponto óptimo da qualidade

A determinação do ponto óptimo da qualidade de um género alimentício manufacturado tem de ter em conta as especificações do produto, bem como as expectativas dos consumidores e a imagem de marca no mercado de determinada empresa.

A figura 2.3 apresenta uma análise de custos da qualidade associados à manufatura de qualquer género alimentício e a determinação do seu ponto óptimo.

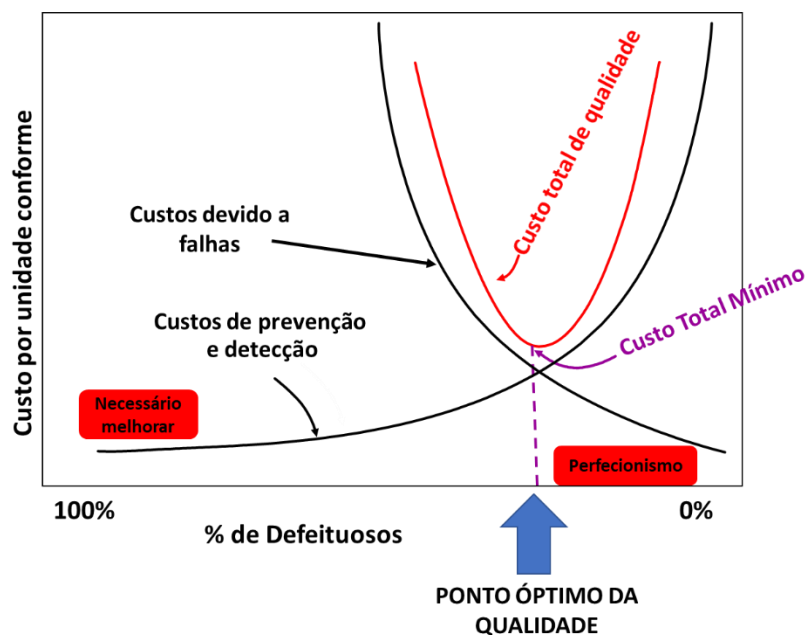


Figura 2.3 – Representação esquemática do ponto óptimo de qualidade, apresentando a tendência dos custos de qualidade relacionados com o decréscimo de produção de géneros alimentícios defeituosos.

A curva do custo total da qualidade apresenta três regiões distintas (Gaudreau, 2021):

- Uma zona de melhoria, com elevados custos devido à manufatura de produtos defeituosos;
- Uma zona de operação;
- Uma zona de perfeccionismo, onde a qualidade excede em muito as expectativas dos consumidores e o valor adquirido pelo produto devido a esse facto não compensa os custos dessa elevada qualidade.

2.2.2 Indicadores de qualidade

As empresas fazem análises sistemáticas do seu desempenho e utilizam *Key Performance Indicators* (KPI) ou Indicadores Chave de Performance, que lhes permite analisar tendências de qualidade ao longo do tempo e num determinado espaço de tempo.

Os KPIs mais utilizados para controlo da qualidade em empresas que manufacturam géneros alimentícios podem ser os seguintes (Meusa, 2022):

- Número de paletes não conformes produzidas;
- Custo de produto não conforme produzido;
- Número de reclamações dos consumidores;

- Tipo de reclamações dos consumidores.

Estes KPIs podem ser semanais, mensais, trimestrais, semestrais ou anuais. Todos eles são criteriosamente estudados e se algum destes se encontra fora dos limites previamente estabelecidos, são iniciados planos de acção que permitam que um determinado indicador que se encontra fora de controlo volte a ficar sob controlo.

2.3 A filosofia de Gestão pela Qualidade Total

A indústria japonesa desenvolveu a metodologia da Gestão pela Qualidade Total, ou TQM – *Total Quality Management*, que orienta todas as áreas a focar na qualidade, investindo recursos para prevenir falhas, reduzindo o mais possível os custos da não qualidade, conseguindo, assim, melhorar a sua imagem perante o mercado mundial. Desta forma garantiu a confiabilidade dos seus produtos e serviços e alavancou as suas vendas exponencialmente, perpetuando a marca e a metodologia como referência em eficiência.

Segundo Dale *et al.* (2007), a filosofia de Gestão pela Qualidade Total ou GQT é a cooperação mútua de todos numa organização e está associado aos processos da empresa que visam produzir produtos e serviços de valor agregado, que satisfaçam e excedam as necessidades e expectativas dos clientes. A GQT é uma prática que cada vez mais faz evoluir um determinado negócio, ao desenvolver métodos e processos que não possam ser imitados pelos concorrentes (Mainardes, 2009).

Em processos industriais, o processo vem primeiro (Gomes, Figueiredo e Figueiredo, 2014; Gomes, e Figueiredo, 2020). A Qualidade é inserida nos produtos através dos processos que fornecem condições necessárias para as transformações como seja a separação e purificação de matérias-primas que dão origem ao produto final. Para produzir o produto perfeito, é necessário conhecer as condições do processo de manufatura (por exemplo, temperatura, pressão, tempo de cozedura, etc) para determinadas quantidades, propriedades e composições das matérias-primas. Tendo em vista este objectivo, as condições operativas dos equipamentos devem ser instaladas e mantidas de forma que funcionem em condições ótimas e produzam productos finais sem qualquer defeito (Suzyki, 1994, Figueiredo e Gomes, 2003).

Para que uma empresa adopte os princípios filosóficos da GQT existem vários princípios que têm de ser seguidos:

- Envolvimento da gestão de topo da empresa, de forma a fomentar uma cultura da Qualidade focada nos clientes, quer internos, quer externos;
- Atitude de melhoria contínua ao longo de toda a cadeia de valor;
- Comunicação aberta e directa entre todos os níveis dentro da empresa;
- Descentralização do poder de forma a que pequenas equipas multidisciplinares possam rapidamente focar-se e contribuir para a eliminação de defeitos e, conseqüentemente, melhoria contínua;
- Boa gestão de recursos humanos e sua permanente formação;

- Prevenção deve ser palavra de ordem, passando pelo desenvolvimento do produto e sua produção em processos robustos com o mínimo de variabilidade;
- Utilização de técnicas e metodologias adequadas para identificar e satisfazer as expectativas de todas as partes interessadas;
- Estratégias *win – win* devem de ser desenvolvidas com fornecedores e outras entidades externas à empresa, que devem de ser entendidos como parceiros, de forma a criar relações estáveis, duradouras e de forte confiança entre as partes, de forma a potenciar as mais valias de cada uma e aumentar os seus níveis de desempenho (Pereira e Requeijo, 2008).

2.4 Modelos de melhoria contínua

A melhoria contínua das actividades é um dos principais focus da GQT, com o objectivo da completa satisfação de todas as partes interessadas. O ciclo PDCA proposto por E. Deming é uma das metodologias mais conhecidas que permite a concretização dos objectivos pré-definidos de uma forma consistente e gradual.

O ciclo PDCA (figura 2.4) é uma ferramenta da Qualidade utilizada no controlo de processos, que tem como foco a solução de problemas. A sua aplicação consiste em quatro fases:

- P (*plan*: planear): seleção de um processo, atividade ou máquina que necessite de melhoria e elaboração de medidas claras e executáveis, sempre voltadas para obtenção dos resultados esperados;
- D (*do*: fazer): implementação do plano elaborado e acompanhamento de seu progresso;
- C (*check*: verificar): análise dos resultados obtidos com a execução do plano e, se necessário, reavaliação do plano;
- A (*act*: agir): caso tenha obtido sucesso, o novo processo é documentado e se transforma num novo padrão.

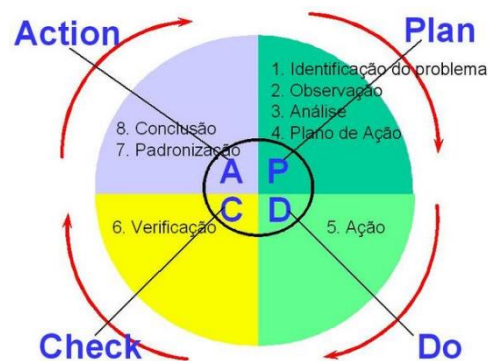


Figura 2.4 – Representação esquemática do Ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act).

A metodologia PDCA evoluiu para o modelo Seis Sigma (figura 2.5). O Seis Sigma tem por objetivo a melhoria na gestão através de uma metodologia voltada para o entendimento e a eliminação dos pontos negativos nos processos e operações, viabilizando a melhoria contínua e crescimento do lucro

nas empresas, assim como qualidade de seus produtos e serviços (Munro et al. 2015, Figueiredo e Gomes, 2003).

A metodologia nasceu na *Motorola* na década de 80 (1987), e o método utilizado para solucionar problemas baseia-se em ferramentas estatísticas para o controle de processos, onde o ciclo passa por uma abordagem denominada *DMAIC* (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control* – em português: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), que visa reduzir a variação e os riscos nos referidos processos, procurando atingir um índice de falhas de 3,4 ocorrências por milhão de oportunidades (DPMO – defects per million of opportunities) (MacCarty, 2005).



Figura 2.5 – Representação esquemática da metodologia DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Controle).

Neste sentido, a metodologia Seis Sigma não pretende criar uma mudança na integridade na interligação da gestão organizacional, mas a sua melhoria contínua e o controle eficiente para eliminar ou amenizar ao máximo qualquer vulnerabilidade no Planejamento de produtos e serviços, garantindo a qualidade e satisfação dos clientes e parceiros, bem como, performance nos processos e modelos operacionais existentes.

De entre as várias técnicas estatísticas aplicáveis no planejamento, controle e melhoria contínua da qualidade, salientam-se a aplicação de Séries Temporais e o Planejamento de Experiências (DOE – Design Of Experiments), os métodos de Taguchi, o controle estatístico do processo, entre outras. Esta dissertação vai abordar sobretudo o Planejamento de Experiências.

3. Metodologia de aplicação de Planeamento de Experiências a dados provenientes da indústria alimentar

3.1 Aplicações do Planeamento de Experiências

O Planeamento de Experiências (DOE, do inglês, *Design of Experiments*), tem uma vasta aplicação em diversas áreas de actividade. Normalmente, observamos uma série de actividades de onde retiramos conjecturas acerca de um processo, efectuamos experiências e colhemos dados que serão usados para elaborar novas conjecturas de onde resultarão novas experiências, e assim por diante.

O Planeamento de Experiências é uma ferramenta que evita este processo moroso. Esta pode ser usada no desenho e desenvolvimento de novos produtos para manufactura, bem como na gestão de produtos. A aplicação desta técnica nos estádios iniciais de desenvolvimento de novos produtos conduz a melhoria nas taxas de processamento, redução da variabilidade, bem como maior proximidade entre as especificações do produto e aquelas que as fábricas conseguem atingir, redução do tempo de desenvolvimento do produto, redução dos custos totais de desenvolvimento e manufactura de um produto (Figueiredo e Gomes, 2003; Montgomery, 2013; Ruicheng *et al*, 2015).

As técnicas de DOE são também importantes nas fábricas de manufactura de, por ex., productos alimentares, ao nível da avaliação de novos desenhos de equipamentos, avaliação de matérias-primas alternativas e consequências na qualidade final dos produtos manufacturados (Kranz *et al*, 2015), bem como na selecção de diversos parâmetros nas máquinas que permitam a elaboração de alimentos robustos (Nouri e Mostafapour, 2016). A DOE permite ainda determinar quais são os parâmetros fundamentais que produzem o maior impacto na elaboração de um determinado produto e actuar nestes de forma a conseguir produzi-lo com a melhor performance (Bergquist, 2015, Allen, 2020).

A utilização do DOE na manufactura de alimentos conduz a produtos mais fáceis de manufacturar, com acrescida performance e confiabilidade, com mais baixos custos de manufactura, onde ao longo do seu processo de desenvolvimento houve uma redução no tempo de planeamento e desenvolvimento.

O DOE tem também aplicações na logística (Chackelsona *et al.*, 2013, Allen, 2020) e marketing dos produtos (Huertas-Garcia, 2009). Em resumo, o DOE tem vantagens ao longo de todo o processo de design, desenvolvimento, manufactura, expedição e venda dos produtos alimentares (Figueiredo e Gomes, 2003, Montgomery, 2013, Allen, 2020).

3.2 Fundamentos do Planeamento de Experiências

O Planeamento de Experiências tem como base uma boa organização do tipo e forma como um determinado número de experiências vai ser conduzido. Este tem de obedecer a vários requisitos:

- os objectivos que se pretendem atingir devem de estar perfeitamente definidos;
- a medição que se vai efectuar tem de ser simples e rigorosa;
- os custos do estudo devem ser os menores possíveis;

- O período de tempo que vai decorrer as experiências deve ser razoável de forma a que os resultados possam ter impacto (Oliveira, 2004).

O DOE deve de seguir três princípios básicos, de forma a conseguir-se os melhores resultados possíveis: uso de réplicas ou repetições, agrupamentos convenientes e ainda, casualização ou aleatorização das amostras envolvidas no estudo (Oliveira, 2004).

No entanto, a nível industrial, é muito difícil efectuar réplicas, pois os industriais vêm as réplicas apenas como uma perda de tempo, não entendendo as vantagens que o conhecimento das variações entre amostras podem trazer para o benefício de um bom DOE.

A 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 (Alberto, 2013; Oliveira 2004).

A aleatoriedade é uma técnica do DOE 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 DOE 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 (Alberto, 2013; Oliveira 2004, Elser, 2017).

A partição em blocos é uma técnica muito importante e 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 (Alberto, 2013; Oliveira 2004, Lawson, 2015).

Após as análises terem sido efectuadas seguindo o esquema da Figura 3.1, é importante utilizar-se a análise de variância para análise dos resultados obtidos. Existe no mercado diverso software estatístico, como por exemplo o Minitab, R, Matlab, Statistica, SAS, que permitem a análise dos dados obtidos de uma forma simples, incluindo alguns, a análise dos resultados gerada pelo próprio programa.

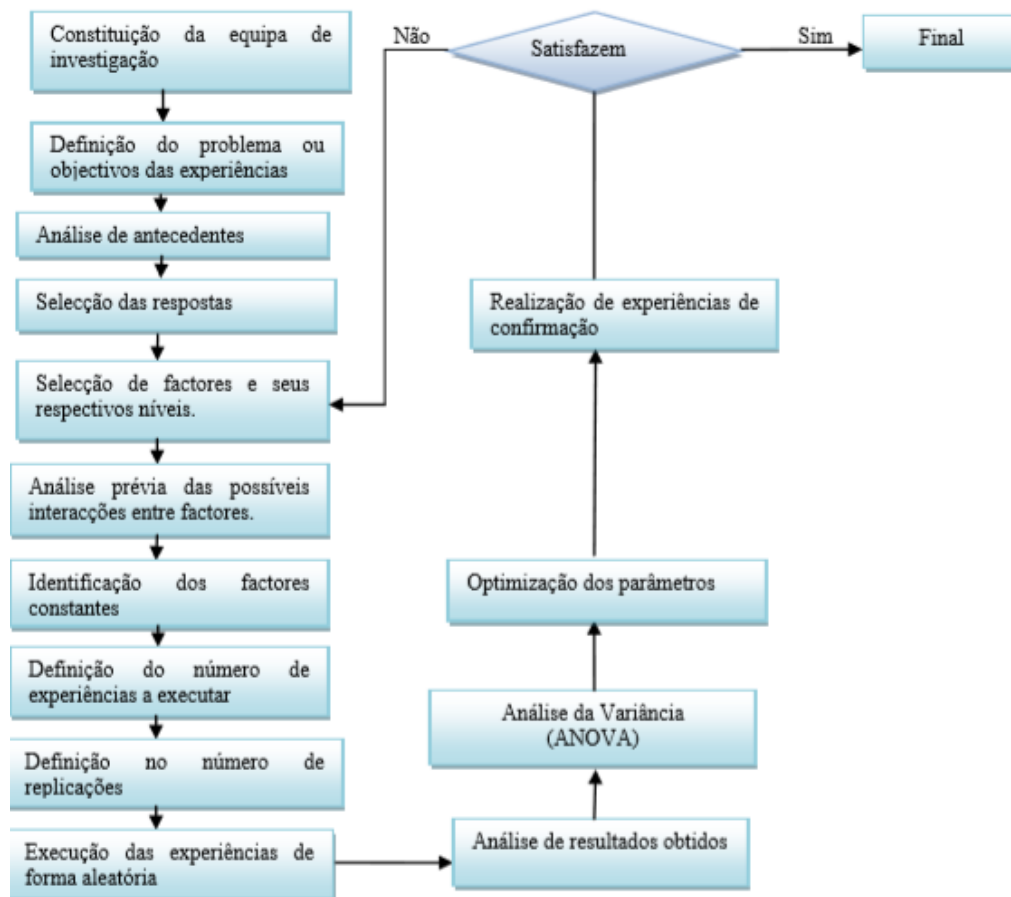


Figura 3.1 – Abordagem sistemática para aplicação de DOE (Alberto, 2013, Pereira e Requeijo, 2008).

Em contexto empresarial temos de ter em atenção três pontos fundamentais (Pereira e Requeijo, 2008). Em primeiro lugar pode-se recorrer à tentação de utilizar resultados obtidos em experiências anteriormente efectuadas e que são “semelhantes” às que se pretendem agora fazer. Isso não é de todo correcto. A variabilidade das máquinas será diferente, devido ao período de tempo que decorreu ou devido a intervenções das equipas de manutenção, que certamente alteraram a afinação das mesmas, conduzindo a respostas com maior ou menor variabilidade (erro) (Johnson, 2012; Anderson e Whitcomb, 2015). A forma com se obtiveram os resultados também é crítica para que os resultados sejam válidos. Este facto é muito descurado pelas empresas, que na maioria das vezes colocam pessoas a obter os resultados sem a mínima formação ou competência para o lugar e que acham que um investigador é demasiado “caro” para estar numa linha de produção a colher dados rotineiros.

Em segundo lugar, experiências bem sucedidas são aquelas que provêm de DOE simples. Quando mais se complica, maior será a probabilidade de se aumentar os erros. Planeamentos simples, bem planeados e bem executados são aqueles que irão dar melhores resultados.

Finalmente, é também importante salientar que apenas raramente se conseguem obter resultados definitivos apenas com um DOE. Normalmente tem de se aperfeiçoar o DOE com o conhecimento obtido de prévios DOE. Os factores usados previamente serão descartados, caso se

verifique que não são os mais adequados no sentido da resposta que se pretende obter, ou serão alterados os seus níveis.

3.3 Conceitos do Planeamento de Experiências

Para se iniciar a prática do DOE existem conceitos fundamentais que é necessário clarificar.

Entende-se por experiência ou ensaio, um teste no qual se efectuam, propositadamente, alterações de certas variáveis ou parâmetros de processo (os factores) para observar as mudanças que ocorrem em uma ou mais características da unidade experimental e identificar as respectivas causas, designa-se por unidade experimental a entidade na qual são feitas as medições de uma ou mais características (Pereira e Requeijo, 2008).

Os factores podem ser controláveis ou não. Os factores ou tratamentos são as variáveis de controlo ou entrada, e podem ser alterados pelo investigador com o objectivo de determinar o efeito numa ou mais respostas. Os níveis ou tratamentos, correspondem às faixas de valores das variáveis de controlo, os factores, podendo ser quantitativos ou qualitativos. A variável resposta é o parâmetro de saída, resultante de uma variação nas variáveis de entrada, ou seja, é a característica da qualidade que se pretende estudar (Montgomery, 2009).

O DOE pode envolver um ou mais factores experimentais. Neste caso estamos a considerar combinação de tratamentos ou de níveis. Pode também acontecer que os investigadores não estejam interessados ou não consigam separar alguns factores que interferem no desenvolvimento experimental. Neste caso estaremos em presença de blocos, e estes deverão ser homogéneos ao longo do estudo (Lawson, 2015).

Erro em DOE tem diversos sentidos. Em qualquer situação experimental, erro pode representar erros na experimentação, erros na medição, variação nos materiais ou nos factores em geral, ou efeito de factores de ruído na resposta, entre outros. O erro experimental é a variabilidade que é observada quando uma combinação de tratamentos é repetida, ou seja, replicada (Elser, 2017).

Os factores de ruído, habitualmente não controláveis pelo experimentador, como por exemplo diferentes lotes de matérias-primas utilizadas ao longo do processo de estudo, existirão muitas vezes ao longo da manufactura de um produto.

3.4 O Planeamento de Experiências na qualidade de processos

Com o aumento de empresas de produção de géneros alimentícios num mercado cada vez mais global e exigente, os seus desafios passam pela necessidade de assegurarem uma redução na variabilidade dos seus produtos e processos, não apenas para assegurarem a consistência dos seus produtos, mas também para reduzirem os seus custos. No entanto, o controlo e redução da variabilidade são muito difíceis de se atingir. Como tal, é muito importante determinar quais os factores que interferem na variabilidade e na dispersão dos valores de resposta (Xirui, 2016; Montgomery, 2017).

O sucesso das empresas consiste em identificar quais os requisitos dos clientes e concretizar estes requisitos na produção de géneros alimentícios de elevada qualidade ao mais baixo custo. A fase de planeamento e desenvolvimento de novos produtos é muito importante pois aqui vai ser decidido quais as especificações do produto, as matérias-primas a ser utilizadas, o tipo de processamento, etc que terão enorme impacto na qualidade e custos do produto a ser posteriormente manufacturado em grande escala (Anderson *et al.*, 2018). O Fazer-Bem-à-Primeira, filosofia inerente à GQT, reforça que é na fase de planeamento e desenvolvimento do produto que se deve edificar a qualidade, evitando graves problemas e elevados custos, posteriormente na produção.

Actualmente, o desenvolvimento de novos produtos passa muito mais por modificações dos produtos já existentes, Isto significa, que já foram adquiridos importantes conhecimentos acerca dos factores que mais influenciam a qualidade e desempenho do produto nas linhas de processamento. Neste contexto, o DOE permite um aumento de conhecimentos de uma forma sistematizada que tem um forte contributo para a melhoria contínua dos produtos, permitindo surpreender os clientes e atingir uma competitividade sustentada (Montgomery, 2017, Elser, 2017).

Outra consequência do aumento de competitividade é a melhor gestão do tempo a que as empresas se vêem cada vez mais obrigadas. Fornecer produtos que vão de encontro com as expectativas dos clientes e que, de preferência as superem, implica elevada flexibilidade. O factor tempo desempenha um papel crucial na flexibilidade (Hron, 2013; Santana-Viera, 2015). O DOE também aqui tem um papel determinante. Muitas vezes são realizadas experiências sem qualquer base científica que consomem demasiado tempo e que não resultam em dados válidos. Deste modo, existe a necessidade premente de fazer experiências com base científica, de forma a consumir o menor espaço de tempo possível. O impacto positivo na flexibilidade e na resposta rápida por parte da manufactura irá proporcionar a disponibilidade de produtos aos possíveis clientes e será um factor de competitividade bastante forte relativamente a possíveis competidores que jogam nos mesmo mercados (Allen, 2020).

Actualmente existem variados tipos de DOE. No entanto, a sua aplicação prática nas empresas ainda é muito reduzida. Isto deve-se sobretudo à falta de preparação técnica dos possíveis envolvidos, falta de conhecimentos dos produtos e dos processos, e, sobretudo, pela falta de disponibilidade de recursos que devem de ser dados pela gestão de topo.

De uma forma muito sistemática, é apresentado na Tabela 3.1, alguns tipos de DOE, a sua possível aplicação, a sua estrutura e ainda, quais as informações que podem ser obtidas de dado tipo de DOE. Esta informação foi extraída do portal do Instituto de Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Fonte consultada a 16/01/2022:

<http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/content/view/full/9417>

Tabela 3.1 – Classificação dos diversos tipos de Planeamento de Experiências, sua aplicação, a sua estrutura e tipo de informações obtidas.

Classificação do DOE	Aplicação	Estrutura	Informações obtidas
Completamente aleatorizado com um único fator	Apropriado quando apenas um fator experimental está a ser estudado	O efeito do fator é estudado por meio da alocação ao conjunto das unidades experimentais aos tratamentos (níveis do fator). Os ensaios são realizados em ordem aleatória.	Estimativa e comparações dos efeitos dos tratamentos Estimativas da variância
Factorial	Apropriado quando vários fatores devem ser estudados em dois ou mais níveis e as interações entre os fatores podem ser importantes	Em cada repetição completa da experiência todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (tratamentos) são estudadas. A alocação das unidades experimentais aos tratamentos e a ordem de realização dos ensaios são feitas de modo aleatório.	Estimativas e comparações dos efeitos dos fatores Estimativa dos possíveis efeitos de interações Estimativa da variância
Factorial 2^k em blocos	Apropriado quando o número de ensaios necessários para o planeamento em k fatores em 2 níveis é muito grande para que sejam realizados sob condições homogéneas	O conjunto completo de tratamentos é dividido em subconjuntos de modo que as interações de ordem mais alta são confundidas com os blocos. São feitas observações em todos os blocos. Os blocos surgem geralmente como consequência de restrições de tempo, homogeneidade de materiais, etc.	Fornecer as mesmas estimativas do planeamento factorial, excepto algumas interações de ordem mais alta que não podem ser estimadas porque estão confundidas com os blocos.
Factorial fracionário 2^k	Apropriado quando existem muitos fatores (k muito grande) e não é possível recolher observações em todos os tratamentos	Vários fatores são estudados em dois níveis, mas somente um subconjunto do factorial completo é executado. A formação dos blocos algumas vezes é possível.	Estimativas e comparações dos efeitos de vários fatores Estimativa de certos efeitos de re-interação (alguns efeitos podem não ser estimáveis) Certos planeamentos factoriais fracionários (quando k é pequeno) não fornecem informações suficientes para estimar a variância
Blocos aleatorizados	Apropriado quando o efeito de um fator está sendo estudado e é necessário controlar a variabilidade provocada por fatores perturbadores conhecidos. Estes	São recolhidas observações correspondentes a todos os tratamentos (níveis do fator) em cada bloco. Usualmente os blocos são considerados em relação a um único fator perturbador.	Estimativas e comparações dos efeitos dos tratamentos livres dos efeitos do bloco Estimativas dos efeitos do bloco Estimativa da variância

	fatores perturbadores (material, tempo, pessoas, etc.) são divididos em blocos ou grupos homogêneos		
Blocos Incompletos Balanceados	Apropriado quando todos os tratamentos não podem ser acomodados num bloco	Os tratamentos testados em cada bloco são selecionados de forma balanceada: dois tratamentos quaisquer aparecem juntos num mesmo bloco o mesmo número de vezes que qualquer outro par de tratamentos	Idêntico ao planejamento em blocos aleatorizados. Os efeitos de todos os tratamentos são estimados com igual precisão
Blocos Incompletos Parcialmente Balanceados	Apropriado quando um planejamento em blocos incompletos balanceados necessita de um número de blocos excessivamente grandes	Alguns pares de tratamentos aparecem juntos n1 vezes, outros pares aparecem juntos n2 vezes,..., e os pares restantes aparecem juntos m vezes.	Idêntico ao planejamento em blocos aleatorizados, mas os efeitos dos tratamentos são estimados com diferentes precisões
Quadrados Latinos	Apropriado quando um fator de interesse está sendo estudado e os resultados podem ser afetados por duas outras variáveis experimentais ou por duas fontes de heterogeneidade. É suposta a ausência de interações	O quadrado latino é um arranjo para permitir dois grupos de restrições de bloco. Os tratamentos são distribuídos em correspondência às colunas e linhas de um quadrado. Cada tratamento aparece uma vez em cada linha e uma vez em cada coluna. O número de tratamentos deve ser igual ao número de linhas e colunas do quadrado. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras, as quais correspondem às colunas e linhas do quadrado.	Estimativas e comparações dos efeitos dos tratamentos livres dos efeitos das duas variáveis bloco. Estimativas e comparações dos efeitos das duas variáveis de bloco Estimativa da variância
Quadrados de Youden	Similares aos quadrados latinos, mas o número de linhas, colunas e tratamentos não precisam ser iguais	Cada tratamento ocorre uma vez em cada linha. O número de tratamentos deve ser igual ao número de colunas. Os blocos são formados em relação a duas variáveis perturbadoras	Idêntico ao planejamento em quadrados latinos
Hierárquico	Experiências com vários fatores em que os níveis de um fator (B) são similares mas não idênticos para diferentes níveis de outro fator (A). Ou seja, o j-ésimo nível de B quando A está no nível	Os níveis do fator B estão aninhados abaixo dos níveis do fator A	Estimativas e comparações dos efeitos dos fatores Estimativa da variância

	1 é deferente do j-ésimo nível de B quando A está no nível 2 e assim por diante		
Superfície de resposta	O objetivo consiste em fornecer mapas empíricos ou gráficos de contorno. Estes mapas ilustram a forma pela qual os fatores, que podem ser controlados pelo pesquisador, influenciam a variável resposta	Os níveis dos fatores são vistos como pontos no espaço de fatores (muitas vezes multidimensional) no qual a resposta será registada	Mapas que ilustram a natureza e a forma da superfície de resposta

Este trabalho irá abordar a aplicação de um planeamento factorial completo com três factores e dois níveis. Como tal, será este tipo de planeamento que irá ser desenvolvido nos pontos seguintes.

