Rúben Daniel Martins de Abreu

Licenciatura em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Implementação do Controlo Estatístico do Processo numa indústria vinícola

Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Professor Doutor José Fernando Gomes Requeijo - Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Rogério Salema de Araújo Puga Leal, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Doutora Isabel Maria da Silva João, Professora Adjunta do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa do Instituto Politécnico de Lisboa

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

2017 Setembro

Implementação do Controlo Estatístico do Processo numa Indústria Vinícola

Copyright © Rúben Abreu, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À memória dos meus avós…

Agradecimentos

A presente dissertação é fruto de um culminar de trabalho desenvolvido ao longo de vários anos e não seria possível sem a contribuição de várias pessoas.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Doutor José Fernando Gomes Requeijo pelo profissionalismo, exigência, disponibilidade, preocupação e boa disposição que foi crucial para o desenvolvimento desta dissertação.

Quero agradecer à Engenheira Paula Borrego da empresa José Maria da Fonseca que me deu a oportunidade de realizar este estudo e que me ajudou a evoluir através das suas sugestões e do seu feedback ao longo do decorrer do meu estágio.

Ainda da José Maria da Fonseca queria agradecer ao meu amigo José Silva pela simpatia, disponibilidade e preocupação demonstrada cujo seu contributo foi de extrema importância para a minha integração na empresa e perceção dos processos. À minha colega de estágio Ana Catarina Dias pelo seu espirito de cooperação, entreajuda e disponibilidade, e ao meu colega João Pedro Rodrigues pela boa disposição e disponibilidade em ajudar. Ao chefe de linha António Pires pela boa disposição e preocupação em ajudar. E a todos os funcionários da José Maria da Fonseca, em especial aos operadores que se demonstraram sempre atenciosos durante a recolha de amostras para a realização desta dissertação.

Quero agradecer aos meus amigos e colegas de curso, em especial ao Francisco Vaz, à Joana Gonçalves, que me acompanharam ao longo destes cinco anos que me apoiaram e que contribuíram para o meu desenvolvimento como estudante e como pessoa.

Por fim quero agradecer à minha família, em especial aos meus pais e à minha namorada Mónica que me motivaram e deram força nos momentos mais complicados e que contribuíram para que eu me tornasse, não só num melhor aluno, mas também numa melhor pessoa e que sem eles nada disto seria possível.

A todos os acima referidos o meu mais sincero obrigado!

Sumário

Este estudo teve como objetivo a melhoria no processo do engarrafamento na empresa José Maria da Fonseca vinhos S.A, mais concretamente nas etapas do enchimento e fecho de garrafa roscada. De modo a analisar o estado atual de uma das linhas de engarrafamento que possui o equipamento mais antigo foram utilizados métodos estatístico como a Análise de Variância e as Cartas de Controlo.

Foram utilizadas técnicas no âmbito da análise de variância para averiguar se existiam diferenças significativas na média das massas das garrafas, entre os lotes de matéria prima de um mesmo fornecedor e também entre os lotes de matéria prima de diferentes fornecedores. Verificou-se que não só existiam diferenças significativas entre as médias das massas de garrafas de vidro de diferentes lotes de um mesmo fornecedor, como também se verificou que existiam diferenças significativas entre os próprios fornecedores. Uma vez que a máquina de enchimento apresentava trinta e duas válvulas de enchimento, foi necessária averiguar se existiam diferenças significativas entre a média do volume de enchimento dessas mesmas válvulas, constatando-se que existiam diferenças significativas. Através da utilização da estatística *LSD* e da Análise ABC foi possível classificar as válvulas de enchimento de acordo com a prioridade na implementação de ações corretivas. Mediante a construção de um diagrama Causa e Efeito foi possível identificar potenciais causas para esta situação, procedendo-se à implementação de ações de melhoria onde, após nova análise de variância, se verificou que já não existiam diferenças significativas entre as médias do volume de enchimento das trinta e duas válvulas. A etapa que se segue ao enchimento é o fecho da garrafa, que neste caso era por meio de aplicação de uma cápsula roscada. Através da análise de variância foi possível verificar que não existiam diferenças significativas entre o valor médio do torque, aplicado na cápsula, de cada uma das cinco cabeças da máquina.

Após terem sido analisadas as fontes de variação, procedeu-se à recolha de dados para o Controlo Estatístico de Processo, onde foram analisadas duas características da qualidade, o volume de enchimento e o torque aplicado na cápsula roscada. Foram utilizadas cartas *Q* para 3 produtos onde os dados existentes eram insuficientes para se proceder à estimação dos parâmetros e utilizou-se a carta *MQ* para fazer a análise multivariada. Já na situação em que existiam dados suficientes para se proceder à estimação de parâmetros, foram utilizadas as cartas $\overline{X}$ e S para a Fase I e as cartas Z e W para a Fase II do Controlo Estatístico Univariado, para estudar 3 produtos. Para a análise multivariada utilizaram-se as cartas T^2 tanto para a Fase I como para a Fase II. Através deste estudo foi possível concluir que existiam oportunidade de melhoria ao nível da capacidade do processo e nos mecanismos de ajuste do nível de enchimento.

Palavras Chave: Variabilidade, Controlo Estatístico do Processo, Melhoria de processos, Capacidade do Processo, Cartas de Controlo

ABSTRACT

The objective of this study was to improve José Maria da Fonseca vinhos S. A's bottling process, specifically in the filling and closing steps. Both the filling and closing processes are influenced by some sources of variability which were analysed, through the usage of statistical methodologies, such and the Variance Analysis. Then Control Chart were used to make an analysis of the current state of one of the bottling lines which has the older equipment.

To analyse if there are significative differences in the empty bottle mass mean between different batches from a same supplier and between different suppliers, variance analysis techniques were used such as the ANOVA Table. It was concluded that there are significant differences in the empty glass bottle's means of different batches from a same supplier and there are also significative differences in the empty glass bottle's means between suppliers. Since the filling machine had thirty-two filling valves, it was necessary to analyse if there are significant differences between the filling volume's means of those same valves. Using a similar procedure as before, Variance Analysis was used in which was concluded that there are significant differences between the filling volume's means of each valve. Using the *LSD* statistic and the ABC Analysis it was possible to classify each valve according to its priority to implement improvement actions. Through the construction of the Ishikawa Diagram it was possible to identify potential causes for this problem and then implement improvement procedures that, through a new Variance Analysis, revealed that there are no longer differences between the filling volume's mean of each valve. The step that follows the filling process is the bottle closing in which a closing capsule is applied. Using the ANOVA it was possible to conclude that there are no significant differences between the mean torque value of each of the five machine heads.

After analysing all the variability sources, it was possible to gather data to be used in the Statistical Process Control, in which were studied two key quality characteristics, the filling volume and the torque applied in the capsule. For three products where there weren't enough data to estimate the process parameters, *Q* control charts were used for the univariate analysis and *MQ* charts were used for the multivariate analysis. For the next three products, there was enough data to properly estimate the process parameter in which $\overline{X}$ and S charts were used for the Phase I and Z and W charts for the Phase II of the Univariate Statistical Process Control. For the multivariate analysis, T^2 charts were used for both Phases. Through the usage of Control Charts it was revealed that there are some improvement opportunities in terms of process capability and is advised to improve the filling level adjustment mechanism.

Key-Words: Variability, Statistical Process Control, Continuous Improvement, Process Capability, Control Charts

Abreviaturas

AMP – Armazém de Matérias Primas

BIB – *Bag in Box* trata-se de uma embalagem, neste caso, com capacidade para 3 litros elaborada em filme transparente multicamada (composta por nylon, EVOH e polietileno) que é acondicionada dentro de uma caixa de cartão.

CEN – Centro de Vinificação

CUSUM – *Cumulative Sum* (Somas acumuladas)

DOP – Direção de Operações

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

EWMA – *Exponentially Weighted Moving Averages* (Média Móvel Exponencialmente Amortecida)

FAC – Função de Autocorrelação

FACP – Função de Autocorrelação Parcial

JMF – José Maria da Fonseca

LC – Linha Central

LIC – Limite Inferior de Control

LIE – Limite Inferior de Especificação

LIP – Limite Inferior do Processo

LSC – Limite Superior de Controlo

LSD – *Leats Significant Distance* (Teste das menores diferenças significativas)

LSE – Limite Superior de Especificação

LSP – Limite Superior do Processo

MSPC – *Multivariate Statistical Process Control* (Controlo Estatístico do Processo Multivariado)

RAC – Secação onde são realizadas operações de refrigeração, estabilização e acabamento de vinhos

SPC – Sta*tistical Process Control* (Controlo Estatístico do Processo)

Simbologia

a – Número de níveis para um fator *A*

A_r – Parâmetro da estimação da estatística $Q_r(\mathbf{X}_r)$ para as cartas MQ_X

A_2,B_3,B_4,B_5,B_6,c_4,D_1,D_2,d_2,D_3,D_4 – Constantes das cartas de controlo

b – Número de níveis para um fator *B*

c – Valor utilizado no numerador do índice MC_{pG}

C_p – Índice de capacidade potencial do processo

C_{pk} – Índice de capacidade do processo

$(C_{pk})_I$ – Índice inferior de capacidade do processo

$(C_{pk})_S$ – Índice superior de capacidade do processo

C_{pm} – Índice de capacidade de segunda geração

C_{pM} – Índice de capacidade de um processo multivariado

C_{pmk} – Índice de capacidade de terceira geração

CV – região do processo que se encontra contida na região de especificação modificada

D – Distância entre o processo e valor alvo, para um processo com duas características com especificação técnica bilateral

det $(\mathbf{\Sigma}_i^{-1})$ – Determinante da inversa da matriz $\mathbf{\Sigma}_i$

det $(\mathbf{\Sigma}^{-1})$ – Determinante da inversa da matriz $\mathbf{\Sigma}$

d_j – estatística *d* para uma determinada variável *j* de um processo multivariado

D_1 – distância entre o limite superior de especificação da segunda variável (Y_2) e uma linha paralela a este limite, que por sua vez passa pela média de processo multivariado com especificação técnica bilateral e unilateral

D_2 – é a distância entre uma linha paralela aos limites superior e inferior de especificação da primeira variável (Y_1) e um ponto definido por $\left(\frac{\left(LSE_{Y_1}+LIE_{Y_1}\right)}{2}, LSE_{Y_2}\right)$ e pela média de um processo multivariado com especificação bilateral e unilateral

$f_m(\mathbf{X},\boldsymbol{\mu},\mathbf{\Sigma})$ – Função densidade de probabilidade para uma distribuição multivariada normal

F_0 – Valor critíco relativo à distribuição de Fisher para um determinado nível de significância α

$F_{\alpha,p,mn-m-p+1}$ – Percentil à direita, para um nível de significância α, da Distribuição de Fisher com graus de liberdade *p* e *mn-m-p+1* respetivamente

$F_{v_1,v_2}(\bullet)$ – Função de Distribuição de Fisher com a e b graus de liberdade no numerador e denominador, respetivamente

g.l. – Graus de liberdade

G_v – Função de Distribuição *t-student* com *v* graus de liberdade

H_0 – Hipótese nula num determinado teste de hipóteses

H_1 – Hipótese alternativa num determinado teste de hipóteses

k – Nível mínimo exigido para a capacidade do processo

LI – Índice de capacidade multivariado que analisa a localização das regiões referentes ao processo

m – Número de amostras

MC_{pG} – Índice de capacidade multivariado para regiões de tolerância assimétricas

MCPI, MCPS – Índice inferior e superior, respetivamente, de capacidade multivariado para processos com especificação técnica unilateral

MCP_{NVC} – Índice de capacidade multivariado para processos com especificação técnica bilateral

MEC_{pk} – Índice de capacidade multivariado para processos com especificação unilateral e bilateral

MS_A – Desvio quadrático médio do fator A

MS_B – Desvio quadrático médio do fator B

MS_{AB} – Desvio quadrático médio da interação entre os fatores A e B

MS_{Erro} – Desvio quadrático médio do erro

n – Dimensão da amostra

N – Número de dados

$N(\mu,\sigma^2)$ – Distribuição Normal com média μ e variância σ^2

NCV – Região do processo que não se insere na região de especificação modificada

n_i – Dimensão da amostra *i*

n_i,n_j – número de observações dos níveis *i* e *j*

$N_p(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})$ – Distribuição Normal multivariada com vetor de médias **μ** e matriz de covariâncias **Σ**

p – Número de características de um determinado processo multivariado

PR – Região do processo

PV – Índice de capacidade multivariado que compara a localização do vetor **μ** com a localização do vetor **T**

$Q(\overline{X}_i)$ – Estatística Q obtida através da transformação de $\overline{X}$

Q_I – Índice inferior de capacidade da carta Q

$Q_i(S_i^2)$ – Estatística Q obtida através da transformação de S_i^2

$Q_r(\overline{X})$ – Estatística Q obtida através da transformação o vetor $\overline{\mathbf{X}}$

Q_S – Índice superior de capacidade da carta Q

R – Amplitude amostral

$\overline{R}$ – Média das amplitudes amostrais

R_i – Valor da amplitude para uma determinada amostra *i*

$\overline{R}_r$ – Estimativa da média das amplitudes amostrais para o instante *r*

S – Desvio padrão amostral

S – Matriz das covariâncias amostrais

$\mathbf{S}^{-1}$ – Matriz inversa das covariâncias amostrais

S^2 – Variância amostral

$\overline{S^2}$ – Média das variâncias de amostras

S_i^2 – Variância da amostra i

S_{jh} – Covariância amostral entre as características da qualidade *j* e *h*

S_{jhk} – Covariância entre as características da qualidade *j* e *h* na amostra *k*

S_{jk}^2 – Variância da característica da qualidade j na amostra k

$\overline{S_j^2}$ – Média das *m* variâncias para a característica da qualidade *j*

$\overline{S_{jh}^2}$ – Média das *m* covariâncias da amostra entre as características *j* e *h*

$S_{p,i}^2$ – Variância combinada de *i* amostras

$S_{pool,r}$ – Matriz das covariâncias combinadas no instante *r*

S_r – desvio padrão amostral para um instante *r*

$\bar{S}_r$ – Estimativa da média do desvio padrão amostral num instante *r*

SS_A – Soma dos quadrados do fator A

SS_B – Soma dos quadrados do fator B

SS_{AB} – Soma dos quadrados da interação entre os fatores A e B

SS_{Erro} – Soma dos quadrados do erro

SS_W – Soma dos quadrados do erro

T – Valor nominal do processo (*target*)

T – Vetor dos valores nominais do processo

T^2 – Estatística multivariada de *Hotelling*

T_i^2 – Estatística multivariada de *Hotelling* determinada a partir de todas as variáveis *p* à exceção da variável *i*

T^{JS} – Estatística multivariada de *Hotelling* modificada com base nos estimadores de *James-Stein*

t_0 – estatística de teste para a comparação de duas médias

$t_{\frac{\alpha}{2},\nu}$ – Valor da distribuição *t-Student* para um nível de significância $\frac{\alpha}{2}$ e ν graus de liberdade

$(W_i)_j$ – estatística W para uma amostra *i* referente a uma determinada característica ou produto *j*

X – Característica da qualidade

$\bar{X}$ – Média amostral

$\bar{\bar{X}}$ – Média das médias

$\bar{\bar{\mathbf{X}}}$– Vetor da média das médias

X_{ij} – Observação *j* da amostra *i*

X_{ijk} – Observação *i* da característica da qualidade *j* na amostra *k*

$\bar{X}_i$ – Média de uma amostra *i*

$\bar{X}_{jk}$ – Média de uma característica da qualidade *j* na amostra *k*

$\bar{\bar{\mathbf{X}}}^{JS}$ – Estimador de *James-Stein* para o vetor da média das médias

$\bar{\mathbf{X}}_k$ – Vetor das médias das *p* características da qualidade da amostra *ki*

X_{max}, $X_{mín}$ – Valor máximo e mínimo

$\overline{X}_r$ – Média para um determinado instante *r*

$\overline{\overline{X}}_r$ – Média das médias para um determinado instante *r*

$\overline{\overline{X}}_{r-1}$ – Média das médias para o instante *r-1*

$Y_{..}$ – Soma das N observações

$Y_{...}$ – Soma de todas as *N* observações

$Y_{.j.}$ – Soma das respostas para o nível *j* referente a um fator B

$Y_{i.}$ – Soma das observações do nível *i*

$Y_{i..}$ – Soma das respostas para o nível *i* relativo ao fator A

$\overline{Y}_{i.}$ – Média das observações referentes ao nível *i*

y_{ij} – Valor da resposta para o nível *i* da réplica *j*

$\overline{Y}_{j.}$ – Média das observações referentes ao nível *j*

$(Z_i)_j$ – Estatística Z para uma determinada amostra *i* para uma característica ou produto *j*

Z_I – Índice de capacidade inferior para as cartas Z

Z_S – Índice de capacidade superior para as cartas Z

α – nível de significância (erro to tipo I)

α_i – erro to tipo I para a variável *i*

β – constante utilizada no índice MCP_{NVC}

β_j – Efeito do nível *j* no fator B

γ – parcela do estimador do vetor média das médias de *James-Stein*

γ_{ij} – Efeito da interação entre os fatores A e B

η – equação para a determinação do parâmetro P utilizado no cálculo do índice MEC_{pk}

θ_i – Quociente entre a variância num instante *i* e a variância combinada $S^2_{p,i-1}$, para um instante *i-1*

λ – Parâmetro de transformação do método *Box-Cox*

$\hat{\mu}$ – Estimativa da média do processo

μ_i – Média do processo relativa à característica da qualidade *i*

$\hat{\mu}_r$ – Estimativa da média para o instante *r*

$\hat{\boldsymbol{\mu}}$ – Vetor média do processo

ν – Número de graus de liberdade

$\mathbf{v}$ – Vetor de dimensão *p* que influencia a performance do estimador de *James-Stein*

ν_n – Número de graus de liberdade do numerador

ν_d – Número de graus de liberdade do denominador

$\xi_{0,135\%}, \xi_{99,865\%}$ - são, respetivamente, o percentil à direita de 0,135% e 99,865% da distribuição de uma variável *X*

$\xi_{50\%}$ - Mediana de uma variável *X*

τ_i – Efeito do nível *i* no fator A

$\boldsymbol{\Sigma}$ – Matriz das covariâncias para *p* características

$\Phi(\bullet)$ – Função da distribuição Normal

$\Phi^{-1}(\bullet)$ – Inverso da função de distribuição Normal

χ^2 – Estatística do Qui-Quadrado

χ_B^2 – Estatística de teste para o Teste de Bartlett

$\chi_{\alpha,p}^2$ – Percentil à direita da distribuição do Qui-Quadrado para um nível de significância α e parâmetro *p*

$\chi_{\alpha,\nu}^2$ – Percentil à direita da distribuição do Qui-Quadrado para um nível de significância α e parâmetro ν

σ – Desvio padrão do processo

$\hat{\sigma}$ – Estimativa do desvio padrão do processo

σ^2 – Variância do processo

σ^2_m – Variância para a população *m*

$\hat{\sigma}_r$ – Estimativa do desvio padrão do processo para o instante *r*

Índice

Índice de Figuras

Índice de Tabelas

1. Introdução

1.1. Enquadramento e Justificação do Tema

A indústria vinícola Portuguesa tem vindo a ganhar cada vez mais protagonismo a nível internacional, o que se reflete num valor acrescentado bruto (VAB) de 11 % e num valor de exportações de vinho Português estimado em 725 milhões de euros (IVV 2017). Segundo as estimativas publicadas pela Organização Internacional da Vinha e do Vinho, em 2015, Portugal apresentou um crescimento de 8% na produção face ao ano transato o que, aliado ao facto de se encontrar na 12º posição enquanto país produtor de vinho, revela a importância desta indústria na economia Portuguesa.

Uma vez que a indústria vinícola se apresenta altamente competitiva, é cada vez mais importante garantir que as necessidades dos clientes são satisfeitas de forma eficaz e eficiente, de forma a estabelecer uma relação duradora entre ambas as entidades. Como tal, é imperativo garantir a consistência da qualidade exigida pelo consumidor (Pereira e Requeijo, 2012), o que implica que os processos produtivos tenham de apresentar estabilidade e reduzida variabilidade em tornos dos valores alvo das características da qualidade. No entanto, existe a tendência para grande parte dos processos falhar a cumprir estes requisitos, sendo crítico que sejam implementadas metodologias que consigam contornar este problema. O Controlo Estatístico de Processos permite monitorizar o comportamento do processo ao longo do tempo, através da construção de cartas de controlo estatístico, reduzir a variabilidade e determinar, a partir de estimativas dos parâmetros do processo, se este tem capacidade para produzir de acordo com as especificações previamente definidas.

Nesse espírito, e em colaboração com a empresa José Maria da Fonseca – Vinhos, S.A, surge a oportunidade de desenvolver uma dissertação no âmbito do controlo estatístico com o objetivo de implementar técnicas que permitam reduzir a variabilidade em torno dos valores alvo das características da qualidade a serem analisadas. Deste modo será possível estabelecer um ponto de situação relativamente ao estado geral dos processos da empresa e da eventual necessidade de implementar planos de melhoria.

A empresa José Maria da Fonseca – Vinhos, S.A é uma empresa que engloba todo o processo produtivo, desde a viticultura à vinificação. Foi criada por José Maria da Fonseca, formado em Matemática pela Universidade de Coimbra, e estabeleceu-se em Vila Nogueira de Azeitão. Consciente da responsabilidade de ser, na atualidade, o mais antigo produtor de vinho de mesa e de Moscatel de Setúbal em Portugal, a José Maria da Fonseca obedece a uma filosofia de

permanente desenvolvimento, o que a leva a investir sempre mais em suportes de investigação e de produção, aliando as mais modernas técnicas ao saber tradicional. Continuando a investir em produtos de referência a nível internacional, sempre pautados pela qualidade, a José Maria da Fonseca tem contribuído de forma decisiva para a divulgação e o prestígio dos vinhos nacionais.

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação consiste na aplicação de técnicas no âmbito do Controlo de Qualidade numa indústria vinícola, nomeadamente, o Controlo Estatístico de Processo (SPC). Numa primeira etapa serão analisadas algumas fontes de variação que condicionam a correta aplicação do SPC, para que depois seja possível proceder à recolha e análise de dados, relativos ao volume de enchimento e ao torque aplicado na cápsula de vedação, mediante a construção de cartas de controlo, quer univariadas quer multivariadas, e o estudo de capacidade dos processos.

Numa primeira Fase (Fase I) será analisada a estabilidade dos processos para se proceder à estimação dos parâmetros dos mesmos e avançar para o estudo de capacidade dos processos. Os *outputs* desta Fase I serão os parâmetros estimados do processo e informação relativa à capacidade (ou não) destes mesmos processos produzirem de acordo com as especificações técnicas definidas. Após ser verificada a estabilidade do processo, estimados os seus parâmetros e comprovada a sua capacidade, é iniciada a Fase II em que se procede à monitorização dos processos, verificando de que forma é possível atuar no sentido de melhorar esses mesmos processos, sobretudo no volume de enchimento, uma vez que o subenchimento de garrafas de vinho poderá resultar no incumprimento da legislação existente para o controlo de capacidades e um elevado sobreenchimento resulta numa gestão ineficiente da matéria prima existente.

A concretização deste estudo permitirá adquirir conhecimentos do processo da produção de vinho, bem como a aplicação de conceitos teóricos no âmbito da Análise de Variância e do Controlo Estatístico de Processos.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente Dissertação apresenta 5 capítulos em que se pretende proceder à aplicação do Controlo Estatístico do Processo, numa indústria vinícola, de forma a melhorar a qualidade do produto final.

O primeiro capítulo está relacionado com a Introdução à Dissertação, onde são apresentadas as motivações que conduziram à realização deste trabalho e os principais objetivos a que o mesmo se propõe a atingir. É ainda apresentada a estrutura da Dissertação, onde se retratam alguns dos pontos chaves de cada um dos capítulos constituintes dessa mesma Dissertação.

No segundo capítulo é apresentada toda a fundamentação teórica necessária à realização deste trabalho. Inicialmente é feita uma introdução à evolução e ao conceito da Qualidade nos últimos anos, onde de seguida se abordam conceitos relativos à Análise de Variância e ao Teste de Bartlett. De seguida são abordados conceitos relacionados exclusivamente com o Controlo Estatístico de Processo (SPC). Numa primeira instância são abordadas as Cartas de Controlo Tradicionais (de Shewhart), depois procede-se à apresentação dos conceitos relativos ao Controlo Estatístico de Pequenas Produções e por fim é abordado o Controlo Estatístico Multivariado (MSPC).

O terceiro capítulo é dedicado à caracterização da Empresa, do Processo Produtivo e dos seus produtos, onde é feita uma breve apresentação da empresa e das suas instalações, seguindo-se uma breve descrição sobre o processo produtivo e o tipo de produtos produzidos.

O quarto capítulo engloba o Caso de Estudo em que são abordadas as metodologias utilizadas, aplicadas as técnicas enunciadas no capítulo 3 e analisados e discutidos os resultados obtidos com este estudo.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste estudo, fazendo a ligação com os resultados analisados no capítulo 4. Neste capítulo também se procede à apresentação de sugestões de melhoria e de eventuais oportunidades para futuros estudos.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Conceito de Qualidade e Evolução

2.1.1. A Evolução da Qualidade

A qualidade de bens e serviços tem sido monitorizada desde os primórdios da humanidade, no entanto a utilização de métodos quantitativos que se baseiam em princípios estatístico para controlo da qualidade é um conceito moderno.

Muitos povos da antiguidade tal como os Gregos, os Romanos e os Egípcios demonstraram um elevado compromisso com a qualidade tanto na área de produção de bens como também na arquitetura, onde muitas dessas construções são ainda hoje uma fonte de inspiração. Durante a idade média e até ao século dezanove, a produção de bens e serviços era constantemente confinada a uma única pessoa ou a um grupo de pessoas de reduzida dimensão, em que a responsabilidade do controlo da qualidade ficava exclusivamente incumbida a essa pessoa ou a esse pequeno grupo. Esta fase, segundo Feigenbaum (1981), foi denominada de fase de controlo de qualidade pelo operador *(operator quality control period* do anglo-saxónico).

No ínicio do século vinte e até aproximadamente 1920, iniciou-se uma nova fase caracterizada pela atribuição da responsabilidade do controlo de qualidade a um determinado indivíduo (*foreman quality control period* do anglo-saxónico). A Revolução Industrial deu lugar ao conceito de produção em massa que por sua vez teve por base o conceito de trabalho qualificado, onde já não existia apenas um indivíduo responsável pela produção integral de um produto, mas sim por uma parte. Isto levou a especialização de trabalhadores em áreas distintas que por sua vez eram agrupados de acordo com as operações a serem realizadas, onde um supervisor era responsável pelo controlo da qualidade e pela realização de outras tarefas de acordo com as suas competências.

O período entre 1920 e 1940, segundo Feigenbaum (1983), foi caracterizado pela inspeção no controlo da qualidade (*inspection quality control period* do anglo-saxónico) onde existiam responsáveis pela inspeção da qualidade do produto após certas operações. Nesse período começaram a existir normas de comparação que eram seguidas por esses inspetores de forma a aprovar a conformidade com a qualidade de um determinado produto. Em 1924, Walter A. Shewhart propôs a utilização de cartas de controlo estatístico para análise de variáveis do produto e promoveu a sua utilização na indústria nos anos que se seguiram.

A fase seguinte na evolução do processo, segundo Feigenbaum (1983), foi a fase do controlo estatístico da qualidade (*statistical quality control period* do anglo-saxónico) que decorreu entre 1940 e 1960. As exigências na produção tiveram um aumento acentuado devido à Segunda Guerra Mundial e uma vez que a inspeção a 100% não era uma alternativa prática, iniciou-se a

implementação de planos de recolha de amostras (*sampling* do anglo-saxónico). Apesar dos danos sofrido durante este período, o Japão interiorizou os conceitos de controlo estatístico da qualidade que, associado às visitas de W.Edwards Deming e J.M.Juran para lecionar estas novas ideias em 1950, levou a que os engenheiros japoneses e a própria gestão de topo tivesse uma melhor noção da importância do controlo estatístico da qualidade como meio para alcançar vantagem competitiva no mercado mundial.

A fase que se seguiu foi a fase do control total da qualidade (*total quality control* do anglo-saxónico) durante os anos sessenta. (Feigenbaum, 1983). Esta fase foi caracterizada pelo gradual envolvimento de diversos departamentos no controlo da qualidade, promovendo uma mudança no paradigma daquela altura, uma vez que a produção com qualidade de um determinado produto apenas seria possível com a contribuição de todos os departamentos. Foi nesta altura que surgiram os conceitos da *produção com zero defeitos* e os "círculos da qualidade", que tinham por base o envolvimento de elementos dos vários níveis de gestão. Este conceito evoluiu ao longo dos anos setenta para, segundo Feigenbaum (1983), o conceito de controlo organizacional total da qualidade que contava com um envolvimento que ia desde o *shoop floor* até aos níveis mais executivos de gestão. A qualidade passava a ser responsabilidade de todos os colaboradores da empresa dos mais variados níveis hierárquicos, o que por sua vez deu início ao paradigma dos sistemas de gestão pela qualidade total (*total quality systems* do anglo-saxónico). Durante este século G.Taguchi introduziu, no Japão, o conceito de melhoria da qualidade através do desenho estatístico de experiências, que por sua vez foi desenvolvido ao longo dos anos noventa.

A abordagem Seis Sigma, que surgiu no fim da década de oitenta e início da década de noventa, tem ganho crescente notoriedade nos últimos anos devido a impressionantes resultados económicos decorrentes da sua aplicação em várias empresas altamente prestigiadas. O nível de desempenho é medido em termos de Sigma (desvio padrão) e, como tal, a metodologia tem por objetivos reduzir sistematicamente a variação, à semelhança do que acontece com a maioria dos princípios e técnicas no âmbito da Qualidade. Ao aumentar o *nível Sigma* corresponde, em termos tradicionais, a melhorar a capacidade do processo. As técnicas utilizadas nesta abordagem não são mais do aquelas que têm vindo a ser aplicadas no contexto da Gestão pela Qualidade Total, onde se utilizam técnicas e conceitos que já existem há dezenas de anos de forma dinâmica e apelativa. O sucesso da aplicação desta metodologia incentiva qualquer empresa a adquirir conhecimentos mais profundos sobre as técnicas da Qualidade, desde ferramentas básicas e de Gestão, até ao Desenho de Experiências e Controlo Estatístico do Processo (Pereira and Requeijo, 2012).