3.5 O Planeamento factorial completo com três factores e dois níveis

O planeamento factorial completo com três factores e dois níveis foi o DOE utilizado ao longo desta dissertação e será apenas esta técnica estatística que irá ser detalhadamente explicada neste capítulo.

O planeamento factorial completo é utilizado em situações onde existe interesse em determinar:

- as diferenças entre os níveis dos diversos factores em estudo;
- se existe uma diferença estatisticamente significativa da interacção entre os fatores.

Um planeamento factorial que contenha diversos factores e cada um deles tenha dois níveis é designado por planeamento factorial 2^k (Montgomery, 2013), onde dois representa 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, de forma a poder determinar e interpretar os efeitos principais e de interacção dos factores investigados, e assim poder identificar quais as melhores condições experimentais do producto ou processo de fabrico (Simpson *et al.*, 2013).

O planeamento factorial completo com três factores (x_1 , x_2 e x_3) e dois níveis a testar (-1, +1), é genericamente denominado de 2^3 . A matriz de planeamento de experiências para este caso encontra-se apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Matriz de planeamento de experiências para o caso de um planeamento factorial 2^3 (adaptado de Montgomery, 2013; Borror, 2008).

ID Teste	Factores de controlo			Ordem do teste	Reposta
	x_1	x_2	x_3		
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

Na matriz de planeamento, as colunas representam os factores a investigar (x_1, x_2, \dots, x_k) e as linhas representam os diferentes níveis ou combinações de factores, sendo -1 o mínimo, e $+1$ o máximo.

A interpretação desta tabela é a seguinte:

- ID Teste é o número de identificação do teste;
- Relativamente aos factores de controlo:
 - I. Para o factor x_1 , a coluna será definida pela combinação dos níveis $-1, +1, -1, +1, -1, +1, -1, +1$;
 - II. Para o factor x_2 , a coluna será definida pela combinação dos níveis $-1, -1, +1, +1, -1, -1, +1, +1$;
 - III. Para o factor x_3 , a coluna será definida pela combinação dos níveis $-1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1$.

Deste modo, os contrastes para o caso do factorial 2^3 poderá ser matematicamente descrito da seguinte forma (Adaptação de Pereira e Requeijo (2008) e de Borror (2008)):

$$\text{Contraste de } x_1 = -y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8$$

$$\text{Contraste de } x_2 = -y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8$$

$$\text{Contraste de } x_3 = -y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8$$

Esta forma de organização é denominada de ordem padrão, e consegue-se com este arranjo que as colunas da matriz sejam ortogonais entre si. Com este tipo de planeamento é possível determinar os efeitos principais e de interacção que as variáveis independentes produzem nas respostas (Montgomery, 2017, Lawson, 2015).

Segundo Montgomery (2013) e Kubiak e Benbow (2009), o modelo estatístico subjacente ao planeamento de experiências 2^3 é o seguinte:

$$Y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (3.1)$$

Para: $i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b, k = 1, 2, \dots, c, l = 1, 2, \dots, n$

onde:

Y_{ijkl} = resposta dos três factores em dois níveis
 μ = média dos resultados
 τ_i = efeito principal do factor x_1
 β_i = 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} = erro experimental

De seguida, passamos a descrever o método generalizado que pode ser seguido para estimar os efeitos principais e de interacção entre os diferentes factores. Os efeitos principais correspondem à mudança da resposta média quando o nível de um factor é alterado de -1 para $+1$ mantendo os restantes factores constantes.

O procedimento consiste em multiplicar os resultados da coluna y_i pelos valores ± 1 associados à coluna x_i da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se quer estimar (tabela 3.2). Em seguida, os valores obtidos devem de ser somados e divididos pela metade do número de ensaios realizados, conforme é apresentado na equação (3.2):

$$E_i = \frac{\sum y_i * x_i}{n/2} \quad (3.2)$$

Sendo E_i o efeito estimado, n o número total de observações, $\sum y_i * x_i$ é a soma dos resultados (y_i) da experiência multiplicados pela coluna x_i .

Para determinar o efeito de interacção, devem ser construídas primeiro as colunas das interacções da matriz de planeamento. Estas colunas são contruídas através da multiplicação das colunas dos efeitos principais. Por exemplo, para estimar o efeito da interacção E_{12} , serão multiplicadas as colunas dos factores x_1 e x_2 . Em seguida, os valores ± 1 da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito da interacção, conforme descrito na equação (3.2).

Existem outros métodos para o cálculo dos efeitos, como o algoritmo de Yates, mas aqui é explicado o método dos sinais.

Para representar o efeito dos factores de controlo que realmente produzem uma diferença significativa na resposta utilizam-se gráficos lineares e de probabilidade normal. Para representar e interpretar graficamente os efeitos principais e de interacção é necessário definir duas propriedades:

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

A forma gráfica do efeito principal (E_i) é apresentada na Figura 3.2. Este gráfico linear ilustra a variação média das respostas em função da mudança de nível (-1 , $+1$) de um factor (x_i), mantendo os outros constantes (tabela 3.2).

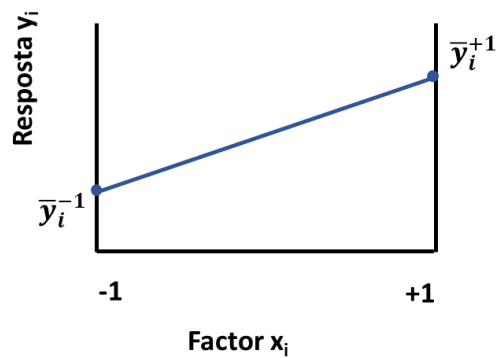
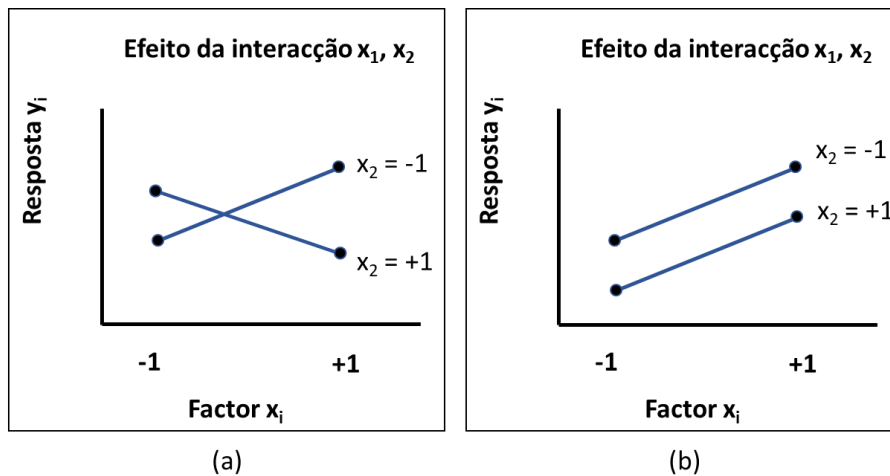


Gráfico 3.1 – Gráfico dos efeitos principais, no caso de um planeamento de experiências 2^k .

Os gráficos dos efeitos da interacção descrevem a variação de um factor em função dos níveis dos outros factores. Por exemplo, a Figura 3.3 (a) ilustra que o efeito provocado pela mudança de nível do factor x_1 na resposta depende do nível do factor x_2 , e portanto, existe interacção entre os factores x_1 e x_2 . A figura 3.3 (b) demonstra que o efeito provocado pela mudança do nível do factor x_1 na resposta é independente do nível do factor x_2 , e portanto não existe interacção entre esses factores.



Gráficos 3.2 (a, b) – Gráficos de efeitos de interacção.

Outro tipo de gráficos que pode ser utilizado no DOE é o de probabilidade Normal. Este tipo de gráficos são utilizados quando não é possível repetir uma experiência num factorial 2^k , sendo importante para obter uma estimativa independente do erro experimental para julgar a importância dos efeitos principais e de interacção. Esse tipo de erros é proveniente de factores incontroláveis que produzem uma variação nas respostas ao realizar os ensaios sob condições pré-estabelecidas.

3.6 Análise de variância

No DOE deve também utilizada a análise de variância ou ANOVA, para aceitar ou rejeitar estatisticamente as hipóteses investigadas.

As hipóteses que devem ser testadas durante o estudo serão as seguintes (Montgomery, 2013):

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem diferenças significativas entre os níveis do factor } x_1)$$

$$H_a: \tau_i \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } i)$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem diferenças significativas entre os níveis do factor } x_2)$$

$$H_a: \beta_j \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } j)$$

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_k \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem diferenças significativas entre os níveis do factor } x_3)$$

$$H_a: \gamma_k \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } k)$$

$$H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ij} \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem interacções significativas entre } x_1 \text{ e } x_2)$$

$$H_a: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } i \text{ ou um } j)$$

$$H_0: (\tau\gamma)_{11} = (\tau\gamma)_{12} = \dots = (\tau\gamma)_{ik} \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem interacções significativas entre } x_1 \text{ e } x_3)$$

$$H_a: (\tau\gamma)_{ik} \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } i \text{ ou um } k)$$

$$H_0: (\beta\gamma)_{11} = (\beta\gamma)_{12} = \dots = (\beta\gamma)_{jk} \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem interacções significativas entre } x_2 \text{ e } x_3)$$

$$H_a: (\beta\gamma)_{jk} \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } j \text{ ou um } k)$$

$$H_0: (\tau\beta\gamma)_{111} = \dots = (\tau\beta\gamma)_{ijk} \\ = 0 \text{ (ou seja, não existem interacções significativas entre } x_1, x_2 \text{ e } x_3)$$

$$H_a: (\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0 \text{ (para, pelo menos um } i, j \text{ ou um } k)$$

A soma dos quadrados, os graus de Liberdade, a média dos quadrados, a estatística de teste e os *p-values* podem ser calculados através de um software estatístico apropriado.

A tabela 3.3 apresenta a ANOVA (Análise de Variância) resultante de um tratamento deste tipo.

Tabela 3.3 – Tabela da análise de variância para um planejamento factorial completo com três factores (A, B e C) assumindo que estes são factores fixos (extraído e adaptado de Montgomery, 2013)

Fonte de variação	df	Soma dos Quadrados	Média dos quadrados	Média dos quadrados esperada	F ₀	Valor - P
A	a - 1	SS _A	MS _A	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a - 1}$	$F_A = \frac{MS_A}{MS_E}$	P (F > F _A)
B	b - 1	SS _B	MS _B	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b - 1}$	$F_B = \frac{MS_B}{MS_E}$	P (F > F _B)
C	c - 1	SS _C	MS _C	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c - 1}$	$F_C = \frac{MS_C}{MS_E}$	P (F > F _C)
AB	(a - 1) (b - 1)	SS _{AB}	MS _{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$	P (F > F _{AB})
AC	(a - 1) (c - 1)	SS _{AC}	MS _{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a - 1)(c - 1)}$	$F_{AC} = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$	P (F > F _{AC})
BC	(b - 1) (c - 1)	SS _{BC}	MS _{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b - 1)(c - 1)}$	$F_{BC} = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$	P (F > F _{BC})
ABC	(a - 1) (b - 1) (c - 1)	SS _{ABC}	MS _{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$F_{ABC} = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$	P (F > F _{ABC})
Erro	abc(n - 1)	SS _E	MS _E	σ^2		
Total	Abc(n - 1)	SS _T				

df = Graus de Liberdade
 SS = Soma dos quadrados

MS = média dos quadrados

F = estatística de teste de F - Senedecor

Valor - p = p - value (Minitab)

O software do Minitab utilizada nesta dissertação efectua todos os cálculos da ANOVA (Cap. 7 desta dissertação). No entanto é importante demonstrar as equações que estão por detrás dos valores apresentados.

A soma dos quadrados dos efeitos é calculada a partir dos totais dos factores A($y_{i...}$), B($y_{j...}$) a C($y_{k...}$) da seguintes forma (denominada também de soma dos quadrados dentro dos grupos ou *between groups*) (Montgomery, 2017; Pereira e Requeijo, 2008, James, 2021):

- Para o factor A:

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

- Para o factor B:

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

- Para o factor C:

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{k...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

O cálculo da soma dos quadrados para a interacção dos factores dois a dois, é determinada segundo as equações seguintes:

- Para a interacção entre os factores AB:

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B = SS_{Subtotals(AB)} - SS_A - SS_B \quad (\text{Eq. 3.6})$$

- Para a interacção entre os factores AC:

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C = SS_{Subtotals(AC)} - SS_A - SS_C \quad (\text{Eq. 3.7})$$

- Para a interacção entre os factores BC:

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_B - SS_C = SS_{Subtotals(BC)} - SS_B - SS_C \quad (\text{Eq. 3.8})$$

- A soma dos quadrados para a interacção dos três factores:

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk...}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} = SS_{Subtotals(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

- A soma total dos quadrados:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

- Finalmente, a soma dos quadrados do erro (soma dos quadrados entre grupos ou *within groups*):

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal(ABC)} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

O passo seguinte passa pela validação dos pressupostos da ANOVA. Este irá ser o assunto a abordar no próximo ponto deste capítulo.

As hipóteses nulas referidas anteriormente serão rejeitadas se $p\text{-value} < \alpha$, onde α traduz o nível de significância utilizado (normalmente opta-se por 5%).

3.6.1 Análise de resíduos

Para a análise de variâncias, ANOVA, seja válida, têm de se verificar vários pressupostos (Munro, 2015, Montgomery, 2017, James, 2021). Os erros ε_{ijkl} (eq. 3.12) têm de ter uma distribuição Normal e distribuídos de forma independente e aleatória, com média zero e variância σ^2 (ou seja, tem de se verificar homocedasticidade – variâncias iguais). As observações y_{ijkl} devem de ter distribuição Normal e serem independentes.

No DOE, a validação dos pressupostos da ANOVA é feita através da análise dos resíduos.

Resíduo pode ser definido para a observação j no tratamento i como:

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Sendo \hat{y}_{ijk} o estimador da correspondente observação y_{ijk}

3.6.1.1 O pressuposto de normalidade

A verificação do pressuposto de normalidade pode ser feita através de um histograma de resíduos, verificando se a forma de sino típica da distribuição Normal existe (gráfico 3.3), ou através de um gráfico de probabilidades de distribuição Normal. No primeiro caso poderá ser difícil no caso em amostras de pequena dimensão. O segundo caso é o mais simples e fiável. Se os resíduos tiverem uma distribuição Normal, o gráfico apresentará a sua disposição sob a forma de uma linha recta. A título de exemplo é apresentado o gráfico 3.4.

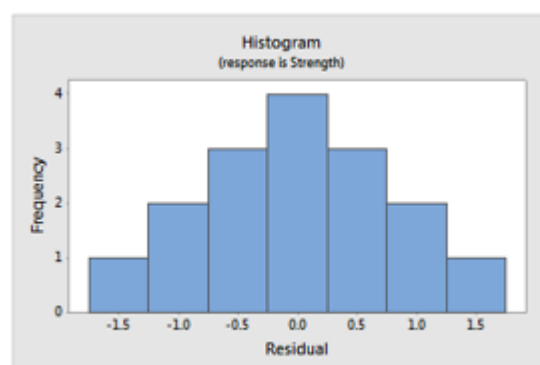


Gráfico 3.3 – Exemplo de distribuição de resíduos sob a forma de um histograma.

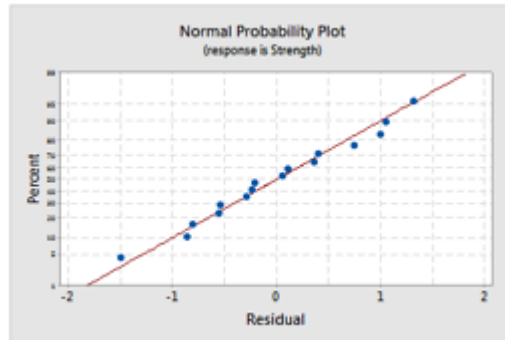


Gráfico 3.4 – Ilustração de um exemplo de um gráfico de probabilidades com distribuição Normal.

No exemplo acima apresentado podemos inferir que a análise de variância é robusta perante o pressuposto de Normalidade.

Este tipo de análise é também muito útil para detectar outliers, ou seja, valores completamente diferentes da maioria. A sua presença pode afectar fortemente a análise de variância (James, 2021).

3.6.1.2 O pressuposto de independência

Um DOE efectuado de forma aleatória é importante pois irá contribuir para o pressuposto de independência que tem de se verificar na análise de variância. Uma análise que pode ajudar a detectar possíveis correlações é colocar todos os dados dos resíduos por ordem das experiências efectuadas e verificar se os resíduos se dispõem de forma aleatória, sem qualquer tendência visível. O gráfico 3.5 exemplifica este tipo de análise.

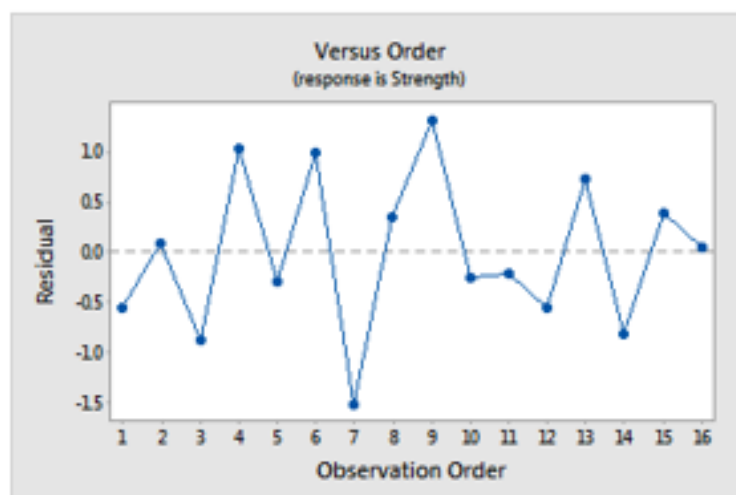


Gráfico 3.5 - Resíduos versus sequência das experiências

Os resíduos devem situar-se acima e abaixo da linha central de forma aleatória. Resíduos apresentando tendências ascendente ou descendente é indicativo de correlação entre os resíduos e violação deste pressuposto (James, 2021).

3.6.1.3 Análise dos resíduos versus valores estimados

Para o modelo estar correcto e os pressupostos satisfeitos, os resíduos não podem apresentar qualquer tendência em particular, e não podem apresentar qualquer tendência com a resposta estimada \hat{y}_{ijk} . O gráfico 3.6 apresenta os resíduos *versus* os valores estimados.

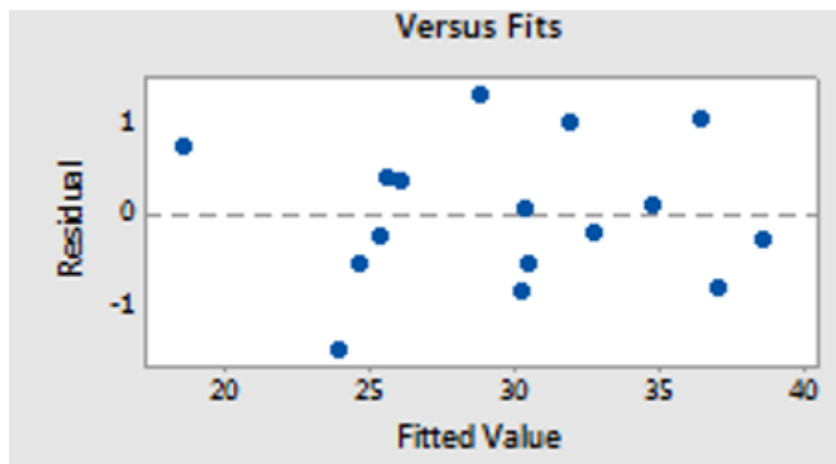


Gráfico 3.6 - Resíduos *versus* os valores estimados.

O gráfico 3.6 deve apresentar os dados de uma forma mais ou menos semelhante acima e abaixo do eixo $y = 0$, indicando variâncias constantes.

Apesar da análise dos resíduos ser a forma mais comum de efectuar a análise da igualdade das variâncias, outros testes podem também ser utilizados, como é o caso do teste de Bartlett (Montgomery, 2017).

4. Controlo estatístico do processo

4.1. Introdução

O desenvolvimento e utilização das técnicas e métodos estatísticos para a análise e solução de problemas passaram a ganhar importância no campo industrial a partir de 1924, quando o Dr. Walter A. Shewart desenvolveu pela primeira vez, os gráficos ou cartas de controlo. Com o desenvolvimento da produção em larga escala, tanto nos EUA e Europa, como principalmente no Japão, após 1944 o Controlo Estatístico do Processo (CEP) surgiu como ferramenta ideal para o eficiente, seguro e rápido controlo e aperfeiçoamento dos processos produtivos: eficiente por trabalhar com base na matemática aplicada; seguro pela sua aplicação no dia-a-dia das atividades industriais e rápidos por trabalhar com pequenas amostras representando esta toda população (Kubiak e Benbow, 2009; Wheeler, 2004).

Com a concorrência cada vez maior de competidores no mercado global, é crítico para todas as empresas aproveitar o melhor possível os seus equipamentos, a mão-de obra, utilizar as melhores e de forma mais económica, as matérias-primas ao seu dispor, e ainda usar os métodos de controlo de processo, como o CEP, que permitem controlar a sua variabilidade e intervir rapidamente quando começa a ser manufacturado produto não-conforme, reduzindo os seus custos de produção o mais possível.

O CEP é um conjunto de ferramentas quantitativas que ajudam a detectar problemas em empresas de manufactura, consistindo em técnicas de diagnóstico que ajudam a localizar fontes de variação, ou seja, produtos não-conformes. Muitas destas técnicas baseiam-se em princípios estatísticos (Zrymiak *et al*, 2015). As cartas de controlo são uma dessas ferramentas, mas existem outras como os fluxogramas (ou diagramas) de processos, listas de verificação, diagramas de dispersão, diagramas de causa-e-efeito (muito vulgarmente conhecidos como “espinha de peixe” ou diagrama de Ishikawa), diagramas de Pareto, e ainda histogramas (Gupta e Walker, 2007).

Estas ferramentas de CEP uma vez dominadas, formam uma ponderosa estrutura para a melhoria contínua da qualidade. No entanto, a equipa de gestores das empresas precisa de criar o ambiente adequado para que estas ferramentas possam ser utilizadas no seu dia-a-dia, o que inclui o recrutamento de colaboradores com conhecimentos nestas áreas que ajudem na implementação. O treino interno de todos os colaboradores envolvidos é essencial para que possam entender as razões e os benefícios que estas técnicas trazem para a empresa.

4.2 Variação do processo

Um processo pode ser definido como uma série de acções ou operações que são efectuadas com o objectivo de produzir algo, definido como produto final. Um processo pode também ser definido como uma combinação de mão-de-obra, máquinas, matérias-primas, métodos, metrologia e meio ambiente, que no seu todo contribuem para o *output* do processo (Pereira e Requeijo, 2008, Montgomery, 2020).

A qualidade do produto final depende como este processo é definido e executado. No entanto, apesar de em todos os processos se tentar fazer exactamente o que foi previamente definido, não existem dois produtos efectuados na mesma linha, exactamente iguais. A diferença entre os dois produtos manufacturados é designada de “variação”. A combinação das variáveis descritas conduzem a variações, mais ou menos aleatórias, que são devidas as causas comuns ou causas especiais de variação.

4.2.1 Causas comuns e causas especiais de variação

Como se afirmou anteriormente, na produção não existem dois produtos manufacturados exactamente iguais.

As causas das variações no processo podem ser divididas em dois grandes grupos:

- Causas comuns ou aleatórias. Estas são fontes de variação inerentes a um processo que se encontra sob controlo estatístico, as quais são difíceis de identificar. O conjunto de causas comuns forma a variabilidade intrínseca de um processo. Este tipo de variabilidade segue normalmente uma Lei de Gauss (distribuição Normal).
- Causas especiais: são causas de dispersão identificáveis, muitas vezes irregulares e instáveis e consequentemente difíceis de prever. A ocorrência de uma causa especial obriga a uma intervenção no processo. Contrariamente às causas comuns, as causas especiais são geralmente pouco numerosas mas obrigam a uma intervenção imediata assim que detectadas. Um exemplo de uma causa especial pode ser por exemplo o desgaste de uma faca que conduz a dimensões fora das especificações previamente definidas para aquele produto ou fase do processo (Duret e Pillet, 2009).

Para melhor se entender estes dois conceitos, a figura 4.1 apresenta as curvas de distribuição Normal num processo estável e noutro instável.

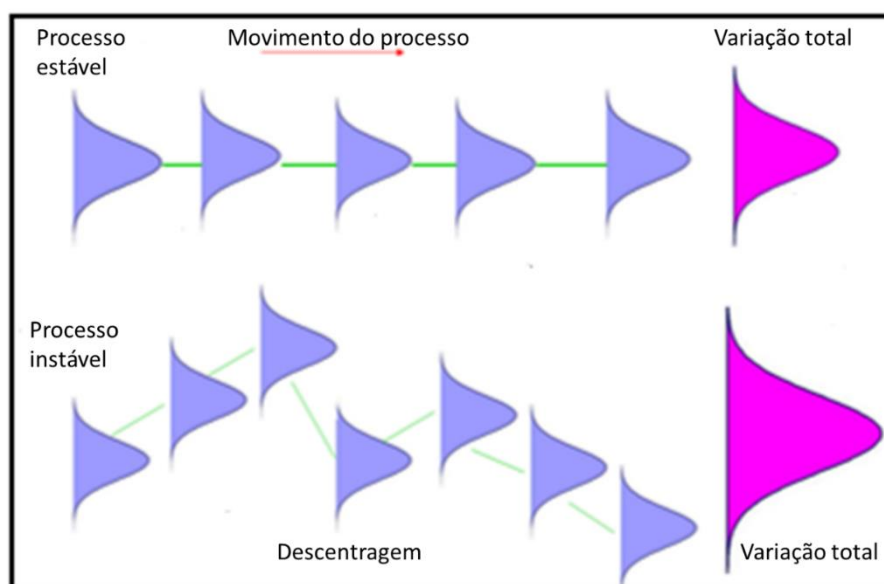


Figura 4.1 - Curvas de distribuição Normal ao longo do tempo, num processo estável e noutra instável (Loc'h, 2012).

Apesar da variação inerente (S_c) ser semelhante, a variação total (S_p) destes dois processos é bastante diferente (estes conceitos irão ser abordados nos próximos pontos deste capítulo).

As causas especiais de variação podem ser detectadas através de cartas de controlo. A sua detecção e remoção imediata é essencial para parar a manufactura de producto não conforme que será rejeitado no final da sua manufactura e contribuirá para o aumento dos custos e diminuição da produtividade da empresa.

Deste modo, uma correcta e adequada implementação das cartas de controlo nos processos industriais tem imensas vantagens, sendo de destacar a prevenção da ocorrência de mais produto não conforme, a distinção entre causas comuns e especiais de variação, a facilidade de utilização das cartas pelo operador no seu local de trabalho, a consistência e previsão da qualidade e dos custos, o menor custo por unidade produzida e ainda a utilização de uma linguagem comum que todos entendem (operadores de todos os turnos, fornecedor e cliente, diversos departamentos na empresa, etc.) (Montgomery, 2020).

4.3 As cartas de controlo como ferramenta essencial para o controlo do processo

As cartas de controlo não vão ser extensivamente explicadas no âmbito desta dissertação, pois não foi explorada esta área na sua parte prática. As cartas de controlo utilizadas foram previamente fornecidas pelo Departamento de Investigação e Desenvolvimento da empresa Γ . No entanto pareceu-nos fazer todo o sentido a sua breve explicação para um melhor entendimento dos índices de capacidade do processo, uma das áreas de análise de dados analisada neste trabalho.

As cartas ou gráficos de controlo consistem num tipo de gráfico usado para acompanhamento do processo. Estes mostram ao longo do tempo, os dados relativos a uma determinada característica de qualidade que se pretende controlar. Deste modo é possível ver o padrão de evolução do processo.

Este gráfico determina estatisticamente uma faixa denominada de limites de controlo, que é limitada pela linha superior (limite superior de controlo - LSC) e uma linha inferior (limite inferior de controlo - LIC), além de uma linha central (LC) – *target* ou objetivo. Estas cartas permitem facilmente verificar se o processo está sob controlo, isto é, isento de causas especiais. Um exemplo de uma carta de controlo é apresentado no gráfico 4.1.

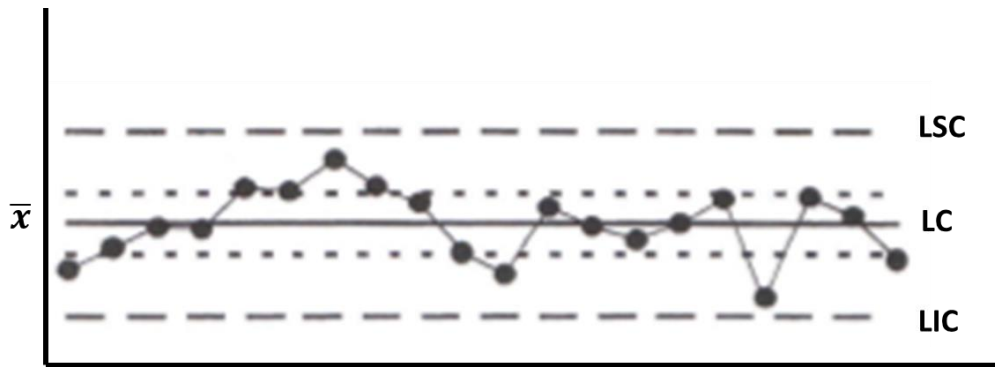


Gráfico 4.1 – Exemplo de uma carta de controlo. LSC – Limite Superior de Controlo, LC – Linha Média, LIC – Limite Inferior de Controlo (Carreira, 2006).

O gráfico 4.1 apresenta um processo sob controlo, onde todos os pontos se encontram no intervalo [LIC, LSC]. No caso de se verificar um ou mais pontos fora destes limites pode inferir-se que o processo se encontra fora de controlo estatístico.

No entanto, todos os pontos estarem dentro do intervalo [LIC, LSC] não é por si só uma demonstração que o processo se encontra sob controlo estatístico, pois pode ocorrer comportamentos não aleatórios (ou sistemáticos) que indiciam a existência de causas especiais de variação.

Existem várias regras para se detectar causas especiais de variação que saiem fora do âmbito desta dissertação, mas que se encontram bem explicadas em Pereira e Requeijo (2008), nas pags 359 – 360).

Para aplicar correctamente o CEP é necessário ter uma correcta percepção da qualidade de um produto (avaliada pelas cartas de controlo de uma empresa aquando da manufactura do produto) e da qualidade de uma determinada característica (determinada pelo Departamento de Investigação e de Desenvolvimento (I&D) da empresa.

Para efeitos de segurança, os limites das cartas de controlo de um determinado producto manufacturado são sempre mais exigentes (ou seja, as suas tolerâncias são inferiores) do que os limites exigidos pelo Departamento de I&D. Este facto permite alguma margem de manobra para a libertação de produto não-conforme dentro dos limites da empresa, mas ainda assim, dentro dos limites de especificação para aquela determinada característica dados pelo Dep de I&D.

Os gráficos apresentam tipicamente a representação apresentada no gráfico 4.2.

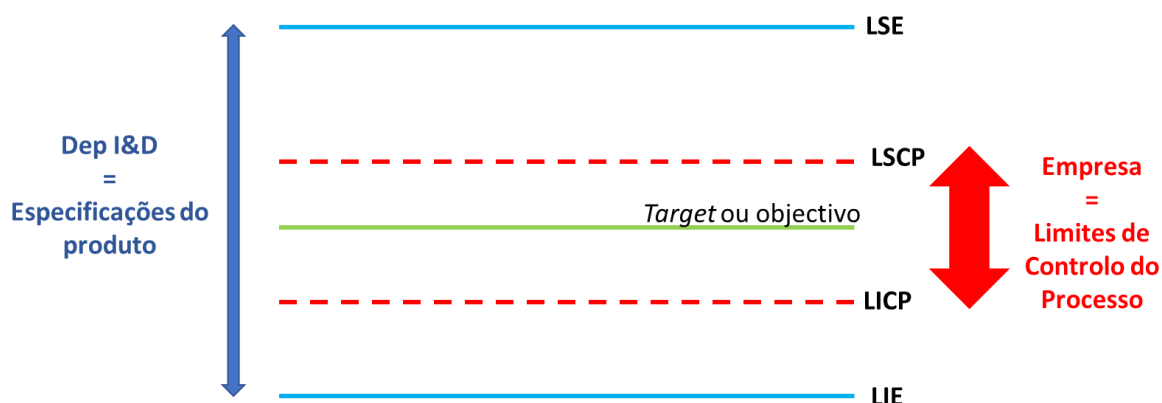


Gráfico 4.2 – Representação esquemática da localização dos diversos limites com que as empresas de manufatura trabalham.

No Gráfico 4.2, a linha media, a verde, representa o valor que determinada característica de qualidade pretende atingir. As linhas a vermelho tracejado representam os limites de controlo do processo dessa mesma característica de qualidade: Limite Superior de Controle do Processo (LSCP) e Limite Inferior de Controle do Processo (LICP). As linhas a azul representam os limites definidos pelo departamento de I&D e que correspondem às definições do produto (normalmente ou muitas vezes dadas pelos clientes). Neste caso temos o Limite Superior de Especificação (LSE) e o Limite Inferior de Especificação (LIE).

Existem vários tipos de cartas de controlo:

- Cartas de controlo por variáveis, e dentro destas:
 - Gráficos de média e amplitude
 - Gráficos de média e desvio padrão
 - Gráficos de média e variância
 - Gráficos de mediana e amplitude
 - Gráficos de observações individuais e amplitudes móveis
- Cartas de controlo por atributos, e dentro destas:
 - Gráficos de proporção de unidades não conformes
 - Gráficos do número de unidades não conformes
 - Gráficos do número de defeitos
 - Gráficos do número de defeitos por unidade

As cartas de controlo utilizadas no âmbito desta dissertação são do tipo Gráficos de média e desvio padrão. Recomenda-se a leitura de Montgomery (2020) para uma análise detalhada de cada uma destas cartas e da sua aplicabilidade.

4.4 A capacidade e performance de um processo

As cartas de controlo mostram se um determinado processo está sob controlo estatístico num determinado período de tempo. No entanto não nos fornecem informações sob a capacidade de um produto conseguir ou não produzir de uma forma consistente, um determinado produto que tem determinadas especificações. Para essa análise utilizam-se os estudos de capacidade e performance do processo.

O objectivo dos estudos de capacidade e performance de um processo é determinar se uma determinada linha de produção é ou não capaz de produzir um produto com determinadas especificações.

Estes estudos apresentam várias vantagens, a saber:

- Prever se o processo é capaz de produzir de acordo com as especificações
- Ajudar a seleccionar ou modificar um processo ou uma determinada máquina
- Seleccionar fornecedores
- Reduzir a variação do processo (Ramalho, 2021)

Como tal, estes estudos representam um das ferramentas essenciais que as empresas recorrem no seu processo de melhoria contínua.

4.4.1 Definição de capacidade de um processo

Antes de colocar um processo sob controlo é necessário avaliar a sua potencialidade, isto é, se é capaz de produzir um determinado produto nas melhores condições e cumprir as especificações que lhe são exigidas.

No entanto tem de se ter em conta que a dispersão de curto prazo é diferente da de longo prazo. A dispersão de curto prazo é principalmente devido à máquina e às condições adoptadas ao longo da manufactura. Os cinco “M” contribuem para a dispersão de curto prazo. Mas ao longo do tempo (da semana, por ex.), os “M”s como a temperatura do ambiente, as mudanças de matérias primas, mudanças de equipas, geram variabilidade nas afinações (Kubiak e Benbow, 2009, Wheeler, 1990). Estes dois tipos de dispersões, ou variações interferem na capacidade da linha, no seu curto e longo prazo. Sem dúvida que o produto que é entregue ao consumidor final é resultante de uma variabilidade de longo prazo que inclui os dois tipos de dispersão. Para melhor ilustrar estes dois tipos de dispersão, é apresentada a figura 4.2.

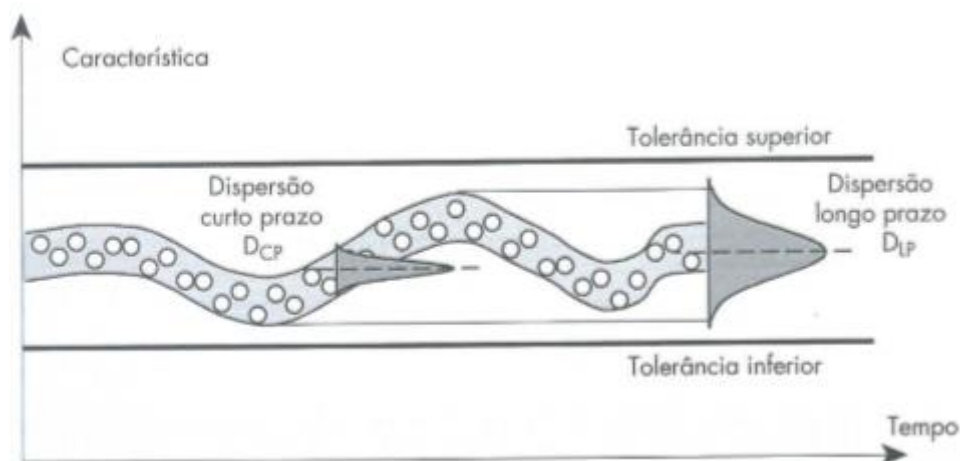


Figura 4.2 – Dispersões de curto e longo prazo (Duret e Pillet, 2009).

O índice de capacidade C_p , é a resposta do processo à sua capacidade para produzir de acordo com os requisitos, tendo em conta a dispersão natural, em condições otimizadas de produção, isto é, relaciona o rendimento real de uma máquina ou processo com o rendimento especificado (McCarty *et al*, 2005).

Os índices de capacidade do processo permitem colocar um valor, ou seja, permite “medir objectivamente” se o processo é ou não capaz e permite comparar, após se terem feito alterações na linha.

Assumindo que os dados têm uma distribuição Normal, considera-se uma variação aceitável para o processo 6σ (sendo σ , o desvio padrão do processo). Isto significa que 99.73% dos valores de uma determinada característica de qualidade se encontram compreendidos entre $\mu + 3\sigma$, sendo μ a média do processo.

A Performance do processo (P_p e P_{pk}) tem a haver com a dispersão de longo prazo (S_p), enquanto de a capacidade do processo (C_p e C_{pk}) apenas medem dispersão no curto prazo (S_c) (Montgomery, 2020; Yang, 2021).

O índice de capacidade, C_p , do processo é calculado da seguintes maneira (Borrór, 2008):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{LSE - LIE}{S_c} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Sendo LSE, o Limite Superior de Especificação, LIE, o seu limite inferior e σ representa a variação de curto prazo (S_c). Ou seja, este índice compara as especificações do produto com a variação do processo.

Neste caso então, $6\sigma = S_c$.

Determinação de S_c :

- 1) Quando a dimensão do subgrupo = 1, a estimação pode ser feita da seguinte forma:
 - Média das amplitudes móveis
 - Mediana das amplitudes móveis
 - Raiz quadrada da media quadrada das diferenças sucessivas (MSSD)

2) Quando a dimensão do subgrupo > 1 , a estimação pode ser feita da seguinte forma:

$$S_c = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Sendo:

\bar{R} – a média das amplitudes

d_2 – valor retirado da tabela apresentada no Anexo 3, sendo um valor dependente da dimensão do subgrupo.

O índice de capacidade C_p é muitas vezes também designado de índice de capacidade potencial, pois este representa o melhor valor que a linha de produção pode atingir. De recordar que o valor de S_c é avaliado com dados que seguem uma distribuição normal e em momentos reduzidos no tempo onde se verificam apenas causas comuns de variação (Duret e Pillet, 2009; Montgomery, 2020).

Considera-se um valor aceitável, quando um processo é bilateral, $C_p \geq 1.33$. No entanto o que se pretende é que a variabilidade seja a menor possível e como tal quanto maior o valor de C_p for, menor será a variabilidade do processo (Kubiak e Benbow, 2009; Montgomery, 2020).

A figura 4.3 apresenta diversos valores de C_p e o que isso significa em termos de capacidade do processo em estudo.

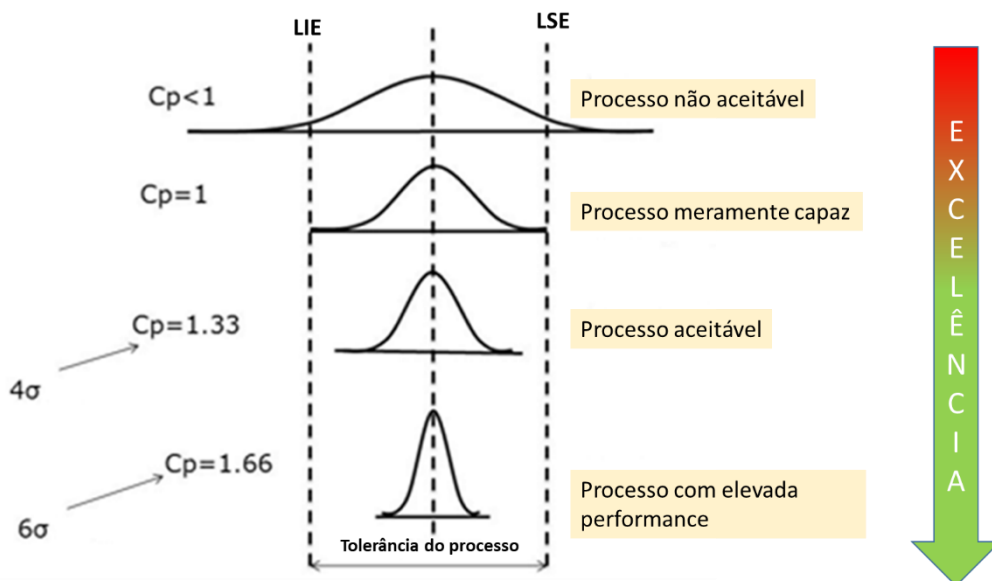


Figura 4.3 – Processos com diferentes C_p e sua relação com a qualidade do processo relativamente às especificações do produto (adaptado de https://www.google.co.uk/search?q=Cp%3D+1+cp%3C1+e+cp%3E1.33&safe=strict&source=lnms&tbm=isch&a=X&ved=0ahUKewjG4KKS9OLdAhXICsAKHXKkCwoQ_AUICigB&biw=1366&bih=651#imgrc=3-gPnVrGPcC2cM;, visualizado em 25/01/2022).

Outros indicadores de desempenho do processo são os índices C_{pk} e C_{pm} .

O índice C_{pk} considera não só a dispersão dos dados, mas também a sua localização relativamente à média. Este indicador é definido da seguinte maneira (Pereira e Requeijo, 2008):

$$C_{pk} = \min ((C_{pk})_I, (C_{pk})_S) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Com:

$$(C_{pk})_I = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

$$(C_{pk})_S = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

O processo será capaz se $C_{pk} \geq 1.33$ e estará centrado no valor nominal quando $(C_{pk})_I = (C_{pk})_S$

Caso o processo seja unilateral, o índice C_{pk} adoptado será determinado pelo Eq. 4.4 ou 4.5, conforme os casos. Neste caso, considera-se um processo capaz quando $C_{pk} \geq 1.25$.

O índice C_{pm} considera ao mesmo tempo a dispersão e a descentragem dos dados relativamente à linha central (Dale *et al.* 2018). O seu objectivo é dar uma imagem global do processo através de um só indicador. Este permite garantir que as condições de centragem e de dispersão mínima são efectivamente cumpridas.

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Sendo T, o valor nominal da característica de qualidade em estudo.

Para melhor se perceber a relação entre Cp e Cpk é apresentada a figura 4.4 com a relação e posicionamento de diversas e hipotéticas curvas de distribuição normal e os seus índices.

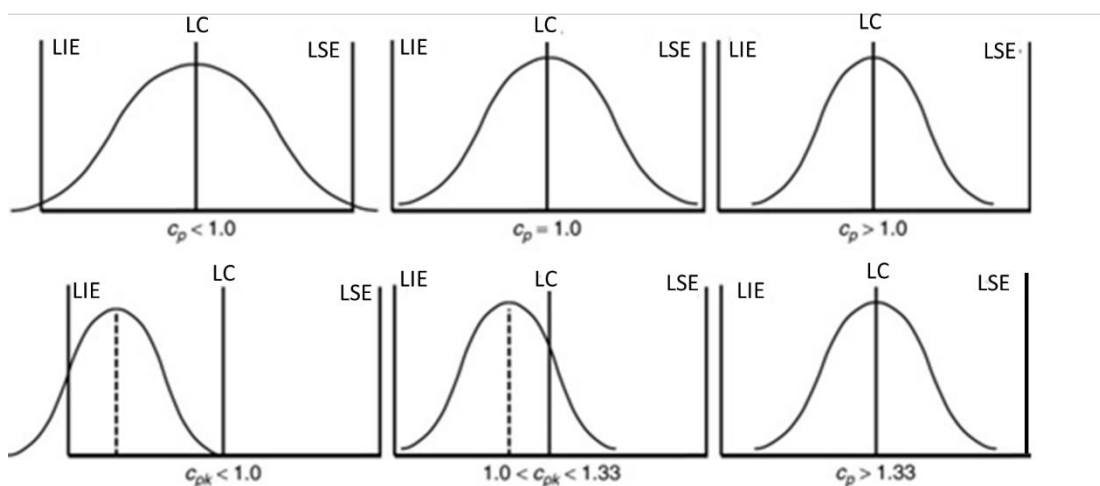


Figura 4.4 - Relação e posicionamento de diversas e hipotéticas curvas de distribuição normal e os seus índices (Djekci e Tomasevic, 2018).

4.4.2 Definição de performance de um processo

No CEP existem outros índices muito importantes que dizem respeito à performance do processo no longo prazo: o Pp e o Ppk.

O cálculo destes índices é feito de forma semelhante aos índices reportados no ponto anterior relativamente à capacidade do processo, mas o desvio padrão, σ , utilizado é o da totalidade dos dados (S_p), sendo a sua fórmula de cálculo a seguinte:

$$S_p = 6 * \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Assim sendo, enquanto que para a determinação de S_c apenas entram dados que tenham tido causas comuns de variação, na determinação de S_p entram dados que tenham sido submetidos a causas comuns e causas especiais de variação (Borrór, 2008; Montgomery, 2020).

O índice de performance do processo, Pp, entra em linha de conta com todo o conjunto de influências que podem perturbar o processo durante a produção. Ou seja, o índice Pp revela as dispersões de curto prazo e a resultante das diferentes afinações das máquinas que ocorreram ao longo do tempo e que são incontornáveis quando se fala de longo prazo. Deste modo, este índice é o que dá uma melhor indicação da qualidade da produção que entregamos ao nosso cliente. Neste contexto, este índice é também denominado de “capabilidade intrínseca do processo” (Duret e Pillet, 2009; Montgomery, 2020).

O cálculo do índice de performance do processo, Pp é apresentado na equação seguinte:

$$P_p = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} = \frac{LSE-LIE}{S_p} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Considera-se um processo com boa performance, quando $P_p > 1.33$.

Tal como no caso anterior, também aqui temos um indicador de desafinação, mas agora de longo prazo, o índice Ppk.

A sua determinação é feita da seguinte forma:

$$P_{pk} = \min((P_{pk})_I, (P_{pk})_S) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

Com:

$$(P_{pk})_I = \frac{\mu-LIE}{3\sigma} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$(P_{pk})_S = \frac{LSE-\mu}{3\sigma} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

O processo será capaz se $P_{pk} \geq 1.33$ e estará centrado no valor nominal quando $(P_{pk})_I = (P_{pk})_S$

Um processo para ser capaz não deve produzir produtos defeituosos. O critério base deverá então ser o índice Ppk, pois inclui ao mesmo tempo a capacidade intrínseca e a eventual desafinação que ocorre normalmente em todas as máquinas ao longo do tempo (Kubiak, 2014; Montgomery 2020).

O objectivo será sempre ter $P_p = P_{pk}$, indicativos de uma afinação perfeita. O objectivo dos técnicos de linha é precisamente manter estes dois índices o mais próximo possível um do outro.

Em resumo, partimos de um processo com um potencial de capacidade C_p para chegarmos ao cliente com uma capacidade P_{pk} , normalmente inferior. Para o cliente saber que o processo de manufactura consegue produzir um determinado produto dentro das especificações previamente exigidas, o valor de P_{pk} deve ser igual ou superior a 1.33. Caso contrário é necessário avaliar as situações que eventualmente estejam a contribuir para essa falta de capacidade. Um processo estabilizado terá valores de C_p e P_p muito próximos, limitando-se a diferentes afinações das máquinas e a dispersão de longo prazo será próxima da de curto prazo (Munro *et al*, 2015; Montgomery, 2020).

5. Análise da situação que fomentou este estudo

5.1. Análise financeira

No final do ano T foi feita uma análise detalhada das perdas de finos. O gráfico 5.1 apresenta detalhadamente sob a forma de um gráfico Pareto onde se removeram as maiores quantidades de finos e em que local da linha de produção esses finos foram retirados.

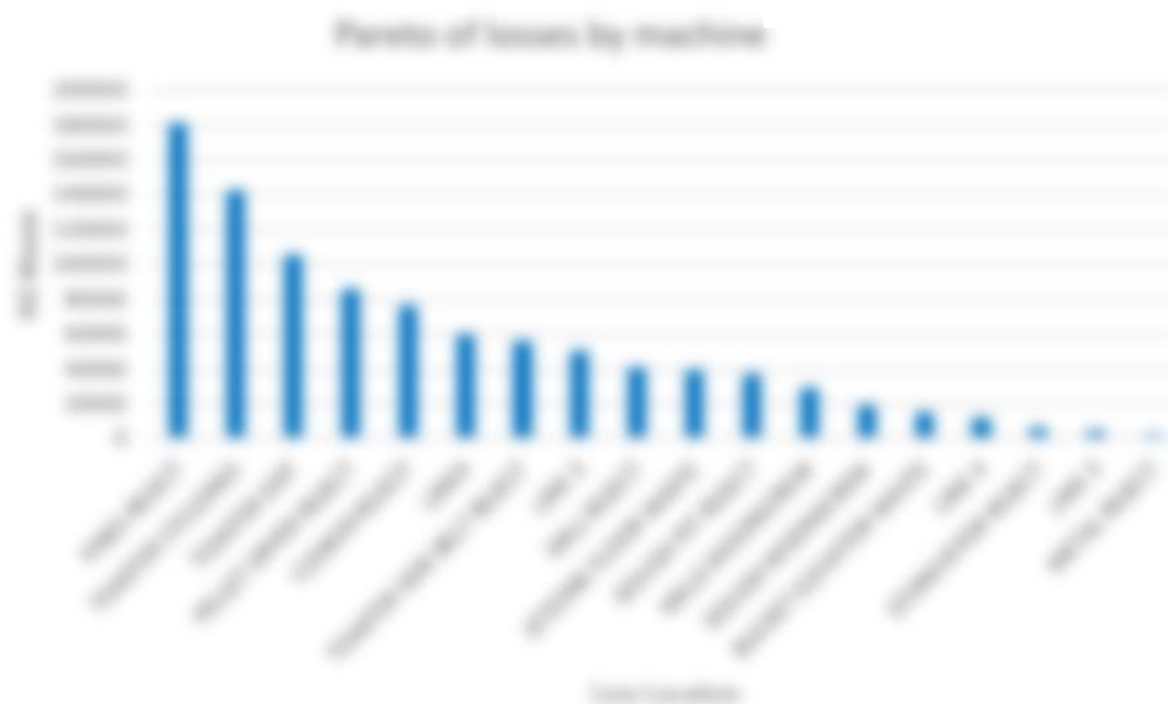


Gráfico 5.1 – Análise das perdas de flocos de trigo (kg) sob a forma de finos, em todos os locais da linha de produção de onde estes são removidos através de crivos.

Nesta análise verificou-se que se perderam cerca de 950 toneladas de flocos de trigo sob a forma de finos, o que equivale a um custo de cerca de 270 000 um.

Pela análise do gráfico 5.1, podemos verificar que ao longo da linha de produção os locais com perdas mais significativas se situaram na zona de separação de finos imediatamente antes do embalamento – *Fines reject* (local utilizado nos estudos que irão ser apresentados nos capítulos posteriores para retirada e análise de amostras), logo seguido pelas zonas de separação de finos no tostador ao nível dos ciclones (*Toaster cyclones*) e na sua zona de saída (*Toaster exit*).

Neste gráfico verifica-se também uma perda muito significativa de finos ao nível das cozedoras (*Cooker reject*) de cerca de 80 toneladas, indiciando que a presença de finos se inicia na primeira etapa de manufactura dos flocos de trigo. Como tal, os estudos posteriores na tentativa de diminuição da quantidade de finos produzida deverão ser iniciados na etapa inicial de produção dos flocos.