Com o desenvolvimento informático e a utilização do computador ao longo dos anos oitenta, foram desenvolvidos e comercializados inúmeros *softwares* para controlo da qualidade. O crescente foco na satisfação do cliente e na melhoria contínua da qualidade resultou na criação de

organizações responsáveis por sistemas de normas e linhas de orientação para suportar a filosofia da qualidade tal como a *International Organization for Standardization (ISO)* que desenvolveu um conjunto de normas, nomeadamente as ISO 9000-9004, no final dos anos oitenta e a *American National Standards Institute (ANSI)*.

Com a última década dos anos noventa e até ao século atual a evolução tem sido feita na área das tecnologias e sistemas de informação, que por sua vez é uma das maiores revoluções desde a Revolução Industrial. Esta nova revolução promove o armazenamento, análise e proteção de informação da qualidade, promovendo a resolução de problemas complexos em tempo real. Segundo Mitra (2016) o crescimento na área da análise de grandes volumes de dados (*Big Data)* e facilidade na recolha de grandes volumes de informação relativa a especificações e necessidades do cliente permitirá alcançar melhorias significativas na qualidade, que por sua vez tende para um paradigma em que não há tolerância para o erro, visto que as características críticas para a qualidade são analisadas e assimiladas em tempo real.

2.1.2. O Conceito de Qualidade

O conceito de qualidade tem sido definido de diversas formas por uma grande variedade de autores, no entanto é um dos fatores mais importantes no processo de seleção de um determinado produto ou serviço, por parte do cliente, mediante a oferta disponível. Perceber a importância da qualidade e tomar medidas no sentido de promover a sua melhoria contínua é um passo fundamental para qualquer empresa se destacar no mercado e ganhar vantagem competitiva face aos seus concorrentes diretos. Segundo Garvin (1987) a qualidade apresenta oito dimensões importantes, nomeadamente:

- A Performance, que está associada à capacidade de um produto ser adequado para a função pretendida.
- A Fiabilidade, que está associada à frequência com que um produto falha.
- A Durabilidade, que está relacionada com o período de tempo em que o produto é adequado para o fim que foi concebido.
- A Manutenibilidade, que está relacionada com a facilidade de reparação e manutenção de um produto.
- As características estéticas, que por sua vez estão associadas à imagem que uma determinada empresa pretende atribuir ao seu produto.
- A Funcionalidade, que por sua vez está relacionado com as funções que um determinado produto é capaz de executar.
- A Perceção de Qualidade, que por sua vez está relacionada com a reputação que o cliente tem da empresa e do seu produto.

- A Conformidade com as especificações que está relacionada com a capacidade de um produto obedecer às exigências impostas.

Uma das definições mais utilizadas é atribuída a Crosby (1979) que define qualidade como sendo "conformidade com as especificações", no entanto Juran (1999) propôs uma definição mais geral em que define qualidade como sendo a "capacidade de um produto ou serviço estar adequado a um fim". Já Montgomery (2012) define a qualidade como sendo "inversamente proporcional à variabilidade". A redução na variabilidade é crucial para alcançar os níveis de qualidade desejados num determinado sistema, como tal é necessário haver um controlo da qualidade que tenha por base o feedback e as especificações importantes do cliente e através da implementação de planos de correção para situações em que existem desvios nos níveis da qualidade. O controlo eficaz e eficiente da qualidade só poderá ser atingível se numa determinada empresa ou organização existir uma gestão centrada na qualidade, em que todos os departamentos trabalham em sintonia para alcançar níveis de qualidade, para que seja possível ganhar vantagem competitiva face à concorrência existente.

2.2. Análise de Variância

A análise de variância (ANOVA – *Analysis of Variance*) surge como uma técnica estatística importante, uma vez que permite comparar valores médios apresentados por mais de duas populações. Através desta análise é possível repartir a variabilidade total dos dados recolhidos pelas diversas componentes responsáveis por essa variabilidade, de forma a determinar se são, ou não, estatisticamente significativas (Pereira e Requeijo, 2012).

Através da análise de variância pretende-se analisar se existem diferenças, estatisticamente significativas, entre as médias de *m* populações em estudo. Isto reflete-se no seguinte teste de hipóteses, onde a hipótese nula (H_0) e a hipóteses alternativa (H_1) são dadas por:

H_0: *Não existem diferenças significativas entre as médias das m populações*

H_1: *Existe pelo menos um par de médias de duas populações que é diferente*

Para testar esta hipótese é importante ter em consideração a forma como as *m* populações são definidas (com base num ou mais critérios). Podemos ter duas situações elementares, a classificação simples (*One-Way ANOVA*) ou a classificação dupla (*Two-Way ANOVA)*. (Murteira, *et al*, 2015)

2.2.1. Classificação simples – *One-Way ANOVA*

Nesta situação, a definição das *m* populações é feita com base em apenas um critério, habitualmente designado por fator. Cada uma dessas populações corresponde a um nível do fator,

que por sua vez apresentará *m* níveis. A aplicação desta ferramenta pressupõe a independência, Normalidade e homogeneidade dos resíduos. (Pereira e Requeijo, 2012).

A tabela 2.1 ilustra uma representação de uma Tabela ANOVA de classificação simples:

Tabela 2.1 - ANOVA de classificação simples

Fonte de Variação	**Soma dos Quadrados (SS)**	**Graus de liberdade (g.l.)**	**Médias Quadráticas (MS)**	**F_0**
Entre níveis	SS_B	a-1	SS_B/(a-1)	MS_B/MS_W
Dentro dos níveis (Erro)	SS_W	N-a	SS_W/(N-a)	
Total	SS_T	N-1		

SST corresponde à Variação Total, nomeadamente, a soma dos quadrados dos desvios de todas as observações, relativamente à média global. SSB corresponde à variação entre os níveis (*between*), que corresponde à soma ponderada dos quadrados das diferenças entre as médias dos níveis e a média global. SS_W é a variação dentro dos níveis (*within*), também designado por variação residual ou erro, sendo definido pela soma dos quadrados dos desvios das observações em relação às médias dos respetivos níveis. MS_B e MS_W correspondem ao quociente entre as variações, SS_B e SS_W e os seus respetivos graus de liberdade, correspondem aos *Desvios Quadráticos Médios ou Médias Quadráticas*. O cálculo de todos estes parâmetros foi feito com recurso às seguintes expressões:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{n} y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{N} \tag{2.1}$$

$$SS_B = \sum_{i=1}^{a} \frac{Y_{i.}}{n} - \frac{(Y_{..})^2}{N} \tag{2.2}$$

$$SS_W = SS_T - SS_B \tag{2.3}$$

onde y_{ij} corresponde ao valor das respostas, $Y_{i.}$ corresponde à soma das observações do nível *i* e $Y_{..}$ corresponde à soma das $N=n \times a$ observações.

Os resultados são interpretados mediante a comparação do valor da estatística de teste (F_0) e o valor crítico $F_{\alpha;v_n;v_d}$, para um nível de significância α, e para os graus de liberdade correspondentes ao numerador (v_n) e denominador (v_d). Se F_0 for superior ao valor crítico, a hipótese nula é

rejeitada, ou seja, existem diferenças significativas entre as médias das *m* populações (Pereira e Requeijo, 2012).

2.2.2. Teste da Menor Diferença Significativa - LSD

Em situações em que a análise de variância permite concluir que existem diferenças significativas entre dois ou mais níveis de um fator, mas não existe informação sobre quais os níveis que efetivamente diferem entre si poderá ser útil utilizar o teste de comparação desenvolvido por Fisher (1971), nomeadamente o Teste da Menor Diferença Significativa (*Least Significant Distance – LSD* do anglo-saxónico). Uma vez que esta técnica assenta na estatística de teste para comparação de duas médias de populações distintas tem-se que:

$$t_0 = \frac{\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{j.}}{\sqrt{MS_{Erro}\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)}} \tag{2.4}$$

onde

$\bar{Y}_{i.}$ – média das observações referentes ao nível i

$\bar{Y}_{j.}$ – média das observações referentes ao nível j

n_i, n_j – número de observações dos níveis *i* e *j*

$MS_{Erro} = MS_W$ – Desvio Quadrático Médio ou variância do erro

Para um teste bilateral, as médias μ_i e μ_j serão significativamente diferentes se $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > LSD$, onde *LSD*, a Menor Diferença Significativa é definida pela expressão:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2};(N-a)g.l}\sqrt{MS_{Erro}\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)} \tag{2.5}$$

Quando o número de observações é o mesmo para todos os níveis $(n_1 = n_2 =.. = n_a = n)$, obtém-se:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2};(N-a)g.l}\sqrt{\frac{2MS_{Erro}}{n}} \tag{2.6}$$

2.2.3. Classificação dupla – *Two-Way ANOVA*

Quando os valores assumidos por uma variável aleatória dependem, não apenas de um fator, mas de dois fatores, torna-se necessário considerar também a forma como estes fatores interagem entre si. Dado um fator designado por fator-linha que assume *a* níveis e que o segundo fator, o fator-

coluna assume *b níveis*, a amostra observada poderá ser decomposta em *a* x *b* células que correspondem ao cruzamento entre o fator linha com o fator coluna (Murteira *et al.*, 2010).

Nesta situação o objetivo é testar o efeito isolado de cada fator, mas também o efeito associado à interação entre dois fatores, como tal apresenta-se em seguida o teste de hipóteses associado a este modelo:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \ldots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \tau_i \neq 0 \qquad (2.7)$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \ldots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \beta_i \neq 0 \qquad (2.8)$$

$$H_0: \gamma_{ij} = 0 \text{ para qualquer par } (i, j)$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \gamma_{ij} \neq 0 \qquad (2.9)$$

Onde τ_i representa o efeito do nível *i* no fator A, β_j corresponde ao efeito do nível *j* no fator B e γ_{ij} corresponde ao efeito da interação entre os fatores A e B.

Na tabela 2.2 é apresentada uma representação da tabela ANOVA para a classificação dupla que é, em muito, semelhante à tabela 2.1:

Tabela 2.2 - Tabela ANOVA de classificação dupla

Fonte de Variação	**Soma dos Quadrados (SS)**	**Graus de liberdade (g.l.)**	**Médias Quadráticas (MS)**	**F_0**
A	SS_A	a-1	$SS_A/(a-1)$	MS_A/MS_{ERRO}
B	SS_B	b-1	$SS_B/(b-1)$	MS_B/ MS_{ERRO}
Interação AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$SS_{AB}/(a-1)(b-1)$	MS_{AB}/MS_{ERRO}
Erro	SS_{Erro}	(ab)(n-1)	$SS_{Erro}/(ab)(n-a)$	
Total	SS_T	N-1	$SS_T/(N-1)$	

Tal como no caso da classificação simples, SS_T corresponde à variação total, SS_A corresponde à variação dos *a* níveis do fator *A*, SS_B corresponde à variação dos *b* níveis do fator *B*, SS_{AB} corresponde à variação resultante da interação dos fatores *A* e *B*, em que $N = a \times b \times n$, para *n* replicações.

Estas variações podem ser calculadas recorrendo às seguintes expressões:

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - \frac{(Y...)^2}{abn} \tag{2.10}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{(Y_{i..})^2}{bn} - \frac{(Y...)^2}{abn} \tag{2.11}$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^{b} \frac{(Y_{.j.})^2}{an} - \frac{(Y...)^2}{abn} \tag{2.12}$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{(Y...)^2}{abn} - SS_A - SS_B \tag{2.13}$$

Os desvios quadráticos médios MS_A, MS_B, e MS_{AB} resultam do quociente entre a variação respetiva e os graus de liberdade correspondentes. A única diferença, face à tabela ANOVA de classificação simples, é o facto de ter sido adicionada uma linha correspondente à interação entre os dois fatores em estudo.

2.3. Teste de Bartlett

O teste de Bartlett permite comparar variâncias de várias populações de forma a averiguar se existem diferenças, estatisticamente significativas, entre elas. Para aplicar este teste devem ser recolhidas amostras diferentes de várias populações, procedendo-se ao cálculo das variâncias amostrais S^2. De notar que a aplicabilidade deste teste pressupõe que as amostras das diversas populações em estudo tenham dimensão igual ou superior a quatro (Pereira e Requeijo, 2012). O teste de hipóteses para comparar as variâncias de *m* populações é definido por:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_m^2$$

$$H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_j, \text{ para pelo menos um par } (i,j) \tag{2.14}$$

A estatística de teste χ_B^2 pode ser calculada através da seguinte expressão,

$$\chi_B^2 = \frac{1}{C} \times \left[\nu \ln(S^2) - \sum_{i=1}^{m} \nu_i \ln(S_i^2) \right] \tag{2.15}$$

onde *C* é dado por,

$$C = 1 + \left(\frac{1}{3(m-1)} \left(\left(\sum_{i=1}^{m} \frac{1}{\nu_i} \right) - \frac{1}{\nu} \right) \right) \tag{2.16}$$

$$S^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^{m} \nu_i S_i^2 \tag{2.17}$$

$$\nu = \sum_{i=1}^{m} \nu_i \tag{2.18}$$

Existem diferenças significativas entre as variâncias de *m* populações quando $\chi_B^2 > \chi^2_{\alpha;m-1}$.

2.4. Controlo Estatístico do Processo (Univariado)

O Controlo Estatístico do Processo (ou SPC – *Statistical Process Cont*rol, do anglo-saxónico) tornou-se numa ferramenta crucial para garantir a vantagem competitiva de qualquer empresa face à sua concorrência. A exigência dos consumidores, face à consistência da qualidade, acarreta grandes esforços no nível de garantir a estabilidade dos processos e de minimizar a variabilidade em torno dos valores desejados para as características da qualidade. O grande objetivo desta ferramenta da qualidade é de monitorizar processos sequenciais, de forma a garantir que estes operam de forma estável e satisfatória (Qiu, 2014), através da construção de cartas de controlo estatístico que permitem, não só reduzir a variabilidade inerente ao processo, mas também estimar parâmetros a ele associados e averiguar de este é capaz de produzir de acordo com as especificações definidas (Pereira e Requeijo, 2012).

2.4.1. Princípios das Cartas de Controlo

Uma carta de controlo é uma representação gráfica onde no eixo das ordenadas se encontram os valores de uma determinada característica da qualidade em estudo e no eixo das abcissas se encontra o número da amostra (ou observação individual) ou o seu intervalo de tempo correspondente. Também é possível verificar a existência de uma linha central (*LC*) e de dois limites de controlo estatístico, o superior (*LSC*) e o Inferior (*LIC*). Se todos os valores das amostras (ou observações individuais) se encontrarem contidos no intervalo [*LIC*, *LSC*] e se não apresentarem nenhuma tendência especial ou comportamento não aleatório sistemático, é possível assumir que o processo está sob controlo. É possível observar um exemplo de uma carta de controlo na figura 2.1.

O comportamento menos desejável dos dados recolhidos pode estar associado a dois tipos de causas. O primeiro remete-nos para as causas comuns de variação que, devido à sua aleatoriedade, não são controláveis e são inerentes ao processo (Pereira e Requeijo, 2012).

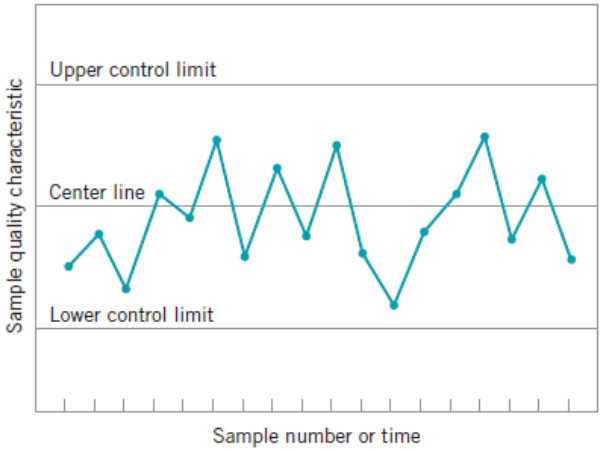

Figura 2.1 - Exemplo de uma carta de controlo. (Fonte: Montgomery, 2012)

As causas especiais estão associadas a situações isoladas, que se refletem num comportamento anómalo do processo. Deve proceder-se à eliminação das causas especiais de variação e da redução das causas comuns de variação.

Existem duas fases distintas que caracterizam o procedimento de construção de uma carta de controlo, cujos objetivos diferem entre ambas. Na Fase I o objetivo é de analisar os dados recolhidos e verificar se não existem causas especiais de variação mediante a construção dos respetivos limites de controlo, garantindo a estabilidade do processo. Outro grande objetivo desta fase é de estimar os parâmetros associados ao processo (média e desvio padrão) e verificar se o processo tem capacidade de produzir de acordo com as especificações técnicas definidas (Pereira e Requeijo, 2012).

A Fase II irá iniciar-se quando existe confirmação de que o processo apresenta estabilidade, de forma a que seja possível monitorizar o processo ao longo do tempo.

As cartas de controlo assentam no princípio de "fazer bem à primeira" uma vez que, através da diminuição da variabilidade em torno dos valores alvo, é possível reduzir a quantidade de produção que não cumpre os requisitos estipulados, bem como limitar a necessidade de recorrer a atividades de reprocessamento. Tudo isto contribuirá para uma diminuição dos custos do processo e para um aumento da sua eficácia e eficiência, garantindo assim uma vantagem competitiva face à concorrência.

2.4.2. Condições de Aplicabilidade

Para uma correta implementação das cartas de controlo devem ser verificados alguns pressupostos relativos aos dados utilizados na construção das mesmas, nomeadamente a independência, aleatoriedade e Normalidade. De seguida apresentam-se alguns métodos para avaliar estes pressupostos.

2.4.2.1.Aleatoriedade dos Dados

A não aleatoriedade dos dados pode ter diversas causas tal como a mistura de diferentes populações e a correlação entre observações consecutivas ou desfasadas no tempo. Como tal, existem métodos que permitem verificar a aleatoriedade dos dados, sendo que os mais utilizados são o Teste das Sequências, o Teste das Sequências Ascendentes e Descendentes e o Teste Modificado do Quadrado Médio das Diferenças Sucessivas (Pereira e Requeijo, 2012).

2.4.2.2.Independência dos Dados

Para uma correta implementação das cartas de controlo é necessário averiguar se existe (ou não) independência dos dados. Dados independentes são aqueles em que não existe autocorrelação significativa entre os mesmos, ou seja, o valor que uma determinada característica da qualidade em estudo toma num intante t não depende do seu valor no instante (t-1) ou em qualquer instante t-k. Para verificar este pressuposto deve proceder-se à aplicação da Função de Autocorrelação (FAC) e da Função de Autocorrelação Parcial (FACP) (Pereira e Requeijo, 2012).

2.4.2.3.Normalidade dos Dados

A normalidade dos dados pode ser verificada recorrendo a diversas técnicas tal como o teste do Qui-Quadrado e o teste de Kolmogorov-Smirnov, que por sua vez foi utilizado no âmbito da presente dissertação. Caso os dados amostrais sigam uma distribuição aproximadamente Normal, para um determinado nível de significância α, conclui-se, por inferência estatística, que a população de onde foram recolhidas as amostras também segue uma distribuição aproximadamente Normal. Se, pelo contrário, for evidenciada a não Normalidade dos dados amostrais pode concluir-se que a população de onde foram recolhidos esses dados também não segue uma distribuição Normal. Em situações de não Normalidade existem diversas abordagens tais como (Pereira e Requeijo, 2012):

- Caracterização, através dos dados disponíveis, da distribuição da característica da qualidade.
- Transformação dos dados de modo a obter-se uma variável com distribuição aproximadamente Normal (Transformação Box-Cox, por exemplo).
- Utilização do método da Variância Ponderada para distribuições assimétricas.

2.4.3. Cartas de Controlo Tradicionais

As cartas de controlo tradicionais (habitualmente designadas por cartas de Shewhart) podem ser divididas em dois tipos, as cartas de controlo de variáveis e as cartas de controlo de atributos. As primeiras são utilizadas em situações em que a característica da qualidade em estudo pode ser expressa numa escala contínua, como por exemplo o peso (Pereira e Requeijo, 2012). As cartas

de controlo de atributos são úteis quando a característica da qualidade em estudo assume valores discretos, como por exemplo o número de defeitos encontrados numa unidade de produto. No âmbito desta dissertação, serão apenas abordadas as cartas de controlo de variáveis, uma vez que são aqueles que se adequam às características da qualidade a serem estudadas, e dado que serão recolhidas amostras não serão abordadas as cartas de controlo relativas a observações individuais.

As cartas de controlo de variáveis apresentam inúmeras vantagens e a sua implementação não apresenta grandes dificuldades significativas, uma vez que existem muitos processos e produtos com características mensuráveis, que por sua vez contêm mais informação do que uma avaliação qualitativa. Face ao controlo de atributos, é mais dispendioso recolher informação sobre características variáveis, no entanto é necessário recolher menos dados o que na globalidade poderá apresentar um custo mais reduzido para a empresa. Uma grande vantagem relativa à implementação destas técnicas estatísticas está relacionada com o facto de, ao ser necessário menos informação, o tempo de deteção e resolução de problemas é substancialmente mais reduzido, o que se reflete em menor quantidade de produto não conforme. Através deste tipo de análise também é possível estudar o comportamento do processo, no sentido de melhorar continuamente o seu desempenho e a qualidade do produto que é produzido, e não apenas averiguar se observações individuais de produto se encontram dentro das especificações.

2.4.3.1.Cartas de média($\overline{X}$) e Amplitude (R)

2.4.3.1.1. Fase I

A primeira etapa na construção destas cartas de controlo passa pela determinação da média ($\overline{X}$) e amplitude (R) amostrais. A etapa seguinte consiste na determinação da média das médias ($\overline{\overline{X}}$) e da amplitude média ($\overline{R}$). De forma a garantir que a estimação é robusta, o número de amostras deverá de ser superior a 20, com uma dimensão de amostra de 4 a 6 unidades (Montgomery, 2012). No caso de observações individuais deve recolher-se pelo menos 100 valores. A média e a amplitude podem ser estimados através das expressões 2.19 e 2.20 e a média das médias e a amplitude média são dadas pelas expressões 2.21 e 2.22.

$$\overline{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_{ij}}{n} \tag{2.19}$$

$$R_i = X_{\max} - X_{mín} \tag{2.20}$$

$$\overline{\overline{X}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \overline{X}_i}{m} \tag{2.21}$$

$$\overline{R} = \frac{\sum_{i=1}^{m} R_i}{m} \tag{2.22}$$

O próximo passo consiste no cálculo dos limites de controlo (*LSC* e *LIC*) e da linha central. Esta última pode ser calculada a partir das expressões 2.23 e 2.24:

$$LC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} \tag{2.23}$$

$$LC_R = \overline{R} \tag{2.24}$$

Os limites superior e inferior, relativos à média, podem ser obtidos através das expressões 2.25 e 2.26, respetivamente:

$$LSC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} + A_2 \overline{R} \tag{2.25}$$

$$LIC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} - A_2 \overline{R} \tag{2.26}$$

No que diz respeito à amplitude, os limites podem ser calculados através das expressões 2.27 e 2.28:

$$LSC_R = D_4 \overline{R} \tag{2.27}$$

$$LIC_R = D_3 \overline{R} \tag{2.28}$$

As constantes A_2, D_3 e D_4 só dependem da dimensão da amostra e podem ser consultados na tabela A.2 no Anexo A.I.

Após se verificar que o processo apresenta estabilidade, deve proceder-se à estimação dos parâmetros do processo mediante as expressões 2.29 e 2.30.

$$\hat{\mu} = \overline{\overline{X}} \tag{2.29}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{R}}{d_2} \tag{2.30}$$

2.4.3.1.2. Fase II

Depois de verificada a estabilidade e estimados os parâmetros do processo, é possível prosseguir para a Fase II do controlo estatístico do processo. Desta forma será possível monitorizar o processo e garantir que existe uma continuidade na estabilidade do mesmo. Nesta Fase II são construídas novas cartas de controlo com base nos parâmetros estimados na Fase I. Caso a dimensão de amostra se mantenha, a linha central e os limites de controlo serão idênticos aos da primeira fase, contudo caso isso não se verifique, os novos limites de controlo das cartas $\overline{X}$ e R são dados por

$$LIC_{\overline{X}} = \mu - A\sigma \tag{2.31}$$

$$LC_{\overline{X}} = \mu \tag{2.32}$$

$$LSC_{\overline{X}} = \mu + A\sigma \tag{2.33}$$

$$LIC_R = D_1\sigma \tag{2.34}$$

$$LC_R = d_2\sigma \tag{2.35}$$

$$LSC_R = D_2\sigma \tag{2.36}$$

2.4.3.2. Cartas $\overline{X}$ e S

2.4.3.2.1. Fase I

Apesar das Cartas $\overline{X}$ e R serem bastante utilizadas, muitas vezes existe a necessidade de se estimar o desvio padrão de forma direta, o que nos leva a utilizar as cartas de média e desvio padrão ($\overline{X}$ e S), onde S corresponde ao desvio padrão amostral (Montgomery, 2012). A metodologia utilizada para o cálculo dos parâmetros é em muito similar às cartas de média e amplitude, onde em primeiro lugar se procede ao cálculo da média global ($\overline{\overline{X}}$) e o desvio padrão médio ($\overline{S}$), que por sua vez correspondem aos valores da linha central da carta das médias ($LC_{\overline{X}}$) e a linha central da carta dos desvios padrão (LC_S), respetivamente (Pereira e Requeijo, 2012). As expressões utilizadas para o cálculo destas linhas centrais são:

$$LC_{\overline{\overline{X}}} = \overline{\overline{X}} = \frac{\sum_{i=1}^{m} \overline{X}_i}{m} \tag{2.37}$$

$$LC_S = \overline{S} = \frac{\sum_{i=1}^{m} S_i}{m} \tag{2.38}$$

Por sua vez, o desvio padrão da amostra (S_i) é dado pela seguinte expressão:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \overline{X}_i\right)^2}{n-1}} \tag{2.39}$$

Após o cálculo das médias e desvios padrão, procede-se ao cálculo dos limites da carta da média e da carta do desvio padrão. No caso da média, os limites são calculados recorrendo às seguintes expressões:

$$LSC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} + A_3\overline{S} \tag{2.40}$$

$$LIC_{\overline{X}} = \overline{\overline{X}} - A_3\overline{S} \tag{2.41}$$

No que diz respeito ao desvio padrão, os cálculos dos limites podem ser obtidos mediante as seguintes expressões:

$$LSC_S = B_4\overline{S} \tag{2.42}$$

$$LIC_S = B_3\overline{S} \tag{2.43}$$

Onde os valores A_3, B_4 e B_3, dependem exclusivamente da dimensão da amostra e podem ser consultados na tabela A.2 no anexo A.I.

Após se verificar que o processo apresenta estabilidade, deve proceder-se à estimação dos parâmetros do processo mediante as seguintes expressões

$$\hat{\mu} = \overline{\overline{X}} \tag{2.44}$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{S}}{c_4} \tag{2.45}$$

2.4.3.2.2. Fase II

Depois de verificada a estabilidade e estimados os parâmetros do processo, é possível prosseguir para a Fase II do controlo estatístico do processo. Desta forma será possível monitorizar o processo e garantir que existe uma continuidade na estabilidade do mesmo. Nesta segunda fase são construídas novas cartas de controlo com base nos parâmetros estimados na primeira fase. Caso a dimensão de amostra se mantenha, a linha central e os limites de controlo serão idênticos aos da primeira fase, contudo caso isso não se verifique, os novos limites de controlo das cartas $\overline{X}$ e S são dados por

$$LIC_{\overline{X}} = \mu - A\sigma \tag{2.46}$$

$$LC_{\overline{X}} = \mu \tag{2.47}$$

$$LSC_{\overline{X}} = \mu + A\sigma \tag{2.48}$$

$$LIC_R = B_5\sigma \tag{2.49}$$

$$LC_R = c_4\sigma \tag{2.50}$$

$$LSC_R = B_6\sigma \tag{2.51}$$

2.4.3.3. Regras para deteção de causas especiais de variação

Após serem calculados os limites de controlo para as cartas, procede-se à análise das mesmas. Se existir algum ponto que não se encontra no intervalo compreendido entre [*LIC*, *LSC*], estamos perante uma causa especial de variação. No entanto, apesar de todos os pontos se encontrarem entre os limites, pode acontecer que seja possível observar padrões não aleatórios que nos indicam a presença de causas especiais de variação.

Segundo a norma ISO 7870-2:2013, que substitui a anterior norma ISO 8258:1991, existem 8 regras para a deteção de causas especiais de variação (Pereira e Requeijo, 2012). A aplicação destas regras pressupõe que a distância entre os limites de controlo é de $6\sigma_{\omega,}$ onde existem 6 zonas de igual largura ($1\sigma_{\omega}$) e simétricas relativamente à linha central. Essas zonas podem ser observadas na figura 2.2 :

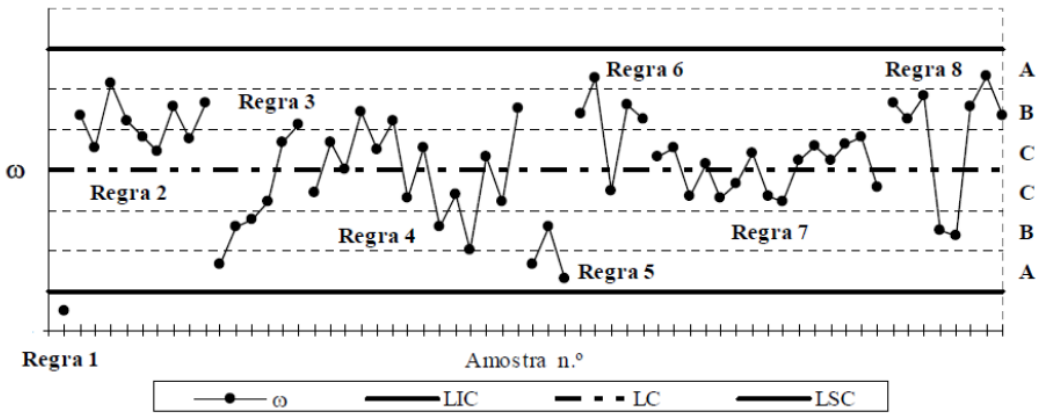

Figura 2.2 – Regras para deteção de causas especiais (Adaptado de Pereira & Requeijo, 2012)

As 8 regras para a deteção de causas especiais são as seguintes:

- Um qualquer ponto fora dos limites de ação
- Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C, do mesmo lado da linha central.
- Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente.

- Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente.
- Dois de três pontos consecutivos na zona A ou para além da zona A, do mesmo lado da linha central.
- Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A ou além desta zona, do mesmo lado da linha central.
- Quinze pontos consecutivos na zona C acima e abaixo da linha central.
- Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.

2.5. Capacidade Univariada do Processo

O objetivo do controlo estatístico de variáveis não é restringir as características de um produto a um único valor, mas sim reduzir a variabilidade em torno de um valor alvo. Para tal são utilizadas técnicas no sentido de avaliar a estabilidade do processo e verificar se este se encontra sob controlo, no entanto é também crucial averiguar se um determinado processo tem capacidade para produzir de acordo com as especificações definidas para os seus produtos.

A figura 2.3 ilustra o que muitas vezes acontece, ou seja, em muitos casos o processo até se apresenta sob controlo, mas com bastante variabilidade e sem capacidade de produzir segundo a especificação. Apesar de existirem diversos métodos para o estudo de capacidade, no âmbito desta dissertação optou-se por proceder ao cálculo e análise dos índices de capacidade do processo, surge como uma metodologia importante para qualquer empresa que pretenda melhorar o desempenho dos seus processos.

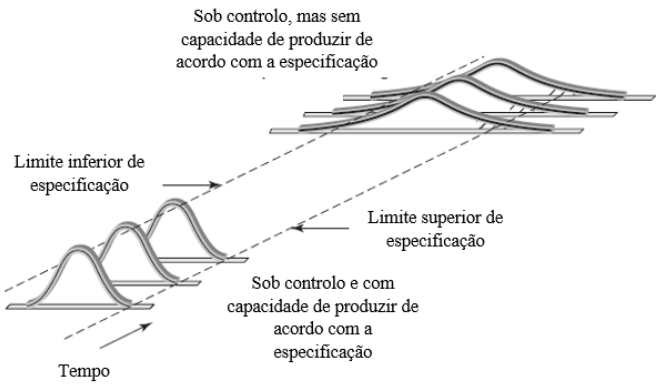

Figura 2.3 - Capacidade de Processos (Adaptado de: Oakland (2008))

2.5.1. Índices de Capacidade do Processo para Dados Normalmente distribuídos

Os índices de capacidade do processo permitem avaliar se um processo está a produzir de acordo com a especificação técnica ou funcional. Na grande maioria dos processos a variação aceitável para a característica de um determinado produto é de 6σ e assumindo que esses processos seguem

uma distribuição Normal com média μ e desvio padrão σ, pode-se considerar que 99,73% dos dados se encontram compreendidos no intervalo $\mu \pm 3\sigma$ (figura 2.4).

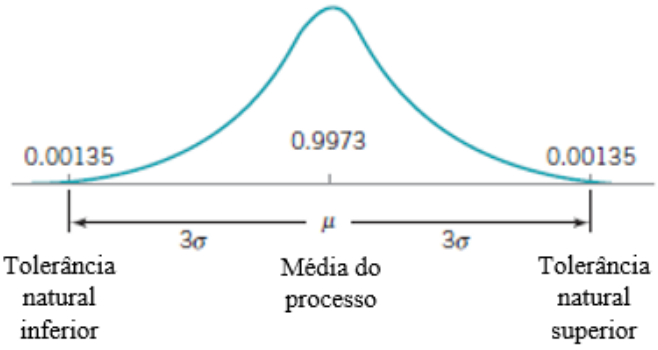

Figura 2.4 - Tolerâncias naturais para uma distribuição normal (Adaptado de: Montgomery (2012))

Um método simples e que permite uma análise quantitativa reside na utilização do *índice de capacidade potencial* (C_P), desenvolvido por Juran (1974), que é dado por

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \tag{2.52}$$

onde LSE e LIE correspondem, respetivamente, ao limite superior e inferior de especificação.

De forma a produzir de acordo com a especificação, a diferença entre o limite superior e o limite inferior de especificação deverá de ser superior à variação total do processo. Um valor de C_P abaixo de 1 indica que a variação do processo é maior que o intervalo de especificação definido, logo o processo não apresenta capacidade. É importante referir este índice não dá nenhuma indicação acerca do processo se encontrar centrado, limita-se a fazer uma comparação entre a variação total e o intervalo da especificação (Oakland, 2008).

Os valores de C_P devem ser o maior possível e não é desejável que este seja inferior a 1, uma vez que iria significar que a variabilidade do processo excede os limites de especificação. Para uma especificação bilateral, C_P=1,33 é um valor aceitável para um determinado processo, no entanto isto não garante que o processo não produza produto não conforme, uma vez que existe a possibilidade do processo ter C_P=1,33, mas não se encontrar centrado, como é possível verificar na figura 2.5.

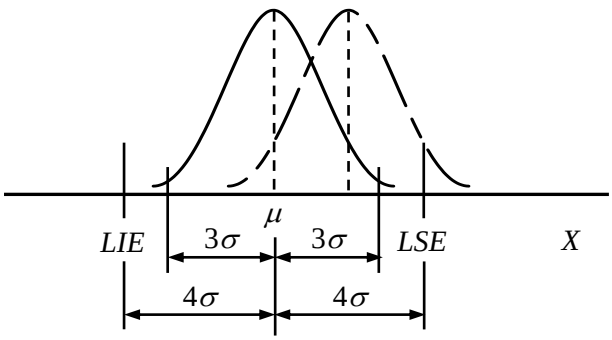

Figura 2.5 - Processo com capacidade, mas não centrado. (Extraído de Pereira e Requeijo (2012))

Assim surgiu a necessidade de utilizar outros indicadores de capacidade para averiguar se o processo é capaz e se está centrado, nomeadamente o índice de segunda geração C_{pk}. O índice C_{pk} apresenta-se bastante útil no sentido de considerar não só a dispersão, mas também a posição da média onde, para uma especificação bilateral, é definido por

$$C_{pk} = mín\left(\left(C_{pk}\right)_I, \left(C_{pk}\right)_S\right) \tag{2.53}$$

em que

$$\left(C_{pk}\right)_I = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \tag{2.54}$$

$$\left(C_{pk}\right)_S = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \tag{2.55}$$

Caso a especificação seja unilateral, se a característica for quanto-maior-melhor, o C_{pk} é calculado pela expressão 2.55, caso a característica seja do tipo quanto-menor-melhor deve utilizar-se a expressão 2.54. Mediante as características do processo, Montgomery (2012) sugere que o C_{pk} aceitável adote diversos valores. A tabela 2.3 apresenta, para diversos tipos de especificação e características do processo, os diversos valores de C_{pk} aceitáveis.

Tabela 2.3 – Valores mínimos de índices de capacidade para diferentes situações (Montgomery 2012)

Tipo de Processo	Especificação Unilateral	Especificação Bilateral
Processos Existentes	1,25	1,33
Processos Novos	1,45	1,50
Características críticas ou associadas a segurança e/ou força	1,45	1,50
Características críticas ou associadas a segurança e/ou força, para um processo novo	1,60	1,67

Os índices C_p e C_{pk} são indicadores adequados para avaliar o progresso na melhoria dos paradigmas da qualidade, nos quais a redução da variabilidade é um dos grandes objetivos. No entanto estes indicadores não dão indicação acerca dos custos associados à impossibilidade de corresponder às necessidades dos clientes. De forma a resolver este problema, (Hsiang and Taguchi, 1985) introduziram o índice C_{pm} que considera a diferença entre a média do processo e o valor alvo pretendido (T), no intervalo natural do processo e é dado por,

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \tag{2.56}$$

Além dos índices C_p, C_{pk} e C_{pm}, Pearn *et al.* (1992) propôs o índice de capacidade do processo $C_{pmk.}$ Este índice pretende alertar para aumentos na variância do processo e/ou para quando a média do processo se desvia do seu valor alvo e é definido por,

$$C_{pmk} = mín\left\{\frac{LSE - \mu}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}, \frac{\mu - LIE}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}}\right\} \tag{2.57}$$

2.5.2. Índices de Capacidade do Processo para dados não Normais

Em situações em que os dados referentes a uma determinada característica da qualidade X não são Normalmente distribuídos devem ser utilizados métodos alternativos.

Clements (1989) foi um dos pioneiros a desenvolver índices de capacidade que se baseiam na diferença entre os percentis $\xi_{99.865\%}$ e $\xi_{0.135\%}$, em vez da utilização de 6σ, e que utilizam a mediana do processo ($\xi_{50\%}$) em vez da sua média (μ). No entanto foram realizados outros desenvolvimentos no âmbito do estudo de capacidades para dados não Normais, com especial referência aos trabalhos de Pearn *et al.* (1995), Schneider *et al.* (1995), Wright (1995), Zwick, (1995), Chen e Pearn (1997), Pearn *et al.* (1999), McCormack *et al.* (2000), Kotz e Johnson (2002) e Wang *et al.* (2016).

2.5.2.1. Método dos percentis

Com base na abordagem de Clements (1989) os índices de capacidade para dados não Normais podem ser definidos por:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{\xi_{99,865\%} - \xi_{0,135\%}} \tag{2.58}$$

$$C_{pk} = mín\left((C_{pk})_I, (C_{pk})_S\right)$$

$$= mín\left\{\frac{LSE - \xi_{50\%}}{\xi_{99,865\%} - \xi_{50\%}}, \frac{\xi_{50\%} - LIE}{\xi_{50\%} - \xi_{0,135\%}}\right\} \tag{2.59}$$

em que, $\xi_{99,865\%}$e $\xi_{0,135\%}$ são, respetivamente, o percentil à direita de 99,865% e 0,135% da distribuição de uma variável (*X*) em estudo e $\xi_{50\%}$ corresponde à sua mediana.

2.5.2.2. Transformação Box-Cox

Uma opção viável para situações de não Normalidade dos dados consiste na transformação Box-Cox, proposta por Box e Cox (1964), de forma a que a variável transformada *Z* seja Normalmente distribuída com média μ_Z e desvio padrão σ_Z. Depois de se analisar estatisticamente a variável transformada *Z*, mediante a construção das cartas de controlo mais adequadas, e de ser verificada a estabilidade do processo pode proceder-se ao estudo de capacidades. Assim seja *X* uma variável não Normal a transformação Box-Cox será dada por:

$$Z = \begin{cases} \frac{X^{\lambda}-1}{\lambda} & se\ \lambda \neq 0 \\ \ln(X) & se\ \lambda = 0 \end{cases} \tag{2.60}$$

onde λ é um parâmetro que poderá ser obtido mediante a utilização do *software Statistica*.

Após a transformação dos dados e em situações em que $\lambda \neq 0$ a sua média e desvio padrão podem ser estimados a partir das seguintes expressões:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{x^{\lambda}-1}{\lambda} \tag{2.61}$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x^{\lambda}-1}{\lambda} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{x^{\lambda}-1}{\lambda}\right)^2} \tag{2.62}$$

2.5.2.3. Outros índices de capacidade

Outra abordagem apresentada por Pereira e Requeijo (2012), com base nos desenvolvimentos enunciados no início da secção 2.5.2 consiste na utilização dos seguintes índices de capacidade:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{5{,}15\sigma} \tag{2.63}$$

$$C_{pk} = mín\left(\frac{\mu - LIE}{2{,}575\sigma}, \frac{LSE - \mu}{2{,}575\sigma}\right) \tag{2.64}$$

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{5{,}15\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \tag{2.65}$$

$$C_{pmk} = \frac{mín(LSE - \mu, \mu - LIE)}{2{,}575\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \tag{2.66}$$

Face aos índices utilizados na situação em que os dados seguem uma distribuição Normal, apenas existe diferença no denominador, onde se assume que a probabilidade de um valor da variável X se encontrar no intervalo $\mu \pm 2{,}575\sigma$ é de 99%.

2.6. Controlo Estatístico de pequenas produções

Mediante a necessidade de responder à exigência crescente dos mercados, muitas empresas procuram garantir que reduzem significativamente a quantidade de matérias-primas em armazenamento de forma a que as unidades em vias de produção sejam igualmente reduzidas, o que se refletirá numa quantidade de produção menor. Esta preocupação surge como uma estratégia de redução de desperdício para o consequente aumento da eficácia e eficiência da empresa, no entanto esta mudança de paradigma no planeamento da produção apresenta alguns desafios ao Controlo de Qualidade, uma vez que haverá necessidade de adotar novas metodologias para desempenhar as suas funções da forma mais adequada. (Pereira e Requeijo, 2012). O conceito de pequena produção (*short run)* está relacionado com três situações distintas:

- As unidades produzidas apresentam-se numa quantidade bastante reduzida (menos de vinte) e o tempo entre produções é relativamente distante.
- Apesar do número de unidades produzidas ser significativamente grande (mais de cem), a produção é rapidamente executada, em termos temporais.
- A produção é realizada através de um número limitado de lotes específicos, ao longo do tempo.

Uma possível solução para esta situação consiste na construção de cartas de controlo específicas, que por sua vez se adaptam às particularidades deste tipo de produção. Analogamente às cartas de controlo tradicionais, as cartas de controlo para pequenas produções podem ser aplicadas a variáveis ou a atributos, contudo nesta dissertação apenas serão abordadas as cartas relativas a variáveis, uma vez que este foi um dos tipos de cartas utilizado.

No que diz respeito a este tipo de cartas de controlo, existe duas situações possíveis que é de extrema relevância abordar. A primeira situação remete-nos para insuficiência de dados necessários para se proceder à estimação dos parâmetros do processo, neste caso deverão utilizar-se as Cartas Q. Na segunda situação, em que existem dados suficientes para a estimação dos

parâmetros do processo, deverão ser utilizadas as Cartas de Diferenças (Cartas *D*) ou as Cartas *Z* e *W* (Pereira e Requeijo, 2012).

Tal como nas cartas de controlo tradicionais de Shewhart, os pressupostos de independência e Normalidade dos dados, associados à característica da qualidade em estudo, devem ser verificados.

2.6.1. Cartas Z e W

Em muitas situações em que se analisam diferentes características da qualidade do produto poderá ser preferível construir uma única carta de controlo que contemple, no mesmo documento, todas as características em estudo, em vez de se proceder à construção de diversas cartas individuais. Para tal procede-se à transformação dos dados, de forma a que estes se tornem adimensionais, recorrendo aos parâmetros estimados na Fase I. Como tal este tipo de cartas de controlo é preferencialmente utilizado na Fase II do controlo estatístico do processo.

Analogamente às cartas tradicionais de Shewart, as cartas *Z* e *W* seguem os mesmos princípios fundamentais subjacentes, nomeadamente, a recolha de subgrupos racionais, frequência de amostragem adequada ao processo em estudo e um nível de significância α=0,0027. As regras de deteção de padrões não aleatórios que constam na norma ISO 7870-2:2013, são também aplicáveis a este tipo de cartas de controlo (Pereira e Requeijo, 2012).

Existem três tipos de cartas *Z* e *W* nomeadamente, as cartas de média e amplitude, as cartas de média e desvio padrão e as cartas de observações individuais e amplitude móvel. No âmbito desta dissertação, não serão abordadas as cartas relativas a observações individuais e amplitudes móveis, devido à natureza dos dados recolhidos.

2.6.1.1. Carta da média e do desvio padrão

De forma a controlar os parâmetros dos processos referentes às características da qualidade em estudo, recorrendo às médias e desvios padrão, procede-se ao cálculo das estatísticas *Z* e *W* mediante as seguintes expressões

$$(Z_i)_j = \left(\frac{\overline{X}_i - \mu}{\sigma_{\overline{X}}} \right)_j = \left(\frac{\overline{X}_i - \mu}{\sigma / \sqrt{n_i}} \right)_j \tag{2.67}$$

$$(W_i)_j = \left(\frac{S_i}{c_4 \sigma} \right)_j = \left(\frac{S_i}{\overline{S}} \right)_j \tag{2.68}$$

em que

$(n_i)_j$ - dimensão da amostra i, para o produto j

$(\bar{X}_i)_j$ - média da amostra i para o produto j

$(\mu)_j$ - média do processo, relativamente à característica X, para o produto j

$(\sigma)_j$ - desvio padrão do processo, relativamente à característica X, para o produto j

$(S_i)_j$ - desvio padrão da amostra i para o produto j

$(\bar{S})_j$ - média dos desvios padrão amostrais para o produto j

Os limites de controlo para as cartas $Z_{\bar{X}}$ e W_s são definidos por

$$\begin{aligned} LSC_Z &= 3 \\ LC_Z &= 0 \\ LIC_Z &= -3 \end{aligned} \tag{2.69}$$

$$\begin{aligned} LSC_{W_s} &= B_4 \\ LC_{W_s} &= 1 \\ LIC_{W_s} &= B_3 \end{aligned} \tag{2.70}$$

Onde os valores B_3 e B_4 dependem exclusivamente da dimensão da amostra e podem ser consultados na tabela A.2 do anexo A.I.

Na construção das cartas $Z_{\bar{X}}$ e W_s deve ter-se em atenção o facto de se representar, em cada ponto, os valores de $(Z_i)_j$ e $(W_i)_j$ por ordem cronológica, seja qual for o produto. No que diz respeito aos limites de controlo, para as cartas $Z_{\bar{X}}$, os limites não se alteram face a diferentes dimensões de amostras, já os limites de controlo das cartas W_s sofrem alterações mediante a dimensão da amostra (Pereira e Requeijo, 2012).

2.6.1.2. Capacidade do Processo

A aplicação de técnicas de controlo estatístico tem duas grandes finalidades. A primeira está relacionada com a verificação da estabilidade do processo tanto na Fase I como na Fase II, existindo inúmeras técnicas que se adequam a cada um dos casos. Após se assegurar que o processo se encontra sob controlo estatístico, interessa partir para a segunda grande finalidade

deste tipo de técnicas, a análise da capacidade do processo. Para a Fase I a abordagem a ser feita relaciona-se com o cálculo e análise dos índices de capacidade tradicionais apresentados na seção 2.5. No que diz respeito à Fase II a situação é diferente, uma vez que não existe um procedimento único. A dificuldade aumenta quando são analisados diversos produtos, como se verifica no caso das "pequenas produções". Posto isto surgiu a necessidade de encontrar uma solução que permitisse analisar a capacidade do processo, em tempo real, à medida que se procede à recolha de dados para as diversas referências de produtos. Desta forma será possível avaliar o desempenho dos processos e verificar se existe conformidade dos produtos com as suas especificações definidas. (Pereira e Requeijo, 2012)

Após se verificar que os processos se apresentam sob controlo estatístico, na Fase I, e que garantem um desempenho mínimo satisfatório, deve seguir-se a análise de capacidade na Fase II que é caracterizada pelo cálculo dos índices Z_I e Z_S, que por sua vez são calculados em tempo real, ou seja, à medida que se procede à recolha dos dados. Estes índices acabam por ser uma mera transformação dos índices de capacidade $(C_{pk})_I$ e $(C_{pk})_S$. A utilização dos índices Z_I e Z_S mostra-se bastante útil, uma vez que permite, não só verificar se o processo é capaz, em tempo real, mas também verificar se este se encontra centrado com o valor nominal da especificação. O processo estará centrado se os índices Z_I e Z_S apresentarem valores absolutos semelhantes.

Estes índices são calculados recorrendo às seguintes expressões

$$(Z_I)_j = \left(\frac{LIE - \mu}{k\sigma}\right)_j \tag{2.71}$$

$$(Z_S)_j = \left(\frac{LSE - \mu}{k\sigma}\right)_j \tag{2.72}$$

No que diz respeito ao valor de k, para especificações unilaterais utiliza-se habitualmente k =1,25 e para especificações bilaterais utiliza-se k = 1,33. No entanto existe uma tendência para se exigirem índices de capacidade maiores, como tal, k poderá adotar valores na ordem de 2. Para um processo ser capaz $(Z_I)_j$ deve ser igual ou inferior a -3 e $(Z_S)_j$deverá de ser maior ou igual a 3.

A estimação dos índices $(Z_I)_j$ e $(Z_S)_j$ é feita com base nos parâmetros estimados dos processos, nomeadamente a média e o desvio padrão para um determinado instante r e produto j, através das seguintes expressões

$$\left(\left(\hat{Z}_I\right)_r\right)_j = \left(\frac{LIE - \hat{\mu}_r}{k\hat{\sigma}_r}\right)_j \tag{2.73}$$

$$\left(\left(\hat{Z}_S\right)_r\right)_j = \left(\frac{LSE - \hat{\mu}_r}{k\hat{\sigma}_r}\right)_j \tag{2.74}$$

As estimativas da média e do desvio padrão para um determinado instante r são dadas por

$$\hat{\mu}_r = \overline{\overline{X}}_r \tag{2.75}$$

$$\hat{\sigma}_r = \frac{\overline{S}_r}{c_4} \tag{2.76}$$

onde

$$\overline{\overline{X}}_r = \frac{1}{r}\left((r-1)\overline{\overline{X}}_{r-1} + \overline{X}_r\right), r = 2,3,... \tag{2.77}$$

$$\overline{S}_r = \frac{1}{r}\left((r-1)\overline{S}_{r-1} + S_r\right), r = 2,3,... \tag{2.78}$$

$$\overline{R}_r = \frac{1}{r}\left((r-1)\overline{R}_{r-1} + R_r\right), r = 2,3,... \tag{2.79}$$

2.6.2. Cartas Q

Em situações em que existe um número restrito de dados, onde uma das possíveis causas pode estar relacionada com a produção de pequenos lotes de determinados produtos, os parâmetros do processo não podem ser estimados de forma conveniente. Posto isto, Charles Quesenberry propôs uma metodologia que consiste em transformar a estatística referente a uma determinada característica da qualidade em estudo *X*, numa variável *Q* que por sua vez segue, aproximadamente, uma distribuição Normal reduzida, com média zero e variância um. De notar que é assumido que os valores da variável *X* são independentes e identicamente distribuídos segundo uma distribuição Normal. (Pereira e Requeijo, 2012).

Este tipo de cartas de controlo assemelha-se em muito às cartas de controlo tradicionais no que diz respeito à recolha de subgrupos racionais, à frequência de amostragem adequada ao processo e ao nível de significância α=0,0027. Tal como se verificou nas cartas *Z* e *W*, também são utilizadas as regras de deteção de pontos fora dos limites de controlo e padrões não aleatórios. As

cartas Q podem ser utilizadas, tanto para observações individuais como para amostras, no âmbito desta dissertação apenas será abordada a análise para amostras.

2.6.2.1. Cartas Q para a média e variância

As cartas Q($\bar{X}$) e Q(S^2) são construídas com base nas seguintes estatísticas:

$$Q_i\left(\overline{X}_i\right)=\Phi^{-1}\left(G_{n_1+\ldots+n_i-i}\left(\omega_i\right)\right)=\Phi^{-1}\left(G_{\nu_1+\ldots+\nu_i-i}\left(\omega_i\right)\right), i=2,3,\ldots \tag{2.80}$$

em que $\nu_i = n_i - 1$

$$Q_i\left(S_i^2\right)=\Phi^{-1}\left(F_{n_i-1,n_1+\ldots n_{i-1}-i+1}\left(\theta_i\right)\right)=\Phi^{-1}\left(F_{\nu_i,\nu_i+\ldots\nu_i-1}\left(\theta_i\right)\right), i=2,3,\ldots \tag{2.81}$$

onde,

$$\omega_i=\sqrt{\frac{n_i\left(n_1+\ldots+n_{i-1}\right)}{n_1+\ldots n_i}}\left(\frac{\overline{X}_i-\overline{\overline{X}}_{i-1}}{S_{p,i-1}}\right), i=2,3\ldots \tag{2.82}$$

$$S_{p,i}^2=\frac{\left(n_1-1\right)S_1^2+\ldots+\left(n_i-1\right)S_i^2}{n_1+\ldots n_i-i}=\frac{\sum_{j=1}^{i}\nu_j S_j^2}{\sum_{j=1}^{i}\nu_j} \tag{2.83}$$

$$\overline{\overline{X}}_i=\frac{n_1\overline{X}_i+\ldots+n_i\overline{X}_i}{n_i+\ldots+n_i} \tag{2.84}$$

$$\theta_i=\frac{S_i^2}{S_{p,i-1}^2}, i=2,3,\ldots \tag{2.85}$$

tendo em consideração que,

n_i - dimensão da amostra i

$\overline{X}_i$ - média da amostra i

$\overline{\overline{X}}_i$ - média das médias de i amostras

$S^2_{p,i}$ - variância combinada de i amostras

2.6.2.2. Capacidade do Processo

Quando existe um número restrito de dados a análise de capacidade dos processos em tempo real torna-se extremamente vantajosa. Assim será possível verificar se o processo está, ou não, a

produzir unidades não conformes permitindo atuar sobre o processo, o mais cedo possível, se necessário.

Ao utilizar cartas *Q* no controlo estatístico do processo a análise da capacidade, mediante as respetivas especificações, é feita através dos índices Q_I e Q_S, que têm por base o conceito do índice tradicional C_{pk} (Pereira and Requeijo, 2012).

Muito à semelhança do que é feito nas cartas Z, os índices Q_S e Q_I são representados, em cada instante, na respetiva carta *Q*, sendo definidos por:

$$Q_I = \frac{LIE - \mu}{k\sigma} \tag{2.86}$$

$$Q_S = \frac{LSE - \mu}{k\sigma} \tag{2.87}$$

Relativamente ao instante r as estimativas dos índices são calculadas através das seguintes expressões

$$\left(\hat{Q}_I\right)_r = \frac{LIE - \hat{\mu}_r}{k\hat{\sigma}_r} \tag{2.88}$$

$$\left(\hat{Q}_S\right)_r = \frac{LSE - \hat{\mu}_r}{k\hat{\sigma}_r} \tag{2.89}$$

As estimativas dos parâmetros (média e desvio padrão), no instante *r*, podem ser calculadas em função da natureza dos dados em análise (observações individuais ou amostras). Para efeitos desta dissertação, será apenas considerada a situação relativa a amostras:

$$\hat{\mu}_r = \overline{\overline{X}}_r \tag{2.90}$$

$$\hat{\sigma}_r = \frac{\overline{S}_r}{c_4} \tag{2.91}$$

2.7. Controlo Estatístico do Processo (Multivariado)

Normalmente existe necessidade de controlar várias características da qualidade, em simultâneo, e não apenas uma característica isolada. O caso mais comum consiste na utilização de cartas de controlo individuais para cada uma das características, que por sua vez apresenta algumas desvantagens. A primeira está relacionada com o facto de conduzir a um número elevado de documentos associados a cada característica. Outra grande desvantagem está relacionada com o facto de, ao ser feita uma análise independente de características que apresentam algum nível de correlação entra elas, poder resultar em situações em que as conclusões que são retiradas desse estudo não estejam em concordância com o que realmente sucede no processo. Se, por exemplo, existir necessidade de controlar duas características correlacionadas X_1 e X_2 e forem construídas as respetivas cartas da média, separadamente, para cada uma delas não se verificam situações anormais (figura 2.6). Contudo se for feita uma análise conjunta de ambas as características, procedendo à construção de uma área de controlo simultâneo, é possível verificar que existe uma amostra com um comportamento bastante diferente de todos os outros pontos. (Montgomery, 2012)

Uma possível solução para este tipo de situações está relacionada com a análise conjunta de ambas as características através da utilização de técnicas de controlo estatístico multivariado. Para efeitos desta dissertação serão abordadas duas vertentes do Controlo Estatístico Multivariado, um primeiro em que existem dados suficientes para estimar os parâmetros do processo e um segundo que contempla um número restrito de dados.

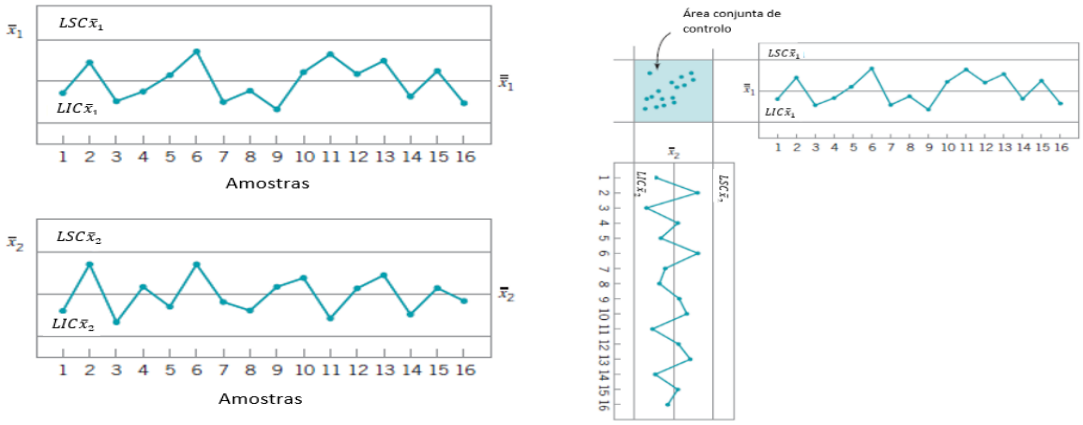

Figura 2.6 - Análise isolada vs análise conjunta (Adaptado de: Montgomery (2012))

2.7.1. Número suficiente de dados – Cartas Multivariadas Tradicionais

Quanto mais características da qualidade forem controladas em simultâneo maior será a distorção na monitorização do processo, ou seja, se para uma característica em estudo a probabilidade de um erro tipo I (ocorrência de um falso alarme) é de 0,27%, se procedermos a um estudo

multivariado com duas características essa probabilidade será $0{,}0027 \times 0{,}0027 = 0{,}0000729$. Já a probabilidade de um ponto pertencer ao intervalo de limites de controlo definidos será de $(1 - 0{,}0027) \times (1 - 0{,}0027) = 0{,}994607$.

Para p características da qualidade que sejam independentes e normalmente distribuídas o risco de tipo I (α) é dado pela seguinte expressão:

$$\alpha = P(erro\ do\ tipo\ I) = 1 - \prod_{i=1}^{p}(1 - \alpha_i) \tag{2.92}$$

Por sua vez a probabilidades dos pontos das p variáveis pertencerem, simultaneamente, aos intervalos definidos pelos limites de controlo é dada por:

$$P(p\ pontos\ entre\ os\ limites\ de\ controlo) = \prod_{i=1}^{p}(1 - \alpha_i) \tag{2.93}$$

Na situação em que as p características da qualidade não são independentes as expressões 2.92 e 2.93 não são aplicáveis.