5.2 Análise da quantidade de finos produzida

Diariamente é retirada uma amostra da quantidade de finos separados do crivo imediatamente antes da zona de espera para embalagem, traduzindo-se essa quantidade como uma percentagem. Este é o local de recolha que melhor representa a quantidade de finos produzida ao longo da linha de produção. O cálculo desta percentagem envolve a quantidade (gramas) de finos recolhidos durante 1 minuto e a velocidade da linha de produção (que pode variar todos os dias).

Além desta análise é também feita uma outra nos pacotes de flocos de trigo antes de irem para a paletizadora. Este teste consiste em separar a quantidade de finos em dois crivos de diferentes dimensões: 3.35mm e 8mm. A media dos resultados obtidos através deste método e ao longo de um ano são apresentados nos gráficos 5.2, (a) e (b).

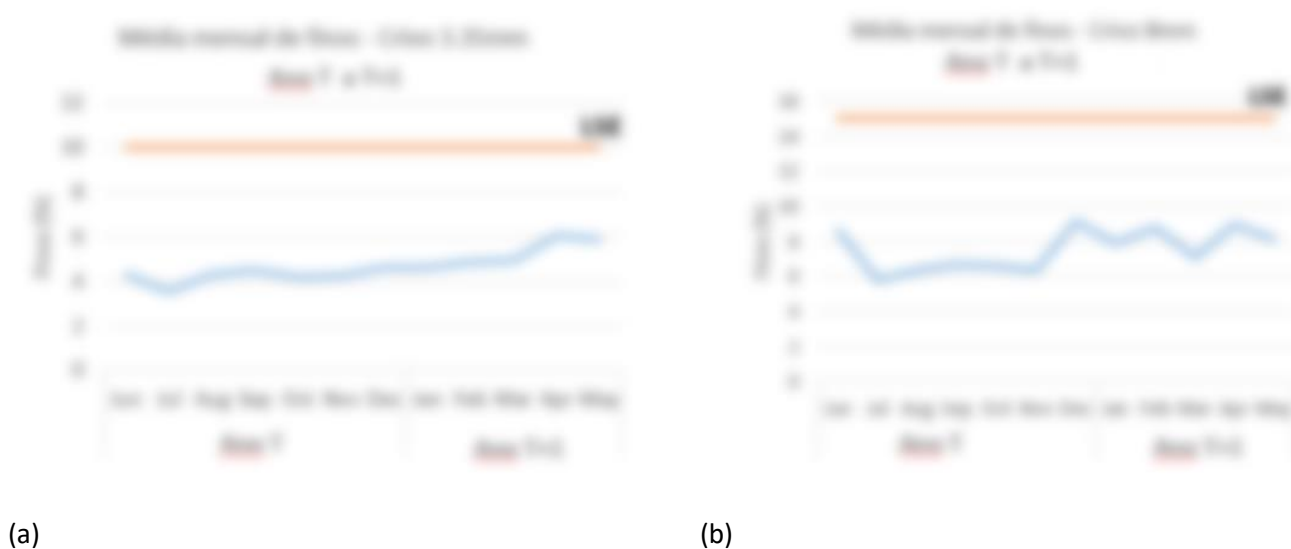


Gráfico 5.2 – Representação gráfica da média mensal da percentagem de finos produzida entre Junho do ano T a Maio do ano T+1. Os dados foram obtidos utilizando um crivo de 3.35mm (a) e 8mm (b). LSE significa Limite Superior de Especificação.

No ano T, a quantidade de finos produzida ao longo do tempo foi aumentando ligeiramente. A partir do mês de Dezembro de T, a percentagem média mensal de finos sofreu um aumento considerável.

5.3 Análise de reclamações

O Departamento de controlo de qualidade tem como uma das suas responsabilidades a análise exhaustiva do número e tipo de reclamações ao longo do tempo. Com esta análise pretende-se detectar problemas na manufactura e estudar as potenciais raízes dos problemas de forma a serem eliminados.

Uma ferramenta muito útil nesta análise denomina-se de IPA (*Identify, Prioritize, Assign*). Esta é feita trimestralmente, dando uma visão panorâmica do estado actual das reclamações por tipo de produtos manufacturados, prioriza através de gráficos Pareto em grandes grupos (ex: corpos estranhos, aparência dos produtos, etc) e finalmente permite afinar o tipo de reclamação (metal, plástico, finos, etc). Esta análise permite priorizar os projectos no sentido da diminuição das reclamações mais significativas para a empresa.

Uma análise IPA foi efectuada aos dados de reclamações do primeiro semestre do ano T+1. Esta encontra-se apresentada na figura 5.1.



Figura 5.1 – Análise IPA (*Identify, Prioritize, Assign*) efectuada aos dados de reclamações do primeiro semestre do T+1, para o produto flocos de trigo.

Ao ser efectuada a prioritização dos géneros alimentícios produzidos pela empresa Γ verificamos que os flocos de trigo são o segundo produto com maior número de reclamações, com um total de 30. Na fase de análise quanto ao tipo de reclamações dos consumidores, verificou-se que a aparência/aspecto dos flocos de trigo obtiveram 10 reclamações, sendo este a reclamação relativamente aos flocos de trigo. Refinando mais dentro do grande grupo relativo a aparência dos flocos, verificou-se que os consumidores reclamaram sobretudo devido a produto sob a forma de pó (5 reclamações), ou seja finos de muitas diminutas dimensões, seguido de produto/flocos partido ou esmigalhado (4 reclamações).

Esta análise também apontou que a causa raiz do problema de produção de finos nos flocos de trigo tinha de ser solucionada.

5.4 Análise dos flocos de trigo

5.4.1 Análise dos flocos de trigo antes do teste em trânsito na cadeia de abastecimento

Após as análises anteriores pretendemos saber exactamente em que estado se encontravam as caixas de flocos de trigo quando o consumidor final as recebia na sua casa. Para tal foi efectuada um teste na cadeia de abastecimento. Assim foram escolhidas três diferentes dimensões das caixas de flocos: 6x1kg (cada caixa contendo 6 pacotes de flocos de trigo com o peso de 1kg), 6x500g e 9x500g.

Duas paletes de cada diferente dimensão das caixas de flocos, no total de 6 paletes, foram retiradas da zona de paletização dos flocos de trigo e foram transportadas até ao entreposto de abastecimento da maior cadeia de supermercados existente no país onde decorreu o estudo, e voltaram para a empresa Γ para serem analisadas em detalhe. Com este teste pretendeu-se verificar o impacto dos movimentos relativos ao transporte nos flocos de trigo.

A figura 5.2 apresenta a forma de transporte das duas paletes de cada tipo de dimensão de caixas. Um importante detalhe que é de notar é o facto de as paletes serem transportadas duas a duas, cada uma pesando 180 kg de flocos de trigo (adicionado ainda o peso da palete de madeira de cerca de 15kg).



Figura 5.2 – Paletes de flocos de trigo que foram submetidas a um teste de movimentação ao longo da cadeia de abastecimento.

5.4.1.1 Especificações dos flocos de trigo relativamente a finos

Aquando do desenvolvimento dos flocos de trigo pelo grupo de Investigação e Desenvolvimento da empresa Γ foi determinado um teor máximo de finos admitido no produto final. A análise de hora a hora que é feita pelos técnicos na zona de embalamento permite determinar se o produto está ou não dentro da especificação para este critério. Caso esteja fora de especificação, o produto tem como destino a sua completa destruição.

A análise do teor de finos no produto final, ou seja, uma caixa retirada no final da linha de embalamento, hora a hora, é feita com recurso a crivos de duas dimensões: 8mm e 3,35mm, como já foi referido anteriormente no ponto 5.2. A caixa contendo os flocos é aberta, sendo estes depositados numa máquina que possui os dois tipos de crivos (figura 5.3).

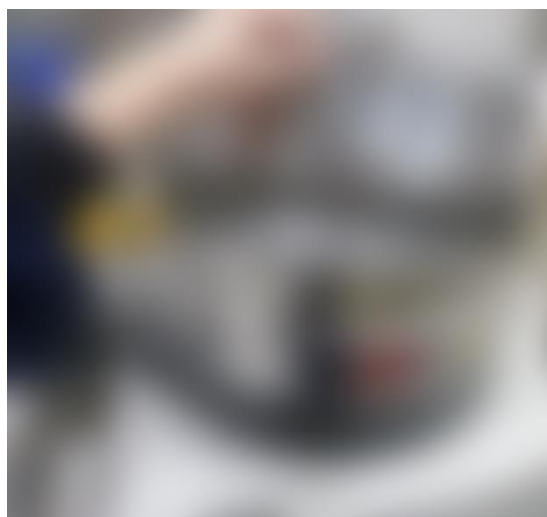


Figura 5.3 – Máquina agitadora dos flocos de trigo, possuindo crivos de duas dimensões distintas: o primeiro de 8mm, e o segundo por baixo, de 3.35mm.

Após fraca agitação durante 1 minuto, os crivos são retirados da máquina agitadora, e o teor de finos depositado em cada crivo é pesado. Este valor é colocado no sistema de informação interno da empresa sob a forma de percentagem.

Na Tabela 5.1 encontra-se os valores de especificação para os flocos de trigo, relativamente ao teor de finos máximo aceite em cada tipo de crivo. De salientar que o teor de finos é um critério de aceitação ou rejeição deste tipo de cereal de pequeno almoço.

5.4.1.2 Flocos de trigo – perspectiva do consumidor e da fábrica

Na mesma altura em que foram retiradas as paletes para o teste em trânsito, foram também retiradas caixas antes da paletização, que continham no total, pelo menos 30 caixas individuais de cada tipo de dimensão (1kg e 500g) de forma a se ter dados para comparar o teor de finos antes e depois da movimentação das paletes.

Para se perceber o impacto visual do produto no consumidor final, foram também tiradas fotografias dos flocos de trigo (figura 5.4). Nestas são apresentadas as fotos que pretendem representar o que o consumidor vê quando abre um pacote de flocos de trigo nas sua casa, bem como no mesmo produto retirado da linha exactamente ao mesmo tempo, o que a fábrica “vê” (o ponto de vista da fábrica), onde é analisado o teor de finos, sendo estes separados e contabilizados. A percentagem de finos apresentada, foi determinada pelo método de crivagem apresentado anteriormente.

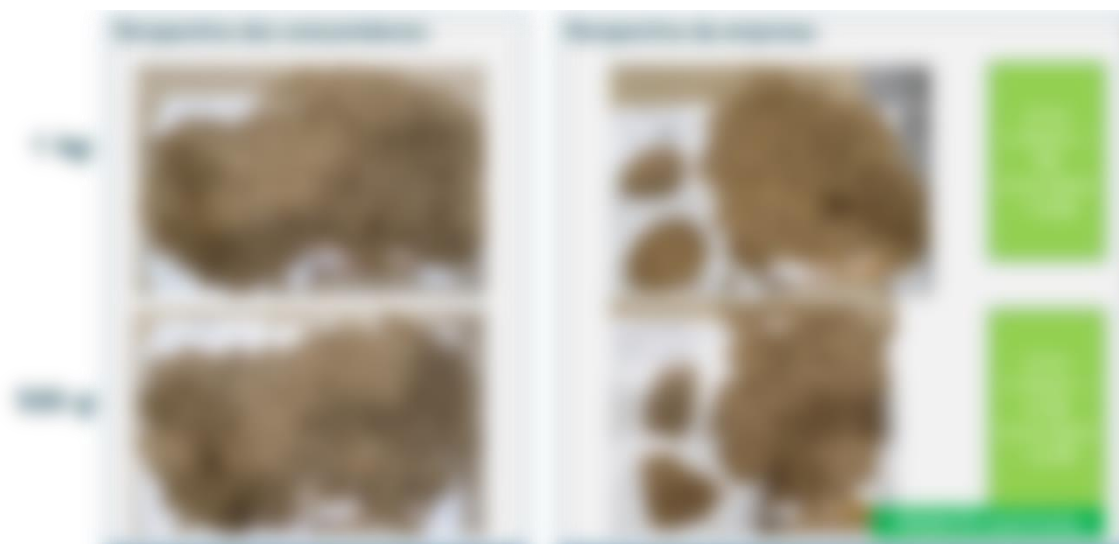
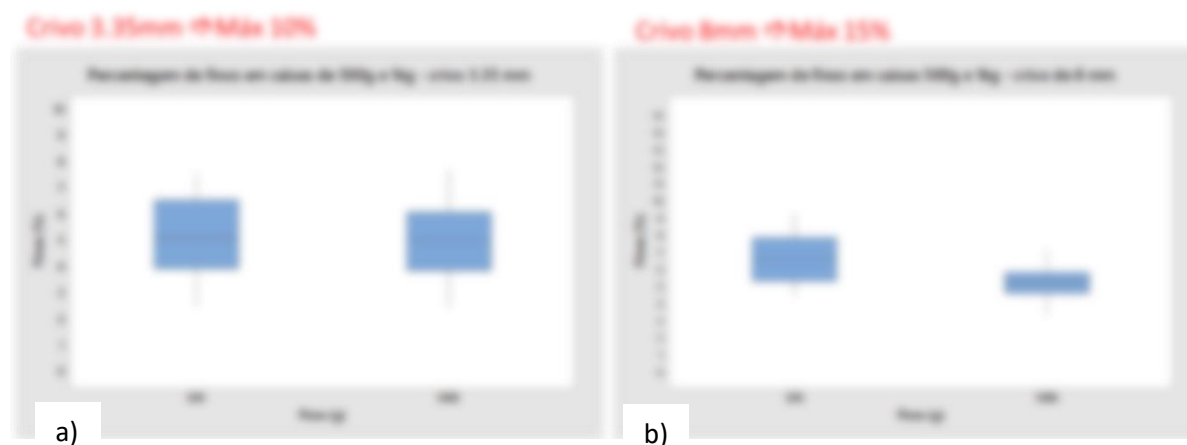


Figura 5.4 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados do final da linha de produção no mesmo espaço de tempo, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote (perspectiva da fábrica), ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Pela análise visual do produto da perspectiva do consumidor, podemos inferir que este provavelmente ficará satisfeito com o produto que recebe na sua casa. No fundo do pacote encontram-se alguns finos. Um consumidor que normalmente compra flocos de trigo entende que devido à fragilidade do produto e sendo semelhante ao produto anteriormente comprado, é esperado encontrar algum produto esmigalhado. O grupo de quatro pessoas (entre elas, Eng. Controlo de Qualidade, Eng Sistemas de Embalamento, Director da Qualidade e Director de Produção) que analisou estas amostras concluiu que não é espectável existirem reclamações com o produto desta amostra.

Nas caixas apresentadas nas fotos anteriores (figura 5.4) foi também determinado o teor de finos. No caso dos flocos em caixa de 1kg, verificou-se que no crivo de 3.35mm o valor foi de 5% e no de 8mm, o valor foi de 5.6%, ambos dentro da especificação para este tipo de produtos. No caso dos flocos de 500g, verificou-se que no crivo de 3.35mm o valor foi de 4.3% e no de 8mm, o valor foi de 6.9%, ambos dentro da especificação para este tipo de produtos (apresentada no ponto 5.4.1.1). Podemos concluir que este produto se encontra dentro da especificação exigida para os flocos de trigo e o produto pode ser libertado para a cadeia de abastecimento.

Para melhor se entender a variabilidade dos valores de finos finos na nossa amostra de 30 caixas já descritas anteriormente, estes foram representados sob a forma de diagrama de *Box Plot* (também denominado de diagrama de Caixa ou diagrama de extremos e quartis, entre outros) para os dois tipos de crivos e para cada diferente peso das caixas de flocos. Os resultados encontram-se apresentados nos gráficos 5.2.



Gráficos 5.3 – Representação sob a forma de Box Plot dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas de flocos de trigo para dois diferentes pesos de caixas: 500g e 1kg, e para os crivos de 3.35mm (a) e 8mm (b).

O diagrama de *Box Plot* identifica onde estão localizados 50% dos valores mais prováveis, a mediana e os primeiro e terceiro quartis. Os limites de fio de bigode indicam o valor mais baixo ou mais elevado dentro da amplitude interquartil. A análise do gráfico 5.3 indica que as amostras analisadas possuíam um teor de finos abaixo dos limites permitidos das especificações para os flocos de trigo, quer no caso do produto embalado em caixas de 1kg, quer em caixas de 500g.

5.4.2 Análise dos flocos de trigo após o teste em trânsito na cadeia de abastecimento

As paletes contendo flocos de trigo em caixas de 6x1kg, 6x500g e 9x500g, duas paletes de cada tipo dispostas uma sobre a outra, no total de 6 paletes, foram transportadas até ao entreposto de abastecimento da maior cadeia de supermercados país, exactamente da mesma forma que normalmente acontece com os produtos distribuídos diariamente, a cerca de 200km da empresa. Quando chegaram foram colocados noutra camiã e retornaram para a empresa Γ.

Para permitir uma correcta análise dos flocos, a posição das caixas das paletes foi identificada como demonstra a figura 5.5.



Figura 5.5 – Disposição das diferentes camadas de caixas e sua denominação de forma a poder ser identificadas a sua exacta posição em cada palete.

Aquando da chegada à empresa Γ, a análise visual destas permitiu verificar que algumas caixas se encontravam amachucadas provavelmente devido ao choque destas paletes com outras durante a sua movimentação com os carros porta-paletes.

5.4.2.1 Flocos de trigo – perspectiva do consumidor e da fábrica

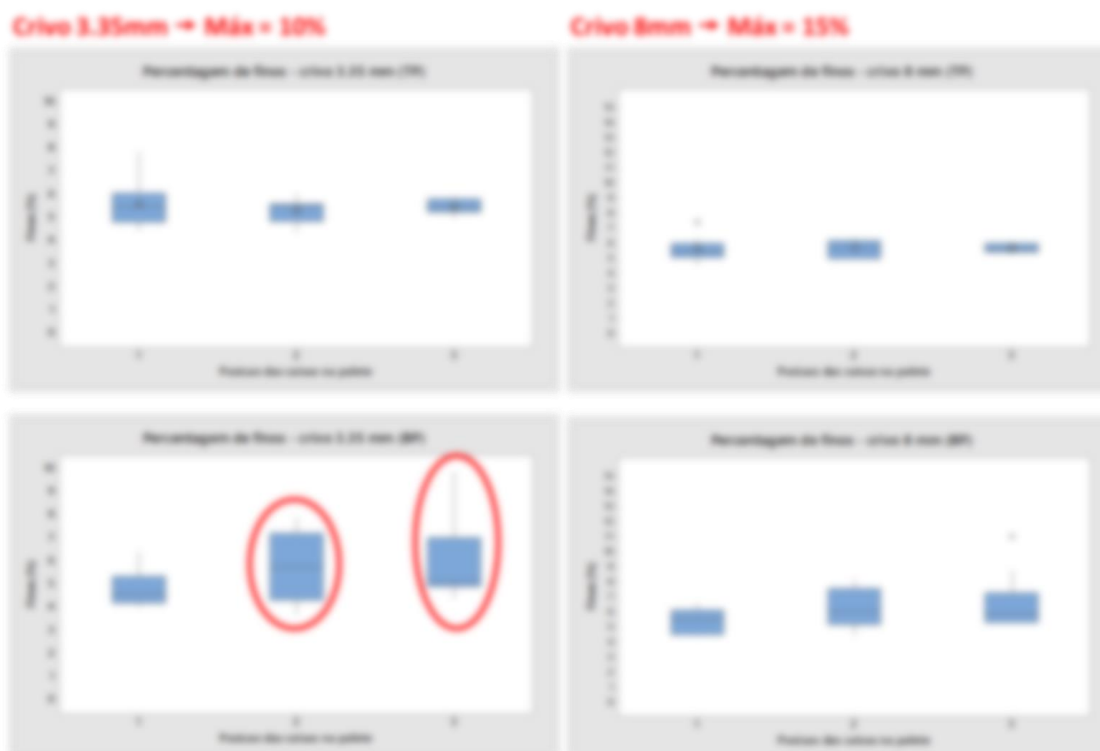
Após terem sido movimentadas ao longo de 400km, as paletes chegaram novamente à empresa permitindo ser analisadas com detalhe.

Esta análise foi similar à já efectuada para amostras similares antes do teste. Os resultados relativos às paletes que continham os flocos sob a forma de caixas 6x1kg encontram-se apresentados na figura 5.6.



Figura 5.6 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados de duas paletes que continham os produtos 6x1kg após o teste em trânsito, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote, ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

De cada paleta (TP e BP) contendo flocos de trigo com o peso de 1kg, foram retiradas aleatoriamente, pelo menos 30 caixas individuais distribuidas ao longo das diferentes posições nas paletes. Os gráficos Box Plot são seguidamente apresentados (gráficos 5.4).



Gráficos 5.4 - Representação sob a forma de *Box Plot* dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas individuais de flocos de trigo por palete (6x1kg): palete situada no topo (TP), e a palete colocada em baixo (BP). Os resultados da percentagem de finos foram obtidos nos crivos de 3.35mm e 8mm.

A análise visual feita a caixas de flocos de trigo retiradas aleatoriamente de cada palete (TP e BP) (figura 5.6) pelo mesmo grupo que anteriormente já tinha efectuado esta avaliação antes do transporte, concluiu que o produto que o consumidor iria receber continha bastantes flocos esmigalhados. Este produto iria certamente incrementar o número de reclamações devido à sua fraca aparência. No entanto, quando foi analisado o teor de finos pelo método de crivagem, todas as amostras se encontravam dentro da especificação para este produto.

Ao analisar os gráficos *Box Plot* (gráficos 5.4), estes apontam para a palete que se situou em baixo (BP) durante o transporte, tem uma maior percentagem de finos relativamente às amostras de controlo (gráficos 5.3), sobretudo aquelas que se situavam nas posições mais inferiores (ver figura 5.5).

Os resultados relativos às paletes que continham os flocos sob a forma de caixas 9x500g encontram-se apresentados na figura 5.7.

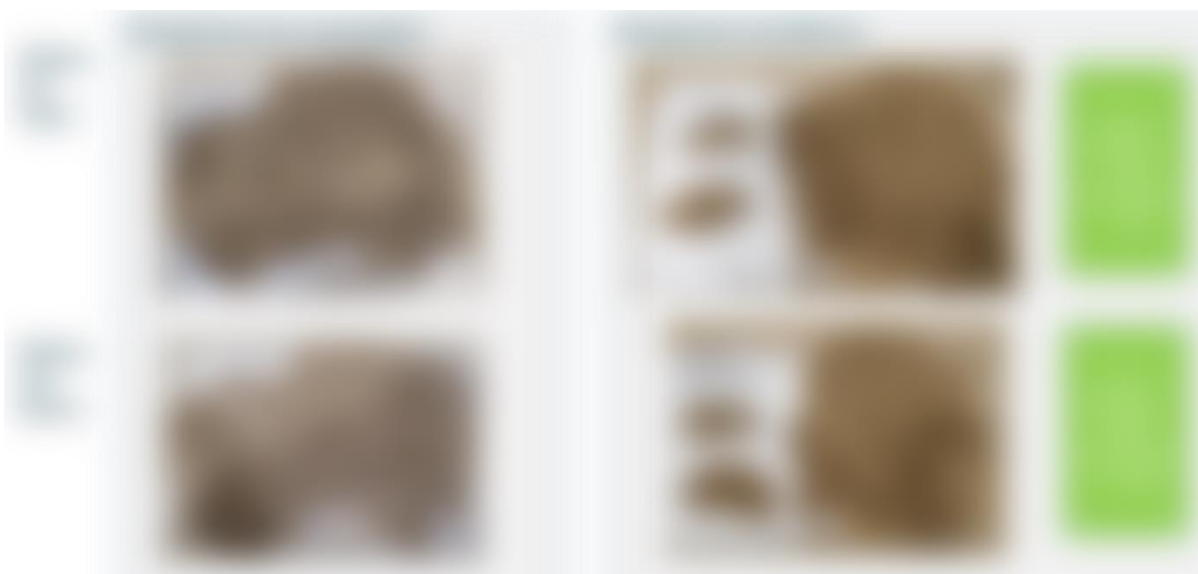
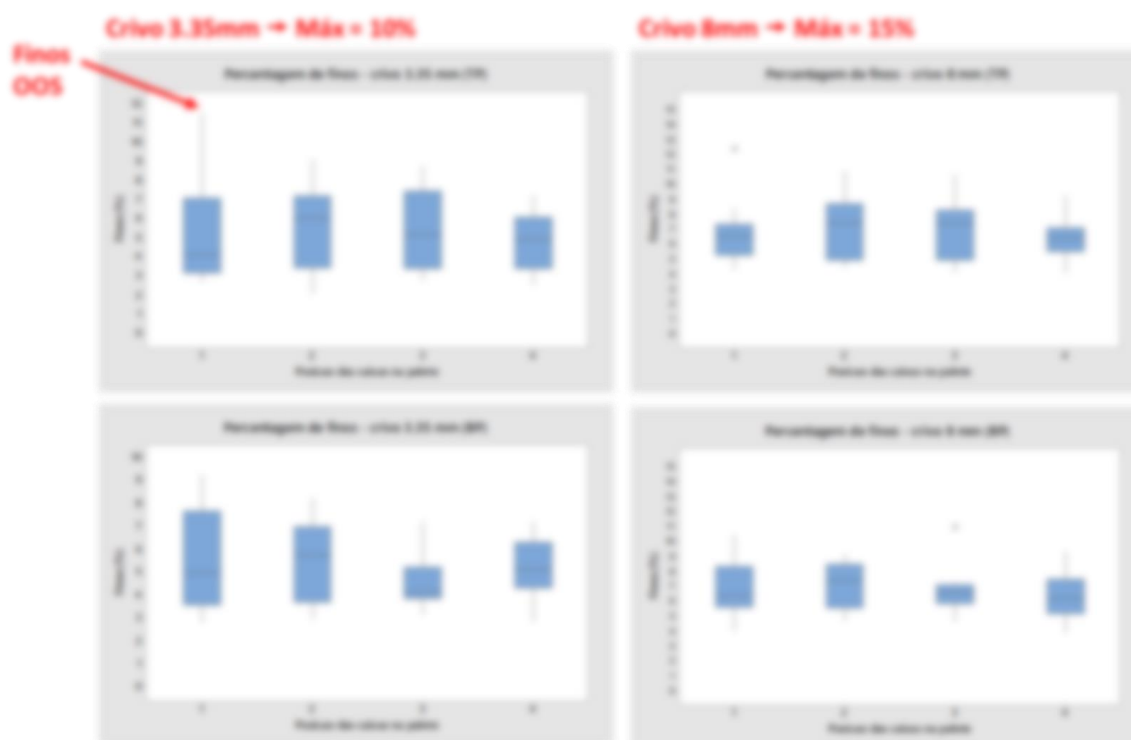


Figura 5.7 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados de duas paletes que continham os produtos 9X500g após o teste em trânsito, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote, ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Tal como já foi descrito anteriormente para o produto com o peso de 1kg, de cada palete (TP e BP) contendo flocos de trigo, foram retiradas aleatoriamente, pelo menos 30 caixas distribuídas ao

longo das diferentes posições nas paletes. Os gráficos *Box Plot* são seguidamente apresentados (gráficos 5.5).



Gráficos 5.5 - Representação sob a forma de *Box Plot* dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas individuais de flocos de trigo por palete (9x500g): paleta situada no topo (TP), e a paleta colocada em baixo (BP). Os resultados da percentagem de finos foram obtidos nos crivos de 3.35mm e 8mm. De notar que OOS significa produto fora de especificação.

No caso dos flocos de trigo agrupados em caixas 9x500g, são formadas paletes com quatro posições, em vez das três apresentadas na figura 5.5.

A análise visual (figura 5.7) apresenta um produto que o consumidor irá percepcionar como esmigalhado, ou seja, com fraca aparência. No entanto, ao analisar o teor em finos verificamos que se encontra dentro da especificação deste produto.

Pela análise de finos ao longo das diferentes posições nas paletes, verificamos que o teor de finos aumentou em ambas as paletes e em todas as posições, tendo sido encontradas caixas que inclusive se encontravam fora de especificação. Este facto significa que quando estas paletes chegaram ao entreposto não poderiam ter sido distribuídas pelos seus diversos supermercados, pois as suas especificações são em tudo semelhantes às especificações da empresa Γ .

Finalmente o último produto: flocos de trigo agrupados em caixas de 6x500g. O tratamento dados foi o mesmo descrito anteriormente.

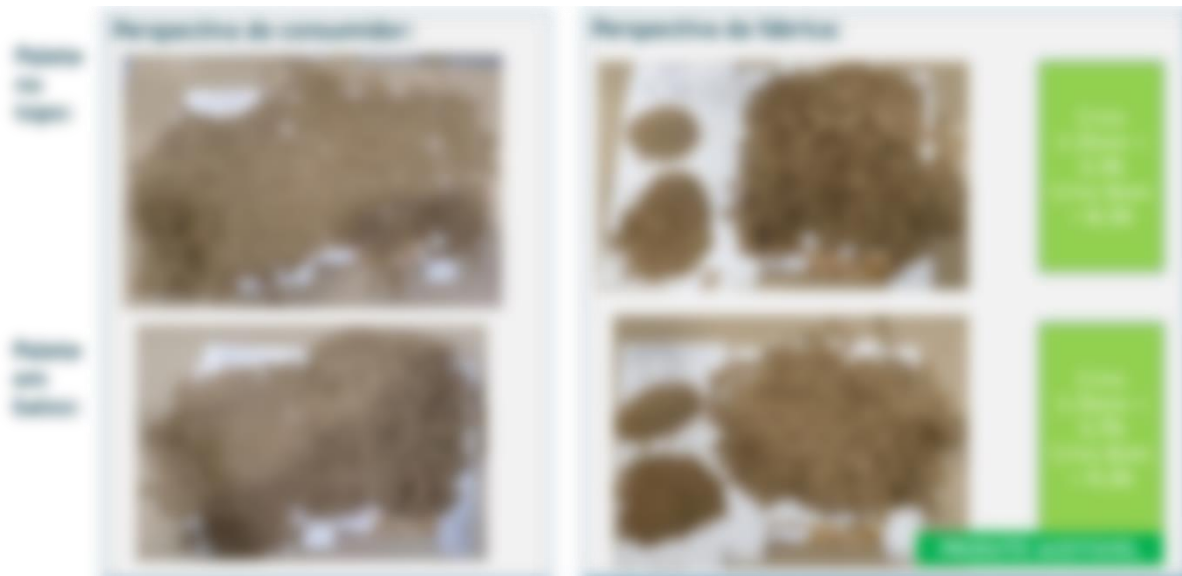


Figura 5.8 – Observação visual dos flocos de trigo, retirados de duas paletes que continham os produtos 6X500g após o teste em trânsito, com o objectivo de visualizar exactamente o que o consumidor observa quando abre um pacote de flocos de trigo (perspectiva do consumidor), e o que a fábrica detecta no mesmo pacote, ou seja, o teor exacto de finos que o pacote contém.

Os gráficos Box Plot são seguidamente apresentados (gráficos 5.6).



Gráficos 5.6 - Representação sob a forma de *Box Plot* dos resultados obtidos do teor de finos numa amostra de 30 caixas individuais de flocos de trigo por palete (6x500g): palete situada no topo (TP), e a palete colocada em baixo (BP). Os resultados da percentagem de finos foram obtidos nos crivos de 3.35mm e 8mm. De notar que OOS significa produto fora de especificação.

Os flocos de trigo dispostos nas duas paletes em caixas de 6x500g apresentaram os piores resultados (figura 5.8). Visualmente o produto apresentava-se com quase todos os flocos partidos, esmigalhados ou reduzidos a pó. Obviamente este produto iria conduzir a um grande número de reclamações. No entanto, a embalagem que foi retirada aleatoriamente e que foi utilizada para a quantificação dos finos, ainda se encontrava dentro da especificação.

Os gráficos Box Plot apresentados (gráficos 5.6) dão uma perspectiva do que se passou ao longo deste ensaio em trânsito. Ambas as paletes apresentaram caixas com produto fora de especificação (representado por OOS).

6. Análise das matérias primas

6.1. Análise química da principal matéria prima - o *Triticum aestivum*

Na manufactura dos flocos de trigo, o ingrediente principal é o trigo (*Triticum aestivum*). As suas características químicas poderão influenciar todo o processo. A empresa Γ recebe diariamente três camiões com trigo com 25 toneladas cada, sendo todas as entregas acompanhadas do respectivo Certificado de Análise (CDA).

O facto de a empresa Γ receber enormes quantidades deste ingrediente principal implica que existam vários fornecedores ao longo do ano, e estes fornecem diferentes variedades de trigo. E ainda, os compostos químicos que fazem parte da estrutura do grão também se alteram ao longo do tempo.

O índice de *Hagberg FN* (FN – *Falling Number*, também denominado de índice de queda) e o teor em proteína (Olaerts, De Bondt, 2018; Delattea *et al.* 2019, Shao *et al.*, 2019) são valores sempre confirmados para recebimento de cada carga, sendo esta rejeitada caso esteja fora de especificação. Os dados obtidos nos CDA foram analisados entre Junho do ano T e Maio do ano T+1.

6.1.1 O índice de *Hagberg FN*

Este índice é na realidade um método padronizado que permite determinar se existem grãos de trigo em germinação pré-colheita. Um elevado grau de humidade, como tempo chuvoso nas semanas anteriores à colheita do trigo é um factor preponderante para esta germinação poder verificar-se. Durante a germinação é produzida uma elevada quantidade de enzima α -amilase que destrói o amido existente no grão de trigo, sendo um factor crucial para a produção de flocos de boa Qualidade (Martínez, M., Pico, J., Gómez, M. 2015). O valor de especificação mínimo para este índice é de 180 segundos.

Os valores dos índice de *Hagberg FN* foram analisados através de uma série temporal, tendo em consideração a variedade de trigo a que se relacionam. Os resultados são apresentados no gráfico 6.1.

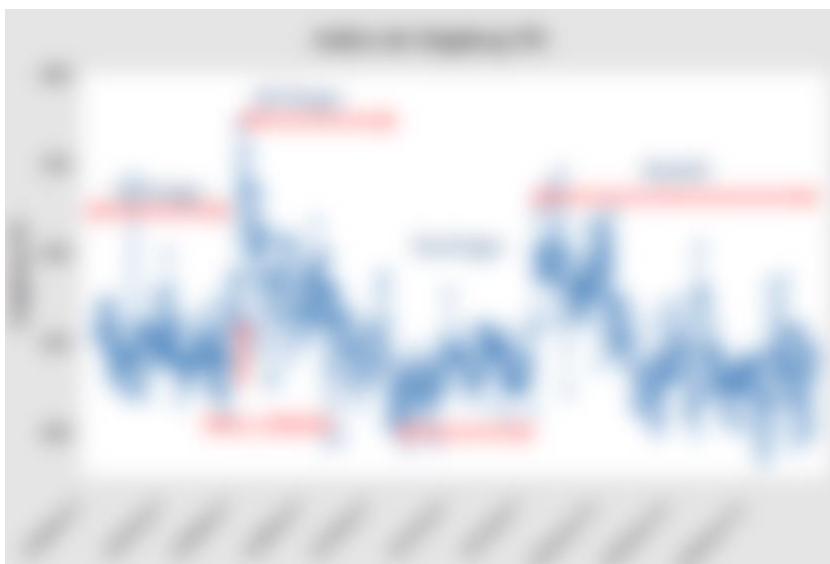


Gráfico 6.1 - índices de *Hagberg FN* foram analisados entre Junho do ano T e Maio de T+1. Neste encontram-se assinaladas as diversas variedades de trigo usadas ao longo do tempo, bem como o período de colheita.

A análise do gráfico 6.1 aponta para valores muito variáveis deste índice ao longo do tempo, ou seja, existiram períodos com maior valor deste índice, tendo provavelmente contribuído para flocos de melhor qualidade e logo menor teor de finos, e ocorreram também períodos de menor qualidade. No capítulo 5, no seu ponto 5.2 pudemos constatar que o teor de finos aumentou sobretudo a partir do mês de Dezembro de T. Nessa altura foi utilizada a variedade *Skyfall*, verificando-se um decréscimo acentuado do índice de *Hagberg FN* entre Dezembro do ano T e Maio do ano T+1.

6.1.2 O teor de proteína

O teor de proteína do trigo tem um impacto direto na quantidade de água que deve ser adicionada nas cozedoras. A proteína está directamente relacionada com a capacidade de absorção de água da massa de flocos de trigo. Na manufactura dos flocos deverá ser ajustado o teor de água a adicionar consoante a capacidade de absorção da proteína (Lia *et al.*, 2020). O gráfico 6.2 apresenta os valores do teor de proteína das diversas cargas de trigo, entre Junho T e Maio T+1.



Gráfico 6.2 – Os teores de proteína foram analisados entre Junho do ano T e Maio do ano T+1. Neste encontram-se assinaladas as diversas variedades de trigo usadas ao longo do tempo, bem como o período de colheita.

No início do mês de Dezembro do ano T passou-se a utilizar a variedade de trigo Skyfall. Esta variedade apresenta valores de proteína muito superiores às variedades anteriormente utilizadas: Santiago e JB Diego.

Na variedade Skyfall verificamos que os teores de proteína decrescem ao longo do tempo. Este facto implica que a capacidade de absorção de água variou ao longo da utilização, entre Dezembro do ano T e Maio do ano T+1.

6.2 Discussão dos resultados obtidos

No capítulo 5 foi verificado um aumento do teor em finos nos flocos de trigo manufacturados sobretudo a partir de Dezembro do ano T até ao final do período em análise, ou seja, Maio do ano T+1. Este período corresponde à utilização da variedade de trigo Skyfall. Os dados dos CDA apontam para uma diminuição da qualidade dos valores dos índice de *Hagberg FN*, bem como uma diminuição considerável do teor de proteína, directamente conectada com uma alteração na capacidade de absorção de água da massa de flocos de trigo.

Ao questionar o Eng. de Sistemas e os técnicos responsáveis pela linha de flocos de trigo, verificou-se que os *settings* (comandos que determinam por exemplo a quantidade de água a adicionar em determinada etapa da linha de processamento) dos equipamentos não mudam ao longo do ano, nomeadamente os relacionados com a quantidade de água a adicionar nas cozedoras da massa de flocos de trigo. Deste modo, a quantidade de finos produzida ao longo do ano varia, no sentido ascendente, com todas as consequências já descritas nos capítulos anteriores.

O objectivo do trabalho apresentado nesta dissertação é precisamente dar uma contribuição para o estudo dos diversos *settings* mais relevantes para o decréscimo da quantidade de finos, bem como transmitir os conhecimentos adquiridos aos técnicos da linha.

7. Optimização do processo de produção de flocos de trigo

7.1 Tempestade de ideias ou *brainstorming*

Para a resolução deste problema foi formada uma equipa multidisciplinar constituída por peritos em cereais, elementos do grupo de Investigação e Desenvolvimento, Eng. de Sistemas e Engenheira de Controlo de Qualidade. O objectivo desta equipa foi estabelecer todas as possıveis causas ao longo da linha de processamento que pudessem conduzir   produção de finos. O resultado desta discussão é apresentado na figura 7.1. Este grupo conseguiu enumerar 43 possıveis causas deste problema.



Figura 7.1 – Resultado de uma “tempestade de ideias” (ou *brainstorm*) que teve como objectivo apresentar o maior número possível de factores que possam eventualmente para a produção de finos na linha de produção de flocos de trigo.

7.2 Definição da estratégia de trabalho

Após alguma discussão sobre o tipo de abordagem a este problema, chegou-se a uma decisão consensual. O estudo para definição dos melhores *settings* seria efectuado nos dois equipamentos que indicavam ser os mais críticos para a qualidade da massa dos flocos de trigo e consequentemente para a maior ou menor produção de finos: as cozedoras e o secador da massa.

A empresa Γ tem como valor estratégico não produzir mais de 2% finos (LSP – Limite Superior de Produção) relativamente à velocidade de linha que se encontra a laborar. Portanto, o grupo de trabalho desta empresa teve como objectivo produzir um teor de finos inferior a este LSP.

Ao longo do mês de Junho do ano T+1, foi anotado diariamente a percentagem de finos produzida, tendo sido a amostra retirada imediatamente antes do depósito de espera para embalagem durante 1 minuto (figura 7.2). Este é o ponto mais representativo da quantidade de finos produzida pois situa-se no ponto imediatamente antes do embalamento.

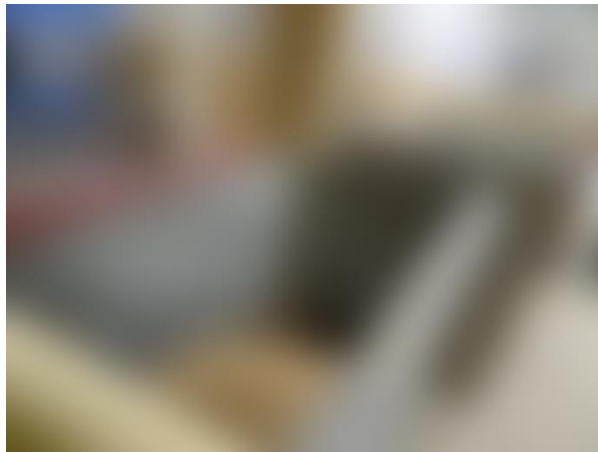


Figura 7.2 – Local de retirada de amostras de finos para análise diária da percentagem produzida relativamente à velocidade da linha de produção. Estes finos são separados do fluxo de produto que é movimentado na cinta transportadora imediatamente antes do depósito de espera para embalagem.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados no gráfico 7.1.

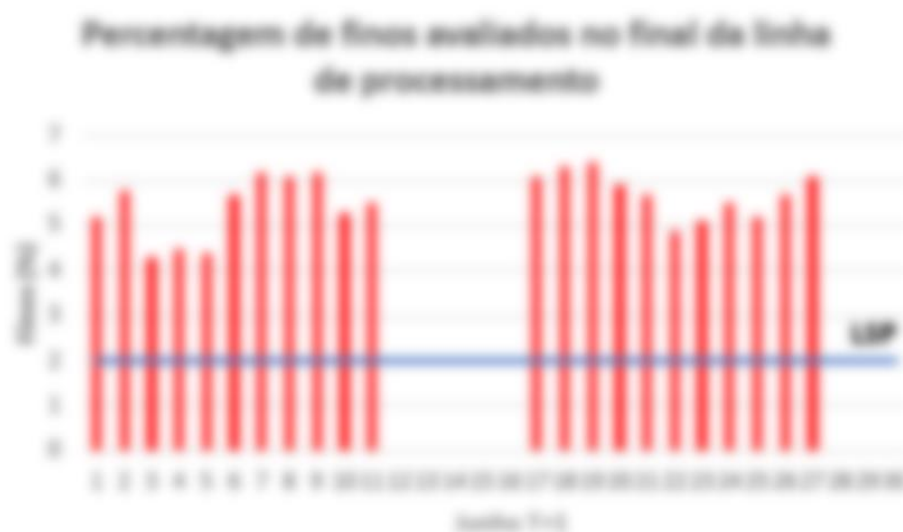


Gráfico 7.1 – Valores da percentagem de finos avaliada diariamente ao longo do mês de Junho do ano T+1. Nos dias que não têm resultados, a linha encontrava-se parada para limpeza e manutenção. LSP – Limite Superior de Produção.

Na avaliação do gráfico 7.1 podemos verificar que em todos os dias de produção foram obtidas percentagens de finos muito superiores ao LSP de 2%.

Deste modo, o trabalho a desenvolver tem como objectivo a diminuição da percentagem de finos abaixo do LSP. Este local foi sempre o escolhido para a retirada de amostras de finos para o desenvolvimento do trabalho que irá ser abordado nos pontos seguintes desta dissertação.

7.3 A metodologia de Planeamento de Experiências aplicada nas cozedoras

7.3.1 Escolha dos factores e dos níveis

Para o estudo e definição dos melhores *settings* das cozedoras com o objectivo de produzir uma quantidade de finos inferior a 2% (a nossa variável resposta), o grupo de trabalho teve de definir qual a técnica estatística que melhor poderia ajudar nesta problemática. A metodologia de Planeamento de Experiências (DOE) pareceu-nos ser a mais indicada. Dentro do DOE foi escolhido o planeamento factorial completo, randomizado, com três factores e dois níveis, 2^3 . Esta análise foi replicada duas vezes.

De entre todos os factores que eventualmente podem afectar a qualidade da massa de flocos de trigo nas cozedoras, seleccionou-se:

- tempo de cozedura da massa (codificado como A)
- a quantidade de água adicionada (codificado como B)
- a quantidade de farinha de trigo adicionada (codificado como C)

De salientar que a variedade de trigo utilizada neste DOE foi a Skyfall.

Os níveis escolhidos para cada factor são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Enumeração dos dois níveis utilizados para cada factor previamente escolhidos, para se proceder a um DOE completo 2^3 .

Tempo de cozedura da massa (min)	Água adicionada a cada cozedora (L)	Quantidade de farinha de trigo adicionada a cada cozedora (kg)
70	72	80
78	84	120

Para planejar correctamente as experiências a realizar foi aplicada uma matriz de planeamento, que corresponde às diversas alterações dos níveis escolhidos de todos os factores em estudo, de uma forma aleatória. Esta matriz encontra-se representado na Tabela 7.2.

O nível de confiança adoptado neste estudo foi de 95%.

7.3.2 Matriz de planeamento

A matriz de planeamento para um DOE 2^3 contempla oito experiências. No entanto como este DOE foi feito em duplicado, no total foram efectuadas dezasseis experiências. A sequência usada e aleatória foi a apresentada na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Matriz de planeamento do DOE factorial 2^3 , efectuado em duplicado.

Design Table (randomized)

Run	A	B	C
1	-	-	+
2	-	-	+
3	+	+	-
4	+	-	+
5	+	+	-
6	-	-	-
7	-	+	+
8	+	+	+
9	+	-	-
10	-	+	-
11	-	+	+
12	+	-	+
13	+	+	+
14	-	+	-
15	+	-	-
16	-	-	-

Para um modelo de DOE que pretende efectuar uma análise de variância, já foi assinalado no cap. 3 desta dissertação, o modelo a seguir (equação 1.1):

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\tau)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Para: $i = 1, 2, \dots, a$; $j = 1, 2, \dots, b$, $k = 1, 2, \dots, c$, e $l = 1, 2, \dots, n$

A matriz de planeamento e os resultados obtidos em cada experiências são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Matriz de planeamento utilizada neste estudo, onde se encontra a variável resposta – percentagem de finos, obtida em cada experiência, segundo uma matriz aleatória.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Tempo coz	Agua adic	Farinha	Finos (%)
13	1	1	1	70	72	120	1.15
11	2	1	1	70	84	80	0.83
16	3	1	1	78	84	120	0.59
10	4	1	1	78	72	80	0.85
5	5	1	1	70	72	120	1.16
6	6	1	1	78	72	120	1.01
8	7	1	1	78	84	120	0.58
9	8	1	1	70	72	80	1.45
14	9	1	1	78	72	120	1.05
7	10	1	1	70	84	120	0.76
4	11	1	1	78	84	80	0.75
1	12	1	1	70	72	80	1.4
15	13	1	1	70	84	120	0.73
12	14	1	1	78	84	80	0.73
2	15	1	1	78	72	80	0.87
3	16	1	1	70	84	80	0.85

Os resultados obtidos são apresentados nos pontos seguintes. No anexo 1 encontram-se todos os resultados complementares relativos que, devido à sua extensão se optou por colocar no final do trabalho.

7.3.3. Análise de variância

A análise de variância encontra-se na Tabela 7.4.

Para facilitar a explicação dos resultados irá utilizar-se a notação utilizada no software *Minitab*:

A - **Tempo coz** ou seja, Tempo de cozedura

B - **Agua adic**, ou seja, Água adicionada nas cozedoras

C – **Farinha**, ou seja, farinha de trigo adicionada nas cozedoras

Tabela 7.4 – Análise de variância para um DOE factorial completo, 2³.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	1.01510	0.145014	362.54	0.000
Linear	3	0.86465	0.288217	720.54	0.000
Tempo coz	1	0.22562	0.225625	564.06	0.000
Agua adic	1	0.60840	0.608400	1521.00	0.000
Farinha	1	0.03063	0.030625	76.56	0.000
2-Way Interactions	3	0.08795	0.029317	73.29	0.000
Tempo coz*Agua adic	1	0.04622	0.046225	115.56	0.000
Tempo coz*Farinha	1	0.03610	0.036100	90.25	0.000
Agua adic*Farinha	1	0.00562	0.005625	14.06	0.006
3-Way Interactions	1	0.06250	0.062500	156.25	0.000
Tempo coz*Agua adic*Farinha	1	0.06250	0.062500	156.25	0.000
Error	8	0.00320	0.000400		
Total	15	1.01830			

Sendo:

Adj SS = Soma dos quadrados ajustada

Adj MS = Média dos quadrados ajustada

F-Value = Valor o teste F de Senedecor

p-value = valor de p

Error = erro

Total = Soma dos quadrados total

Pela análise da Tabela podemos verificar que a soma dos quadrados (*Adj SS*) dos efeitos principais dos factores A($y_{i\dots}$), B($y_{j\dots}$) e C($y_{k\dots}$) são os seguintes:

- Para o factor A (Tempo de cozedura):

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} = 0.22562$$

- Para o factor B (Água adicionada nas cozedoras):

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{j\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} = 0.60840$$

- Para o factor C (farinha de trigo adicionada nas cozedoras):

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{k\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} = 0.03063$$

O cálculo da soma dos quadrados para a interacção dos factores dois a dois, foi efectuada da seguintes forma:

- Para a interacção entre os factores AB:

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B = 0.04622$$

- Para a interacção entre os factores AC:

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{ik...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_C = 0.03610$$

- Para a interacção entre os factores BC:

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{jk...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_B - SS_C = 0.00562$$

- A soma dos quadrados para a interacção dos três factores:

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} = 0.06250$$

- A soma dos quadrados do erro:

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotal(ABC)} = 0.00320$$

Sendo a soma dos quadrados do subtotal ABC sido determinada da seguintes forma:

$$SS_{Subtotal(ABC)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk...}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn}$$

- Finalmente, a soma total dos quadrados:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{...}^2}{abcn} = 1.01830$$

Pela análise dos valores da soma dos quadrados da tabela ANOVA podemos verificar que a água adicionada às cozedoras (B) afecta significativamente a percentagem de finos formada ao longo do processo de manufactura, e ainda que o tempo de cozedura (A) tem também uma grande relevância no impacto da variável resposta. O gráfico 7.2 apresenta uma análise sob a forma de Pareto que ilustra a análise apresentada.

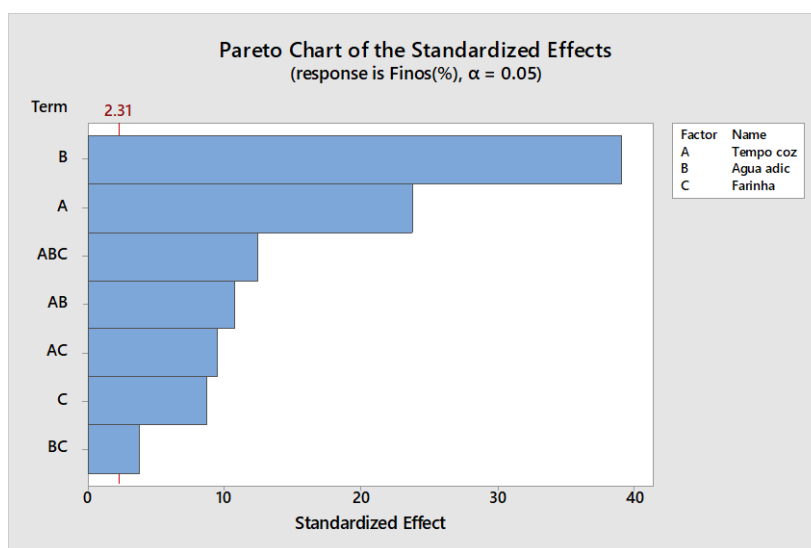


Gráfico 7.2 – Gráfico Pareto dos efeitos estandardizados para a variável resposta: efeito no teor de finos produzidos ao longo do processo de manufatura dos flocos de trigo.

No entanto, em terceiro lugar aparece a interação entre os três factores em estudo, que também tem alguma influência na variável resposta.

7.3.4 Qualidade de ajustamento do modelo e análise dos coeficientes

Os valores de F mais significativos correspondem aos factores B (1521.00) e A (564.06). A análise dos valores-p (*p-values*) na tabela ANOVA verificamos que todos eles são inferiores ao valor de $\alpha = 0.05$, estipulado aquando da análise dos resultados. Deste modo, os *p-values* indicam que os efeitos do modelo são estatisticamente significativos, e que existe pelo menos uma variável explicativa para o nosso modelo.

Para avaliar a qualidade do ajustamento do modelo recorreremos ao R^2 e ao R^2 ajustado. Os valores encontrados para o nosso modelo encontram-se na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Valores de R^2 e R^2 ajustado do nosso modelo.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.02	99.69%	99.41%	98.74%

Para os dados relativos à nossa variável resposta verificamos que R^2 e R^2 ajustado são respectivamente de 99.69% e 99.41%, ou seja muito próximo de 100%. Deste modo, a a variação

observada na nossa variável resposta é muito próximo de 100% em ambos os casos para as variáveis predictoras (factores) em análise.

Prosseguimos para a tabela dos coeficientes (Tabela 7.6).

Tabela 7.6 – Tabela dos coeficientes.

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0.92250	0.00500	184.50	0.000	
Tempo coz	-0.23750	-0.11875	0.00500	-23.75	0.000	1.00
Agua adic	-0.39000	-0.19500	0.00500	-39.00	0.000	1.00
Farinha	-0.08750	-0.04375	0.00500	-8.75	0.000	1.00
Tempo coz*Agua adic	0.10750	0.05375	0.00500	10.75	0.000	1.00
Tempo coz*Farinha	0.09500	0.04750	0.00500	9.50	0.000	1.00
Agua adic*Farinha	-0.03750	-0.01875	0.00500	-3.75	0.006	1.00
Tempo coz*Agua adic*Farinha	-0.12500	-0.06250	0.00500	-12.50	0.000	1.00

De notar que para cada efeito e suas interações corresponde um coeficiente (*Coef*) e um efeito (*Effect*), sendo o valor do efeito, o dobro do respectivo coeficiente. Pela análise da Tabela 7.6 podemos observar que os maiores valores absolutos dos coeficientes (*Coef*) pertencem, por ordem decrescente ao factor *Agua adic* (B) (-0.1950), seguido por *Tempo coz* (A) (-0.11875), estando em terceiro lugar interação entre os factores ABC (-0.06250). Isto significa que o factor B tem o maior efeito sobre a quantidade de finos produzida ao longo da manufactura dos flocos de trigo. O sinal negativo significa que quanto mais baixo for este factor (água adicionada - B) mais fortemente influenciará a resposta, ou seja, maior será o teor de finos produzidos. O mesmo se passa com o factor A – tempo de cozedura que também tem um coeficiente com sinal negativo, e com a interação dos factores ABC. De notar que o erro standard de todos os coeficientes (*SE coef*) é inferior ao nosso $\alpha = 0.05$, pelo que indica que todos os coeficientes são estatisticamente significativos. Esta análise indica-nos o poder explicativo dos factores e das suas interações.