Segundo Montgomery (2012) os primeiros desenvolvimentos associados a este tipo de controlo estatístico são da autoria Hotelling (1947), que por sua vez deu origem às cartas de controlo T^2 para análise de alterações no vetor da média em processos multivariados. No entanto existem diversos outros tipos de cartas de controlo multivariadas, Crosier (1988) e Pignatiello e Runger, (1990) contribuíram para o desenvolvimento de cartas de Somas Acumuladas (CUSUM) multivariadas. Lowry *et al.* (1992) deram contributos no sentido de desenvolver as cartas MEWMA que se revelaram bastante úteis na deteção de pequenas alterações no vetor média. Reynolds e Cho (2006) e Reynolds e Stoumbos (2008) propuseram a combinação de diferentes cartas multivariadas para a monitorização da média. Para mais estudos relativos ao controlo estatístico multivariado devem ser consultados os estudos por parte de Chan *et al.* (2003), Huwang *et al.* (2007), Wang *et al.* (2000), Woodall e Montgomery (1999) e Pereira e Requeijo (2012).

No desenvolvimento desta dissertação o enfoque irá recair nas cartas T^2, uma vez que foram estas as cartas de controlo multivariadas utilizadas. Tal como no estudo univariado, estas cartas apresentam 2 fases distintas, a Fase I que está relacionada com a estabilidade do processo de forma a ser possível estimar os seus parâmetros e averiguar se o processo apresenta capacidade e a Fase II que é caracterizada pela monitorização do processo. Relativamente ao número de amostras e segundo Pereira e Requeijo (2012), devem ser recolhidas entre 25 a 30 amostras de dimensão igual ou superior a 4 ou, no caso das observações individuais, m=100. De seguida deve proceder-se à construção da carta T^2 para a Fase I de forma a verificar a estabilidade e estimar os parâmetros do processo para as p características em análise. De seguida deve estabelecer-se os limites de controlo da carta T^2 para a Fase II com base nas m amostras ou observações individuais utilizadas na Fase I para que se proceda à construção da carta T^2 para a Fase II de forma a monitorizar o processo em tempo real. Assim que o número total de amostras m recolhidas para

as cartas T^2 da Fase I e da Fase II esteja contido no intervalo $\frac{800p}{3(n-1)} \leq m \leq \frac{400p}{n-1}$, deverá proceder-se à monitorização do processo (Fase II), utilizando as cartas χ^2. No caso se observações individuais o m deve estar contido no intervalo $180p \leq m \leq 300p$. (Pereira e Requeijo, 2012)

No desenvolvimento desta dissertação foram utilizadas cartas T^2 para amostras, que se baseiam no pressuposto de que a distribuição conjunta das p variáveis é uma distribuição Normal multivariada $N_p(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$, com vetor média $\boldsymbol{\mu}' = (\mu_1, \mu_2, \ldots \mu_p)$ e a matriz das covariâncias $\boldsymbol{\Sigma}$. É assumido que as variáveis $X_1, X_2, \ldots, X_p$ são independentes e identicamente distribuídas. Se por sua vez se verificar que existe auto-correlação em alguma das variáveis, deve proceder-se à determinação dos resíduos correspondentes às p variáveis e aplicar as cartas de controlo multivariadas a esses mesmos resíduos.

2.7.1.1. Condições de aplicabilidade

Tal como no estudo univariado existem condições necessárias para que seja possível implementar o controlo estatístico multivariado. Deve ser confirmada a aleatoriedade dos dados, onde Holmes e Mergen (1998) sugerem um teste multivariado para ser aplicado às p características da qualidade. Deve também ser verificada a Normalidade dos dados referentes a cada umas das características da qualidade em análise e a independência dos mesmos.

2.7.1.2. Cartas T^2 média de amostras

Na Fase I da aplicação de cartas T^2 são recolhidas m amostras de dimensão n para p características em análise, onde por sua vez se procede ao cálculo das médias, variâncias e covariâncias amostras a partir das observações individuais X_{ijk} (i = 1,2,…n; j = 1,2,…,p; k = 1,2,…m), através das seguintes expressões:

$$\overline{X}_{jk} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_{ijk} \tag{2.94}$$

$$S_{jk}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_{ijk} - \overline{X}_{jk}\right)^2 \tag{2.95}$$

$$S_{jhk} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_{ijk} - \overline{X}_{jk}\right)^2\left(X_{ihk} - \overline{X}_{hk}\right); j \neq h \tag{2.96}$$

Mediante a necessidade de calcular as médias das médias amostrais ($\bar{\bar{X}}_j$), que por sua vez serão os elementos do vetor média $\overline{\overline{\mathbf{X}}}$, e as variâncias ($\bar{S}_j^2$) e covariâncias amostrais ($\bar{S}_{jh}$) que por sua vez são os elementos da matriz das covariâncias **S**, devem utilizar-se as seguintes expressões:

$$\overline{\overline{X}}_j = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}\overline{X}_{jk} \tag{2.97}$$

$$\overline{S}_{jj} = \overline{S_j^2} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}S_{jk}^2 \tag{2.98}$$

$$\overline{S}_{jh} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m}S_{jhk} \quad ; \quad j \neq h \tag{2.99}$$

Por sua vez os vetores $\overline{\overline{\mathbf{X}}}$ e **S** são dados por:

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}} = \left(\overline{\overline{X}}_1, \overline{\overline{X}}_2, ..., \overline{\overline{X}}_p\right)' \tag{2.100}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} & \dots & \bar{S}_{1p} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{23} & \dots & \bar{S}_{2p} \\ . & . & . & \dots & . \\ . & . & . & \dots & . \\ . & . & . & \dots & . \\ . & . & . & \dots & . \\ \bar{S}_{p1} & \bar{S}_{p2} & \bar{S}_{p3} & \dots & \bar{S}_{pp} \end{bmatrix} \tag{2.101}$$

O vetor $\overline{\mathbf{X}}_k$ é formado pelas médias das *p* características da qualidade da amostra k:

$$\overline{\mathbf{X}}_k = \left(\overline{X}_{1k}, \overline{X}_{2k}, ..., \overline{X}_{pk}\right)' \tag{2.102}$$

Em que a simbologia utilizada é referente a:

X_{ijk} – observação *i* da característica da qualidade *j* na amostra *k*

$\bar{X}_{jk}$ – média da característica da qualidade *j* na amostra *k*

S_{jk}^2 – variância da característica da qualidade *j* na amostra *k*

S_{jhk} – covariância entre as característica da qualidade *j* e *h* na amostra *k*

$\bar{\bar{X}}_j$ – média das *m* médias de amostra referente à característica da qualidade *j*

$\bar{S}_j^2$ – média das *m* variâncias da amostra referente à característica da qualidade *j*

$\bar{S}_{jh}$ - média das *m* covariâncias da amostra entre as características *j* e *k*

Com base nas expressões acima apresentadas será possível proceder ao cálculo da estatística de *Hotelling* (T^2) que, para um instante *k*, é definida por:

$$\left(T^2\right)_k = n\left(\overline{\mathbf{X}}_k - \overline{\overline{\mathbf{X}}}\right)'\mathbf{S}^{-1}\left(\overline{\mathbf{X}}_k - \overline{\overline{\mathbf{X}}}\right) \tag{2.103}$$

Mediante a representação num gráfico dos diversos valores de T^2 para cada instante k, em conjugação com os limites de controlo calculados, obtém-se a carta T^2. Segundo Alt (1985) é preciso algum cuidado no cálculo dos limites de controlo, uma vez que na fase de verificação de estabilidade e estimação de parâmetros (Fase I) os limites utilizados são diferentes daqueles que são utilizados na fase de monitorização (Fase II).

Para a Fase I do controlo estatístico multivariado os limites a utilizar são dados por:

$$LSC = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha,p,mn-m-p+1}$$

$$LIC = 0 \tag{2.104}$$

onde $F_{\alpha,p,mn-m-p+1}$ é o percentil à direita, para um nível de significância α, da Distribuição de Fisher com graus de liberdade p e $mn-m-p+1$ respetivamente.

Quando o valor de $(T^2)_k$ for superior ao limite superior de controlo, é detetada uma causa especial de variação. Dever-se-á retirar as estatísticas amostrais referentes às causas especiais e recalcular os vetores $\overline{\overline{\mathbf{X}}}$ e $\mathbf{S}$ e a estatística T^2.

Após ser verificada a estabilidade do processo e estimados os seus parâmetros ($\hat{\boldsymbol{\mu}}=\overline{\overline{\mathbf{X}}}$ e $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}=\mathbf{S}$) pode ser dada como terminada a Fase I do controlo estatístico multivariado e partir para a Fase II. Nesta fase será feita a monitorização do processo, em tempo real, dos dados que venham a ser recolhidos e é feita com a estatística calculada através da expressão 2.103, onde os limites de controlo serão dados por:

$$LSC = \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{\alpha,p,mn-m-p+1}$$

$$\text{LIC} = 0 \tag{2.105}$$

De notar que o cálculo do limite superior de controlo se baseia no número de amostras (m) da Fase I e se $(T^2)_k$ for superior ao limite superior de controlo deve proceder-se à identificação da característica ou características responsáveis através da aplicação de, por exemplo, o método da estatística d. Depois de ser identificada a característica ou características responsáveis pela causa especial de variação, devem ser tomadas ações corretivas.

2.7.1.3.Carta χ^2

Caso o processo permaneça em controlo estatístico durante um longo período de tempo garantindo a estabilidade dos seus parâmetros pode, em alternativa às cartas T^2, utilizar-se a carta χ^2 na Fase II do controlo estatístico multivariado. A estatística que constará num gráfico de controlo é dada por:

$$\left(\chi^2\right)_k = n\left(\overline{\mathbf{X}}_k - \boldsymbol{\mu}\right)' \boldsymbol{\Sigma}^{-1}\left(\overline{\mathbf{X}}_k - \boldsymbol{\mu}\right) \tag{2.106}$$

onde os limites de controlo são respetivamente:

$$LSC_{\chi^2} = \chi^2_{\alpha;p}$$

$$LIC = 0 \tag{2.107}$$

onde, $\chi^2_{\alpha;p}$ é o percentil à direita, para um nível de significância α, da distribuição do Qui-Quadrado, com p graus de liberdade.

Tal como no caso anterior, se algum valor de $(\chi^2)_k$ for superior ao limite superior de controlo, é detetada uma causa especial de variação que por sua vez deverá de ser analisada de forma idêntica a carta T^2.

2.7.1.4.Cartas JS-T^2

Segundo Wang *et al* (2015), para situações em que o número de características do processo em análise (p) é igual ou superior a três, e os dados por sua vez seguem uma distribuição Normal multivariada, pode utilizar-se um estimador de James-Stein, proposto por James e Stein (1961), para estimar os elementos do vetor média das médias do processo, em alternativa à expressão 2.100, uma vez que irá permitir reduzir o erro quadrático médio. O estimador de James-Stein para o vetor da média das médias pode ser dado pela seguinte expressão:

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}}^{JS} = \left(1 - \frac{p-2}{n\left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{v}\right)' \mathbf{S}^{-1}\left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{v}\right)}\right)^{+} \times \left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{v}\right) + \mathbf{v} \tag{2.108}$$

Em que $\mathbf{v}$ corresponde a um vetor de dimensão p que pode assumir qualquer conjunto de valores, no entanto a performance do estimador de James–Stein depende deste vetor. Como tal o autor recomenda escolher, como elementos deste vetor, valores próximos da matriz $\overline{\overline{\mathbf{X}}}$ ou então um vetor de zeros.

Se $\gamma = \left(1 - \frac{p-2}{n\left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{v}\right)' \mathbf{S}^{-1}\left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{v}\right)}\right)$ então tem-se que:

$$\gamma^{+} = \begin{cases} \gamma \; se \;\; \gamma > 0 \\ 0 \; se \; \gamma \leq 0 \end{cases} \tag{2.109}$$

Assim à semelhança das cartas T^2 tradicionais e substituindo, na equação 2.103, a matriz $\overline{\overline{\mathbf{X}}}$ pela matriz $\overline{\overline{\mathbf{X}}}^{JS}$ obtém-se a estatística de Hotelling modificada (T_k^{JS}), dada por:

$$T_k^{JS} = n\left(\overline{\mathbf{X}}_k - \overline{\overline{\mathbf{X}}}^{JS}\right)\mathbf{S}^{-1}\left(\overline{\mathbf{X}}_k - \overline{\overline{\mathbf{X}}}^{JS}\right) \tag{2.110}$$

que quando representada num gráfico para k amostras, corresponde à carta JS-T^2. Será detetada uma causa especial quando $T_k^{JS} > LSC$.

2.7.1.5.Interpretação das cartas T^2

Uma grande dificuldade associada à utilização deste tipo de cartas de controlo está relacionada com a interpretação das causas especiais de variação. Como tal foram desenvolvidas algumas técnicas no sentido de permitir identificar a causa, ou causas responsáveis por situações fora de controlo. Alt (1985) sugere a utilização de cartas univariadas das p variáveis em estudo, utilizando limites baseados nas desigualdades de Bonferroni. Já Jackson (1980, 1981a, 1981b, 1985) apresenta o método de decomposição de T^2 ou χ^2 em componentes principais. Hayter e Tsui (1994) sugerem o método do Ponto Crítico, $C_{R,\alpha}$. O método de decomposição de T^2 ou χ^2 em componentes ortogonais por Mason *et al* (1995,1997) ou as cartas univariadas com limites de diagnóstico por Nedumaran e Pignatiello (1998). No âmbito desta dissertação será utilizada o método da estatística d desenvolvido por Runger *et al* Alt (1996) e mais tarde, novamente, por Montgomery (2001).

A. Método da estatística *d*

Esta metodologia permite decompor a estatística T^2 de forma a verificar a contribuição de cada variável individualmente. Se $T^2_{(j)}$ representar a contribuição das variáveis p-1, ou seja, todas as variáveis p em estudo à exceção da variável j, então a estatística d é dada por:

$$d_j = T^2 - T^2_{(j)}\ ,\ \text{j=1, 2,…,p} \tag{2.111}$$

Se d_j for superior ao valor de $\chi^2_{\alpha;1}$ então considera-se que a variável j contribui significativamente para a situação de fora controlo. Na eventualidade de nenhum valor de d_j ser superior ao valor crítico, a causa especial de variação será devida à alteração de correlação entre variáveis, onde por sua vez se deverá utilizar o método por decomposição em componentes ortogonais.

2.7.1.6. Estudo Multivariado de Capacidade do Processo

No estudo multivariado de capacidades, assumindo que **X** segue uma distribuição Normal multivariada $N_p(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})$, é feita uma comparação entre áreas quando são analisadas duas características (p=2), ou comparação entre volumes quando são estudadas três características (p=3). À semelhança da análise univariada deve ser verificada a capacidade do processo produzir de acordo com a especificação e de verificar qual o afastamento do vetor **μ** face ao vetor dos valores nominais de especificação (**T**)

A. Índices de capacidade para processos com especificação técnica bilateral

A.1. Desenvolvimentos de Shahriari, Hubele e Lawrence (1995)

Os índices para processos com especificações técnicas bilaterais foram desenvolvidos por Shahriari *et al* (1995), onde um processo será capaz de C_{pM} for igual ou superior a 1,33, *PV* deverá ser próximo de 1 e *LI* deverá ser 1.

O índice de capacidade potencial, C_{pM} , é semelhante ao índice C_p do estudo univariado, uma vez que o seu objetivo é comparar o "volume" das regiões referentes à especificação técnica com o volume modificados do processo, e é definido por:

$$C_{pM} = \left(\frac{Volume\ da\ região\ referente\ à\ especificação}{Volume\ modificado\ referente\ ao\ processo}\right)^{\frac{1}{p}} \tag{2.112}$$

Mediante o número de características em estudo, a região definida pela especificação técnica será uma região *p-rectangular*. Se *p*=2 a região será um rectângulo, no caso de *p*=3 a zona será um prisma e para p≥ 4 será um *p-rectângulo*. No caso da região do processo, desde que este siga uma distribuição Normal multivariada $N_p(\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})$, será sempre um *p-elipsóide*. No denominador do índice C_{pM} consta o volume modificado referente ao processo, que por sua vez não é o *p-elipsóide* definido pelo processo, mas sim o menor *p-rectângulo* que contém esse *p-elipsoide*. Posto isto o índice C_{pM} poderá ser definido por:

$$C_{pM} = \left(\frac{\prod_{i=1}^{p}\left(LSE_i - LIE_i\right)}{\prod_{i=1}^{p}\left(LSP_i - LIP_i\right)}\right)^{\frac{1}{p}} \tag{2.113}$$

em que:

$$LSP_i = \mu_i + \sqrt{\frac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}\right)}{\det\left(\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\right)}} \tag{2.114}$$

$$LIP_i = \mu_i - \sqrt{\frac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}\right)}{\det\left(\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\right)}} \tag{2.115}$$

onde $\boldsymbol{\Sigma}_i$ corresponde à matriz das covariâncias excluindo a coluna e a linha *i* da matriz $\boldsymbol{\Sigma}$ e $\chi^2_{\alpha;p}$ corresponde ao percentil à direita para uma distribuição χ^2 com probabilidade α e *p* graus de liberdade. (Pereira e Requeijo, 2012)

Na figura 2.7 encontra-se uma ilustração da região modificada para um processo bivariado.

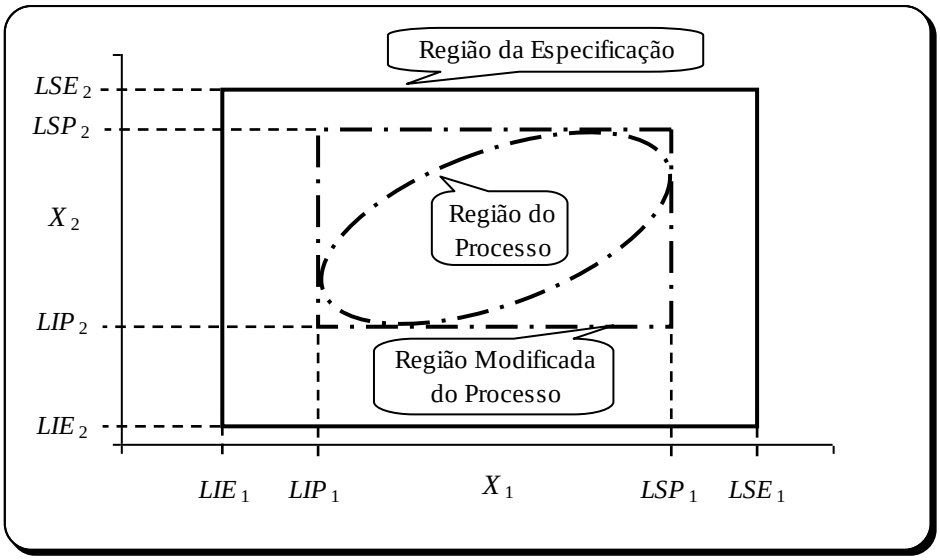

Figura 2.7 - Exemplo das regiões do processo e de especificação (Extraído de: Pereira & Requeijo, (2012))

O índice *PV* tem como objetivo averiguar se o valor alvo do processo coincide com o vetor **T** (vetor dos valores nominais do processo) que por sua vez é dado por:

$$PV = P\left(T^2 > \frac{p(N-1)}{N-p} F_{p,N-p}\right) \tag{2.116}$$

em que a *N* representa o número de observações utilizadas na estimação dos parâmetros do processo, a estatística T^2 é calculada com base no vetor da média estimado ($\hat{\boldsymbol{\mu}}$), no vetor dos valores nominais para *p* características **(T)** e na matriz das covariâncias estimada ($\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$). Assim a estatística T^2 pode ser calculada através de:

$$T^2 = n\left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{T}\right)' \mathbf{S}^{-1} \left(\overline{\overline{\mathbf{X}}} - \mathbf{T}\right) \tag{2.117}$$

O último índice, *LI*, pretende comparar o intervalo associado à especificação técnica com o intervalo da região modificada do processo. Se for verificado que, para uma determinada característica *j*, o intervalo $[LIP; LSP]_j$ está contido no intervalo de especificação $[LIE, LSE]_j$, então será atribuído ao índice *LI* o valor de 1.

A.2. Desenvolvimentos de Bashiri e Amiri (2012)

Em alternativa ao método desenvolvido por Shahriari *et al* (1995) poderá ser utilizado o método desenvolvido por Bashiri e Amiri (2012), que se baseia na divisão da região do processo, *PR* (do anglo-saxónico *Process Region*), em duas regiões distintas. A primeira é referente ao rácio da região do processo que se insere na região de especificação modificada, *CV* (*Conformance Volume* do anglo-saxónico) e a segunda é referente ao rácio da região do processo que por sua vez não se insere na região de especificação modificada, *NC*V (*Non Conformance Volume* – do

anglo-saxónico), que por sua vez serão utilizadas no cálculo de um novo índice, $MCP_{NVC.}$ Na figura 2.8 são apresentadas as regiões de especificação do processo e a região de especificação modificada.

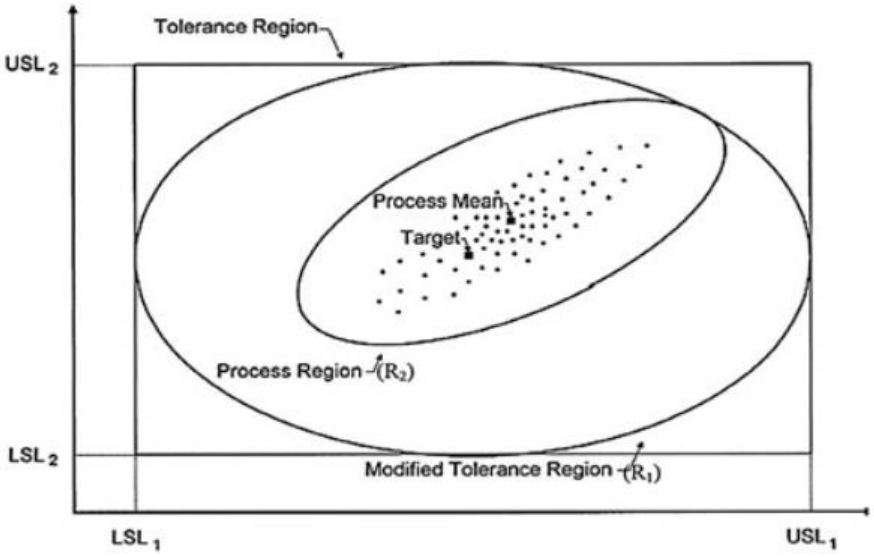

Figura 2.8 - Exemplo da região de especificação modificada (Extraído de: Bashiri e Amiri ,2012)

Para um processo com duas características com especificação técnica bilateral, a distância entre o processo e valor alvo é dado por:

$$D = \left(1 + (\mu - \boldsymbol{T})'\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mu - \boldsymbol{T})\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.118}$$

onde o índice MCP_{NVC} é calculado a partir da seguinte expressão:

$$MCP_{NVC} = \left[\frac{\lambda \times PR + CV + \beta}{PR + NCV}, \frac{1}{D}\right] \tag{2.119}$$

em que λ é um parâmetro de sensibilidade do processo que varia entre 0 e 1. Já β é adicionado ao numerador do primeiro componente de forma a aumentar a sensibilidade do índice para com o processo. O valor de β deverá de ser 0,1, no entanto se o volume da região de tolerância for inferior a 1, é recomendado que β assuma um valor de 0,05. *CV* corresponde à região do processo que se encontra contida na região de especificação modificada, obtida recorrendo ao cálculo integral. Já *NCV* corresponde à região do processo que não se insere na região de especificação modificada, obtida através da diferença entre a região do processo (*PR*) e a região *CV*. Na figura 2.9 encontra-se um exemplo destas duas regiões.

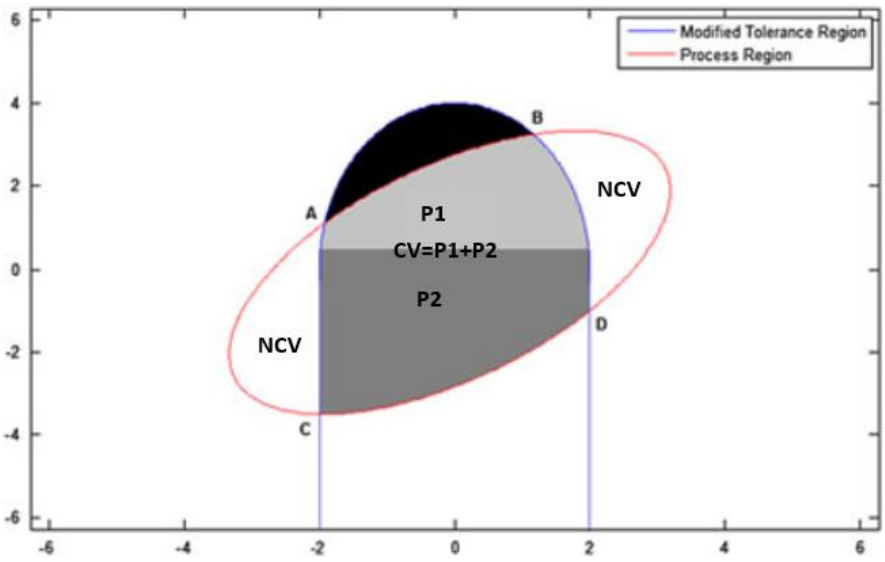

Figura 2.9 - Regiões CV e NCV para um processo com especificação unilateral (Adaptado de: Bashiri e Amiri, 2012)

O processo será capaz se a primeira parcela do índice for superior a 1.

A.3. Desenvolvimentos de Ganji e Gildeh (2015)

De forma a obter um índice que tem em consideração situações em que a região de tolerância é assimétrica, ou seja, quando, para pelo menos uma característica da qualidade, o valor alvo (*target*) não corresponde ao ponto médio da especificação, os autores Ganji e Gildeh (2015) sugerem a utilização do índice MC_{pG}, que é definido por:

$$MC_{pG} = \frac{vol.(região\ modificada\ do\ processo)}{vol.(99.73\%\ da\ região\ do\ processo)} \tag{2.120}$$

em que no numerador consta a área ou volume da região modificada do processo e no denominador se encontra a região elipsoidal que abrange 99.73% de processo multivariado. A figura 2.10 apresenta um exemplo destas regiões, para um processo em que são analisadas duas características com especificação técnica bilateral.

Para se calcular o índice MC_{pG}, recorre-se à seguinte expressão:

$$MC_{pG} = \frac{c}{\sqrt{\chi^2_{0,09973\,;\,p}}} \tag{2.121}$$

em que:

$$c = mín\left\{ mín\left\{ \frac{LSE_i - \mu_i}{\sigma_i}, \frac{\mu_i - LIE_i}{\sigma_i} \right\} \right\} \text{ com } i = 1, 2, \ldots p \tag{2.122}$$

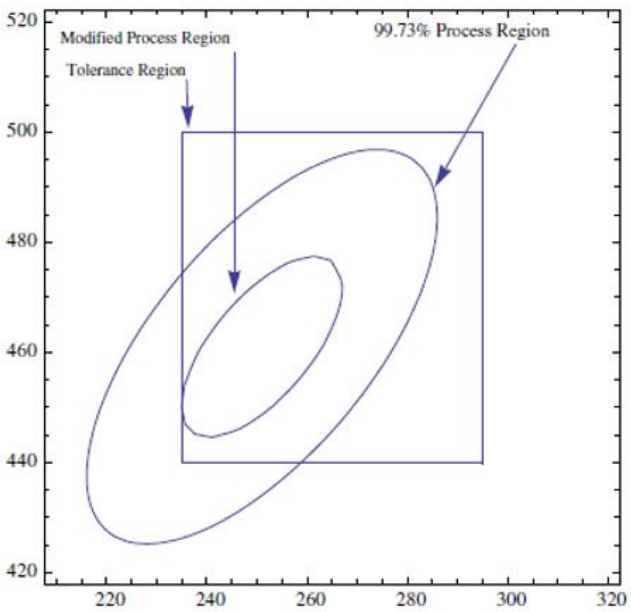

Figura 2.10 - Geometria da região do processo e da região modificada do processo (Extraído de Ganji e Gildeh (2015))

Na situação em que são utilizadas amostras, um estimador de MC_{pG} pode ser dado por:

$$\hat{M}C_{pG} = \frac{\hat{c}}{\sqrt{\chi^2_{0,99773\,;p}}} \tag{2.123}$$

em que:

$$c = mín\left\{ mín\left\{ \frac{LSE_i - \overline{X}_i}{s_i}, \frac{\overline{X}_i - LIE_i}{s_i} \right\} \right\} \quad \text{com } i = 1, 2, \ldots p \tag{2.124}$$

O processo apresentará capacidade se o valor do índice MC_{pG} for, pelo menos, igual a 1. No entanto também deverá de ser analisado o índice PV à semelhança do que foi abordado nos desenvolvimentos de Shahriari, Hubele e Lawrence (1995).

B. Índices de capacidade para processos com especificação técnica unilateral

B.1. Desenvolvimentos de Perakis e Xekalai (2012)

Para processos multivariados em que a especificação técnica é unilateral pode utilizar-se o método desenvolvido por Perakis e Xekalaki (2012) que consiste na aplicação de dois índices, um para casos em que a especificação é unilateral à direita e outro para quando é unilateral à esquerda, dados por:

$$MCPI = \left(\prod_{i=1}^{r} CPI^{Y_i} \right)^{\frac{1}{r}} \tag{2.125}$$

$$MCPS = \left(\prod_{i=1}^{r} CPS^{Y_i} \right)^{\frac{1}{r}} \tag{2.126}$$

em que CPI^{Yi} e CPS^{Yi} correspondem aos índices $(C_{pk})_I$ e $(C_{pk})_S$ que são utilizados no estudo de capacidades para processos univariados e *r* representa o número de características em análise.

Se os processos em estudo apresentarem apenas especificações unilaterais à esquerda, deve ser utilizado o índice *MCPI*, caso contrário, se por sua vez o processo for caracterizado por especificações unilaterais à direita deve-se, em alternativa, utilizar o índice *MCPS*. O processo apresenta capacidade se os valores dos respetivos índices forem superiores a 1,25.