O valor do VIF (*Variance Inflation Factor*) dá-nos uma indicação da possível existência de multicolinearidade entre os factores em estudo. O VIF informa sobre o grau em que cada variável exógena é explicada por outras variáveis exógenas, sendo considerado como o limite acima do qual existe multicolinearidade $VIF > 10$. Quanto mais próximo de zero estiver este valor menor será a multicolinearidade. No nosso caso temos $VIF = 1.00$ para todos os factores em estudo, ou seja, não se verifica multicolinearidade entre eles.

7.3.5 Modelo de regressão

A regressão linear múltipla (RLM) tem como objectivo estudar a associação entre uma variável dependente métrica, ou podendo ser representada por índices, (Y), e um conjunto de variáveis independentes ou explicativas (métricas), mediante o ajustamento de um modelo linear.

Esta é uma técnica estatística que determina uma combinação linear de variáveis explicativas (equação de regressão através do métodos dos mínimos quadrados) permitindo descrever a sua relação com uma variável dependente através de de uma estrutura linear, assim como prever valores da variável dependente a partir do conhecimento dos valores das variáveis independentes ou explicativas.

A RLM pode ser definida pelo seguinte modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Eq. 1.1})$$

sendo:

Y = variável dependente ou resposta (neste caso a percentagem de finos)

β_0 = constante, intercepção da recta com o eixo dos y

$X_1 \dots X_p$ = variáveis independentes ou explicativas (no nosso caso, os factores A, B e C)

ε_i = Resíduo

Os estimadores dos parâmetros do modelo de regressão correspondem a:

Regression Equation in Uncoded Units

```
Finos(%) = 97.13 - 1.2794 Tempo coz - 1.1461 Agua adic - 0.7855 Farinha
          + 0.01526 Tempo coz*Agua adic + 0.010750 Tempo coz*Farinha
          + 0.009479 Agua adic*Farinha - 0.000130 Tempo coz*Agua adic*Farinha
```

A interpretação do valor relacionado com cada variável resposta é simples. Quando o tempo de cozedura diminui um minuto, a percentagem de finos piora (neste caso aumenta) 1.2794. No entanto temos de ter em atenção que existe também efeitos de interacção onde esta variável também entra.

7.3.6 Representação gráfica dos efeitos da DOE

A análise das tabelas anteriores pode ser visualizada nos gráficos 7.3 e 7.4.

Existe uma interacção entre dois factores quando o efeito de um deles na resposta (Y) depende do nível a que o outro factor está. Como se pode observar no gráfico 7.3, a interacção mais visível entre as apresentadas é a que corresponde aos factores AB (já assinalado no gráfico Pareto atrás apresentado). Segue-se as interacções AC e BC pouco representativas.

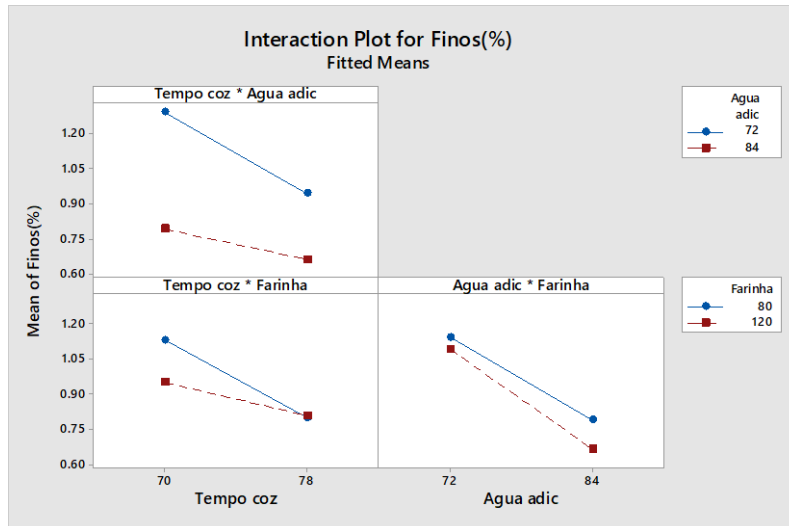


Gráfico 7.3 – Representação gráfica entre as possíveis interacções dos diversos factores A, B e C.

O gráfico dos efeitos principais relativos a cada factor em análise encontra-se no gráfico 7.4.

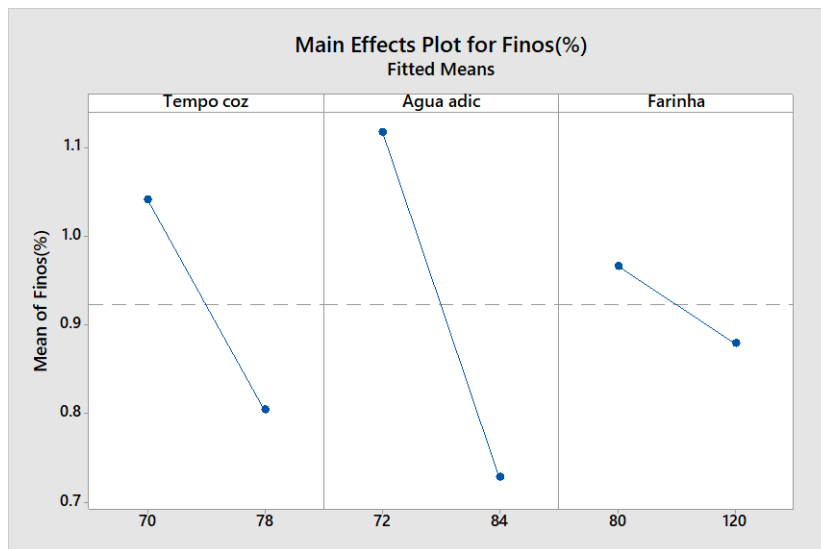


Gráfico 7.4 – Representação gráfica do efeito dos diversos factores A, B e C quando os níveis são alterados.

A sua análise aponta para que, em todos os factores, quando o factor A, B e C decrescem, o efeito na variável resposta, Y (diminuição da % de finos) é mais representativa.

Procurámos analisar qual seria a melhor combinação de *settings* das cozedoras no sentido de obtenção do menor teor de finos. Como conclusão são recomendados os seguintes *settings*:

- Tempo de cozedura: 78 min
- Água adicionada às cozedoras: 84 litros

- Farinha adicionada nas cozedoras: 120 kg

7.3.7 Representação geométrica

A figura 7.3 ilustra a representação geométrica dos dados analisados neste DOE factorial 2³.

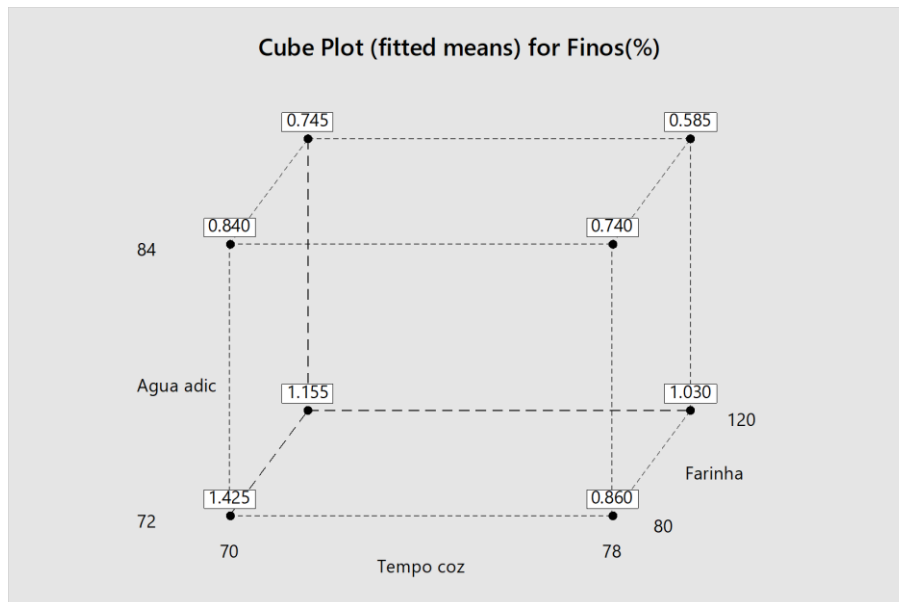


Figura 7.3 - Representação geométrica dos dados analisados neste DOE factorial 2³.

A representação geométrica sob a forma de cubo permite visualizar a relação entre os diversos factores em estudo e a resposta obtida. Pela sua análise facilmente verificamos que a menor teor de finos (0.585%) foi obtida com os valores mais elevados de tempo de cozedura (78 min), água adicionada nas cozedoras (84 L) e teor de farinha adicionada (120 kg) ou seja, os valores de settings recomendados no ponto anterior.

7.3.8 Análise de resíduos

No sentido de validar os pressupostos da análise de variância (resíduos independentes, normalmente distribuídos e com variância constante) foi efectuada uma análise de resíduos. Os resíduos foram calculados pela diferença entre os valores observados e os valores previstos. Os gráficos 7.5, a, b, c, d apresentam os resultados obtidos.

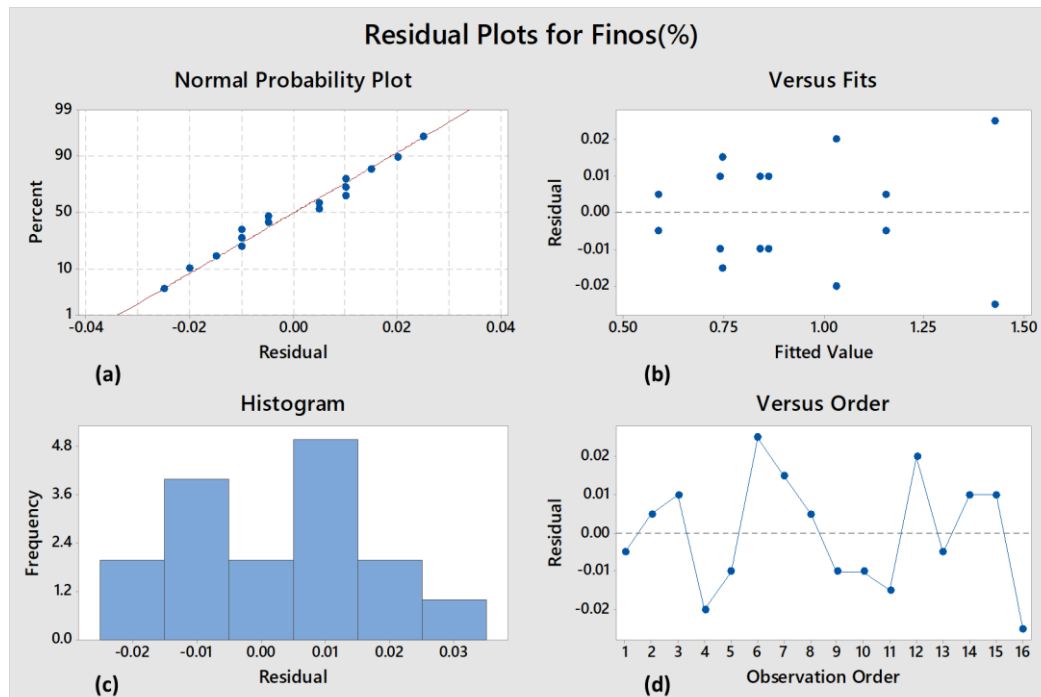


Gráfico 7.5 – Análise de resíduos. (a) – Gráfico de probabilidades de distribuição Normal. (b) – Resíduos *versus* valores previstos. (c) – Histograma dos resíduos. (d) – Resíduos *versus* sequência das experiências.

Os gráficos não parecem indicar problemas graves no que respeita à violação das hipóteses de Normalidade, independência e homogeneidade da variância.

A análise do gráfico 7.5 (a) indica que os resíduos parecem seguir uma linha recta e como tal a sua distribuição é Normal. No entanto o histograma dos resíduos (gráfico 7.5 c) deveria apresentar uma forma de sino mais evidente, típica da distribuição Normal. Os resíduos no gráfico 7.5 (b) encontram-se igualmente e aleatoriamente distribuídos ao longo do eixo do $y = 0$ o que indica variâncias constantes. Os resíduos também parecem não ter problemas eventuais correlações entre eles, pois no gráfico 7.5 (d) estes encontram-se aleatoriamente distribuídos acima e abaixo do eixo $y = 0$.

7.3.9 Análise do impacto da mudança de settings das cozedoras

Ao longo de duas semanas foi monitorizado o teor de finos produzidos, agora com os novos *settings* determinados pela DOE nas cozedoras. Os resultados obtidos encontram-se no gráfico 7.6 abaixo apresentado.



Gráfico 7.6 – Valores da percentagem de finos avaliada diariamente ao longo de 12 dias consecutivos. LSP – Limite Superior de Produção.

Comparando estes resultados apresentados no gráfico 7.6 com os iniciais, apresentados no gráfico 7.1 verificamos uma substancial diferença na redução do teor de finos.

7.4 A metodologia do Planeamento de Experiências aplicada ao secador da massa

7.4.1 Escolha dos factores e dos níveis

Apesar do estudo anterior feito nas cozedoras já ter atingido o resultado pretendido, ou seja, a quantidade de finos produzida ao longo da linha de manufactura dos flocos de trigo inferior a 2%, o grupo de trabalho pretendeu ir mais longe e estudar o secador da massa.

O secador da massa foi um equipamento adquirido, como o próprio nome indica, para secar um pouco a massa. No entanto este equipamento tem apenas a temperatura controlada. A quantidade de vapor e a pressão podem ser alterados, mas estes parâmetros nunca foram testados. O DOE seguinte pretendeu exactamente testar níveis diferentes de temperatura, vapor e pressão e estudar o seu impacto na quantidade de finos produzida ao longo da linha. De salientar que quando este DOE foi realizado, as cozedoras já tinham os *settings* mais adequados, que foram estudados no DOE no ponto 7.3 desta dissertação.

O DOE escolhido foi novamente o planeamento factorial completo, randomizado, com três factores e dois níveis, 2^3 . Esta análise foi replicada duas vezes.

Os factores testados no secador da massa foram os seguintes:

- Quantidade de vapor adicionado (codificado como A)
- Pressão (codificado como B)
- Temperatura (codificado como C)

Os níveis escolhidos para cada factor são apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Enumeração dos dois níveis utilizados para cada factor previamente escolhidos, para se proceder a um DOE completo 2^3 .

Quantidade de vapor adicionado (cv)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
0	0	22
3	2	45

7.4.2 Matriz de planeamento

Novamente foi feita uma matriz de planeamento, em tudo semelhante ao DOE anterior e que corresponde às diversas alterações dos níveis escolhidos de todos os factores em estudo, de uma forma aleatória. Esta matriz encontra-se representado na Tabela 7.8.

O nível de confiança adoptado neste estudo foi de 95%.

Tabela 7.8 – Matriz de planeamento do DOE factorial 2^3 , efectuado em duplicado.

Design Table (randomized)

Run	A	B	C
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	+	+
4	+	+	+
5	+	-	+
6	-	+	-
7	+	-	-
8	-	-	+
9	-	-	+
10	+	-	-
11	+	+	+
12	+	+	-
13	+	+	-
14	-	+	+
15	-	+	-
16	+	-	+

A matriz de planeamento e os resultados obtidos em cada experiências são apresentados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Matriz de planejamento utilizada neste estudo, onde se encontra a variável resposta – percentagem de finos, obtida em cada experiência, segundo uma matriz aleatória.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Vapor	Pressao	Temperatura	Finos (%)
1	1	1	1	0	0	22	0.62
9	2	1	1	0	0	22	0.58
15	3	1	1	0	2	45	2.45
16	4	1	1	3	2	45	4.27
14	5	1	1	3	0	45	3.68
11	6	1	1	0	2	22	2.5
10	7	1	1	3	0	22	3.32
5	8	1	1	0	0	45	3.98
13	9	1	1	0	0	45	4.2
2	10	1	1	3	0	22	3.4
8	11	1	1	3	2	45	4.38
12	12	1	1	3	2	22	3.68
4	13	1	1	3	2	22	3.72
7	14	1	1	0	2	45	2.5
3	15	1	1	0	2	22	2.55
6	16	1	1	3	0	45	3.72

Os resultados obtidos são apresentados nos pontos seguintes. No anexo 2 encontram-se todos os resultados complementares relativos a esta análise.

7.4.3 Análise de variância

A análise de variância encontra-se na Tabela 7.10.

A notação utilizada pelo software Minitab foi a seguinte:

A - Vapor

B - Pressão

C – Temperatura

Tabela 7.10 – Análise de variância para um DOE factorial completo, 2³.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	20.4790	2.92557	610.29	0.000
Linear	3	12.5339	4.17797	871.55	0.000
Vapor	1	7.2765	7.27651	1517.92	0.000
Pressao	1	0.4064	0.40641	84.78	0.000
Temperatura	1	4.8510	4.85101	1011.94	0.000
2-Way Interactions	3	4.2874	1.42914	298.13	0.000
Vapor*Pressao	1	0.1073	0.10726	22.37	0.001
Vapor*Temperatura	1	1.5314	1.53141	319.46	0.000
Pressao*Temperatura	1	2.6488	2.64876	552.54	0.000
3-Way Interactions	1	3.6577	3.65766	763.01	0.000
Vapor*Pressao*Temperatura	1	3.6577	3.65766	763.01	0.000
Error	8	0.0384	0.00479		
Total	15	20.5173			

A análise de variância apresenta os valores mais altos da soma dos quadrados soma dos quadrados (*Adj SS*) para o factor Vapor - A (7.2765), seguido pelo factor Temperatura – B (4.8510), sendo estes os dois factores que mais afectam significamente a produção de finos.

O gráfico 7.6 apresenta uma análise sob a forma de Pareto que ilustra a análise apresentada.

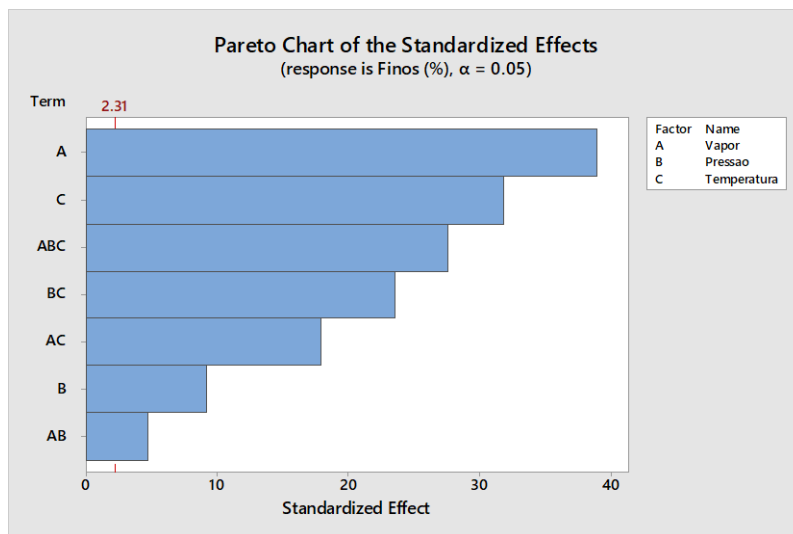


Gráfico 7.6 – Gráfico Pareto dos efeitos estandardizados para a variável resposta: efeito no teor de finos produzidos ao longo do processo de manufactura dos flocos de trigo.

No entanto, em terceiro lugar aparece a interacção entre os três factores em estudo, que também tem alguma influência na variável resposta.

7.4.4 Qualidade de ajustamento do modelo e análise dos coeficientes

O *F-value* tem também valores elevados, respectivamente de 1517.92, 1011.94 e 763.01, para os factores Vapor e Temperatura. Os valores de *p* (*p-value*) são todos tendencialmente semelhantes a zero, ou seja, inferiores ao valor de $\alpha = 0.05$, o que indica que estes factores são estatisticamente significativos e têm impacto na formação de finos ao longo da linha de processamento dos flocos de trigo.

Para avaliar a qualidade do ajustamento do modelo recorreu-se novamente ao R^2 e ao R^2 ajustado. Os valores encontrados para o nosso modelo encontram-se na Tabela 7.11.

Tabela 7. 11 - Valores de R^2 e R^2 ajustado do nosso modelo.

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0692369	99.81%	99.65%	99.25%

Para os dados relativos à nossa variável resposta verificamos que R^2 e R^2 ajustado são respectivamente de 99.81% e 99.65%, ou seja muito próximo de 100%. Deste modo, a a variação observada na nossa variável resposta é muito próximo de 100% em ambos os casos para as variáveis predictoras (factores) em análise.

Proseguimos para a tabela dos coeficientes (Tabela 7.12).

Tabela 7.12 – Tabela dos coeficientes.

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		3.0969	0.0173	178.91	0.000	
Vapor	1.3488	0.6744	0.0173	38.96	0.000	1.00
Pressao	0.3188	0.1594	0.0173	9.21	0.000	1.00
Temperatura	1.1013	0.5506	0.0173	31.81	0.000	1.00
Vapor*Pressao	0.1638	0.0819	0.0173	4.73	0.001	1.00
Vapor*Temperatura	-0.6188	-0.3094	0.0173	-17.87	0.000	1.00
Pressao*Temperatura	-0.8138	-0.4069	0.0173	-23.51	0.000	1.00
Vapor*Pressao*Temperatura	0.9563	0.4781	0.0173	27.62	0.000	1.00

Pela análise da Tabela 7.12 podemos observar que os maiores valores absolutos dos coeficientes (*Coef*) pertencem, por ordem decrescente ao factor *Vapor* (A) (0.6744) seguido por *Temperatura* (C) (0.5506), estando em terceiro lugar interacção entre os factores ABC (0.4781). Esta análise indica-nos o poder explicativo dos factores e das suas interacções.

O erro standard de todos os coeficientes (*SE coef*) é inferior ao nosso $\alpha = 0.05$, pelo que indica que todos os coeficientes são estatisticamente significativos.

O valor do VIF (*Variance Inflation Factor*) é igual a 1.00 para todos os factores em estudo, ou seja, não se verifica multicolinearidade entre eles.

7.4.5 Modelo de regressão

O modelo de regressão encontrado foi o seguinte:

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{Finos (\%)} = & -2.738 + 1.9243 \text{ Vapor} + 2.6555 \text{ Pressao} + 0.15174 \text{ Temperatura} \\ & - 0.8739 \text{ Vapor*Pressao} - 0.04565 \text{ Vapor*Temperatura} \\ & - 0.07696 \text{ Pressao*Temperatura} \\ & + 0.02772 \text{ Vapor*Pressao*Temperatura} \end{aligned}$$

A interpretação deste modelo de regressão linear múltipla pode ser feita da seguinte maneira: quando o *Vapor* aumenta uma unidade, a percentagem de finos aumenta 1.9243. A interpretação dos outros factores e da sua interacção é feita de semelhante forma.

7.4.6 Representação gráfica dos efeitos do DOE

Passamos para à análise dos gráficos relativos a este estudo (gráficos 7.7 e 7.8).

A representação gráfica dos efeitos, dois a dois e o seu efeito na resposta (Y) é fraca, sendo a mais representativa a interacção *Pressao/Temperatura* (cujo factor na tabela dos coeficientes (-0.4069)).

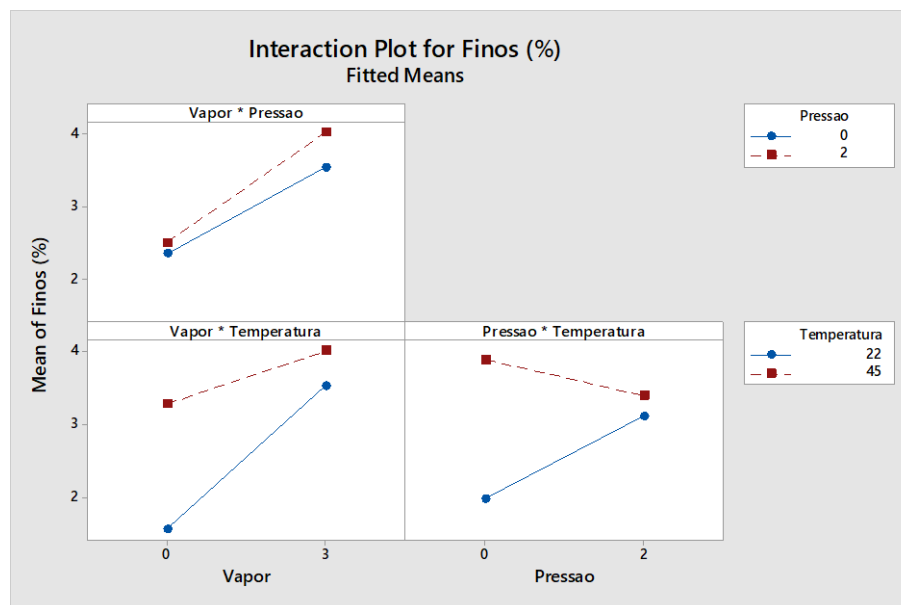


Gráfico 7.7 – Representação gráfica entre as possíveis interacções dos diversos factores A, B e C.

O gráfico dos efeitos principais relativos a cada factor em análise encontra-se no gráfico 7.8.

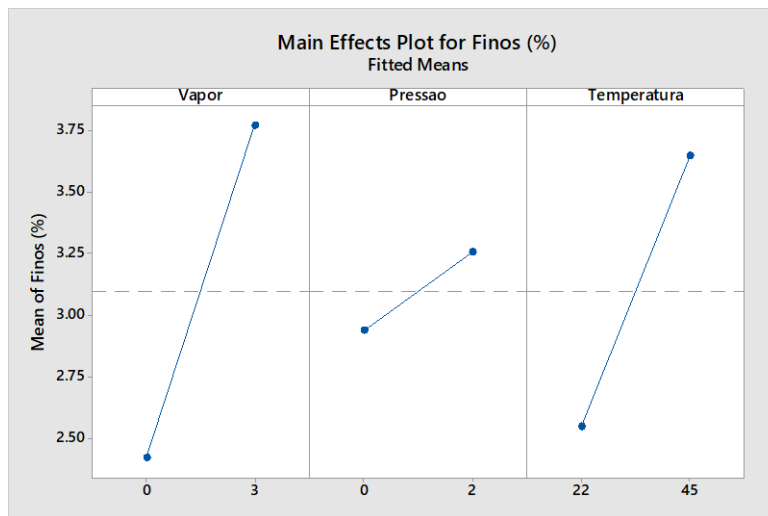


Gráfico 7.8 – Representação gráfica do efeito dos diversos factores A, B e C quando os níveis são alterados.

Esta análise indicou-nos algo muito interessante e que o grupo de trabalho não suspeitava. Esta aponta que todos os factores que agora estão sendo usados são os mais correctos para a menor produção de finos.

Como conclusão são recomendados os seguintes *settings*:

- Vapor = 0
- Pressao = 0
- Temperatura = 22 °C

Ou seja, basicamente o secador da massa está apenas a ser usado como meio de transporte da massa entre as cozedoras e os depósitos com parafusos sem-fim. Este equipamento não deveria existir nesta linha de produção.