C. Índices de capacidade para processos com especificação técnica unilateral e bilateral

C.1. Desenvolvimentos de Bashiri e Amiri (2012)

Para situações em que o processo apresenta duas variáveis, uma variável Y_2 com especificação unilateral à direita e uma variável Y_1 com especificação bilateral, e à semelhança dos desenvolvimentos para casos em que existem duas variáveis com especificação técnica bilateral, também foi desenvolvido pelos autores um índice MCP_{NCV}, calculado a partir da seguinte expressão:

$$MCP_{NVC} = \left[\frac{\lambda \times PR + CV + \beta}{PR + NCV}, \frac{1}{D'} \right] \tag{2.127}$$

em que:

$$\frac{1}{D'} = (1 + D_1) \times \frac{1}{1 + D_2} \tag{2.128}$$

onde D_1 é a distância entre o limite superior de especificação da segunda variável (Y_2) e uma linha paralela a este limite, que por sua vez passa pela média do processo. D_2 é a distância entre uma linha paralela aos limites superior e inferior de especificação da primeira variável (Y_1) e um ponto definido por $\left(\frac{(LSE_{Y_1} + LIE_{Y_1})}{2}, LSE_{Y_2} \right)$ e pela média do processo. A figura 2.11 apresenta ilustrada as distâncias D_1 e D_2 para uma melhor compreensão das mesmas.

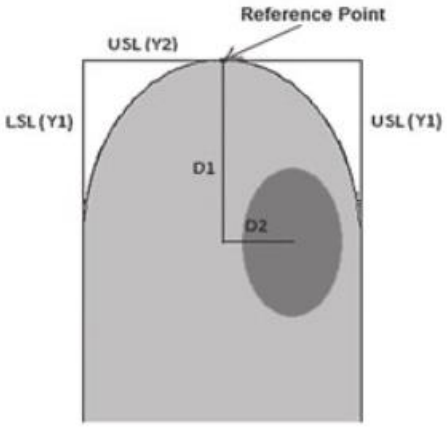

Figura 2.11 - Distâncias D1 e D2 para uma variável Y_1 com especificação bilateral e Y_2 com especificação unilateral à direita(Extraído de Bashiri e Amiri, 2015)

Para situações com *a* especificações unilaterais e *b* especificações bilaterais, os autores sugerem as seguintes expressões para determinação de $\frac{1}{D'}$:

$$\frac{1}{D'} = k^a \times \frac{1}{(1+D_{i2})} \tag{2.129}$$

em que:

$$k = \begin{cases} 1+D_{i1}\ , \ se\ \mu_i \leq LSC(Y_i)\ ou\ \mu_i \geq LIC(Y_i) \\ \frac{1}{1+D_{i1}}, \ se\ \mu_i \geq LSC(Y_i)\ ou\ \mu_i \leq LIC(Y_i) \end{cases} \tag{2.130}$$

Onde D_{i1} e D_{i2} correspondem, respetivamente, às distâncias D_1 e D_2 para uma determinada característica *i*. Após ser calculado $\frac{1}{D'}$ aplica-se a expressão 2.127 com recurso aos valores das áreas ou volumes de *PR*, *CV* e *NCV*. O processo apresentará capacidade se a primeira parcela do índice for superior a 1.

C.2. Desenvolvimentos de Gu et al (2015)

Para situações em que o processo multivariado apresenta especificações técnicas bilaterais e/ou unilaterais, Gu *et al.* (2015) apresentam o índice MEC_{pk} que permite analisar a capacidade deste tipo de processos. Para *p* características em estudo, os autores apresentam quatro etapas para o cálculo deste índice.

1 - Estimação da matriz da média ($\hat{\boldsymbol{\mu}}$) e da matriz das covariâncias ($\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$)

2 - Após se averiguar e confirmar que os dados utilizados seguem uma distribuição multivariada Normal, a função densidade de probabilidade é dada por:

$$f_m(\mathbf{X},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{p}{2}}|\boldsymbol{\Sigma}|^{\frac{1}{2}}}\exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu})'\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu})\right] \tag{2.131}$$

Com base na especificação técnica das características do processo, procede-se ao cálculo do parâmetro η com base na seguinte expressão:

$$\eta = \int_{\mathbf{LIE}}^{\mathbf{LSE}} f(\mathbf{X},\hat{\boldsymbol{\mu}},\hat{\boldsymbol{\Sigma}})d\mathbf{X} = \int_{\mathbf{LIE}}^{\mathbf{LSE}} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{p}{2}}|\boldsymbol{\Sigma}|^{\frac{1}{2}}}\exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu})'\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{X}-\boldsymbol{\mu})\right]d\mathbf{X} \tag{2.132}$$

Para situações em que uma, ou mais, variáveis apresentam especificação técnica unilateral os limites do integral da equação 2.132, para a variável em questão, devem ser ajustados de LSE_i (LIE_i) para $+\infty$ ($-\infty$).

3 - De seguida é possível proceder ao cálculo do parâmetro *P* recorrendo à seguinte expressão:

$$\eta = \Phi(1{,}5+P) - \Phi(1{,}5-P) \tag{2.133}$$

4 - Por fim, é possível calcular o índice MEC_{pk} através da seguinte expressão:

$$MEC_{pk} = \frac{P}{3} - 0{,}5 \tag{2.134}$$

Para determinação do integral 2.132 os autores sugerem o software *MVNCDF*, de linguagem C++, desenvolvido pelos mesmos. Para situações em que são analisadas duas ou três características do processo, o *software* apresenta um erro de cálculo de 10^{-15}, para situações em que são analisadas 4 características o erro é de 10^{-6}.

2.7.2. Número restrito de dados – Carta MQ($\bar{X}$)

À semelhança do estudo univariado, também existem cartas de controlo para situações em que a recolha de dados está condicionada. Como tal após serem recolhidas amostras das *p* características em análise, procede-se ao cálculo da estatística *Q* para o instante *r* que representa uma transformada do vetor $\overline{\mathbf{X}}$ nesse instante, que por sua vez é definida por:

$$Q_r(\overline{\mathbf{X}}) = \Phi^{-1}\left(F_{p,N_r-r-p+1}(A_r)\right), r = 2,3,... \tag{2.135}$$

em que:

$$A_r = \left(\frac{n_r N_{r-1}(N_r - r + 1 - p)}{N_r\, p(N_r - r)}\right)\left(\overline{\mathbf{X}}_r - \overline{\overline{\mathbf{X}}}_{r-1}\right)'\mathbf{S}_{pool,r}^{-1}\left(\overline{\mathbf{X}}_r - \overline{\overline{\mathbf{X}}}_{r-1}\right) \tag{2.136}$$

$$\overline{\mathbf{X}}_r = \left(\overline{\mathbf{X}}_{r1}, \overline{\mathbf{X}}_{r2},..., \overline{\mathbf{X}}_{rp}\right)' \tag{2.137}$$

Os valores das estatísticas da amostra *i* são dados por:

$$\overline{\mathbf{X}}_i = \frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{n_i}\mathbf{X}_{ij} \tag{2.138}$$

$$\mathbf{S}_i = \frac{1}{n_i - 1}\sum_{j=1}^{n_i}\left(\mathbf{X}_{ij} - \overline{\mathbf{X}}_i\right)'\left(\mathbf{X}_{ij} - \overline{\mathbf{X}}_i\right) \tag{2.139}$$

As estatísticas sequenciais são definidas por:

$$N_r = n_1 + ... + n_r \tag{2.140}$$

$$\overline{\overline{\mathbf{X}}}_r = \frac{1}{N_r}\sum_{i=1}^{r} n_i \overline{\mathbf{X}}_i = \frac{1}{N_r}\left(N_{r-1}\overline{\overline{\mathbf{X}}}_{r-1} + n_r \overline{\mathbf{X}}_r\right) \tag{2.141}$$

$$\mathbf{S}_{pool,r} = \frac{1}{N_r - 1}\sum_{i=1}^{r}(n_i - 1)\mathbf{S}_i =$$

$$= \frac{1}{N_r - 1}\left((N_{r-1} - r + 1)\mathbf{S}_{pool,r-1} + (n_r - 1)\mathbf{S}_r\right) \tag{2.142}$$

$$\mathbf{S}_{pool,0} = 0 \tag{2.143}$$

Uma vez que a estatística *Q* definida na equação 2.135 segue uma distribuição Normal segundo N(0,1), a linha central e os limites de controlo da carta $MQ(\bar{X})$ são os seguintes:

$$\begin{aligned} LSC_{MQ_{\bar{X}}} &= +3 \\ LC_{MQ_{\bar{X}}} &= 0 \\ LIC_{MQ_{\bar{X}}} &= -3 \end{aligned} \tag{2.144}$$

A análise da carta $MQ_{\bar{X}}$ é idêntica à da carta $Q(\bar{X})$ univariada abordada na secção 2.7.2.

3. Caracterização da Empresa e do Processo Produtivo

3.1. Apresentação da Empresa José Maria da Fonseca Vinhos – S.A

A empresa José Maria da Fonseca (JMF), fundada em 1834, é um dos grandes referenciais do sector vinícola cuja missão assenta na distinção e competitividade através da excelência da sua marca. Esta empresa foi caracterizada por quatro ciclos importantes que foram definindo o rumo da empresa, o primeiro ciclo corresponde ao "Ciclo da Fundação" que vai desde o ano da criação da empresa (1834) até ao ano 1884. O "Ciclo do Brasil" que se estendeu desde 1884 ate aos finais dos anos trinta do século XX. O "Ciclo do Rosé" que vai desde o final dos anos de 1930 até meados de 1980. E por fim o "Ciclo dos Mercados Estratégicos que compreende o período que vai desde 1980 até ao momento atual (JMF, 2017).

A JMF é uma empresa familiar, atualmente gerida pela 6ª geração mas contando com 3 membros da 7º geração no ativo, que prima pela sua identidade cultural que reflete o resultado de mais de 160 anos de continuados esforços de afinação na criatividade e aperfeiçoamento tecnológico e qualitativo na produção e comercialização dos seus vinhos .Para a produção das mais de 30 marcas de vinho da JMF, esta empresa conta com cerca de 650 hectares de vinha, distribuídos por diferentes regiões, nomeadamente o Alentejo, douro e Península de Setúbal, onde é nesta última região que a empresa possui a maior área de vinha (JMF, 2017).

Nas instalações da JMF, localizadas em Vila Nogueira de Azeitão, é que todo o trabalho desenvolvido nas vinhas se materializa. Estas instalações apresentam um centro de vinificação bastante moderno com uma área coberta de 9000m^2 e um conjunto de edifícios de caráter industrial que integram um conjunto de equipamentos destinados à preparação, armazenagem, refrigeração, acabamento, engarrafamento, envelhecimento, oficinas de manutenção, áreas administrativas, cantina e estação de tratamento de águas residuais. (JMF, 2017).

Devido ao seu trabalho notável na atividade vinícola a JMF, não só tem conquistado prémios e distinções nacionais e internacionais, como também apresenta um grande portefólio de clientes internacionais. A JMF é um dos maiores exportadores nacionais de vinho e as suas exportações correspondem hoje em dia à maior parte do volume de vendas anual da empresa, apresentando produtos em diversos países tais como Brasil, Canadá, Reino Unido, Estados Unidos Americanos, Itália, Suécia, Noruega, Dinamarca, Alemanha, Espanha, Japão, entre outros.

A JMF tem vindo a manter uma aposta continuada em suportes de investigação, inovação e tecnologia, obedecendo a uma filosofia de permanente desenvolvimento e melhoria contínua, suportando a sua visão de modernidade e investimento no futuro (Cristóvão, 2013). A minimização do impacto ambiental proveniente das suas atividades, produtos e serviços também é uma das grandes preocupações desta empresa, que por sua vez segue um sistema de melhoria

do desempenho ambiental caracterizado por uma revisão periódica de estratégias e planos de ação adequados. No que diz respeito à qualidade, a JMF tem prosseguido uma estratégia que acompanhou o desenvolvimento das suas marcas, tornando-a na primeira empresa no setor dos vinhos de mesa, em Portugal, a receber as certificações da norma ISO, tanto no domínio da qualidade como também no domínio ambiental (Cristóvão, 2013).

A JMF assume responsabilidades sociais visíveis mediante ações de proteção ambiental e participação ativa na comunidade local, promovendo também práticas saudáveis de consumo. Apesar da componente social ser um dos pilares desta empresa, existe ainda uma forte componente humana ligada à qualidade dos vinhos da JMF que conta com a colaboração dos seus diversos trabalhadores. A estrutura organizacional da empresa encontra-se representada no organigrama da figura 3.1.

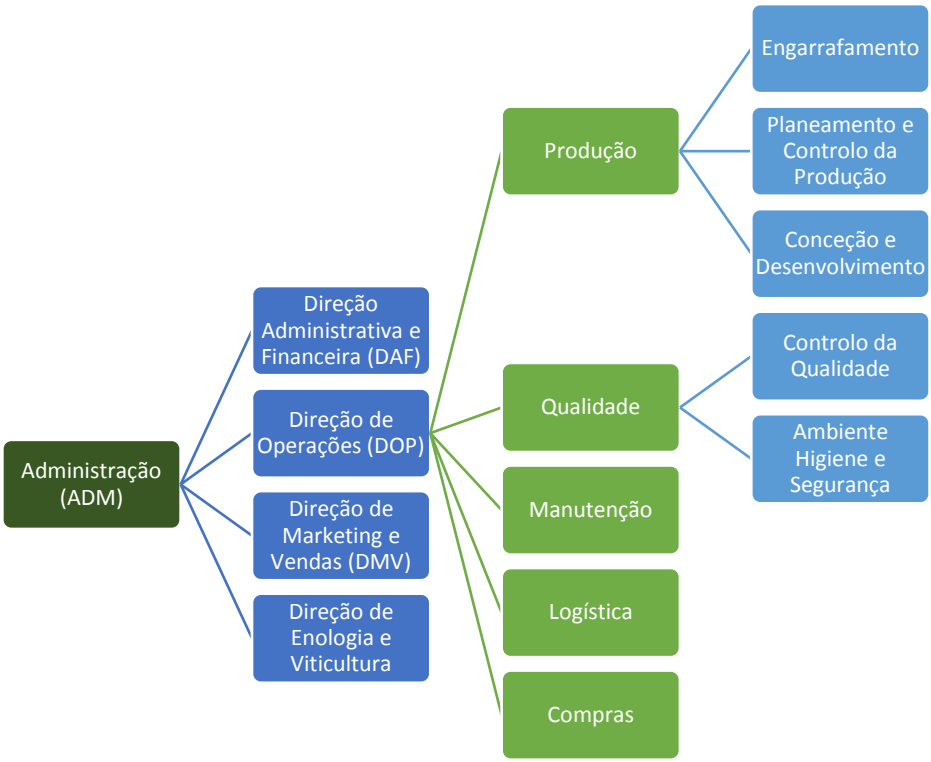

Figura 3.1 - Organigrama da estrutura organizacional da empresa (Fonte: Cristóvão, 2013)

O Conselho de Administração subdivide-se em quatro direções principais, onde apenas será dada especial atenção à Direção de Operações (DOP) uma vez que os departamentos que apoiam o desenvolvimento desta dissertação se inserem nesta direção. A Direção de Operações (DOP) é constituída pelos departamentos da Produção que engloba o Engarrafamento, onde irá ser feita a recolha de dados necessários para a elaboração desta dissertação, o Planeamento e Controlo da Produção, onde é feita toda a análise das necessidades produtivas, e a Conceção e Desenvolvimento. Outro departamento que pertence ao DOP é o Departamento da Qualidade que que é responsável pela análise da conformidade de produtos e processos com os parâmetros

estabelecidos, bem como a recolha de amostras tanto para análise de capacidades e torques, bem como análise microbiológica e química. Este departamento também engloba a componente do ambiente higiene e segurança que por sua vez está relacionada com o cumprimento dos requisitos necessários para garantir que todos os postos de trabalho e trabalhadores que neles executam atividades, apresentam condições para cumprir com os parâmetros de segurança e ambiente legislados. O estudo no âmbito desta dissertação irá incidir sobre o Engarrafamento e o Controlo da Qualidade uma vez que é feito o controlo estatístico das características da qualidade relativas ao volume de enchimento e ao torque aplicado na cápsula de vedação, no sentido de identificar eventuais oportunidades de melhoria.

3.2. Instalações da José Maria da Fonseca Vinhos – S.A

As instalações da José Maria da Fonseca concentram-se em Vila Nogueira de Azeitão, mais concretamente na Quinta da Bassaqueira. Esta zona apresenta cerca de 4 edifícios principais, como pode ser observado na figura 3.2:

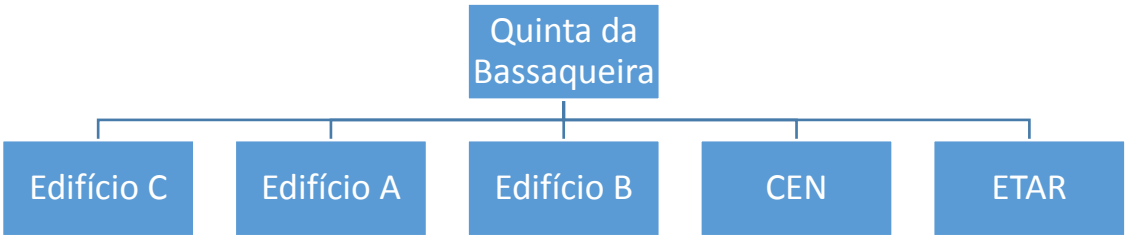

Figura 3.2 - Estrutura da Quinta da Bassaqueira

O edifício C engloba a sala de receção e a área de gabinetes – Administração, Direções, Salas de Reuniões, áreas Administrativas e de Marketing e Vendas.

O edifício A engloba diversos setores dos quais se destacam:

- **A Estabilização (RAC)** (onde é feito o acabamento de vinhos e a aprovação para engarrafamento);
- **Os Sistemas Contínuas** que asseguram a produção do vinho *Lancers*, onde existem 5 depósitos, ligados entre si, que circulam o produto do primeiro até ao último, de forma contínua. Dispõem de três instalações de frio, onde o funcionamento é interrupto e automático, que por sua vez permite uma produção de sete milhões de litros por ano.
- **A sala de Engarrafamento**, na qual existem 4 linhas equipadas com máquinas de armar caixas, despaletizadores, máquinas de lavagem de garrafas, enchedoras, máquinas de capsulagem, máquinas de lavagem exterior, máquinas de rotulagem, máquinas de aplicação de rolha e/ou rosca, máquinas de fechar caixas, máquinas acondicionadoras de

paletes. No que diz respeito ao rendimento das linhas, para a produção de garrafas de 750 ml, em caixas de nove litros, a linha "um" produz cerca de 550 caixas por hora, a linha "dois" produz 450 caixas por hora, a linha "três" produz entre 1100 a 1200 caixas por hora, e a linha "quatro" produz entre 580 a 670 caixas por hora.

- **Os Laboratórios (Química e Microbiologia)**, onde é feito o controlo microbiológico, quer dos vinhos, quer das operações de sanitização.
- **A Sala de Provas**, onde o enólogo decide a vida do vinho, de acordo com as exigências do cliente.
- **Os Armazém de Matérias-primas e Produto Acabado**, onde o armazém de produto acabado tem capacidade para 200 000 caixas.
- **A Cave**, onde a JMF recebe os seus convidados, com área para armazenamento de vinhos de cerca de 1 milhão de garrafas. Existe também uma área de envelhecimento com cerca de 700 pipas.

O edifício B, situado fora do edifício principal, é destinado à armazenagem e ao loteamento de vinhos, dispondo para isso dos seguintes depósitos e equipamento:

- 55 Depósitos "B", com uma capacidade total de aproximadamente 10 600 000 litros
- 27 Depósitos "R", com uma capacidade total aproximada de 652 000 litros
- 30 Depósitos "L", com uma capacidade total aproximada de 3 330 000 litros
- 3 Depósitos "BR", com uma capacidade total aproximada de 45 900 litros
- 1 báscula de 50 toneladas
- 3 filtros de terras
- 1 filtro de lentilhas
- 1 concentrador
- 2 dessulfitadores
- 1 caldeiras.

O Centro de Vinificação (CEN), onde existem 436 cubas de fermentação com uma capacidade total de 6 726 000 litros, sendo uma das maiores adegas de fermentação do país. Apresenta uma capacidade de refrigeração de 1 800 000 frigorias/horas e uma área coberta de cerca de 9000 m^2. Neste local é feita a receção da uva, onde é descarregada e desengaçada, a fermentação, a prensagem da uva branca, a prensagem da uva tinta e o loteamento. Também existem lagares onde as umas são pisadas a pé e aí fermentam.

A José Maria da Fonseca também possui uma ETAR, construída no ano de 1999, onde recebe caudais do Centro de Vinificação e do Edifício Principal. Tem a possibilidade de entrega do efluente tratado de acordo com os valores exigidos para coletor municipal constantes nas normas de descarga do Concelho de Setúbal, ou para linha de água superficial de acordo com a legislação

em vigor. O caudal médio tratado é de 200 m3/dia e a ETAR é constituída por uma obra de entrada, onde é feita a separação dos sólidos, 2 lagoas arejadas, estações elevatórias, zonas de decantação, edifícios de exploração e zonas de desidratação de lamas.

3.3. O Processo Produtivo

3.3.1. Introdução

Na José Maria da Fonseca são realizadas atividades tanto no âmbito da vinicultura, nomeadamente, a produção, conservação, acondicionamento e comercialização de vinho, como no âmbito da vinificação, que engloba o conjunto das operações necessárias para transformar as uvas em vinho. Na JMF são produzidos vinhos tranquilos que englobam os tintos, brancos e rosés, vinho espumante e vinho generoso. Na figura 3.3 é possível observar as etapas de produção de vinhos tranquilos. No anexo B encontram-se as figuras (Figuras B.1 e B.2) referentes aos vinhos espumante e generoso.

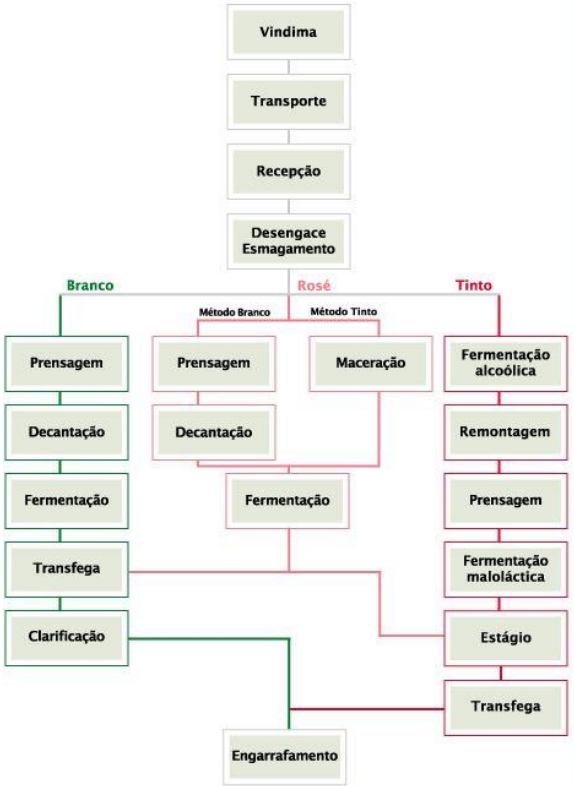

Figura 3.3 - Etapas de produção de vinhos tranquilos (Extraído de Infovini,2017)

3.3.2. Receção

Após a vindima, onde a uva pode ser colhida manualmente ou mecanicamente, é feita a receção da uva, que por sua vez é transportada para o centro de vinificação. É importante que todos os

recipientes utilizados durante o transporte apresentem as condições de sanitização adequadas, de forma a que a uva não perca qualidade, evitando assim potenciais contaminações microbiológicas. Quando as uvas chegam ao centro de vinificação, são feitas análises associadas ao grau alcoólico e aos açúcares característicos da uva e por vezes estas recebem um tratamento composto de anidrido sulfuroso para evitar a rápida oxidação das uvas. De seguida a uva é encaminhada para a etapa de desengace e esmagamento.

Figura 3.4 -Receção de uva na adega (Fonte: Infovini,2017)

3.3.3. Desengace e Esmagamento

O desengace é um processo de eliminação total ou parcial das partes lenhosas dos cachos de uvas. Nesta etapa é feita a separação dos bagos de uva do seu engace, e por sua vez é feito o esmagamento dos bagos. No caso de uvas tintas o desengaçador-esmagador provoca esmagamento parcial do bago, de forma a libertar a polpa e o sumo, mas sem esmagar a grainha. No que diz respeito ao vinho branco, este é preparado com alguma maceração, envelhecendo em condições oxidativas. Para vinhos brancos em que se pretende preservar a cor branco pálida e os aramos frescos, reduz-se o tempo de maceração.

Figura 3.5 – Esmagamento (Fonte: Sogrape vinhos, 2017)

3.3.4. Arrefecimento das Massas Vínicas

Após o desengace e esmagamento, as massas vínicas resultados (sumo, polpa, grainhas e película) apresentam-se com uma temperatura superior à desejável, como tal, é necessário proceder ao arrefecimento destas massas para valores próximos da temperatura a que se pretende que ocorra a fermentação. Consoante o tipo de vinho, quer se trate de tinto ou branco, o vinho é enviado para

cubas de fermentação em aço inox, que por sua vez possuem sistemas de refrigeração de forma a controlar a temperatura do mosto ao longo da fermentação (Infovini, 2017)

3.3.5. Encubação

Na encubação o mosto é colocado em cubas de fermentação, onde serão adicionadas leveduras. Esta etapa é caracterizada por três sub-processos. O primeiro sub-processo consiste na maceração, onde o objetivo é garantir que o mosto se mantém em contacto direto com a película da uva, para que a cor da película seja transferida para o mosto. Como é nas películas que estão os componentes ligados à cor e ao aroma, pretende-se assim enriquecer o mosto nestes constituintes. Esta operação acontece antes de se iniciar a fermentação alcoólica pois após o aparecimento do álcool os fenómenos enzimáticos responsáveis por este enriquecimento deixam de estar ativos e, a partir daí, a extração destes componentes passa a ser feita por dissolução de álcool que se vai formando. A maceração não ocorre nos vinhos brancos, uma vez que neste tipo de produção se pretende que ocorra única e exclusivamente a fermentação do sumo do fruto. (Infovini, 2017)

O segundo sub-processo consiste na fermentação alcoólica, que ocorre em cubas de fermentação, onde através da intervenção de leveduras, se procede à obtenção de etanol e dióxido de carbono a partir da degradação de açúcares redutores existentes no mosto. A fermentação alcoólica pode ser afetada negativamente por diversos fatores, nomeadamente a quantidade de ar/oxigénio existente, que por sua vez permite a multiplicação e desenvolvimento das leveduras, a temperatura que deverá de ser adequada consoante o tipo de vinho. Para vinificação de vinho tinto a temperatura deverá estar compreendida no intervalo de 26ºC a 28ºC. Para vinificação de vinho rosé e branco as temperaturas de fermentação poderão situar-se entre 10ºC e 20ºC. Por último, a existência de agentes microbianos contaminantes que procedam à conversão de álcool em ácido acético, aumentando a acidez do vinho. Para garantir que a fermentação alcoólica decorre como previsto, o processo deve ser controlado diariamente, através de medições de densidade, controlo de temperatura e quantificação de açúcares redutores.

O terceiro sub-processo é apenas característico na vinificação de vinho tinto e corresponde à fermentação maloláctica. Na altura da vindima ainda existem ácidos na uva, como o ácido tartárico, o ácido málico, o ácido cítrico entre outros, por sua vez, o ácido málico torna os vinhos tintos microbiologicamente instáveis. Se este ácido não for eliminado do vinho antes do engarrafamento o vinho tinto pode criar gás dentro da garrafa, o que não é desejável. Assim a fermentação maloláctica conciste na transformação do ácido Málico em ácido Láctico com libertação de CO_2 gasoso, operada por bactérias lácticas. Ocorre habitualmente após a fermentação alcoólica caso não ocorre uma diminuição excessiva da temperatura. Esta deverá de ser a última intervenção de microrganismos no vinho tinto uma vez que já deverá de se encontrar microbiologicamente estável. (Sogrape vinhos, 2017)

Figura 3.6 - Cubas de Fermentação (Fonte: Sogrape vinhos, 2017)

3.3.6. Remontagem

Uma vez que as partes sólidas das uvas tendem a vir à superfície, é necessário misturá-las com o restante liquido que está na parte mais inferior dos tanques de fermentação. A remontagem é elaborada com auxílio de um sistema de bombeamento para que o líquido circule e se vá misturando. As vantagens da remontagem assentam sobretudo em permitir o arejamento do mosto de modo a homogeneizar o conteúdo da cuba (Infovini, 2017).

3.3.7. Prensagem

A prensagem dos vinhos tintos normalmente ocorre no fim da fermentação e é caracterizada pelo esmagamento das uvas para que o liquido nos bagos seja extraído. Esta operação deve ocorrer no momento certo, caso contrário o sabor do vinho será afetado. No caso dos vinhos brancos a prensagem é feita antes da fermentação, uma vez que no vinho tinto as peles e grainhas das uvas devem estar em contacto com o mosto para lhe conferir a cor e as propriedades adequadas (Infovini, 2017).

3.3.8. Transfega

Na transfega o vinho é transferido para uma cuba limpa e separam-se algumas partículas que este ainda possa apresentar, por exemplo borras acumuladas no fundo da cuba. Normalmente realiza-se a operação de sulfitação de forma a conservar o vinho e a protegê-lo contra a oxidação. Outra operação realizada é o atesto, onde se preenche o vazio da cuba com vinho, geralmente da mesma qualidade. A decisão da transfega depende da maturação da uva, da casta, do estado sanitário, do equipamento e do tipo de vinho. Assim, de acordo com as qualidades organoléticas do vinho em

causa, este pode ser encaminhado para cascos de madeira de modo a envelhecer, ou para filtração e engarrafamento para ser consumido.

3.3.9. Clarificação

A clarificação é um processo com a finalidade de eliminar todas as eventuais impurezas em suspensão do vinho de forma a torna-lo límpido, existindo essencialmente duas técnicas de clarificação, a colagem e a filtração. No que diz respeito à colagem, adiciona-se ao vinho um produto clarificante que por sua vez coagula e forma partículas que sedimentam, que por sua vez atraem e arrastam as impurezas existentes. A filtração consiste em passar o vinho por um filtro de forma a que as partículas e impurezas fiquem retidas nesse mesmo filtro.

3.3.10. Engarrafamento

Nesta etapa procede-se ao engarrafamento do vinho, onde é crucial que existam cuidados especiais para que não ocorram contaminações microbiológicas ou a oxidação do vinho. O engarrafamento é uma etapa importante no âmbito desta dissertação uma vez que se procede à recolha de amostras relativas ao volume de enchimento. O engarrafamento apresenta seis linhas de produção que permitem produzir todas as marcas que a empresa apresenta de acordo com o planeamento definido. Destas seis linhas de produção (figura 3.7), quatro são de engarrafamento, nomeadamente as linhas 1, 2, 3 e 4, a linha 5 é de produção *offline*, caracterizada pelo processamento e transformação de produtos que engloba atividades relacionadas com aplicação de etiquetas, marcações, entre outras. A linha 6 é dedicada ao enchimento de *Bag-in-Box* (BIB). Mediante as características do vinho e o tipo de pré-embalagem, é feita a atribuição de cada produto à respetiva linha de produção que melhor se adequa.

De um modo geral as linhas de engarrafamento estão divididas em células, existindo operadores responsáveis por cada uma destas células (figura 3.8) que, por sua vez, podem ser constituídas por mais do que um conjunto de máquinas. A linha 4 é dedicada, essencialmente, a produções de pequenos lotes, nomeadamente gamas *premium* e *super premium* onde o produto é guardado semiacabado. Esta linha também é caracterizada por não possuir equipamento de paletização automática, uma vez que a paletização é feita manualmente por operadores, nem possuir máquina de formar caixas devido ao facto de não ser um produto final. Os fluxogramas referentes a cada linha de engarrafamento encontram-se no anexo B figuras B.3, B.4, B.5 e .B.6 e B.7.

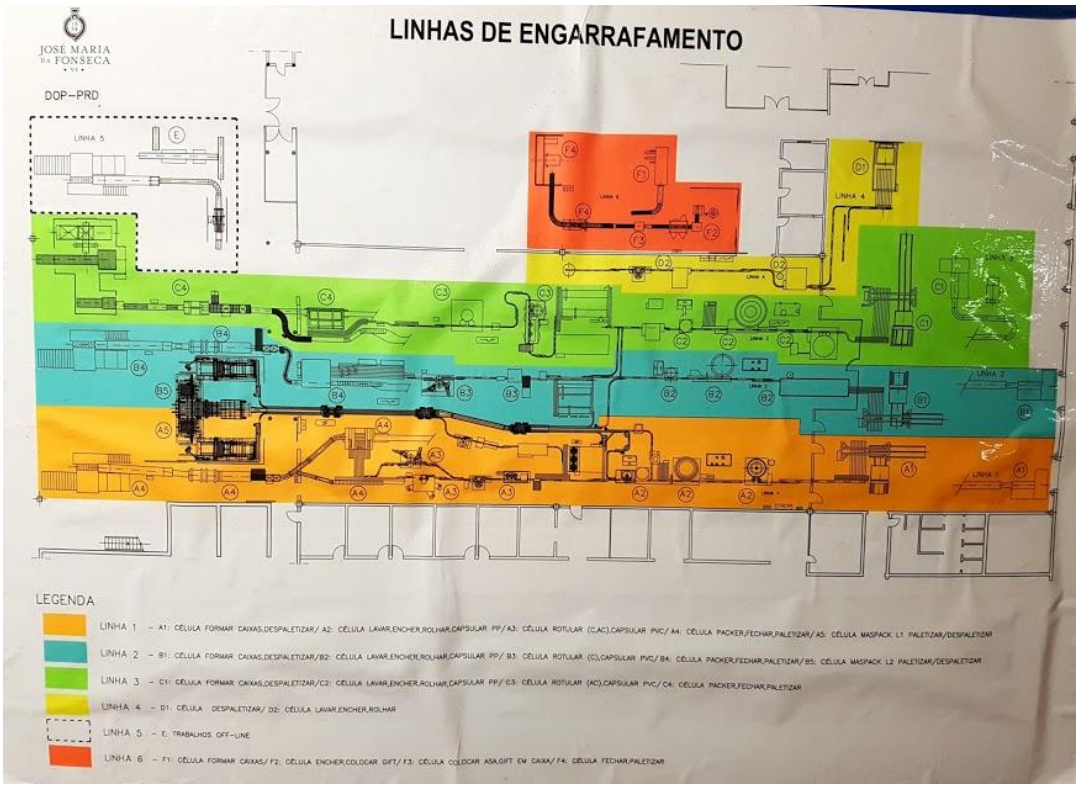

Figura 3.7 - Linhas de engarrafamento da JMF

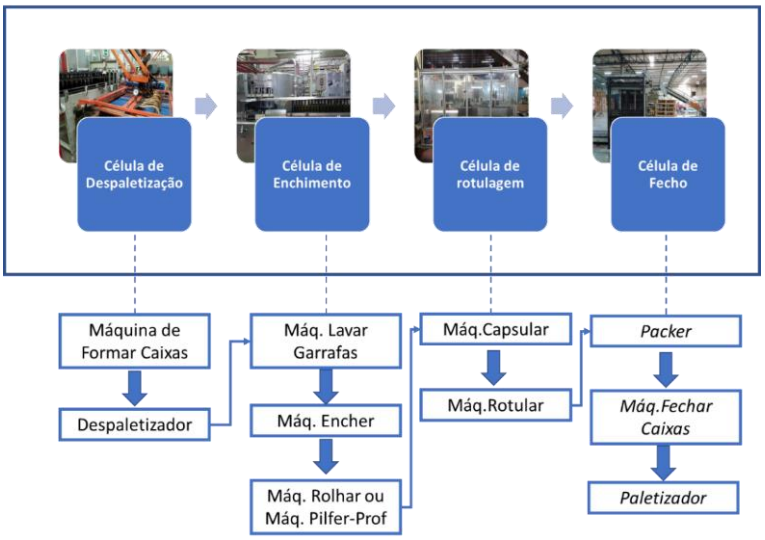

Figura 3.8 - Células das linhas de Engarrafamento (adaptado de: Borrego, 2009)

A primeira etapa do engarrafamento inicia-se na máquina de formar caixas, onde se procede à abertura, montagem e colagem das caixas que por sua vez serão transportadas, por um tapete secundário, para o fim da linha de produção de forma a alimentar o *packer* que por sua vez coloca as garrafas de vinho dentro das caixas.

Figura 3.9 - Máquina de formar caixas

A próxima etapa consiste na despaletização de garrafas, uma vez que estas são transportadas em paletes e estão envoltas em plástico retráctil, provenientes do armazém de matérias primas (AMP). Estas paletes são colocadas no despaletizador e o operador responsável retira o plástico que envolve a palete, de seguida a máquina automaticamente coloca as garrafas no tapete transportador, que por sua vez vai alimentar a máquina de lavar garrafas (Borrego, 2009).

Figura 3.10 - Máquina despaletizadora

De seguida as garrafas vão para a máquina de lavar garrafas onde se procede ao enxaguamento das mesmas. No interior das garrafas, mesmos das garrafas novas podem ocorrer poeiras de vidro ou outras, pequenos fragmentos de vidro, resíduos de tratamento de superfície, bolores, águas de condensação e insetos, assim é necessário que a lavagem das garrafas seja feita de forma adequada, com um tempo de injeção de água suficiente para um perfeito arrastamento de detritos ou poeiras existentes. As garrafas são invertidas e sopradas por um fluxo de água tratada e filtrada a uma pressão controlada acima dos 2 bar através de um sistema de injetores. De seguida as garrafas percorrem um circuito para eliminação de água residual no interior das mesmas.

Figura 3.11 - Máquina de lavagem de garrafas

Após a lavagem as garrafas seguem num tapete transportador de forma a entrar na máquina de enchimento que por sua vez é alimentada por vinho, proveniente do RAC, que se desloca em tubagens de inox, pressionado por ar comprimido (no caso de vinhos gaseificados) ou por azoto (no caso de vinhos tranquilos). Na linha 4 o processo é diferente, uma vez que o envio de vinho para esta linha é realizado com recurso a uma bomba apropriada.

Figura 3.12 - Máquina de enchimento

As enchedoras utilizadas na JMF e na grande maioria das indústrias vinícolas são, quase exclusivamente, enchedoras de nível constante, ou seja, asseguram um nível constante de vinho no gargalo da garrafa, que pode ser regulado no início da operação de enchimento. Muito raramente se recorre a enchedoras volumétricas, que permitem encher as garrafas de forma mais rigorosa. No entanto o facto das garrafas apresentarem forma variável, conjugado com o seu gargalo estreito, levaria a diferenças significativas do nível de enchimento que seriam facilmente detetadas pelo consumido (Carvalheira, 2017).

Existem vários tipos de enchedoras a nível constante como é possível observar na figura 3.13:

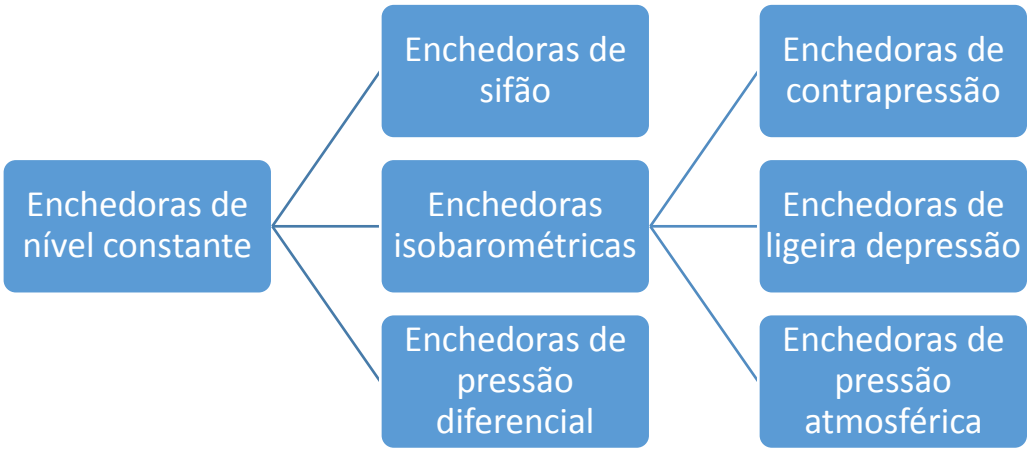

Figura 3.13 - Tipos de máquinas de enchimento a nível constante

A José Maria da Fonseca utiliza máquinas de enchimento isobarométrica nas linhas 1, 2 e 3, que assenta no conceito em que a pressão presente no interior do tanque de abastecimento é gerada no interior da garrafa a fim de realizar um enchimento rápido e eficaz, que pode ser aplicado quer a garrafas de vidro quer a garrafas de PET. Apesar de ser um tipo de enchimento geralmente adequado a bebidas carbonada ou gaseificadas, pode de qualquer maneira ser aplicado a todos os tipos de bebida. Isto revela-se útil para empresas que apresentam diversos tipos de bebida diferentes, como é o caso da José Maria da Fonseca onde existem vinhos tranquilos, vinho espumante e vinhos generosos.

As máquinas de enchimento isobarométrico são, tipicamente, rotativas com dezenas de cabeças de enchimento. No caso da José Maria da Fonseca a enchedora da linha 1 apresenta 48 cabeças de enchimento, a da linha 2 apresenta 32 cabeças de enchimento e a linha 3 apresenta 48 cabeças de enchimento. Neste tipo de enchimento as garrafas são levantadas e hermeticamente fixadas à cabeça de enchimento, equipada com uma junta de vedação e uma válvula de múltiplas posições. O enchimento, numa fase inicial, começa com a injeção de CO_2 para dentro da garrafa a fim de garantir que a pressão que existe no tanque de abastecimento é a mesma que existe na garrafa, de seguida a válvula reposiciona-se para permitir que o produto flua a partir do tanque para dentro da garrafa. Quando o nível do liquido atingir a parte inferior do tupo de respiro, uma válvula de controlo termina o processo de enchimento. Por fim é aberto para a atmosfera o tubo de igualização de pressão para permitir que a pressão dentro da garrafa desça para o nível atmosférico ao abrigo de uma injeção de gás inerte para prevenir a contaminação e oxidação antes da rolhagem ou fecho da garrafa (Patrick Thomson, 2017). Na linha 4 o enchimento é feito numa máquina por gravidade, onde é o peso da coluna do líquido na panela que provoca o enchimento.

Depois do enchimento segue-se a aplicação de rolha ou, em alternativa, a aplicação de uma cápsula de vedação *Pilfer-Proof*. Para o fecho cápsula *Pilfer-Proof* a marisa da garrafa tem de ser roscada, e comparativamente com a rolha apresenta algumas vantagens e desvantagens. Em termos de vantagens do fecho roscado, destaca-se a perda de SO_2 ao longo do tempo, que por sua vez é significativa para diversos tipos de rolhas, quer sintéticas quer de cortiça natural, mas na cápsula roscada é bastante menor. Em termos da evolução do teor de ácido ascórbico após rolhamento, as rolhas "técnicas" (rolhas fabricadas à base de cortiça com componentes sintéticos) e as cápsulas roscadas são as mais eficazes seguidas pelas rolhas de cortiça natural. A cápsula roscada apresenta excelente vedação, onde apenas se verifica redução do aroma ao fim de 18 meses de armazenamento. Em termos de desvantagens, nas cápsulas de roscas as juntas PVC podem ceder semicarbazidas (cancerigénico) e policloreto de vinilideno (cancerigénico). As rolhas de cortiça, por sua vez, cedem ao vinho um composto que pode melhor/ complexar o seu aroma e/ou sabor (Carvalheira, 2017).

Figura 3.14 - Cápsula de vedação Pilfer-Proof (esquerda) e Rolha de cortiça (direita)

As quatro linhas de engarrafamento estão equipadas de forma a permitir realizar o fecho da garrafa com rolhas naturais ou rolhas "técnicas", no entanto, apenas a linha 2 e a linha 3 estão devidamente equipadas para efetuar o fecho com cápsula de vedação *Pilfer-Proof*.

Figura 3.15 - Máquina de aplicação de cápsula (à esquerda) e máquina de rolhar (à direita)

Após o fecho das garrafas estas seguem no tapete transportador e, caso seja necessário, passam por um secador de forma a subir a temperatura do vinho, uma vez que, por exemplo, os vinhos

gaseificados são cheios a temperaturas na ordem dos 0º e 2ºC e a estas temperaturas uma adequada rotulagem das garrafas torna-se complicada, devido ao efeito de condensação.

Figura 3.16 - Secador de garrafas

A próxima etapa consiste na aplicação de uma cápsula exterior de PVC ou de Estanho (no caso de produtos de gamas superiores) na máquina de capsular, onde por sua vez as garrafas seguem para a rotuladora.

Figura 3.17 - Máquina de capsular

Em termos de rotulagem, a linha 1 está equipada de forma a realizar dois tipos de rotulagem, a rotulagem de cola convencional e a rotulagem autocolante, conforme o tipo de produto a ser produzido na linha. Já a linha 2 apenas realiza rotulagem de cola convencional, a linha 3 está equipada para fazer rotulagem autocolante.

Figura 3.18 - Máquina rotuladora

Após a rotulagem, as garrafas seguem para o *Packer* que as coloca automaticamente dentro das caixas. No decorrer do percurso até ao *Packer* as garrafas são marcadas com o *Lote Code* através do sistema de *inkjet*.

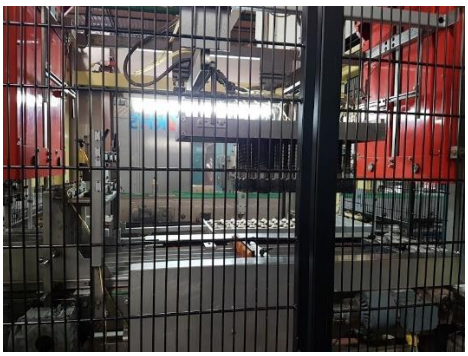

Figura 3.19 – Packer

De seguida as caixas seguem para um tapete transportador após passarem por uma balança que pesa as caixas e averigua se o peso destas está dentro dos parâmetros definidos. Caso se verifique que o peso da caixa não está conforme esta será rejeitada. Posteriormente as caixas serão fechadas com cola na parte superior e serão marcadas com um *Lote Code* de produto acabado, utilizando novamente um sistema de *inkjet*.

Figura 3.20 - Balança+Máquina de fechar caixas (à esquerda) e marcação inkjet (à direita)

Na linha 1 e na linha 2 existem equipamentos de paletização semi-automáticos, onde é necessária a presença de um operador responsável, já na linha 3 a máquina paletizadora é completamente automática.

Figura 3.21 - Máquina paletizadora

Na fase final do engarrafamento a palete com caixas é envolvida numa camada de plástico estirável, que por sua vez será marcada com o *Lote Code* de engarrafamento e a referência do mercado/cliente. As paletes já devidamente identificadas seguem para o Armazém de Produto Acabado (APA) para, numa fase posterior, serem expedidas mediante as encomendas existentes.

Figura 3.22 - Máquina de aplicação de plástico estirável

3.4. Os Produtos

A José Maria da Fonseca possui uma diversificada gama de produtos, que se reparte por vinhos brancos, rosés, tintos e licorosos (moscatéis). Os vinhos são provenientes de uvas de várias regiões do país, mas a empresa possui produtos principalmente da Península de Setúbal. As principais marcas da empresa, com exceção do *Lancers* (gama de vinhos branco e rosé gaseificados) que não tem região definida. Periquita (tinto, branco e rosé), o BSE e o Alambre (Moscatel de Setúbal) são da região vitivinícola da Península de Setúbal. No entanto existem vinhos de outras regiões, nomeadamente vinhos do Dão (Terras Altas), do Douro (Domini e Domini Plus), dos Vinhos

Verdes (*Twin Vines*) e do Alentejo (Montado, José de Sousa, José de Sousa Mayor e "J") (JMF, 2015). Em 2009 a empresa lançou um novo produto que, por sua vez, é uma extensão da marca *Lancers*, designado por "*Lancers Free*". Este produto é comercializado na versão rosé e branco e a sua característica diferenciadora é o facto de se tratar de um produto com teor de álcool.

As marcas da JMF dividem-se pelas seguintes gamas de produtos:

- Grandes marcas: vinhos que apresentam grandes volumes de produção e grande rotação;
- Vinhos *premium*: são Vinhos de Quinta ou Reservas;
- Vinhos *super premium*: correspondem aos vinhos topo de gama;
- Licorosos e Aguardentes: Moscatéis vários, incluindo vinhos velhos especiais e Aguardentes Velhas.

Os vinhos, em alguns casos, podem ser sujeitos a um processo de envelhecimento em barricas de madeira, estes vinhos são, nomeadamente, gamas *super premium* e moscatéis velhos (Alambre 20 anos, p.ex) ou as Aguardentes (Aguardente Velha Reserva 40 anos). No anexo B encontra-se uma tabela (Tabela B.1) com os produtos comercializados pela JMF.

4. Caso de Estudo – Metodologia, Análise e Discussão de resultados

4.1. Metodologia

O presente caso de estudo está relacionado com a aplicação de técnicas de controlo estatístico na empresa JMF. O enfoque deste estudo será a linha 2, uma vez que esta apresenta uma maior taxa de utilização, comparativamente com as outras 5 linhas, aliado ao facto de o equipamento de enchimento apresentar algum desgaste significativo. Assim será relevante fazer uma análise de forma a averiguar se existe necessidade de implementar algumas melhorias ao nível do equipamento e/ou do processo.

Numa primeira fase irá proceder-se à análise de fontes de variação importantes, nomeadamente no vidro adquirido aos fornecedores, nas diversas válvulas da máquina de enchimento e nas bocas de aplicação de cápsula de vedação. Mediante as conclusões retiradas desta análise, irá proceder-se à implementação do Controlo Estatístico do Processo, onde serão estudados alguns produtos. Cada amostra irá ter uma dimensão de $n=5$, onde se irá proceder à pesagem de 5 garrafas vazias, que por sua vez serão devidamente identificadas, e de seguida irão ser recolhidos os valores relativos à massa bruta, de forma a calcular o valor da massa liquida e consequentemente o volume de enchimento. Depois serão recolhidos os valores de torque necessários para abrir a cápsula de vedação. A frequência de recolha das amostras é de hora em hora. O equipamento de medição utilizado (Anexo J) encontrava-se devidamente calibrado.

O controlo estatístico irá incidir em duas vertentes distintas, a primeira associada a produtos com número restrito de dados, para os quais se irão utilizar técnicas de controlo estatístico para "pequenas produções" para analisar 2 produtos de gama *premium* e um produto exclusivo para um cliente específico. A outra parte do estudo irá incidir na análise de produtos com número suficiente de dados, para os quais foram recolhidas cerca de trinta amostras para a Fase I e vinte amostras para a Fase II do controlo estatístico de três referências de produto. Para estas duas vertentes serão feitos dois tipos de análise, uma primeira relativa ao estudo de cada característica individualmente (estudo univariado) e depois uma análise conjunta que engloba ambas as características (estudo multivariado).

Nos produtos em que existe um número restrito de dados, serão utilizadas exclusivamente as cartas $Q(\bar{X})$ e $Q(S^2)$ no estudo univariado e as cartas $MQ(\bar{X})$ para o estudo multivariado. Já na situação em que não existe qualquer restrição na recolha de amostras, serão utilizadas as cartas $\bar{X}$ e S para a Fase I do controlo estatístico e na Fase II irá utilizar-se as cartas Z e W. Para o estudo multivariado, tanto para a Fase I como para a Fase II, irá utilizar-se as cartas T^2.

4.2. Análise de fontes de variação

O processo de enchimento e aplicação de rosca em garrafas apresenta diversas fontes de variação que poderão comprometer os objetivos da empresa. Um dos grandes problemas assenta na qualidade do vidro que é fornecido à José Maria da Fonseca. É importante avaliar se existem diferenças significativas na média e na variância das garrafas entre os diversos lotes, bem como entre os diversos fornecedores. Outra fonte de variação importante advém das válvulas de enchimento. Na máquina de enchimento da linha de produção em estudo existem 32 válvulas de enchimento, o que significa que qualquer bico que não encha de acordo com os parâmetros legislados poderá comprometer a empresa. Como tal é crucial analisar estas fontes de variação de forma a que a implementação do controlo estatístico do processo seja feita de forma adequada.

4.2.1. Garrafas

De forma a que a implementação das técnicas de controlo estatístico possa ser feita nas condições mais adequadas é necessário averiguar se existe variação significativa entre a média e a variância das taras. A José Maria da Fonseca apresenta fundamentalmente dois grandes fornecedores de garrafas de vidro. Este estudo irá incidir em produtos que utilizam a garrafa "bordalesa leve 0,75cl". Assim esta análise irá subdividir-se em duas componentes: a estudo de variação entre lotes de um mesmo fornecedor e o estudo da variação entre fornecedores.

4.2.1.1.Análise entre lotes

De forma a analisar a variação na média e na variância que existe entre os lotes de garrafas dos dois fornecedores da JMF, procedeu-se à recolha de 10 valores de taras para 4 lotes distintos dos dois fornecedores. De seguida procedeu-se à análise individual para cada um dos dois fornecedores.

A. Variação entre lotes do Fornecedor A

A.1. Média

Para averiguar se existem diferenças significativas na média recorreu-se à análise de variâncias, como tal recorreu-se ao teste de hipóteses seguinte:

$$H_0: \mu_{A1} = \mu_{A2} = \mu_{A3} = \mu_{A4}$$

$$H_1: \mu_{Ai} \neq \mu_{Aj} \text{ para qualquer (i,j) com } i \neq j$$

Os valores das taras das garrafas de vidro para o Fornecedor A encontram-se na tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Valores das taras de garrafas de diversos lotes do Fornecedor A

Lotes	**Massa das taras (g)**									
Lote 1	422,67	421,66	421,79	422,25	422,89	421,84	422,39	419,71	419,74	419,58
Lote 2	426,4	426,36	427,77	426,08	426,87	427,05	426,78	426,32	427,37	426,86
Lote 3	419,65	417,81	417,52	415,52	419,77	419,87	419,88	415,62	416,25	416,92
Lote 4	416,82	417,58	416,14	416,25	416,92	417,49	418,04	417,82	416,77	416,32

De seguida procedeu-se à construção da tabela ANOVA:

Tabela 4.2 - Tabela ANOVA referente às taras das garrafas do fornecedor A

Fonte de Variação	**SS**	**g.l.**	**MS**	**F_0**
Entre Lotes	591,030	3	197,010	140,4
Erro	50,523	36	1,403	
Total	641,553	39	16,450	

Através da comparação do valor de F_0 (140,4) e o F crítico ($F_{5\%;3;36\,g.l} = 2{,}87$) é possível observar que existem indícios para, um nível de significância de 5%, se rejeitar a hipótese nula, ou seja, existem diferenças significativas entre as médias das massas das garrafas vazias dos diversos lotes em estudo para o fornecedor A. É possível observar que a maioria da variação é exterior (entre lotes).

A.2. Variância

No que diz respeito à verificação de variâncias significativamente diferentes, procedeu-se à utilização do Teste de Bartlett, tendo em conta o seguinte teste de hipóteses (inserir aqui o teste de hipóteses).

$$H_0: \sigma_{A1}^2 = \sigma_{A2}^2 = \sigma_{A3}^2 = \sigma_{A4}^2$$

$$H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_j, \text{ para pelo menos um par (i,j), com } i \neq j$$

Como tal, procedeu-se ao cálculo da estatística de teste χ^2_B tendo-se obtido o seguinte valor:

$$\chi_B^2 = \frac{1}{1{,}046} \times [12{,}200 - (-3{,}596)] = 15{,}10$$

Através da comparação desta estatística com o valor crítico ($\chi^2_{5\%;3g.l} = 7{,}82$), para um nível de significância de 5%, verifica-se que existem indícios para se rejeitar a hipótese nula, ou seja, existem diferenças significativas entre as variâncias das garrafas vazias do fornecedor A.

B. Variação entre lotes do Fornecedor B

B.1. Média

De forma análoga ao fornecedor A, onde foi feito o teste de hipóteses seguinte:

$$H_0: \mu_{B1} = \mu_{B2} = \mu_{B3} = \mu_{B4}$$

$$H_1: \mu_{Bi} \neq \mu_{Bj} \text{ para qualquer } (i,j) \text{ com } i \neq j$$

Os valores das taras das garrafas de vidro para o Fornecedor B encontram-se na tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Valores das taras de garrafas de diversos lotes do Fornecedor B

Lotes	**Massa das taras (g)**									
Lote 1	418,52	418,67	417,59	419,73	418,36	419,65	418,19	419,61	418,29	417,39
Lote 2	418,18	418,06	419,02	417,16	418,8	420,75	422,46	420,07	421,4	420,91
Lote 3	411,78	410,97	411,7	415,43	414,65	411,16	413,52	411,67	411,4	411,3
Lote 4	402,4	402,68	403,26	403,11	403,17	415	413,26	415,37	413,49	414,57

Recorrendo à análise de variância, foi possível construir a Tabela ANOVA:

Tabela 4.4 - Tabela ANOVA referente às taras das garrafas do fornecedor B

Fonte de Variação	**SS**	**g.l.**	**MS**	**F_0**
Entre Lotes	822,829	3	274,276	25,7
Erro	384,507	36	10,681	
Total	1207,336	39	30,957	

Tal como se verificou anteriormente, através da comparação entre o valor de F_0 (25,7) e o F crítico ($F_{5\%;3;36g.l} = 2{,}87$) é possível observar que existem indícios para, um nível de significância de 5%, se rejeitar a hipótese nula, ou seja, também existem diferenças significativas entre as médias das massas das garrafas vazias dos diversos lotes em estudo para o fornecedor B. De notar que a maior parte da variação é entre lotes.

B.2. Variância

De forma análoga ao fornecedor A, procedeu-se ao cálculo da estatística de teste χ^2_B onde se obteve o seguinte valor:

$$\chi_B^2 = \frac{1}{1{,}046} \times [85{,}264 - 46{,}921] = 36{,}66$$

Tal como se verificou para o fornecedor A, através da comparação desta estatística com o valor crítico ($\chi^2_{5\%;3g.l} = 7{,}82$), para um nível de significância de 5%, verifica-se que existem indícios para se rejeitar a hipótese nula, ou seja, existem diferenças significativas entre as variâncias das garrafas vazias do fornecedor B.

4.2.1.2.Análise entre fornecedores

De forma análoga ao que foi feito para a análise entre os lotes dos diversos lotes, procedeu-se à análise de diferenças entre os dois fornecedores. Para tal procedeu-se à recolha de 40 taras de garrafas de diferentes lotes para cada um dos fornecedores. Na tabela 4.5 é apresentado um excerto dos dados recolhidos. A tabela integral encontra-se no Anexo C.I.

Tabela 4.5 - Valores das taras de garrafas para os respetivos fornecedores

Fornecedores	Massa das taras (g)								
Fornecedor A	422,67	421,66	421,79	422,25	422,89	...	417,82	416,77	416,32
Fornecedor B	418,52	418,67	417,59	419,73	418,36		415,37	413,49	414,57

A. Média

Recorrendo, novamente, à tabela ANOVA procedeu-se à análise de diferenças significativas entre as médias das taras dos dois fornecedores.

Tabela 4.6 - Tabela ANOVA referente à análise de taras de garrafas entre fornecedores

Fonte de Variação	SS	g.l.	MS	F_0
Entre Fornecedores	711,863	1	711,863	30,03
Erro	1848,890	78	23,704	
Total	2560,752	79	32,415	

Através da comparação entre o valor de F_0 (30,03) e o F crítico ($F_{5\%;1;78g.l} = 3{,}96$) é possível observar que existem indícios para, um nível de significância de 5%, se rejeitar a hipótese nula, ou seja, existem diferenças significativas entre as médias das massas das garrafas vazias dos dois fornecedores. Neste caso a maioria da variação é interior, ou seja, existe muita variação dentro dos diversos lotes de um dado fornecedor.

B. Variância

Procedendo da mesma forma, utilizando o teste de Bartlett, foi calculado o valor da estatística de teste χ_B :

$$\chi_B^2 = \frac{1}{1{,}013} \times [246{,}919 - 243{,}085] = 3{,}79$$

Comparando o valor χ^2_B (3,79) com o valor crítico ($\chi^2_{5\%;1g.l} = 3{,}84$), para um nível de significância de 5%, não existem indícios para se rejeitar a hipótese nula, ou seja, não existem diferenças significativas entre as variâncias das massas das garrafas vazias entre os dois fornecedores em estudo.