Após discussão destes resultados com um grupo multidisciplinar de colaboradores, alguém se recordou que esta linha tinha sido uma cópia de uma outra projectada e implementada pela empresa Γ no continente asiático. Provavelmente a existência de um secador da massa fará todo o sentido nesse local, possivelmente devido às diferenças climáticas (ou outras, que não podemos apontar, por total desconhecimento desta linha), mas não tem nenhuma utilidade no local onde se situa a empresa Γ .

7.4.7 Representação geométrica

A figura 7.4 ilustra a representação geométrica dos dados analisados neste DOE factorial 2^3 .

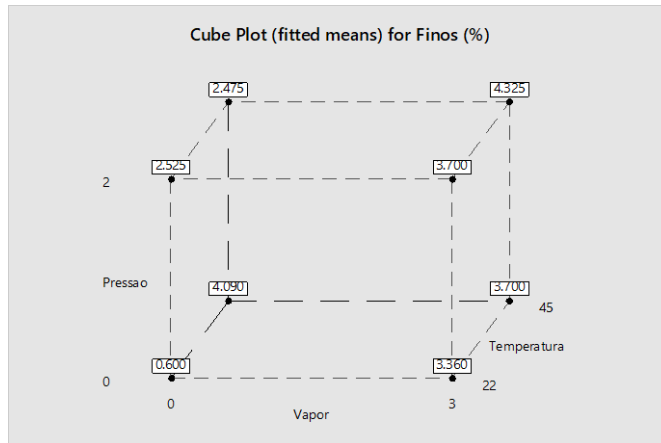


Figura 7.4 - Representação geométrica dos dados analisados neste DOE factorial 2³.

A representação geométrica sob a forma de cubo permite visualizar que o menor teor de finos (0.60%) é obtido quando o *Vapor* e a *Pressão* estão desligados, e a temperatura é genericamente a ambiente (22 °C)

7.4.8 Análise de resíduos

Tal como foi efectuado no DOE anterior, os pressupostos da análise de variância foram validados através da análise de resíduos. Os resíduos foram calculados pela diferença entre os valores observados e os valores previstos. Os gráficos 7.9, a, b, c, d apresentam os resultados obtidos.

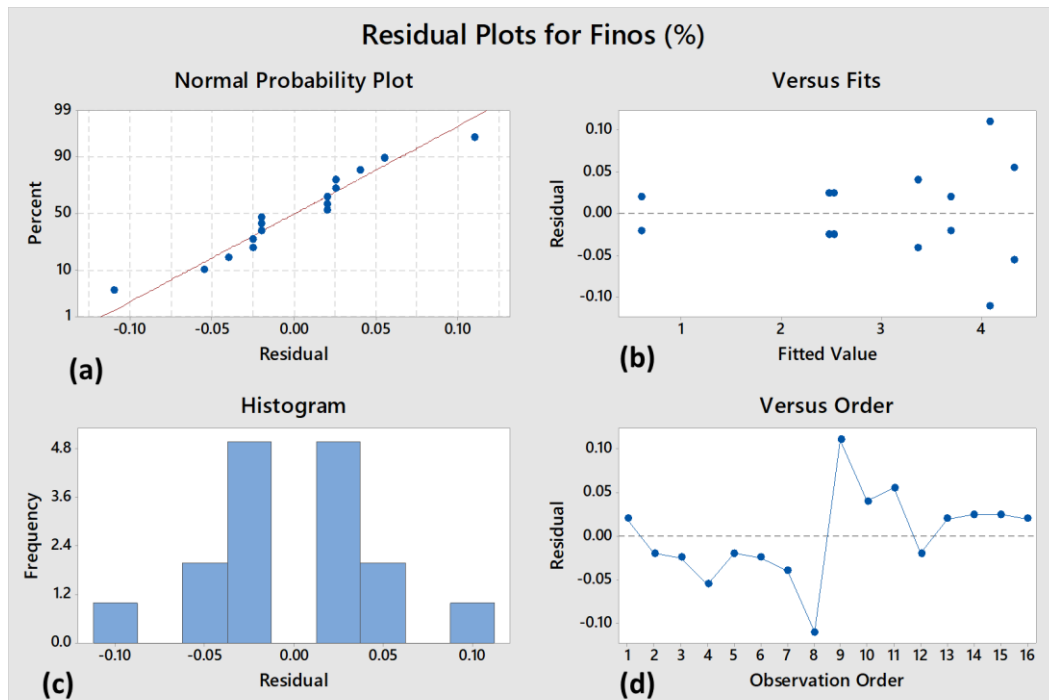


Gráfico 7.9 – Análise de resíduos. (a) – Gráfico de probabilidades de distribuição Normal. (b) – Resíduos versus valores estimados. (c) – Histograma dos resíduos. (d) – Resíduos versus sequência das experiências.

Os gráficos não parecem indicar problemas graves no que respeita à violação das hipóteses de Normalidade, independência e homogeneidade da variância.

A análise do gráfico 7.9 (a) indica que os resíduos parecem seguir uma linha recta e como tal a sua distribuição é Normal. O histograma dos resíduos (gráfico 7.9 c) apresenta a forma de sino, típica da distribuição Normal. Os resíduos no gráfico 7.9 (b) encontram-se igualmente e aleatoriamente distribuídos ao longo do eixo do $y = 0$ o que indica variâncias constantes. Os resíduos também parecem não ter problemas eventuais correlações entre eles, pois no gráfico 7.9 (d) estes encontram-se aleatoriamente distribuídos acima e abaixo do eixo $y = 0$.

8. Capabilidade e performance do processo

8.1. Introdução

O conceito de capabilidade de um processo é extremamente importante em unidades de produção industriais pois “traduz em números” o quanto os seus processos de fabrico conseguem ou não produzir determinado produto dentro das especificações previamente definidas.

Os responsáveis pela produção e controlo de qualidade precisam de saber exactamente do que as suas máquinas conseguem ou não produzir (estudos de capabilidade e performance dos processos), qual a sua variabilidade e ainda as suas causas especiais de variação. As causas comuns e especiais de variação que são detectadas pelas cartas de controlo, não fazem parte do âmbito desta dissertação. As cartas de controlo e os seus limites são previamente definidos pelo departamento de Investigação e Desenvolvimento da empresa Γ , e a produção recebe-as como um dado adquirido (apesar de as podermos questionar ao longo do tempo, se detectarmos grande quantidade de produto não conforme a ser manufacturado, e pelo qual não conseguimos ter controlo, devido ao facto de existir maquinaria muito obsoleta com grande variabilidade/desafinação).

A carta de controlo utilizada para o estudo da quantidade de finos no produto final (produto já embalado, empacotado e pronto para ser paletizado) foi a já apresentada no Cap 5, Tabela 5.1. No entanto no nosso sistema de informação interno, onde são reportados todos os resultados das análises feitas ao longo da linha de processamento, os limites são ligeiramente diferentes. Estes encontram-se descritos na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Limites usados na carta de controlo para o teor de finos em flocos de trigo, existente no Sistema de informação interno da empresa Γ , relativamente ao produto final embalado e pronto para ser paletizado.

Obviamente, o objectivo que se pretende atingir é ter o nosso produto final, as embalagens de flocos de trigo, com o menor teor possível de finos. Como tal, ao analisar os índice de capacidade e de performance do processo teremos de ter este factor em consideração.

Os dados utilizados neste estudo foram retirados directamente do sistema de informação disponível e a sua análise foi feita tendo em consideração os limites inseridos no sistema.

De salientar também que todos os dados foram adquiridos tendo em atenção apenas causas normais de variação. Antes da obtenção destes dados, quer antes do DOE, quer depois, as máquinas mais críticas foram submetidas a uma inspecção detalhada pelo departamento de manutenção. Nas

alturas em que o depósito de espera para empacotamento esteve cheio (devido a paragem das máquinas de embalagem) também não foram retirados quaisquer dados.

8.2 Análise da capacidade e performance do processo de manufactura de flocos de trigo antes de se ter efectuado o estudo de Planeamento de Experiências

Os índices de capacidade e performance permitem medir a capacidade de um processo ou de uma determinada máquina para produzir um determinado produto dentro de uma determinada tolerância (que nesta dissertação denominamos por “especificação”. O facto da capacidade e performance de um processo se traduzirem por um número permite-nos efectuar comparações. Por exemplo, quando efectuamos uma determinada alteração num processo, este índice permite-nos saber se melhoramos ou não o nosso processo, e qual o impacto dessa melhoria (Yang, He, Yin, 2021).

Para a análise da capacidade e performance de um processo é necessário que dois pressupostos estejam presentes:

- O processo em estudo tem de estar sob controlo, ou seja, tem de se analisar as cartas de controlo para verificar que apenas existem causas normais de variação;
- Os dados têm de ter uma distribuição Normal. Caso não ocorra esta permissão, pode tentar-se transformar os dados com a transformação Box-Cox ou Johnson (Pereira e Requeijo, 2008).

8.2.1 Verificação dos pressupostos

Uma embalagem de flocos de trigo foi retirada hora a hora, entre os dias 2 a 25 Maio do ano T+1. Isto significa que os nossos resultados são apenas estimativas pontuais relativas a este intervalo de tempo. Esta embalagem foi aberta e colocada num equipamento vibratório com dois tipos de crivos: 3.35mm e 8 mm de abertura. Após 1 min de agitação, o teor de finos de cada crivo foi pesado e os resultados expressos em percentagem. O número total de amostras independentes foi de 65.

Para melhor se perceber o processo, apresenta-se duas fotos que ilustram o método (Figura 8.1).

Figura 8.1 – Processo de medição do teor de finos no produto final já embalado.



Os resultados obtidos para a verificação dos pressupostos relativamente ao crivo de 3.35mm e de 8mm, são apresentados nos gráficos seguintes.

A) Resultados obtidos para os dados obtidos no crivo de 3.35mm

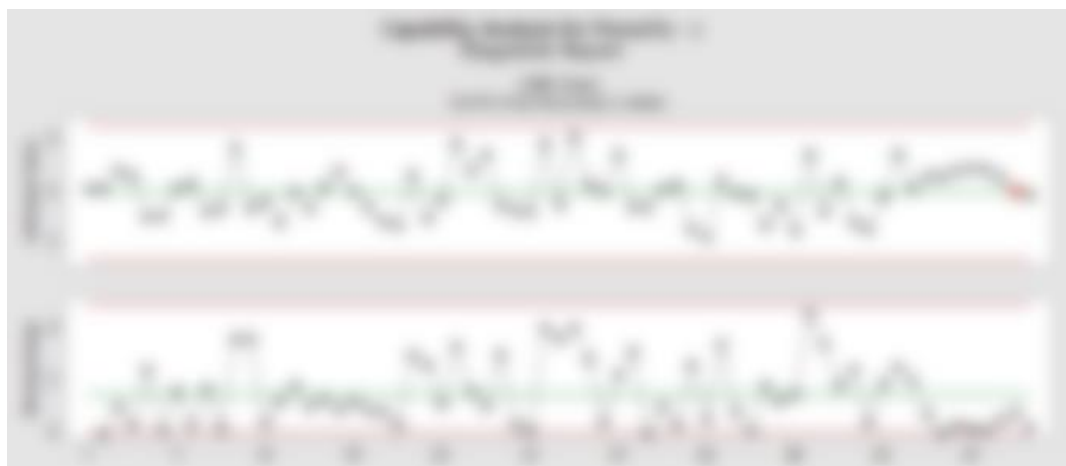


Gráfico 8.1 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 3.35mm.

Devido ao facto de apenas termos observações individuais, não analisamos uma carta de medias \bar{x} , mas sim de leituras individuais (carta I-MR). Pela análise quer da carta I-MR não se verifica

nenhum ponto fora dos limites das cartas de controlo. Como tal podemos afirmar que no espaço de tempo em estudo, o processo se encontrava sob controlo estatístico.



Gráfico 8.2 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

B) Resultados obtidos para os dados obtidos no crivo de 8mm

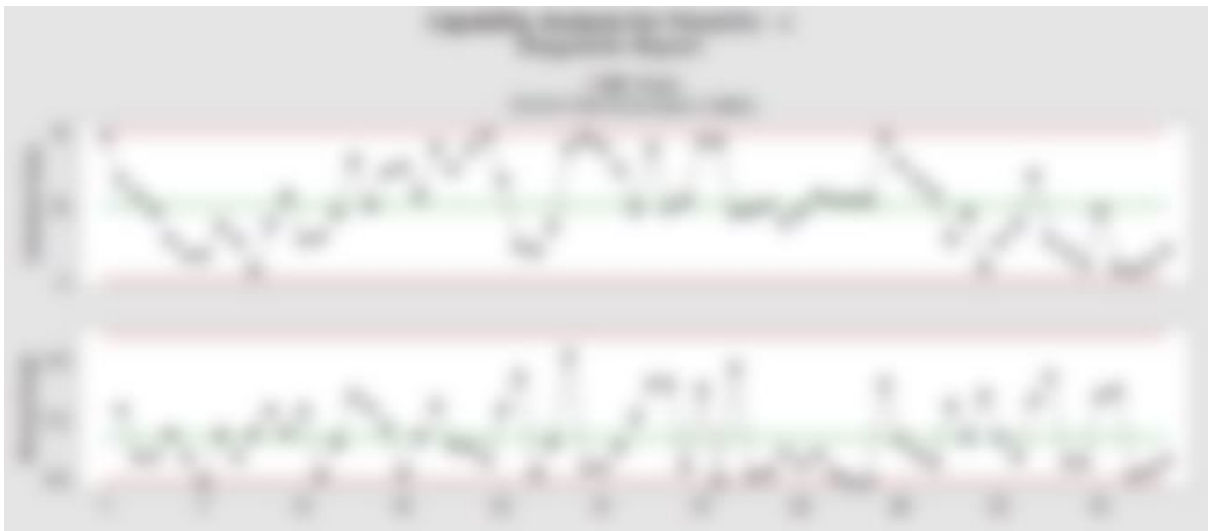


Gráfico 8.3 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 8mm.



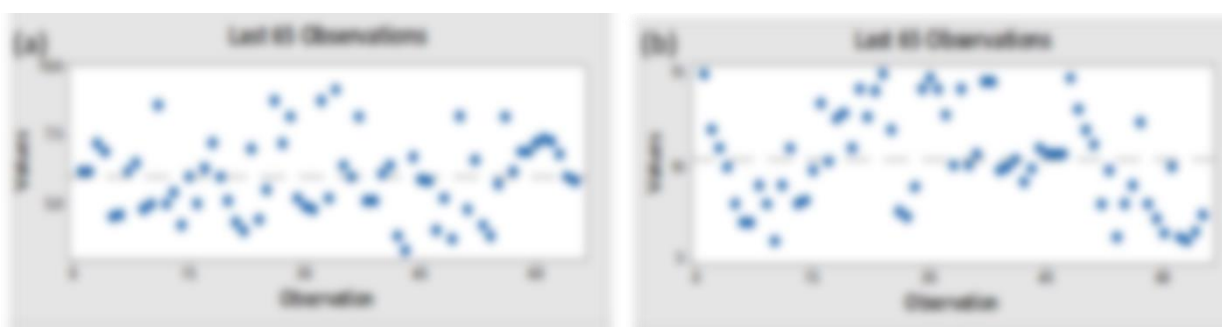
Gráfico

8.4 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

A análise anteriormente efectuada para o crivo de 3.35mm também se aplica ao crivo de 8mm. Todos os dados usados neste estudo se encontram-se dentro das cartas de controlo (Gráfico 8.3 e processo sob controlo estatístico), e seguem uma distribuição Normal (Gráfico 8.4).

8.2.2 Análise dos dados distribuídos ao longo da média

Com o objectivo de verificar se os dados obtidos se encontram dispersos aleatoriamente ao longo das observações e também para visualizar eventuais outliers, foram efectuados os gráficos 8.5 (a – para o crivo de 3.5 mm e b – para o crivo de 8 mm).



Gráficos 8.5 – Dados observados ao longo da média. (a) – para o crivo de 3.5 mm e (b) – para o crivo de 8 mm).

Intuitivamente, a visualização dos gráficos 8.5, (a) e (b) sugere que os dados se encontram aleatoriamente e simetricamente distribuídos ao longo da média para ambos os tipos de crivos.

8.2.3 Histograma das capacidades

O histograma das capacidades pretende ser outra forma de visualização dos dados e da sua distribuição Normal (em forma de sino). Os gráficos 8.6 (a) e (b) apresentam os resultados obtidos.



Gráficos 8.6 – Histograma das capacidades para (a) – crivo de 3.35mm e (b) – crivo de 8mm.

Ambos os gráficos apresentam a forma típica de sino, característica da distribuição Normal.

8.2.4 Análise da capacidade e performance do processo

A análise da capacidade e da performance é feita através de índices: C_p e C_{pk} para a capacidade do processo (o melhor que a linha de produção pode fazer nas condições em que se encontra), e ainda de P_p e P_{pk} (a performance da linha neste momento). O índice C_{pm} pretende incorporar num só índice a dispersão e a centragem dos dados ao longo do valor *target*.



Gráficos 8.7 – Capacidade e performance do processo para os crivos de 3.35mm (a) e de 8mm (b).

Pela análise dos índices C_p e C_{pk} consideramos como um processo com boa capacidade quando o seu $C_p > 1.33$. No entanto, no caso em estudo gostaríamos de ter o valor C_{pk} descentrado para a esquerda, ou seja o mais perto possível de zero. Os resultados obtidos para o crivo de 3.35mm foram respectivamente para C_p e C_{pk} de 1.26 e 1.01, e para o crivo de 8mm, de 1.51 e 0.92. Estes resultados apontam para que os finos se encontram dentro da tolerância exigida para a sua percentage relacionada com cada um dos crivos. No entanto os resultados obtidos em ambos os crivos mostram que se situam sobretudo entre o valor target e o LSP (quando pretendemos o inverso).

A análise dos índices P_p e P_{pk} indicam-nos a performance da linha no momento em que os dados foram recolhidos. Os resultados obtidos para índices P_p e P_{pk} , foram respectivamente para o crivo de 3.35mm de 1.18 e 0.95, e para o crivo de 8mm, de 0.94 e 0.57. Estes valores revelam que no crivo de 3.35mm os valores se encontram dentro da tolerância, apesar de se encontrarem mais entre o target e o LSP. No entanto, no crivo de 8mm o valor de P_p é inferior a 1, indicando que estamos a produzir flocos de trigo fora da especificação para este produto.

Os valores de C_{pm} são de 0.55 e 0.39, respectivamente para os crivos de 3.35mm e de 8mm, bastante inferiores a 1.

8.3 Análise da capacidade e performance do processo de manufactura de flocos de trigo após se ter efectuado o estudo de Planeamento de Experiências

8.3.1 Verificação dos pressupostos

Tal como anteriormente, iremos verificar se o processo se encontra sob controlo estatístico, isto é, se todos os pontos nas cartas de controlo se encontram dentro dos limites (para o gráficos I-MR) e ainda se os dados têm uma distribuição Normal. Esta verificação foi novamente feita para os dois tipos de crivos.

A) Resultados obtidos para os dados obtidos no crivo de 3.35mm

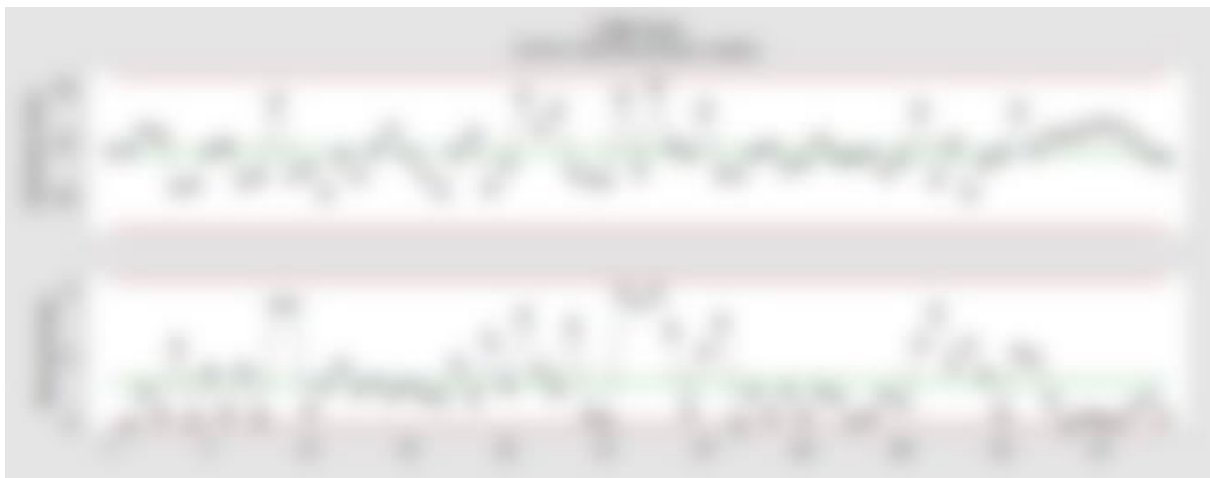


Gráfico 8.8 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 3.35mm.

Pela análise do gráficos 8.8, que na carta I-MR não se verifica nenhum ponto fora dos limites das cartas de controlo. Como tal podemos afirmar que no espaço de tempo em estudo, o processo se encontrava sob controlo estatístico.



Gráfico 8.9 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

Os gráficos 8.9 (a) e (b) que os dados usados neste estudo seguem uma distribuição Normal.

Como tal, os dados relativos ao crivo de 3.35mm obdecem aos pressupostos para um estudo de capacidade.

B) Resultados obtidos para os dados obtidos no crivo de 8mm

Os resultados obtidos pela análise dos dados relativos ao crivo de 8mm são apresentados nos gráficos 8.10 e 8.11. As considerações feitas para o crivo de 3.35mm, são as mesmas para o crivo de 8mm.

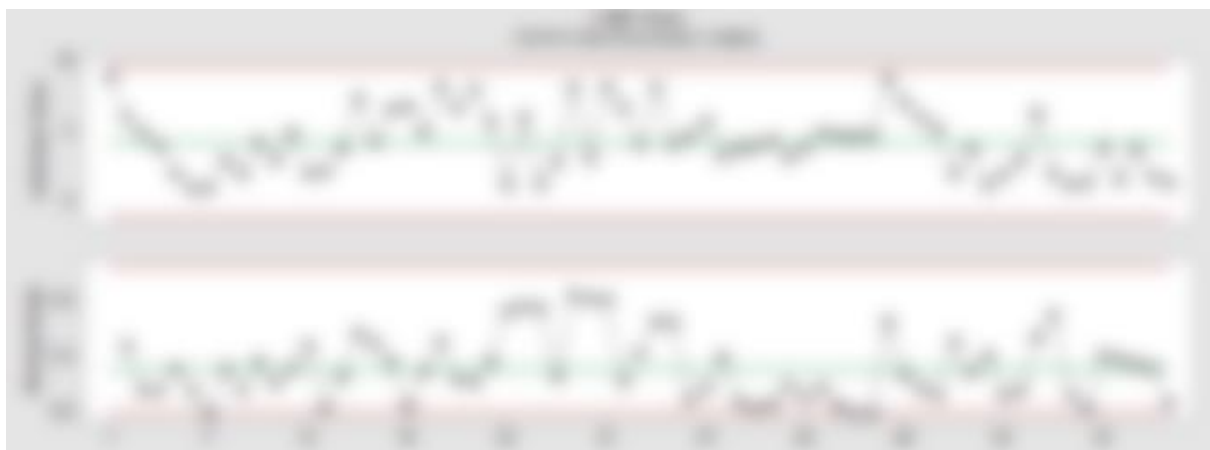


Gráfico 8.10 – Carta I-MR para os dados obtidos no crivo de 8mm.



Gráfico 8.11 – Verificação do pressuposto da distribuição Normal para os dados obtidos no crivo de 3.35mm. (a) – verifica-se o pressuposto de distribuição Normal pois todos os pontos seguem a linha recta do gráfico apresentado, e passaram o teste de Anderson-Darling. (b) – Verifica-se também que os dados além de terem uma distribuição Normal se encontram dentro de um nível de confiança de 95%.

Os dados usados neste estudo se encontram-se dentro das cartas de controlo (Gráfico 8.10 e processo sob controlo estatístico), e seguem uma distribuição Normal (Gráfico 8.11).

8.3.2 Análise dos dados distribuídos ao longo da média

Os gráficos 8.12 (a) e (b) apresentam os dados obtidos nos dois tipos de crivos, ao longo da média.



Gráficos 8.12 – Dados observados ao longo da média. (a) - para o crivo de 3.5 mm e (b) – para o crivo de 8 mm.

Nos gráficos 8.12, (a) e (b) os dados encontram-se aleatoriamente e simetricamente dispersos ao longo da média em ambos os tipos de crivos.

8.3.3 Histograma das capacidades

O histograma das capacidades é apresentado nos gráficos 8.13 (a) e (b) para ambos os tipos de crivos.



Gráficos 8.13 – Histograma das capacidades para (a) – crivo de 3.35mm e (b) – crivo de 8mm.

Ambos os gráficos apresentam a forma típica de sino, característica da distribuição Normal.

8.3.4 Análise da capacidade e performance do processo

Possivelmente, enfatizamos que esta análise é uma das que mais se destaca pelo seu impacto. Será neste ponto que vamos verificar se os resultados de capacidade apontam ou não para uma melhoria do processo, ou seja, se com os novos *settings* nas cozedoras conseguimos realmente diminuir o teor de finos nas embalagens de flocos de trigo.

O gráfico 8.14 apresenta os resultados após a alteração dos *settings* das cozedoras.



Gráficos 8.14 – Capacidade e performance do processo para os crivos de 3.35mm (a) e de 8mm (b) após alteração dos settings das cozedoras.

Para melhor resumir os resultados obtidos apresentamos a Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Resumo dos índices de capacidade, performance obtidos em ambos os tipos de crivos, antes e depois da alteração dos *settings* das cozedoras, em resultado do DOE já abordado no capítulo 7.

A) Análise de dados dos crivos de 3.35mm

Pela análise dos índices de capacidade C_p verificamos que depois da alteração dos *settings*, este índice melhorou, passando de 1.26 para 1.41 (considera-se um processo com boa capacidade quando este índice é igual ou superior a 1.33). O índice C_{pk} que num processo “normal” gostaríamos que fosse igual ou superior a 1.33, neste caso queremos o processo desfasado e com a distribuição de dados o mais possível próximo de zero (queremos o teor mais baixo possível de finos dentro das caixas de flocos). Este caso aconteceu. O índice C_{pk} passou de 1.01 para 0.61, ou seja, melhorou.

Passando para a análise da performance do processo, verificamos que o índice P_p passou de 1.18 para 1.36 (ou seja a performance do processo melhorou), e o índice P_{pk} passou de 0.95 para 0.81. Ambos os índices melhoraram com os novos *settings* das cozedoras.

B) Análise de dados dos crivos de 8mm

Os índices de capacidade C_p verificamos que depois da alteração dos *settings*, diminuiu, passando de 1.51 para 1.4 (ainda um processo com boa capacidade). O índice C_{pk} O índice C_{pk} passou de 1.92 para 0.81, ou seja, melhorou também neste caso, pois o processo encontra-se desfasado mais para a direcção da diminuição do teor de finos.

A análise da performance do processo, indica que o índice P_p passou de 0.94 para 1.12 (ou seja a performance do processo melhorou), mas o índice P_{pk} passou de 0.57 para 0.65. Este ultimo índice indica que a distribuição dos dados relativamente aos finos no crivo de 8mm se encontra mais próximo do valor *target* (6% colocado no caso em estudo) do que próximo de zero, que é o que se pretende.