4.2.1.3.Conclusão

Mediante a análise estatística realizada, com o intuito de verificar se existiam diferenças significativas entre as garrafas de fornecedores diferentes e de lotes diferentes, é possível concluir que existem diferenças significativas. Essa variação é não só entre fornecedores, mas também entre lotes de um mesmo fornecedor. Como tal a recolha de dados, relativos aos volumes de enchimento dos produtos em análise, necessária para implementar o controlo estatístico deve contemplar uma pesagem antecipada da tara das garrafas.

4.2.2. Válvulas de Enchimento

Outra fonte de variação que interessa estudar antes de se proceder à implementação do controlo estatístico está relacionada com a diferença entre os volumes de enchimento de cada bico, tendo em conta que o enchimento é feito a volume constante. Como tal procede-se à recolha de 10 valores de volumes de enchimento de cada uma das 32 válvulas, verificando estatisticamente se existem diferenças significativas entre as suas médias e variâncias através da Tabela ANOVA e do teste de Bartlett, respetivamente.

4.2.2.1.Média

Na tabela 4.7 é apresentado um excerto dos 10 valores de volume de enchimento recolhidos para cada uma das válvulas de enchimento. A tabela completa encontra-se no anexo C.II, tabela C.2.

Tabela 4.7 - Valores de volume de enchimento para cada uma das válvulas de enchimento

Válvulas	Volume de enchimento (ml)									
Válvula 1	750,27	750,84	753,32	752,78	750,21	750,07	748,69	753,15	750,71	749,89
Válvula 2	751,99	752,94	752,94	750,76	753,92	748,63	750,57	751,04	748,02	750,94
Válvula 3	750,20	750,85	750,55	749,94	750,21	752,32	751,13	750,85	751,17	750,02
Válvula 4	749,57	749,60	753,13	749,39	750,96	752,46	748,46	750,22	749,42	751,94
Válvula 5	752,26	754,24	750,52	750,19	750,78	750,42	749,43	747,17	750,61	749,80
Válvula 6	752,08	748,85	752,05	748,85	752,05	748,18	750,15	748,91	749,23	750,23
Válvula 7	754,96	748,95	751,09	749,79	751,55	753,96	752,41	751,23	750,36	751,04
Válvula 8	751,34	752,22	753,15	753,41	753,04	753,01	751,52	751,37	755,20	753,19
Válvula 9	752,53	751,66	752,24	751,31	750,21	754,32	749,67	750,96	751,18	750,26
Válvula 10	752,57	752,88	751,97	749,12	749,17	748,17	748,80	748,82	751,57	747,71
...										
Válvula 29	752,32	755,01	754,15	753,54	751,73	751,95	750,87	749,99	753,86	751,07
Válvula 30	749,19	751,77	752,09	751,76	751,65	750,33	756,59	754,77	751,28	751,83
Válvula 31	754,62	752,23	757,27	751,84	756,06	753,83	749,92	754,90	754,74	752,79
Válvula 32	748,08	749,57	754,12	750,51	752,96	754,39	747,33	754,28	750,92	748,16

De forma análoga foi utilizada a tabela *ANOVA* para averiguar se existiam diferenças significativas entre as médias do volume de enchimento das diversas válvulas.

Tabela 4.8 - Tabela ANOVA do volume referente às válvulas de enchimento

Fonte Variação	**SS**	**g.l.**	**MS**	**F_0**
SSB	314,683	31	10,151	2,85
Erro	1026,433	288	3,564	
Total	1341,116	319	4,204	

Comparando F_0 (2,85) com o valor crítico ($F_{5\%;31;288g.l} = 1{,}49$) é possível concluir que existem evidências para rejeitar a hipótese nula, ou seja, existem diferenças significativas entre as médias dos volumes de enchimento das válvulas.

Existindo diferenças significativas entre as médias dos volumes de enchimento das diversas válvulas, é crucial verificar qual ou quais as válvulas de enchimento mais críticas e atuar. Assim deve proceder-se ao cálculo da estatística *LSD* e averiguar se o módulo da diferença entre a média do volume de enchimento do válvula i ($\overline{X}_i$) e a média do volume de enchimento válvula j ($\overline{X}_j$) é superior a essa mesma estatística.

Posto isto, a próxima etapa consistiu no cálculo da estatística *LSD*,

$$LSD = t_{0,025;288} \times \sqrt{\frac{2 \times 3{,}564}{10}} = 1{,}662$$

Mediante o módulo da diferença entre as médias das 32 válvulas, verifica-se quais desses valores são superiores à estatística LSD, este estudo encontra-se apresentado no anexo C.II, tabelas C.3 e C.4). Através de uma análise ABC procedeu-se à classificação de válvulas segundo a sua prioridade para implementação de ações corretivas. No Diagrama de Pareto da figura 4.1 é apresentada a classificação que foi atribuída a cada grupo de válvulas, tendo em conta a sua prioridade na implementação de ações corretivas e o princípio empírico “80-20”.

Através da análise ABC e da representação do respetivo Diagrama de Pareto procedeu-se à divisão do conjunto total das 32 válvulas em dois grupos distintos, de acordo com a prioridade em serem implementadas ações de melhoria. As válvulas 14,31,6,10,21 e 24 foram classificadas como classe “A”, ou seja, são as válvulas prioritárias a melhorar, visto que representam, aproximadamente, 20% das causas, e contribuem para mais de 40% do número total de diferenças significativas existentes.

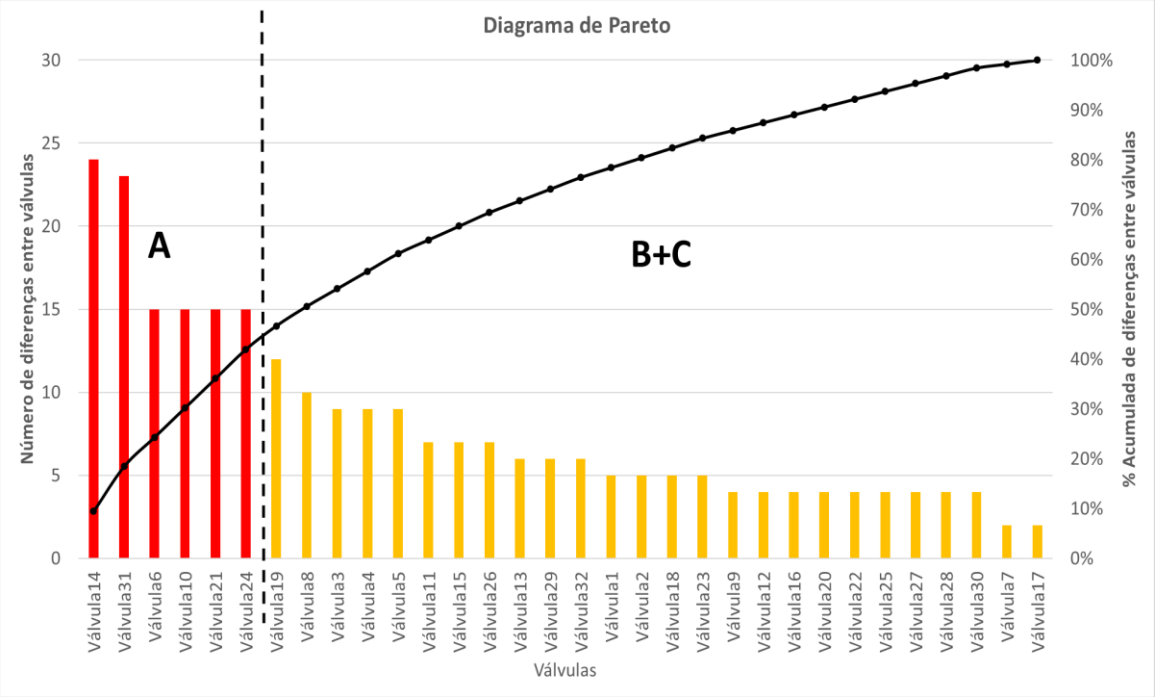

Figura 4.1 - Diagrama de Pareto relativo às diferenças entre o volume das válvulas de enchimento

A classe B+C contempla as restantes válvulas que apesar de não serem prioritárias devem ser também alvo de uma futura implementação de ações corretivas. A tabela utilizada na construção do Diagrama de Pareto (tabela C.5) encontra-se no anexo C.

De forma a averiguar as potenciais causas para que exista um número tão avultado de diferenças entre válvulas de enchimento, procedeu-se à construção de um diagrama causa-e-efeitos que se encontra apresentado na figura 4.2.

4.2.2.2. Variância

Utilizando novamente o Teste de *Bartlett*, procedeu-se à verificação de diferenças significativas entre as variâncias das diversas populações, neste caso, das válvulas de enchimento.

$$\chi_B^2 = \frac{1}{1{,}038} \times [366{,}015 - 330{,}686] = 34{,}029$$

Comparando o valor χ^2_B com o valor crítico ($\chi^2_{5\%;31g.l} = 44{,}99$), para um nível de significância de 5%, não existem indícios para se rejeitar a hipótese nula, ou seja, não existem diferenças significativas entre as variâncias das válvulas de enchimento.

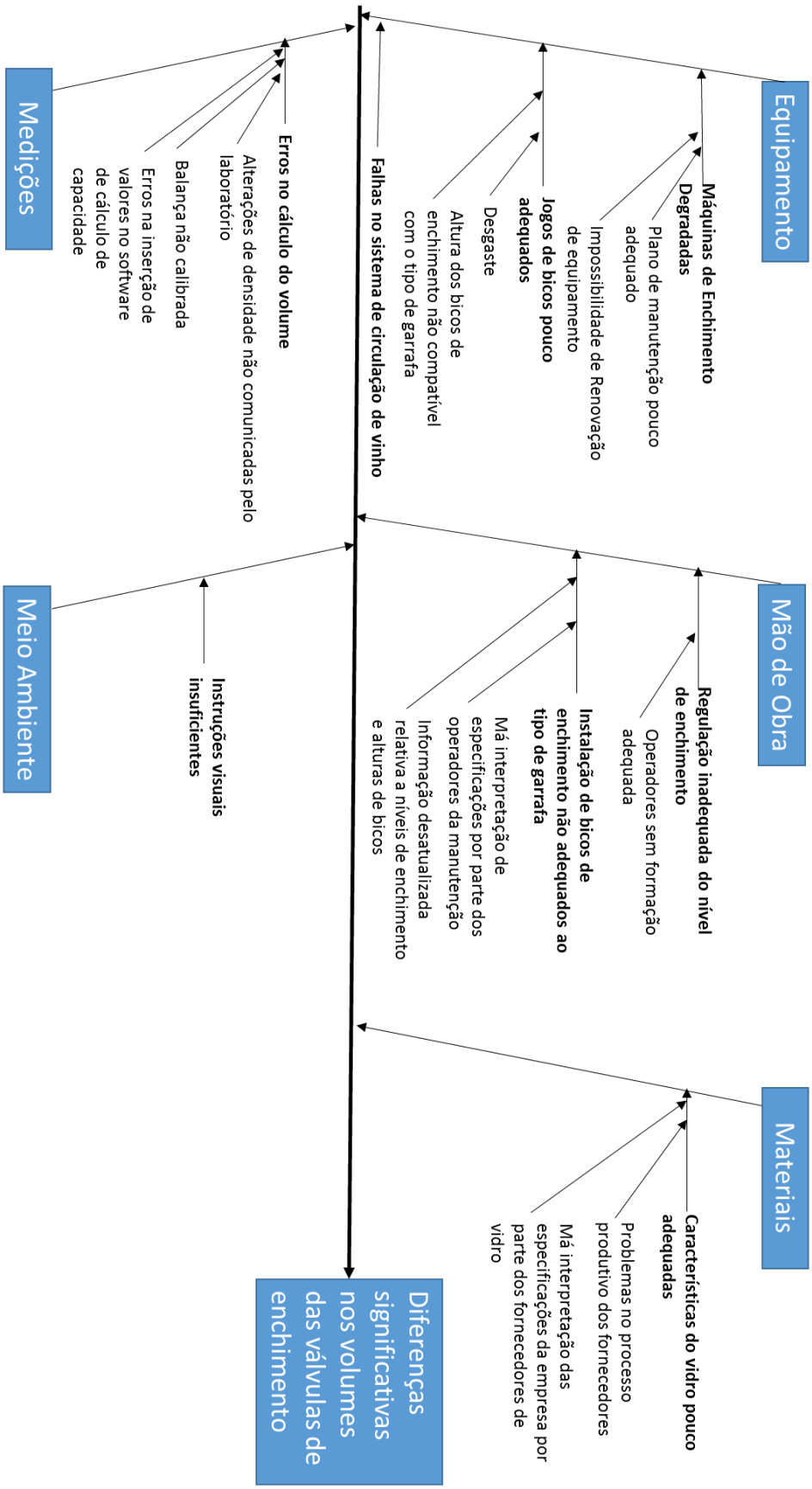

Figura 4.2 - Diagrama causa e efeito

4.2.2.3. Análise da média e variância após intervenção

Face às diferenças significativas entre os volumes das válvulas de enchimento, a empresa implementou diversas ações corretivas no sentido de minorar estas diferenças, com base nas potenciais causas identificadas no diagrama de causa-e-efeito. Posto isto procedeu-se a nova recolha de valores de volume de enchimento de cada válvula, na tabela 4.9 encontra-se um excerto dos valores recolhidos. A tabela completa (tabela C.6) encontra-se no anexo C.II.

Tabela 4.9 - Valores de volume de enchimento para cada uma das válvulas de enchimento após ações corretivas

Válvulas	Volume de enchimento (ml)									
Válvula 1	754,56	752,31	750,76	754,42	754,31	752,66	748,65	751,03	753,12	748,06
Válvula 2	750,67	752,26	753,22	751,85	750,19	752,68	753,01	752,78	749,83	749,69
Válvula 3	753,00	753,45	755,76	755,89	751,66	750,24	751,79	748,08	753,25	751,29
Válvula 4	752,65	751,82	751,15	752,15	749,73	749,78	753,24	756,08	750,81	752,05
Válvula 5	751,96	751,26	748,15	748,97	751,87	748,02	750,22	752,73	749,55	751,23
Válvula 6	755,03	750,83	749,90	751,71	751,87	752,44	750,74	752,23	749,84	754,10
Válvula 7	751,82	751,88	751,94	753,27	755,34	748,76	750,28	747,71	753,53	754,43
Válvula 8	754,58	756,23	752,24	751,53	752,44	750,19	752,71	752,43	751,05	751,28
Válvula 9	751,70	751,84	753,78	752,02	749,77	749,35	752,08	754,10	753,69	754,62
Válvula 10	751,56	753,45	756,95	754,05	750,75	750,79	751,77	752,30	750,28	751,25
•••										
Válvula 29	754,04	754,75	748,70	750,00	754,46	751,16	752,34	754,11	753,74	750,12
Válvula 30	749,03	753,03	749,92	752,01	755,38	751,03	750,96	752,05	750,80	748,97
Válvula 31	750,26	750,72	750,14	753,68	748,04	750,70	752,36	753,33	751,63	751,62
Válvula 32	750,13	749,42	751,24	751,79	750,97	755,15	748,64	751,96	750,54	752,44

De forma análoga ao que já foi realizado, procedeu-se à construção da tabela ANOVA e à realização do Teste de *Bartlett*, após terem sido tomadas as medidas corretivas.

Tabela 4.10 - Tabela ANOVA após intervenção nas válvulas de enchimento

Fonte Variação	SS	g.l.	MS	F_0
SSB	120,162	31	3,876	1,14
Erro	976,711	288	3,391	
Total	1096,873	319	3,438	

Através da análise da tabela ANOVA é possível verificar que houve uma melhoria significativa, não havendo evidências, para um nível de significância de 5%, de que a média dos volumes das válvulas de enchimento seja significativamente diferente, uma vez que o valor de F_0 é inferior ao valor de F crítico ($F_{5\%;31;288g.l} = 1{,}49$).

Relativamente à variância, procedeu-se novamente ao Teste de *Bartlett*, verifica-se que não existem diferenças significativas entre as variâncias das diversas válvulas uma vez que, para um nível de significância de 5%, χ^2_B (20,0) é inferior ao valor crítico ($\chi^2_{5\%;31g.l} = 44{,}99$).

$$\chi_B^2 = \frac{1}{1{,}038} \times [351{,}71 - 330{,}95] = 20{,}0$$

4.2.2.4.Conclusões

A análise das válvulas de enchimento foi de extrema importância, uma vez que condiciona bastante a implementação do controlo estatístico do processo. Como tal verificou-se, numa primeira fase, que efetivamente existiam diferenças significativas entre as válvulas, assim foi necessário verificar quais as válvulas prioritárias para implementação de ações corretivas. Após terem sido feitos esforços no sentido de melhorar a presente situação, foram recolhidos novos valores onde, através da tabela ANOVA, se verificou que já não existiam diferenças significativas.

4.2.3. Bocas de aplicação de cápsula

Volta a ser pertinente estudar uma fonte de variação que está relacionada com as bocas da máquina de roscar. Isto é importante uma vez que cada cápsula roscada pelas diferentes bocas poderá necessitar de aplicação de mais ou menos torque. Como tal é crucial analisar se existem diferenças significativas entre essas bocas, de forma a que se evite situações em que é necessária a aplicação de um torque maior, ou pelo contrário, situações em que a cápsula de vedação não está devidamente colocada, refletindo-se num valor de torque relativamente baixo.

Assim sendo serão recolhidos 10 valores de cada uma das 5 bocas, de forma a verificar se, estatisticamente, existem diferenças significativas entre a média dos valores do troque e a sua variância. O procedimento será análogo ao que já foi feito anteriormente, através da utilização da Tabela ANOVA e do teste de Bartlett.

Na tabela 4.11 são apresentados os valores recolhidos para cada uma das 5 bocas de aplicação de rosca.

Tabela 4.11 - Valores de torque para cada boca de rosca

Bocas	**Torque (in.lbs)**									
Boca 1	23,7	24,9	24	21,2	16,9	17,3	15,7	21,9	17,4	13,4
Boca 2	19	25,7	24,6	15,4	19,6	17,6	18	13,1	21,1	15,8
Boca 3	21,4	24,7	28,7	16,2	13,5	15,4	20	18	18,4	15,2
Boca 4	21,4	23,1	20,6	14,3	16,5	16,1	21,7	16,5	15,9	15,2
Boca 5	21	23,7	24,6	16,5	18,7	16,6	16,8	16,1	15,9	16,2

4.2.3.1.Média

De forma análoga ao que já foi feito, recorreu-se à Tabela ANOVA para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias das diversas bocas de aplicação de cápsula de vedação.

Tabela 4.12 - Tabela ANOVA para Máquina de Rosca

Fonte Variação	SS	g.l.	MS	F_0
Entre Bocas	12,951	4	3,238	0,22
Erro	675,748	45	15,017	
Total	688,699	49		

Através da comparação entre F_0 (0,22) e F crítico ($F_{5\%;4;45g.l} = 2{,}58$) é possível verificar que existem indícios, para o nível de significância de 5%, não se rejeitar a hipótese nula, ou seja, não existem diferenças significativas entre as médias do torque necessário para abrir uma cápsula vedante, colocada por uma das cinco bocas de aplicação de rosca.

4.2.3.2.Variância

Procedendo da mesma forma, utilizando o teste de Bartlett, foi calculado o valor da estatística de teste χ_B^2

$$\chi_B^2 = \frac{1}{1{,}044} \times [121{,}912 - 120{,}104] = 1{,}73$$

Comparando o valor χ_B^2 (1,73) com o valor crítico ($\chi^2_{5\%;4g.l} = 9{,}49$), para um nível de significância de 5%, não existem indícios para se rejeitar a hipótese nula, ou seja, não existem diferenças significativas entre as variâncias do torque necessário para abrir uma cápsula vedante, colocada por uma das cinco bocas de aplicação de rosca.

4.2.3.3.Conclusão

Através da análise feita com o intuito de verificar se existiam diferenças entre o torque necessário para abrir uma cápsula de vedação, aplicada numa das cinco bocas da máquina de rosca, é possível concluir que não existe variação entre essas mesmas bocas.

4.3. SPC para pequenas produções - Cartas Q ($\bar{X}$) e Q(S^2)

Mediante a necessidade de a empresa monitorizar o processo de enchimento associado a alguns dos seus produtos caracterizados por pequenas produções procedeu-se à implementação de controlo estatístico para analisar a característica volume de enchimento de duas referências de produtos, e para analisar duas características (volume de enchimento e torque da cápsula de vedação) de outro produto. Como já foi referido os três produtos apresentam produções relativamente pequenas, onde dois dos produtos pertencem a gamas *super premium*, com uma produção anual de cerca de 5000 litros e o terceiro é produzido exclusivamente para um único cliente com uma produção anual de cerca de 10000 litros. Como tal adotou-se a metodologia

desenvolvida por Charles Quesenberry, que consiste na transformação das estatísticas referentes à característica da qualidade X (neste caso o volume de enchimento do pré-embalado) numa variável Q, que deste modo será mais indicada para este tipo específico de produção (*short runs).* De forma a aplicar estas cartas de controlo, assumiu-se que os dados recolhidos relativamente aos dois produtos em análise (SPA e SPB) são independentes e identicamente distribuídos. O *software* utilizado na construção destas cartas foi o *Microsoft Office – Excel*.

4.3.1. Carta Q($\bar{X}$) e Carta Q(S^2) dos produtos SPA, SPB e CA

Após terem sido recolhidas as amostras, procedeu-se à construção das cartas Q($\bar{X}$) e Q(S^2). Abaixo encontram-se representadas as respetivas cartas apenas para o produto CA e para a característica volume de enchimento, uma vez que a linha de raciocínio é a mesma para a característica torque e para os outros dois produtos. Os resultados relativos à característica torque e aos outros produtos encontram-se no anexo D.

Na carta Q($\bar{X}$) não se detetaram causas especiais de variação sendo possível verificar a estabilidade da média do volume no processo de enchimento.

Relativamente à capacidade é possível verificar que o processo apresenta capacidade para produzir de acordo com a especificação, no entanto o processo nunca se encontra centrado, ou seja, o índice de capacidade inferior (Q_I) nunca é simétrico ao índice de capacidade superior (Q_S), havendo uma discrepância entre o volume alvo definido e os valores de volume que efetivamente se encontram em cada garrafa deste produto.

Relativamente à carta *Q(S^2)* (figura 4.4) também não se verificou a presença de causas especiais de variação, logo a dispersão do processo encontra-se estabilizada. No entanto a partir da amostra 13 a dispersão aumentou consideravelmente. Foram tomadas medidas no sentido de alertar os operadores para procederem à regulação do nível com maior rigor.

Relativamente à característica torque e para os outros dois produtos em análise apresenta-se nas tabelas 4.13 e 4.14 a respetiva a análise relativamente à presença de causas especiais de variação nas cartas *Q($\bar{X}$) e Q(S^2).*

4.3.1.1.Conclusões

Mediante a construção e análise das cartas *Q($\bar{X}$)* e *Q(S^2)* para os três produtos em estudo foi possível verificar que a média e a variância do volume de enchimento do produto SPA se encontram sob controlo estatístico, após ter sido corrigida uma causa especial na carta *Q($\bar{X}$)* (amostra 3).

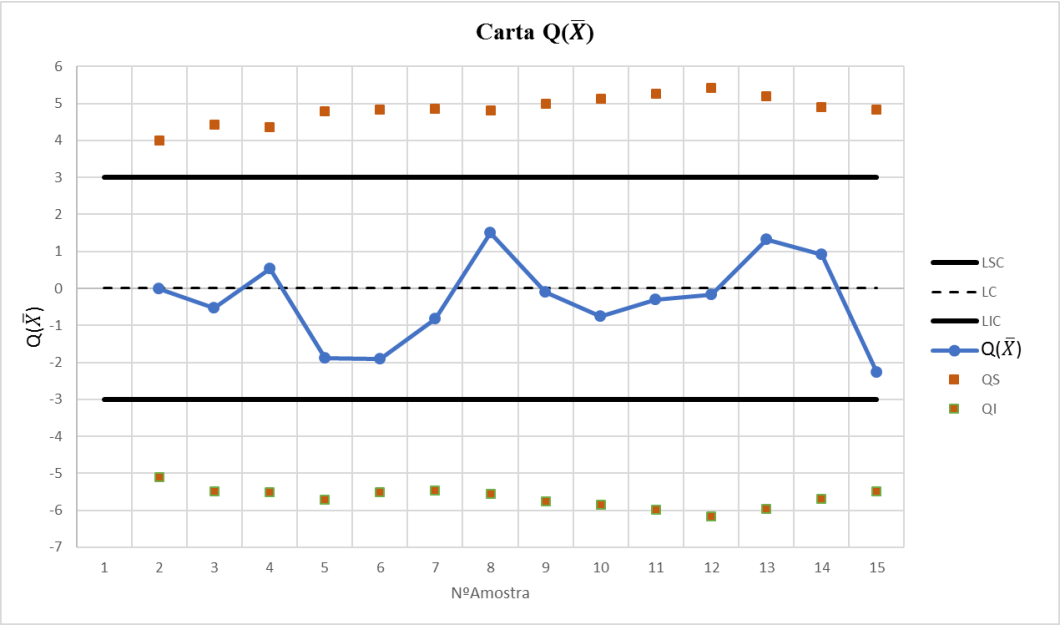

Figura 4.3 - Carta Q($\bar{X}$) para o produto "CA" para a característica Volume de Enchimento

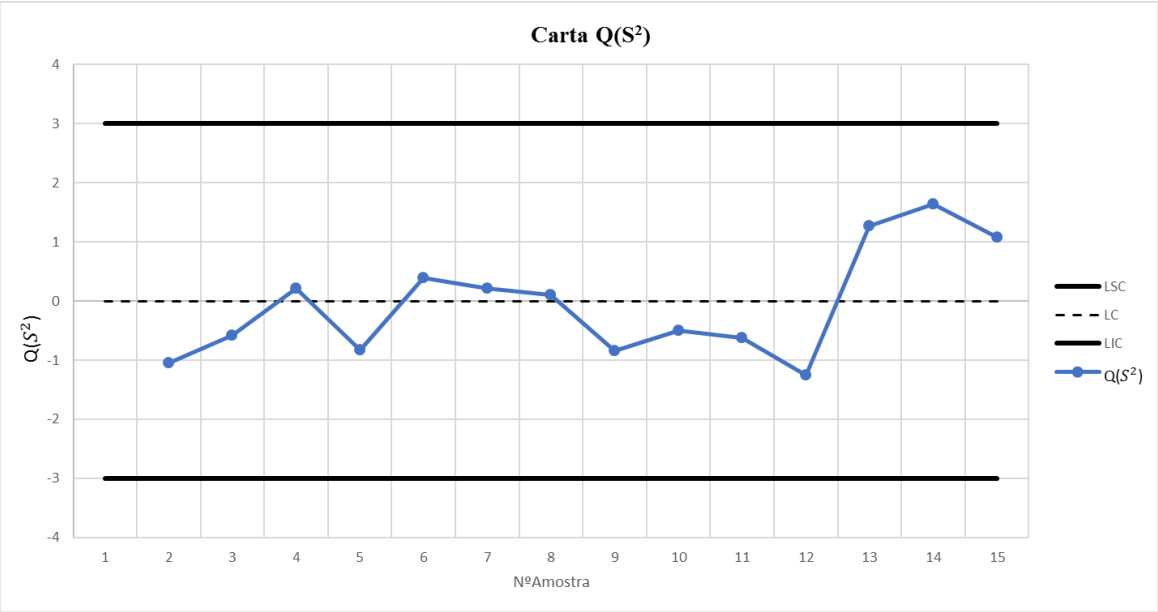

Figura 4.4 - Carta Q(S^2) do produto "CA" da característica volume de enchimento

Tabela 4.13 - Análise da Característica volume de enchimento para os 3 produtos

Característica Volume de Enchimento				
Produto	**Causas especiais na carta $Q(\bar{X})$**	**Causas especiais na carta S^2**	**Capacidade**	**Processo Centrado**
SPA	Regra 5	-	Sim	Na maioria dos pontos
SPB	-	Regra 5 e dois pontos abaixo do LIC	Sim	Na maioria dos pontos
CA	-	-	Sim	Não

Tabela 4.14 - Análise da característica torque na cápsula de vedação para os 3 produtos

Característica Torque na cápsula de vedação				
Produto	**Causas especiais na carta $Q(\bar{X})$**	**Causas especiais na carta S^2**	**Capacidade**	**Processo Centrado**
SPA	Característica não analisada	Característica não analisada	-	-
SPB	Característica não analisada	Característica não analisada	-	-
CA	Regra 6	-	Sim	Não

A eventual razão desta causa poderá estar relacionada com um ajuste no nível da pré-pressão de enchimento, de forma a ajustar o nível de enchimento de vinho nas garrafas para um valor mais adequado. O processo apresenta capacidade para produzir de acordo com as especificações definidas e a partir da amostra 8 foi possível verificar que o processo se encontrou centrado, visto que o índice de capacidade superior (Q_S) é aproximadamente simétrico ao índice de capacidade inferior (Q_I). Também foi possível verificar que a partir dessa mesma amostra 8 a dispersão diminui consideravelmente, o que poderá estar associado a um lote de garrafas de vidro com maior regularidade na sua capacidade nominal.

Para o produto SPB verificou-se que a média e a variância do volume de enchimento se encontravam sob controlo estatístico após se terem corrigido quatro causas especiais, na carta $Q(S^2)$, duas delas associadas à regra 5 (amostras 14 e 15) e as outras relativas a pontos abaixo do limite inferior de controlo (amostras 1 e 10). Estas causas especiais de variação estão relacionadas com a alteração do lote de vidro que ocorreu a partir da amostra 9. Em termos de média do volume enchimento existem poucas oscilações, no entanto, na carta da variância é possível observar que existem grandes oscilações até à amostra 10, a partir da qual se verificou uma diminuição na dispersão do processo. Isto está relacionado com as condições do lote de vidro, que por sua vez deveriam estar mais próximas do que é exigido pela empresa ao fabricante do vidro.

No que diz respeito à capacidade é possível verificar que em todos os momentos o processo consegue produzir de acordo com a especificação definida. No entanto o processo só se encontrou centrado a partir da amostra 7.

O produto CA apresentava duas características para análise, a primeira correspondente ao volume de enchimento em que a sua média e variância se encontravam sob controlo estatístico não se verificando qualquer causa especial de variação. No entanto existe uma oportunidade de melhoria no sentido de garantir que o processo se encontre centrado o que é de extrema importância, de forma a alinhar as especificações definidas com o que realmente se verifica durante o processo de enchimento. A partir da amostra 12 (figura 4.4) houve um aumento significativo na dispersão, que está relacionado com uma situação de sobreenchimento causada pelo ajuste do nível de enchimento.