Os valores de C_{pm} melhoraram em ambos os crivos, após a alteração dos *settings* das cozedoras.

Em resumo, este estudo aponta para uma melhoria da capacidade e da performance do processo.

9. Considerações finais

Este último capítulo da dissertação pretende fazer um resumo do trabalho efectuado e dos objectivos que se pretenderam atingir, bem como efectuar uma súmula dos resultados.

As aprendizagens e competências adquiridas ao longo deste trabalho, as suas limitações e possíveis trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos dentro desta temática numa tentativa de melhoria contínua do sistema, dando por concluído este trabalho de dissertação.

9.1 Sinopse do trabalho desenvolvido

As metodologias estatísticas – Planeamento de Experiências (DOE – Design of Experiments) e Controlo Estatístico do Processo (CEP) foram exploradas intensamente numa aplicação a dados reais.

A análise dos dados foi efectuada através dos *softwares* para análise estatística, Minitab e SPSS.

Este trabalho foi efectuado na empresa Γ , e iniciou-se devido ao facto de se ter detectado um número anormalmente elevado de reclamações no produto “flocos de trigo”.

As reclamações eram devido à fraca aparência dos flocos de trigo, contendo as embalagens uma elevada quantidade de flocos partidos, esmigalhados, ou mesmo reduzidos a pó, que nesta dissertação denominamos de “finos”.

Na linha de produção também se começou a detectar uma grande quantidade de finos recolhidos ao longo do processo. No entanto esta recolha de finos não era pesada/avaliada de forma sistemática, de forma que o seu cálculo nunca estava correcto e não permitia uma visão objectiva e quantificada do problema.

A receita dos flocos de trigo foi alterada no final do ano T. Após se ter iniciado a produção contínua desta nova receita, verificou-se que as perdas de produto sob a forma de finos, eram muito mais elevadas do que na receita anterior.

Com esta alteração, os flocos apresentavam-se mais frágeis, mais facilmente desenvolviam aglomerados nos moinhos, e o produto tinha visivelmente menor qualidade relativa à sua aparência.

Efectuou-se um estudo dos factores que um grupo multidisciplinar entendeu como poderem ser os mais determinantes, no equipamento mais crítico para a qualidade da massa dos flocos de trigo. Este grupo seleccionou dois equipamentos: as cozedoras e o secador da massa dos flocos.

Na tentativa de se escolher os melhores *settings* (parâmetros) de cada um dos equipamentos foi aplicada uma técnica estatística designada por Planeamento de Experiências. Foi escolhido um DOE aleatório, factorial 2^3 em ambos os casos, tendo sido replicado duas vezes.

Após se ter encontrado os *settings* que, com os factores estudados, contribuíram para a menor quantidade de finos formada ao longo do processo de manufactura dos flocos de trigo, foram feitos estudos de capacidade do processo.

Os estudos de capacidade do processo pretenderam quantificar, no curto espaço de tempo em que foram retirados os dados, se a capacidade e a performance do processo melhoraram com a introdução dos novos *settings* nas cozedoras.

9.2 Principais resultados

Os resultados obtidos com os DOE foram muito interessantes e inesperados. Antes deste trabalho, os técnicos de linha mais experientes iam alterando os *settings* das cozedoras da forma que achavam que melhor ajudava a fluir a massa pelos diversos equipamentos, sem se preocuparem muito com a quantidade de finos que se produzia ao longo do processo.

A massa nos moinhos não pode estar muito seca, pois torna-se quebradiça e os flocos saem com diminutas dimensões, que serão rejeitados na análise sensorial que um painel de provadores treinado faz de 4 em 4 horas.

A massa também não pode estar muito húmida pois “agarra-se” aos rolos dos moinhos e forma agregados de enormes dimensões que obrigam a parar todo o processo, enviar tudo o que está em linha para o lixo, e recomeçar a cozer de novo.

Na realidade, os *settings* das cozedoras nunca despertaram grande atenção por parte do *staff* que faz parte da produção.

Um estudo detalhado e sistemático permitiu a escolha dos parâmetros (denominados de factores) das cozedoras, equipamento este que o grupo de trabalho achou como sendo um dos principais influenciadores do teor de finos.

Os factores que estudados nas cozedoras foram os seguintes:

- tempo de cozedura da massa;
- a quantidade de água adicionada;
- a quantidade de farinha de trigo adicionada.

Para cada um destes factores foram seleccionados dois níveis, que na altura se achou que poderiam conduzir à produção de diferentes quantidades de finos.

Como conclusão foram recomendados os seguintes *settings*:

- Tempo de cozedura: 78 min
- Água adicionada às cozedoras: 84 litros
- Farinha adicionada nas cozedoras: 120 kg

O segundo equipamento estudado foi o secador de massa. Este equipamento encontra-se na realidade desligado e apenas trabalha como cinta transportadora, que permite o movimento da massa das cozedoras para os depósitos com parafusos sem-fim.

Na altura, o grupo de trabalho achou que este equipamento poderia eventualmente ter um contributo positivo para a diminuição da quantidade de finos. Novamente se fez um DOE, semelhante ao das cozedoras.

Os factores seleccionados foram os seguintes:

- Quantidade de vapor adicionado
- Pressão
- Temperatura

Esta análise indicou-nos algo muito interessante e que o grupo de trabalho não esperava. Os factores que apontam ser os mais indicados para a menor produção de finos são:

- Vapor = 0
- Pressão = 0
- Temperatura = 22 °C

Em resumo, o secador deve continuar desligado.

A pergunta óbvia seguinte é a razão pela qual temos um equipamento que não contribui em nada para a produção dos flocos de trigo. A equipa de projectos respondeu à nossa questão: a linha é uma cópia integral de uma outra linha montada pela empresa no continente asiático. Este equipamento faz todo o sentido nesse local, mas não faz no país em que esta linha se encontra.

Após serem encontrados os *settings* mais adequados com os factores inicialmente escolhidos, o grupo de trabalho pretendeu saber se a capacidade e a performance da linha aumentou e quanto aumentou. Para tal foram estudadas a capacidade e performance do processo antes e depois da introdução dos novos *settings* nas cozedoras.

Estes estudos apontaram para uma melhoria significativa da capacidade e da performance da linha de processamento.

9.3 As aprendizagens e competências adquiridas

Este trabalho talvez seja um pouco diferente daqueles que normalmente são alvo de estudo e interesse por parte de alunos do Mestrado em Estatística e Biometria da Universidade Aberta. A resolução de problemas reais que as empresas enfrentam deve de ser feita através de uma abordagem técnica e metódica. Raramente isso acontece no mundo real, pois as empresas normalmente não têm nos seus colaboradores, os conhecimentos necessários para uma correcta abordagem.

As minhas aprendizagens relativas ao Planeamento de Experiências e ao Controlo Estatístico do Processo, adquiridas ao longo do Mestrado e de seguida, aprofundadas através do tratamento estatístico dos dados deste trabalho, foram muito importantes para a minha vida profissional. A estratégia usada para a solução do problema foi reconhecidamente a correcta para a resolução do problema. O facto de se ter envolvido neste trabalho um grupo multidisciplinar que passou pelos Eng. de Sistemas, Eng. Mecânicos, Investigadores do departamento de Investigação e Desenvolvimento e peritos nos *settings* dos diversos equipamentos, reforçou bastante a minha grande aprendizagem. Todos eles me ensinaram algo que desconhecia acerca da linha de processamento de flocos de trigo.

Outra competência muito importante que eu desenvolvi e que muitas vezes é esquecida, foi a melhoria das minhas “*soft skills*”. O relacionamento com os outros, sobretudo uma estrangeira,

mulher (na empresa Γ cerca de 95% são homens) ter de convencer bastantes pessoas, como chefes de linha e técnicos a fazer experiências com os *settings* de máquinas que poderiam conduzir a produto não conforme, e afectar/diminuir a performance do seu turno, não foi tarefa fácil. Apenas quando começaram a sair os primeiros resultados conseguiu-se ter todo o pessoal da linha envolvido e interessado no desenvolvimento deste trabalho.

9.4 Limitações do estudo, potencialidades da abordagem seguida e trabalhos futuros

Este trabalho abordou o estudo de três factores nas cozedoras e outros tantos no secador da massa de flocos. No entanto no Cap. 5 desta dissertação o grupo de trabalho sugeriu 43 potenciais factores que poderiam influenciar a maior ou menos produção de finos.

A continuação deste estudo deverá envolver outros factores nas cozedoras ou em outras máquinas que não foram testadas, como os moinhos, o secador de pellets e o tostador de flocos.

A variabilidade das matérias-primas tem também de ser estudada antes de entrar em produção, sobretudo o trigo, pois diferentes variedades contêm diferentes teores de proteína, que condicionam uma maior ou menor absorção de água. Ou seja, tem de se verificar e ajustar, caso seja necessário, a quantidade de água nas cozedoras sempre que se muda de variedade de trigo.

Num trabalho futuro recomenda-se o estudo do impacto que estas alterações tiveram nas reclamações. Recordemos que o despoletar deste estudo foi motivado pelas reclamações. Como será a sua evolução ao longo do tempo após se ter efectuado estas alterações? Fica aqui mais este desafio.

Referências bibliográficas

ALBERTO, M. 2013. Planeamento de Experiências e Controlo de Qualidade na Indústria: Revisão e aplicação metodológica. Dissertação apresentada na Universidade Aberta para obtenção do grau de mestre em Matemática, Estatística e Computação. Universidade Aberta. Lisboa.

ALMANSUR, A., SUKARDI, MACHFUD. 2017. Improving Performance of Biscuit Production Process through Lean Six-sigma at PT XYZ. Indonesian Journal of Business and Entrepreneurship, Vol. 3 No. 2, May, 77-89.

ALLEN, P. 2020. Design of experiments for 21st century engineers. Lulu.com publishers.

ANDERSON, M., WHITCOMB, P. 2015. DOE simplified. Practical tools for effective experimentation. 3a Edição. CRC Press.

ANDERSON, M., WHITCOMB, P., Bezener, M. 2018. Formulation simplified. Finding the sweet spot through design and analysis of experiments with mixtures. Routledge.

AOAC INTERNATIONAL. 2000. AOAC Official Method 993.19. Soluble dietary fiber in food and food products. Enzymatic-gravimetric Method (phosphate buffer).

ARECTOUT, A, BOUKHAL, H., CHAKIR, E., CHHAM, E., FERRO-GARCÍA, M., PINERO-GARCÍA, F., AZAHRA, M., MAKHLOUL, M., AZOUGAGH, M., EL YAAKOUBI, H., ZIDOUH, I., EXPOSITO-SU, V., AREZ, F. 2021. Optimization of the n-type HPGe detector parameters using the “design of experiments” technique. Radiation Physics and Chemistry. 189, 1-11.

BERGQUIST, B. 2015. Analysis of an unreplicated 2² factorial experiment performed in a continuous process. Total Quality Management. Vol. 26, No. 10, 1083–1094.

BERNAUD, F E T. RODRIGUES. 2013. Fibra alimentar – Ingestão adequada e efeitos sobre a saúde do metabolismo. *Arq Bras Endocrinol Metab.* 57/6.

BORROR. C.M. 2008. The certified Quality Engineer handbook. 3^a Edição. ASQ Quality Press. Milwaukee, Wisconsin.

BRITT, K.A., RAMÍREZ, B., MISTRETTA, T. 2016. Process monitoring using statistical stability metrics: Applications to biopharmaceutical processes, *Quality Engineering*, Vol 28(2), pages 193–211.

CANO-COTO, D. 2019. Performance evaluation of interoperability in peer to-peer processes. *Tecnología en Marcha. Edición especial. Movilidad Estudiantil* 6, 137-145.

CHACKELSONA, C., ERRASTIA, A., CIPRÉSB, D. E F. LAHOZB. 2013. Evaluating order picking performance trade-offs by configuring main operating strategies in a retail distributor: A Design of Experiments approach. *International Journal of Production Research.* Vol. 51, No. 20, 6097–6109.

CRUTHIS, E.N. & RIGDON, S.E. 1992. Comparing two estimates of the variance to determine the stability of a Process. *Quality Engineering*, Vol 5(1), pages 67-74.

DALE, B., WIELE, T E J. IWAARDEN. 2007. Managing quality. 5. ed. Blackwell Publishing: Oxford/UK.

DELATTEA, S., DORANA, L., BLECKERA, C, MOLC, G., ROISEUX, O., GOFFLOTE, S., MALUMBAB, P. 2019. Effect of pilot-scale steam treatment and endogenous alpha-amylase activity on wheat flour functional properties. *Journal of Cereal Science.* Vol. 88, 38-46.

- DURIER, C., MONODA, H., BRUETSCHY, A. 1997. Design and analysis of factorial sensory experiments with carry-over effects. *Food Quality and Preference*. Vol. 8, No. 2, 141-149.
- ELSER, T. 2017. *Factorial design: understanding design of experiments (DOE) and applying it in practice*. 1st Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- FIGUEIREDO, F. O., GOMES, M.I. 2003. *Controlo Estatístico da Qualidade e Métodos Robustos*.
- FLY, A., CZAMECKI-MAULDEN, G. 1996. Iron bioavailability from diets containing high-fiber breakfast cereals and crackers. *Nutrition Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 267-278.
- GAUDREAU, S., BRIDGE, J., FISHER, E. 2021. *Total quality management for custodial operations*. CRC Press.
- GLAVAN, J., FOX, E., FIFIĆ, M., HOUP, J. 2019. Adaptive design for systems factorial technology experiments. *Journal of Mathematical Psychology*. 92, 1-20.
- GOMES, M. I., FIGUEIREDO, F. O., FIGUEIREDO, A. 2014. *Controlo Estatístico da Qualidade em Indústria e Serviços*. Livro de Atas do II Congresso de Ciência e Desenvolvimento dos Açores e VII Congresso de Gestão e Conservação da Natureza. Universidade dos Açores, Angra do Heroísmo, Vol: *In Tomaz Dentinho (ed.)*
- GOMES, M. I., FIGUEIREDO, F. 2020. *Papel do controlo estatístico da qualidade em indústria e serviços*. Memórias da Academia das Ciências de Lisboa, classe de Ciências, Tomo XLVII, Vol. 1.
- HAUPENTHAL, S., VILAS-BOAS, M., SIQUEIRA, J., TOKURA, L., NASCIMENTO, L. 2021. Statistical quality control to emission uniformity in micro sprinkler with autonomous photovoltaic pumping. *Research, Society and Development*. Vol. 10, n. 11, 1-12.
- HRON, J. E T. MACÁK. 2013. Application of design of experiments to welding process of food packaging. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. Volume LXI 100 Number 4. 909-915.
- HUERTAS-GARCIA, R. 2009. Using statistical design experiment methodologies to identify customers' needs. *International Journal of Market Research*. Vol. 51 Issue 1, 115 – 136.
- JAMES, G., WITTEN, D., HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. 2021. *An introduction to statistical learning with applications in R*. 2ª Edição. Springer.
- JENSEN, W.A., SZARKA, J., WHITE, K. 2019. Stability assessment with the stability index, *Quality Engineering*, Vol 31(2), pages 289–301.
- JOHNSON, R., HUTTO, G, SIMPSON, J. E D. MONTGOMERY. 2012. *Designed Experiments for the Defense Community*. *Quality Engineering*, 24:60–79.
- KRANZ, B., KOCH, M., SCHAPf, M. E L. FISCHER. 2015. Investigation of the Germination of Barley and Wheat Grains with a Design of Experiments for the Production of Hydrolases. *Food Technol. Biotechnol.* 53 (2) 127–135.
- KUBIAK, T. E D. BENBOW. 2009. *The certified six sigma black belt handbook*. 2ª Edição. Pearson. ASQ Quality Press Publications.

- LAVERNE, E. 2022. Quality management principles: what is the purpose of quality management? Independently published.
- LAWSON, J. 2015. Design and analysis of experiments with R. CRC Press.
- LIA, C., DHITALAB, S., GILBERTAC, R., GIDLEYA, M. 2020. High-amylose wheat starch: Structural basis for water absorption and pasting properties. Carbohydrate Polymers. Vol. 245, 116-144.
- MAINARDES, E. 2009. Gestão pela Qualidade Total: percepções na Universidade. *Diálogo e Interação*. Vol 2. ISSN 2175-3687.
- Martínez, M., Pico, J., Gómez, M. 2015. Physicochemical modification of native and extruded wheat flours by enzymatic amylolysis. Food Chemistry, Vol. 167, 447-453.
- MCCARTY, T., DANIELS, L., BREMER, M. E P. GUPTA. 2005. The six sigma black belt handbook. MacGraw-Hill.
- MEUSA, J. 2022. Quality Management process: what is meant by quality management? Published independently.
- MINEIRO, S. 2014. Fibra Alimentar: composição, métodos e implicações alimentares. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia e Segurança Alimentar. FCT/UNL.
- MONTGOMERY, C. 2009. Design and analysis of experiments. 7ª edição. Wiley.
- MONTGOMERY, D. 2017. Design and analysis of experiments. EMEA Edition. 9ª Edição. Wiley.
- MONTGOMERY, D. 2020. Introduction to statistical quality control. EMEA Edition. 8ª Edição. Wiley.
- MORADI, M., HASANI, A., POURMAND, Z., LAWRENCE, J. 2021. Direct laser metal deposition additive manufacturing of Inconel 718 superalloy: Statistical modelling and optimization by design of experiments Optics and Laser Technology. 144, 1-11.
- MUNRO, R., RAMU, G E D. ZRYMIAK. 2015. The certified six sigma green belt handbook. 2a Edição. ASQ Press. Milwaukee, Wisconsin.
- NOURI, N. E K. MOSTAFAPOUR. 2016. Development and Evaluation of Calibration Procedure for a Force-Moment Balance Using Design of Experiments. Latin American Journal for Solids and Structures. 13, 119-135.
- OLAERTS, H., DE BONDT, Y., COURTIN, C. 2018. Density separation as a strategy to reduce the enzyme load of preharvest sprouted wheat and enhance its bread making quality. Food Chemistry. Vol. 241, 434-442.
- OLIVEIRA, T. 2004. Estatística aplicada. Universidade Aberta. Lisboa.
- PEREIRA, Z. E J. REQUEIJO. 2008. Qualidade: Planeamento e control estatístico de processos. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.
- PRIEBE, M E J. MCMONAGLE. 2016. Effects of Ready-to-Eat-Cereals on Key Nutritional and Health Outcomes: A Systematic Review. PLOS ONE. October 17.
- RAMALHO, J. 2021. IndustRial data science. Case studies in product development and manufacturing. Site consultado entre Jan e Julho de 2022. <https://j-ramalho.github.io/industRial/index.html>

- RAMÍREZ, B., RUNGER, G. 2006. Quantitative Techniques to Evaluate Process Stability, *Quality Engineering*, Vol 18, pages 53–68.
- RUICHENG, D., BINGCAI G., NINGNING, L., CHENCHEN, W., ZIDONG, Y. E M. MINGJIAN. 2015. Design and experiment on intelligent fuzzy monitoring system for corn planters. *Int J Agric & Biol Eng*. Vol. 6 No.3, 11-18.
- SABRI-LAGHAIE, K, FATHI, M., EZIO, E., MAZHAR M. 2022. A novel reliability monitoring scheme based on the monitoring of manufacturing quality error rates. *Reliability Engineering and System Safety*. 217, 1-14.
- SALL, J. 2017. Scaling up process characterization, *Quality Engineering*, Vol 29(4), pages 62-78.
- SANTANA-VIERA, V., JIMENEZ, J., JINA, T. E J. ESPIRITUB. 2015. Implementing factory demand response via onsite renewable energy: a design-of-experiment approach. *International Journal of Production Research*, 2015 Vol. 53, No. 23, 7034–7048.
- SEBASTIAN-COLEMEN, L. 2022. Meeting the challenges of data quality management. Academic Press.
- Shao, Y., Tsai, M-H. ,He, Y. , Chen, J., Wilson, C. , Amy Hui-Mei, A. 2019. Reduction of falling number in soft white spring wheat caused by an increased proportion of spherical B-type starch granules. *Food Chemistry*. Vol. 284, 30 June 2019, 140-148.
- SILVA, S, LIMA, G., LIMA, V., GHEYI, H., SOARES, L., OLIVEIRA, J. 2022. Production and post-harvest quality of mini-watermelon crop under irrigation management strategies and potassium fertilization. *Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering*. Vol.26, n.1, 51-58.
- SIMPSON, J., LISTAK, C. E H. GREGORY. 2013. Guidelines for Planning and Evidence for Assessing a Well-Designed Experiment. *Quality Engineering*. 25:333-355.
- SUZUKI, T. 1994. TPM in process industries. CRC Press.
- SZARKA, J., JENSEN, W., WHITE, K. 2017. Stability Assessment with the Stability Index, Fall Technical Conference “Statistics: Powering a Revolution in Quality Improvement”.
- XIRUI, Z., CHAO, W., ZHISHUI, C. E Z. ZHIWEI. 2016. Design and experiment of a bionic vibratory subsoiler for banana fields in southern China. *Int J Agric & Biol Eng*. Vol. 9 No.6, 75-83.
- Wheeler, D. 1990. Understanding industrial experimentation. 2ª Edição. SPC Press Inc.
- Wheeler, D. 1993. Understanding variation: the key to managing chaos. Longman Higher Education.
- Wheeler, D. 2004. Advanced topics in statistical process control: the power of Shewhart’s charts. 2ª Edição. SPC Publications.
- YANG, B, HE, Y., YIN, H. 2021. Data Analysis and Production Process Control. Springer Nature Switzerland AG. A. Dolgui et al. (Eds.). IFIP AICT 630, pp. 555–562.

ANEXO 1 – Resultados complementares relativos a DOE das cozedoras.

		Factor A	Factor B	Factor C	Variável resposta	Residues	Standardized residues	Predicted fits	Standard error of predicted fits	Confidance limits	Confidance limits	Prediction limits	Prediction limits
CenterPt	Blocks	Tempo coz	Agua adic	Farinha	Finos(%)	RESI1	SRES1	PFITS	PSEFITS	CLIM	CLIM_1	PLIM	PLIM_1
1	1	70	72	120	1.15	-0.005	-0.353553391	1.155	0.014142136	1.122388177	1.187611823	1.098514665	1.211485335
1	1	70	72	120	1.16	0.005	0.353553391	1.155	0.014142136	1.122388177	1.187611823	1.098514665	1.211485335
1	1	78	84	80	0.75	0.01	0.707106781	0.74	0.014142136	0.707388177	0.772611823	0.683514665	0.796485335
1	1	78	72	120	1.01	-0.02	-1.414213562	1.03	0.014142136	0.997388177	1.062611823	0.973514665	1.086485335
1	1	78	84	80	0.73	-0.01	-0.707106781	0.74	0.014142136	0.707388177	0.772611823	0.683514665	0.796485335
1	1	70	72	80	1.45	0.025	1.767766953	1.425	0.014142136	1.392388177	1.457611823	1.368514665	1.481485335
1	1	70	84	120	0.76	0.015	1.060660172	0.745	0.014142136	0.712388177	0.777611823	0.688514665	0.801485335
1	1	78	84	120	0.59	0.005	0.353553391	0.585	0.014142136	0.552388177	0.617611823	0.528514665	0.641485335
1	1	78	72	80	0.85	-0.01	-0.707106781	0.86	0.014142136	0.827388177	0.892611823	0.803514665	0.916485335
1	1	70	84	80	0.83	-0.01	-0.707106781	0.84	0.014142136	0.807388177	0.872611823	0.783514665	0.896485335
1	1	70	84	120	0.73	-0.015	-1.060660172	0.745	0.014142136	0.712388177	0.777611823	0.688514665	0.801485335
1	1	78	72	120	1.05	0.02	1.414213562	1.03	0.014142136	0.997388177	1.062611823	0.973514665	1.086485335
1	1	78	84	120	0.58	-0.005	-0.353553391	0.585	0.014142136	0.552388177	0.617611823	0.528514665	0.641485335
1	1	70	84	80	0.85	0.01	0.707106781	0.84	0.014142136	0.807388177	0.872611823	0.783514665	0.896485335
1	1	78	72	80	0.87	0.01	0.707106781	0.86	0.014142136	0.827388177	0.892611823	0.803514665	0.916485335
1	1	70	72	80	1.4	-0.025	-1.767766953	1.425	0.014142136	1.392388177	1.457611823	1.368514665	1.481485335

ANEXO 2 – Resultados complementares relativos a DOE do secador da massa.

				Factor A	Factor B	Factor C	Variável resposta	Residues	Standardized residues	Predicted fits	Standard error of predicted fits	Confidance limits	Confidance limits	Prediction limits	Prediction limits
StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Vapor	Pressao	Temperatura	Finos (%)	RESI1	SRES1	PFITS	PSEFITS	CLIM	CLIM_1	PLIM	PLIM_1
1	1	1	1	0	0	22	0.62	0.02	0.408514337	0.6	0.04895789	0.487102903	0.712897097	0.404456492	0.795543508
9	2	1	1	0	0	22	0.58	-0.02	-0.408514337	0.6	0.04895789	0.487102903	0.712897097	0.404456492	0.795543508
15	3	1	1	0	2	45	2.45	-0.025	-0.510642921	2.475	0.04895789	2.362102903	2.587897097	2.279456492	2.670543508
16	4	1	1	3	2	45	4.27	-0.055	-1.123414427	4.325	0.04895789	4.212102903	4.437897097	4.129456492	4.520543508
14	5	1	1	3	0	45	3.68	-0.02	-0.408514337	3.7	0.04895789	3.587102903	3.812897097	3.504456492	3.895543508
11	6	1	1	0	2	22	2.5	-0.025	-0.510642921	2.525	0.04895789	2.412102903	2.637897097	2.329456492	2.720543508
10	7	1	1	3	0	22	3.32	-0.04	-0.817028674	3.36	0.04895789	3.247102903	3.472897097	3.164456492	3.555543508
5	8	1	1	0	0	45	3.98	-0.11	-2.246828853	4.09	0.04895789	3.977102903	4.202897097	3.894456492	4.285543508
13	9	1	1	0	0	45	4.2	0.11	2.246828853	4.09	0.04895789	3.977102903	4.202897097	3.894456492	4.285543508
2	10	1	1	3	0	22	3.4	0.04	0.817028674	3.36	0.04895789	3.247102903	3.472897097	3.164456492	3.555543508
8	11	1	1	3	2	45	4.38	0.055	1.123414427	4.325	0.04895789	4.212102903	4.437897097	4.129456492	4.520543508
12	12	1	1	3	2	22	3.68	-0.02	-0.408514337	3.7	0.04895789	3.587102903	3.812897097	3.504456492	3.895543508
4	13	1	1	3	2	22	3.72	0.02	0.408514337	3.7	0.04895789	3.587102903	3.812897097	3.504456492	3.895543508
7	14	1	1	0	2	45	2.5	0.025	0.510642921	2.475	0.04895789	2.362102903	2.587897097	2.279456492	2.670543508
3	15	1	1	0	2	22	2.55	0.025	0.510642921	2.525	0.04895789	2.412102903	2.637897097	2.329456492	2.720543508
6	16	1	1	3	0	45	3.72	0.02	0.408514337	3.7	0.04895789	3.587102903	3.812897097	3.504456492	3.895543508

ANEXO 3 – Tabela com os valores de d_2 e sua relação com a dimensão do subgrupo (extraído de Pereira e Requeijo, 2008, pag. 729).

Dimensão do subgrupo	d_2
2	1.128
3	1.693
4	2.059
5	2.326
6	2.534
7	2.704
8	2.847
9	2.97
10	3.078