Relativamente à característica torque na cápsula de vedação, a média e a variância do processo encontram-se sob controlo estatístico após ter sido corrigida uma causa especial de variação na carta $Q(\bar{X})$ associada à regra 6, na amostra 11. Deste modo, procedeu-se à sua correção de forma a que já não fosse possível identificar a causa especial.

Na amostra 13, é possível verificar a existência de um ponto que quase se encontra abaixo do limite inferior de especificação o que nos indica que o valor de torque a aplicar para abrir a cápsula de vedação da garrafa, nessa amostra, era relativamente baixo. Isto poderá estar relacionado com alteração no lote do vidro que se verificou a partir da amostra 12.

No início do processo, nomeadamente na amostra 2 e 3 (figura D.5 do anexo D.III) verificou-se que, apesar do processo apresentar capacidade, os índices apresentam um valor próximo de +3, o que poderá estar relacionado com alguma intervenção na máquina de capsulagem por parte da manutenção. Relativamente aos outros pontos, verifica-se que o processo se encontra com capacidade para produzir de acordo com a especificação, no entanto não se verifica que o processo se encontre centrado, o que poderá ser uma oportunidade de melhoria, de forma a alinhar as especificações definidas com o que efetivamente se verifica durante a capsulagem das garrafas.

4.3.1.2.Verificação dos pressupostos de Normalidade e independência

Depois de se proceder ao tratamento das causas especiais de variação dos diversos produtos, deve verificar-se os pressupostos de Normalidade e independência dos dados. Relativamente à independência dos dados foi assumido que tal se verificava. Para a Normalidade dos dados, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (referido do capítulo 2) com o auxílio do *software Statistica*.

Em primeiro lugar deve-se proceder ao cálculo do número de classes do histograma, de cada produto e para cada característica, através da seguinte expressão

$$k = 1 + \frac{\log N}{\log 2} \tag{2.142}$$

em que $N=m\times n$ corresponde ao produto entre o número de amostras (m) e a dimensão da amostra (n).

De seguida determina-se o $D_{crítico}$ que para o nível de significância 5% (α = 0,05) pode ser determinado pela seguinte expressão (para N > 30 e de acordo com a tabela A.1 do anexo A)

$$D_{Crítico} = \frac{0{,}886}{\sqrt{N}} \tag{2.143}$$

Por fim, recorrendo ao *software Statistica*, verifica-se qual o valor da estatística d como se pode constatar no seguinte exemplo (figura 4.5).

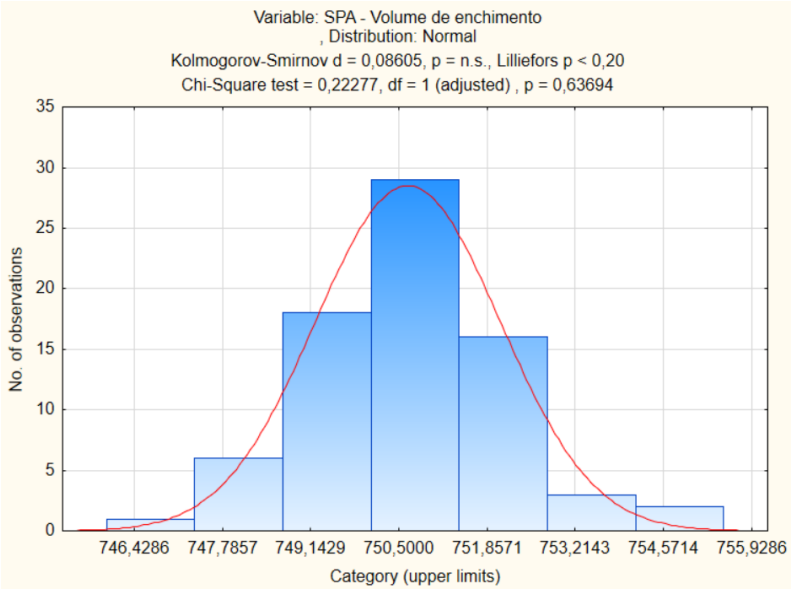

Figura 4.5 - Normalidade dos dados referentes ao volume de enchimento do produto CA

As figuras referentes à distribuição Normal das outras características e dos outros produtos encontram-se no anexo G. De seguida apresenta-se o quadro com o número de classes a ser utilizado para a construção do histograma e os valores da estatística *d* e do $D_{crítico}$.

Tabela 4.15 - Normalidade dos produtos SPA,SPB e CA

Característica volume de enchimento				Característica torque na cápsula
	SPA	**SPB**	**CA**	**CA**
N	45	60	75	70
k	6	7	7	7
d	0,0902	0,1134	0,0861	0,0767
$D_{crítico}$	0,1321	0,1144	0,1023	0,1059

Verifica-se que em todos os produtos, e no caso do produto CA para ambas as características, que o valor da estatística *d* é inferior ao valor de $D_{crítico}$. Assim é possível concluir que, para um nível de significância de 5%, os dados se ajustam a uma distribuição aproximadamente Normal.

4.3.1.3.Análise Multivariada – Carta MQ($\bar{X}$)

Após ter sido feita a análise para cada variável individualmente, procedeu-se à análise multivariada que por sua vez permite construir uma carta de controlo conjunta de ambas as características em estudo, que se encontra na figura 4.4. Neste tipo de cartas é compreendido o efeito de alterações em ambas as características, o que significa que se num determinado ponto houver uma alteração significativa, em ambas as características, a carta *MQ($\bar{X}$)* irá refletir a junção

dessa mesma variação. Um ponto que se destaca nesta carta $MQ(\bar{X})$ é a amostra 13 que é caracterizada por um aumento na carta do volume de enchimento e por uma diminuição brusca no valor do torque aplicado à cápsula de vedação, que por sua vez aparecem refletidas num ponto que quase se encontra acima do limite superior de controlo.

No que diz respeito a causas especiais de variação, presentes nesta carta, é possível verificar a presença de uma causa especial associada à regra 6, ou seja, a presença de quatro de cinco pontos na zona B, ou A, do mesmo lado da linha central (amostras 5 a 8). Esta causa especial foi evidenciada na carta da média da característica torque e encontra-se refletida na carta multivariada.

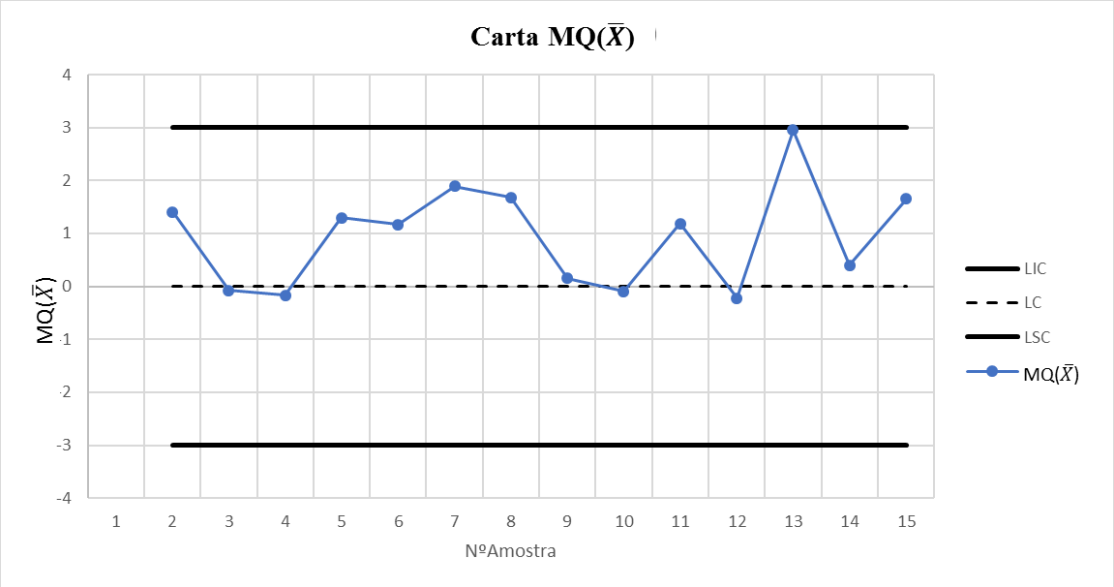

Figura 4.6 - Carta $MQ(\bar{X})$

4.3.1.3.1. Conclusões

A construção da carta $MQ(\bar{X})$ revelou-se útil no sentido de permitir fazer o paralelismo entre a análise individual de cada característica e a análise multivariada. Foi possível constatar a presença da regra 6 que se havia verificado na carta da média da característica torque. É importante averiguar se a produção realizada nos instantes em que se detetou a causa especial de variação não apresenta garrafas com cápsulas que exijam a aplicação de grandes valores de torque, o que se reflete numa maior dificuldade para o cliente conseguir abrir a garrafa de vinho.

4.4. SPC para "Grandes Produções"

Após ter sido feita a análise a referências de produto com limitação na quantidade de dados disponíveis para recolha, prossegue-se agora para a análise de produtos cujas quantidades produzidas permite a obtenção de um número de amostras aceitável para implementação de cartas

de controlo tradicionais, numa Fase I e depois a aplicação de cartas *Z* e *W*, numa Fase II. Feita análise univariada das características volume de enchimento e torque aplicado na cápsula de vedação, procede-se para a análise multivariada através da construção das cartas T^2. A dimensão da amostra recolhida é de 5 unidades e a frequência de recolha foi de hora a hora, onde se procedeu à pesagem da tara, pesagem da tara mais liquido, cálculo do volume e verificação do torque necessário para abrir a cápsula de vedação.

4.4.1. Análise Univariada

4.4.1.1.Produto GPA, GPB e GPC – Fase I

Na figura 4.7 e 4.8 são apresentadas as cartas $\bar{X}$ e *S*, respetivamente, para a característica volume de enchimento do produto GPA. Uma vez que a linha de raciocínio é idêntica, as cartas dos outros produtos e características encontram-se no anexo C. Após ter sido feita a recolha de 30 amostras deste produto foram elaboradas as cartas $\bar{X}$ e S para a característica volume de enchimento, recorrendo ao software *Microsoft Office* – Excel, procedeu-se à análise das mesmas onde não se verificou a presença de nenhum ponto abaixo ou acima dos limites inferior e superior de controlo, respetivamente.

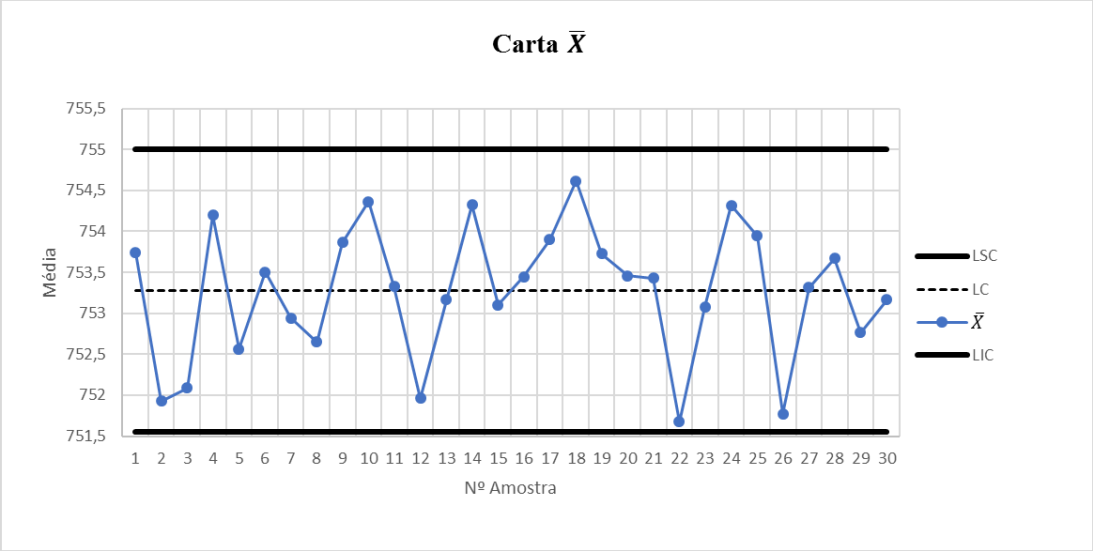

Figura 4.7 - Carta $\bar{X}$ do produto GPA para o volume de enchimento

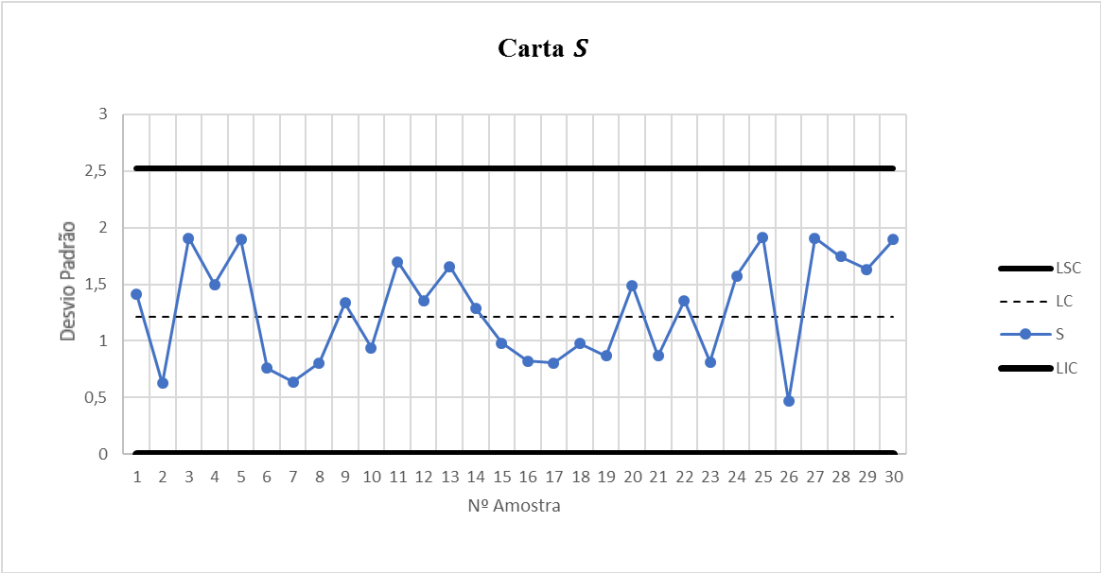

Figura 4.8 - Carta S para o produto GPA para o volume de enchimento

De seguida apresentam-se duas tabelas resumo com a informação relativa à presença de causas especiais nas características de todos os produtos analisados.

Tabela 4.16 - Análise de pontos fora dos limites de controlo para o volume de enchimento

Característica Volume de Enchimento		
Produto	**Causas especiais na carta $\bar{X}$**	**Causas especiais na carta S**
GPA	-	-
GPB	amostra 24	-
GPC	amostra 11 e amostra 14	-

Tabela 4.17 - Análise de pontos fora dos limites de controlo para o torque na cápsula

Característica Torque na cápsula de vedação		
Produto	**Causas especiais na carta $\bar{X}$**	**Causas especiais na carta S**
GPA	-	-
GPB	-	-
GPC	amostra 15	amostra 17

Analisando as tabelas 4.16 e 4.17 é possível verificar que o produto GPA não apresenta qualquer causa especial, em nenhuma das cartas em ambas as características. Já o produto GPB apresenta uma causa especial na amostra 24 da carta da média do volume de enchimento. Esta situação está associada ao facto de se ter evidenciado uma diminuição no volume das garrafas e de ter sido necessário regular o nível de enchimento. O facto de o equipamento apresentar algum desgaste significativo dificulta a regulação deste parâmetro, provocando muitas vezes situações de sobreenchimento. No que diz respeito à característica do torque não foram detetadas causas especiais de variação.

No produto GPC foram detetadas duas causas especiais na carta da média do volume de enchimento, nomeadamente na amostra 11 e outra na amostra 14. Estas causas especiais foram

provocadas por um problema no gaseificador o que por vezes conduzia a situações pontuais de sobreenchimento ou subenchimento. Para a característica do torque na cápsula, foram evidenciadas duas causas especiais, uma na carta da média (amostra 15) e outra na carta do desvio padrão (amostra 17). A causa para estas duas situações está associada à mudança para um lote de garrafa novo, que se iniciou na amostra 12 e terminou aproximadamente na amostra 17.

Uma vez retirados todos os pontos fora dos limites de controlo das duas características dos três produtos, a próxima etapa consiste na verificação de eventuais padrões não aleatórios em ambas as cartas, onde para tal se recorreu ao *software Statistica* como é possível ver nas figuras 4.9 e 4.10 que estão associadas à característica volume de enchimento do produto GPA. As figuras referentes aos outros produtos para ambas as características encontram-se no anexo F.

	GPA - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet39) X-bar Chart Center line: 753,265505 Sigma: 0,601616	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura 4.9 – Padrões não aleatórios na carta $\bar{X}$ do volume do produto GPA

	GPA - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet39) S Chart Center line: 1,264520 Sigma: 0,459020	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	**from sample**	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura 4.10 - Padrões não aleatórios na carta S do volume do produto GPA

No quadro 4.18 é possível verificar se existiram padrões não aleatórios em alguma das características dos três produtos.

Através da análise da tabela 4.18 é possível concluir que não se detetaram nenhuns padrões não aleatórios. Posto isto a próxima etapa consistirá na verificação do pressuposto de Normalidade, uma vez que é assumida a independência dos dados.

Tabela 4.18 - Análise de padrões não aleatórios para as características dos 3 produtos

Regras	Característica Volume			Característica Torque		
	Produtos			Produtos		
	GPA	GPB	GPC	GPA	GPB	GPC
9 pontos do mesmo lado da LC	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6 pontos consecutivos a subir ou a descer	OK	OK	OK	OK	OK	OK
14 pontos alternadamente a subir e descer	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2 de 3 pontos na zona A ou para além desta zona	OK	OK	OK	OK	OK	OK
4 de 5 pontos na zona B ou para além desta zona	OK	OK	OK	OK	OK	OK
15 pontos na zona C	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8 pontos acima da zona C	OK	OK	OK	OK	OK	OK

De forma análoga ao que foi feito para produtos com restrição de dados, deve verificar-se a normalidade dos dados após se ter concluído que não existiam causas especiais de variação. Recorrendo ao *software Statistica*, procede-se à determinação da estatística *d* de forma a compará-la ao valor crítico calculado. Nas tabelas 4.19 e 4.20 encontra-se os respetivos valores de *d e* $D_{crítico}$ para cada produto e característica em estudo.

Tabela 4.19 - Normalidade para os dados relativos ao Volume de Enchimento

Volume de Enchimento			
Volume de Enchimento	GPA	GPB	GPC
N	150	145	140
k	8	8	8
$D_{crítico}$	0,0723	0,0736	0,0749
d	0,0592	0,0438	0,0525

Tabela 4.20 - Normalidade para os dados relativos ao torque

Torque na cápsula de vedação			
Torque	GPA	GPB	GPC
N	150	150	140
k	8	8	8
$D_{crítico}$	0,0723	0,0723	0,0749
d	0,0676	0,0660	0,0739

Através da análise das tabelas podemos verificar que para ambas as características e para os três produtos, os dados recolhidos seguem, aproximadamente, uma distribuição normal para um nível de significância de 5%. As respetivas figuras extraídas do *software Statistica* que apresentam o valor da estatística *d* encontram-se em no anexo G.

Verificada a Normalidade dos dados e assumindo que estes são independentes, verificam-se todos os pressupostos necessários para se proceder à implementação de cartas de controlo. A etapa seguinte consiste em estimar os parâmetros do processo e proceder à análise de capacidades. A média e o desvio padrão estimados podem ser obtidos através das expressões 2.44 2.45 mencionadas no capítulo 2, seção 2.4.3.2.1. Estimando os parâmetros do processo do produto

GPA para a característica volume de enchimento e os respetivos índices de capacidade resultará em:

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}} = 753{,}27$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} = \frac{1{,}265}{0{,}94} = 1{,}345$$

Uma vez que a especificação do volume de enchimento e do torque são ambas bilaterais, procede-se ao cálculo dos índices C_p e C_{pk}, recorrendo às expressões 2.52, 2.54 e 2.55, da seção 2.5.1, onde se obtém que:

$$C_P = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} = \frac{760 - 740}{6 \times 1{,}345} = 2{,}478$$

$$C_{Pk} = mín\left(\frac{\mu - LIE}{3\sigma}, \frac{LSE - \mu}{3\sigma}\right) = mín\,(3{,}287\,;1{,}669) = 1{,}669$$

De forma análoga procedeu-se ao cálculo dos parâmetros e índices para cada característica e para cada produto. O resumo dos valores obtidos encontra-se nas tabelas 4.21 e 4.22:

Tabela 4.21 - Parâmetros e Índices de Capacidade para o Volume de Enchimento

Volume de Enchimento			
	GPA	GPB	GPC
$\hat{\mu}$	753,27	750,36	751,08
$\hat{\sigma}$	1,345	1,169	0,955
C_p	2,478	1,711	2,095
$(C_{pk})_I$	3,287	1,815	2,473
$(C_{pk})_S$	1,669	1,607	1,716
C_{pk}	1,669	1,607	1,716

Tabela 4.22 - Parâmetros e Índices de Capacidade para o Torque na Cápsula de Vedação

Torque na cápsula de vedação			
	GPA	GPB	GPC
$\hat{\mu}$	16,96	14,71	17,47
$\hat{\sigma}$	1,720	1,245	1,347
C_p	1,551	1,875	1,980
$(C_{pk})_I$	1,544	1,796	2,097
$(C_{pk})_S$	1,558	1,953	1,863
C_{pk}	1,544	1,796	1,863

No que diz respeito à capacidade, tanto para o volume como para o torque na cápsula de vedação, os processos apresentam capacidade para produzir de acordo com as suas respetivas especificações técnicas. Em termos dos processos se encontrarem centrados, verifica-se que no processo de enchimento o único produto em que se verifica que $(C_{pk})_I \cong (C_{pk})_S$ é o GPB, nos

outros produtos verifica-se uma grande discrepância entre estes dois índices. Já no processo do torque aplicado na cápsula de vedação verifica-se que, em todos os produtos, $(C_{pk})_I \cong (C_{pk})_S$.

4.4.1.1. Conclusões

Através da implementação da Fase I de controlo estatístico seguido do estudo e análise da capacidade, tendo em conta a estimação de parâmetros dos processos, permitiu verificar que o processo se encontrava sob controlo estatístico, após remoção de algumas causas especiais de variação. A grande inconsistência nas características dos lotes de vidro aliado ao facto do equipamento de enchimento apresentar algum desgaste, contribui para algumas situações pontuais de desvios no nível de enchimento. Verificada a Normalidade dos dados e assumido o pressuposto de independência dos mesmos, procedeu-se à estimação dos parâmetros e determinação das capacidades. Uma vez que a especificação era bilateral, os valores dos índices de capacidade (C_p e C_{pk}) teriam de, pelo menos, serem superiores a 1,33, o que se verifica para todas as referências de produto e características em estudo. Sobretudo nos produtos GPA e GPC verifica-se que a média não se encontra centrada, o que poderá ser uma oportunidade de melhoria para a empresa.

4.4.1.2. Fase II do SPC – Cartas Z e W

Uma vez verificada a estabilidade dos processos e estimados os seus parâmetros, existem condições para se proceder à Fase II do controlo estatístico que tem por fim a monitorização dos processos. Para tal procedeu-se à recolha de 20 amostras de dimensão 5, que por sua vez seriam utilizadas na construção das cartas *Z* e *W* para ambas as características em estudo.

A. Volume de Enchimento - Produto GPA, GPB e GPC

Recolhidas as amostras, procedeu-se à construção das cartas *Z* e *W*. Nas figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se as cartas *Z* e *W* para a característica volume de enchimento. Mediante a análise da carta *Z* não foram evidenciadas causas especiais de variação, verificando-se assim continuidade na estabilidade da média do processo de enchimento. Relativamente à carta *W* para a dispersão, também não foram evidenciadas causas especiais de variação, contudo na amostra 1 (Produto GPA) existe um ponto que se encontra muito próximo do limite superior de controlo, que por sua vez está relacionado com a fase de arranque do processo, onde é feita uma regulação do nível de enchimento. Esta situação levou a que nessa amostra existisse pouca uniformidade entre alguns dos valores de volume de enchimento. No que diz respeito à capacidade, os três produtos apresentam capacidade uma vez que os índices Z_S e Z_I são superiores a +3 e inferiores a -3, respetivamente. No entanto o processo só se encontra aproximadamente centrado no produto GPB, uma vez que nos outros dois produtos (GPA e GPC) existem grandes discrepâncias entre

os valores do índice de capacidade Z_S e o índice Z_I, o que se traduz numa oportunidade de melhoria para a empresa.

A tabela 4.23 apresenta um resumo da análise de causas especiais de variação para esta característica:

Tabela 4.23 - Causas especiais no volume de enchimento cartas Z e W

Característica Volume de Enchimento				
Produto	**Causas especiais na carta Z**	**Causas especiais na carta W**	**Capacidade**	**Processo Centrado**
GPA	-	-	Sim	Não
GPB	-	-	Sim	Sim
GPC	-	-	Sim	Não

Apesar de todos os produtos apresentarem capacidade, só no produto GPB é que se verifica que o processo se encontra aproximadamente centrado.

B. Torque aplicado na cápsula - Produto GPA, GPB e GPC

As cartas *Z* e *W* relativas ao torque aplicado na cápsula de vedação encontram-se apresentadas nas figuras 4.13 e 4.14. Através da sua análise foi possível verificar que o processo apresenta duas causas especiais de variação, uma na carta Z (amostra 37, produto GPB) e outra na carta W (amostra 55, produto GPC). Na amostra 37 (produto GPB) a principal causa está relacionada com a mudança para novo lote de vidro que se iniciou a partir da amostra 32 (produto GPB), verificando um aumento gradual dos valores de torque desde a amostra 33 até à amostra 37 (produto GPB).

A causa especial da amostra 55 (Produto GPC) poderá estar associada ao facto de uma das garrafas de vidro dessa amostra ter sido feita num molde desgastado, o que resulta em potenciais alterações nas características do vidro. Uma vez que a situação foi pontual e não se voltou a verificar, não foram tomadas medidas corretivas. Analisando a capacidade do processo, verifica-se que todos os produtos apresentam capacidade, uma vez que os índices Z_I e Z_S são inferiores a -3 e superiores a +3, respetivamente. Verifica-se também que o processo se encontra aproximadamente centrado para todos os produtos uma vez que os valores absolutos dos índices Z_I e Z_S são aproximadamente iguais.

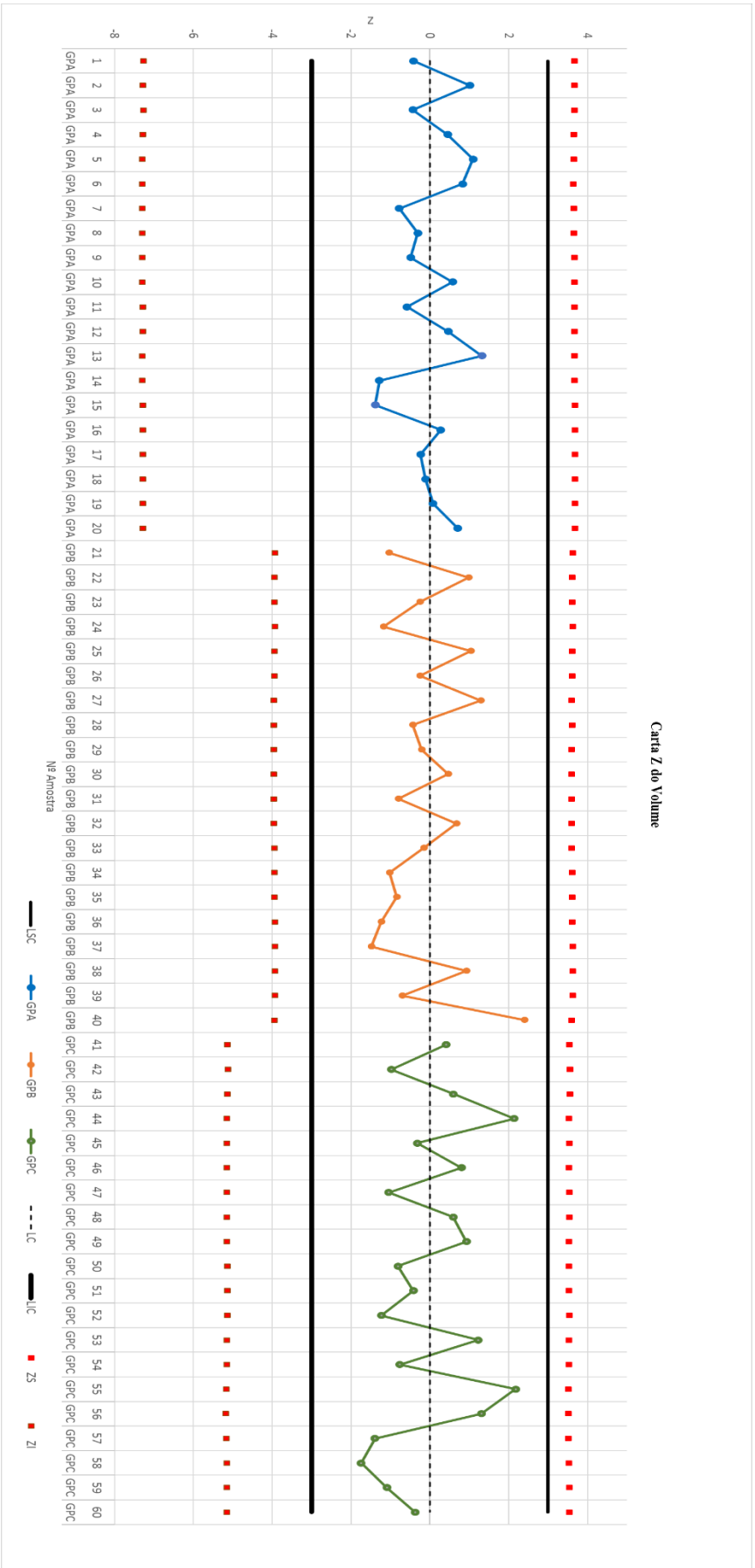

Figura 4.11 - Carta Z do volume de enchimento

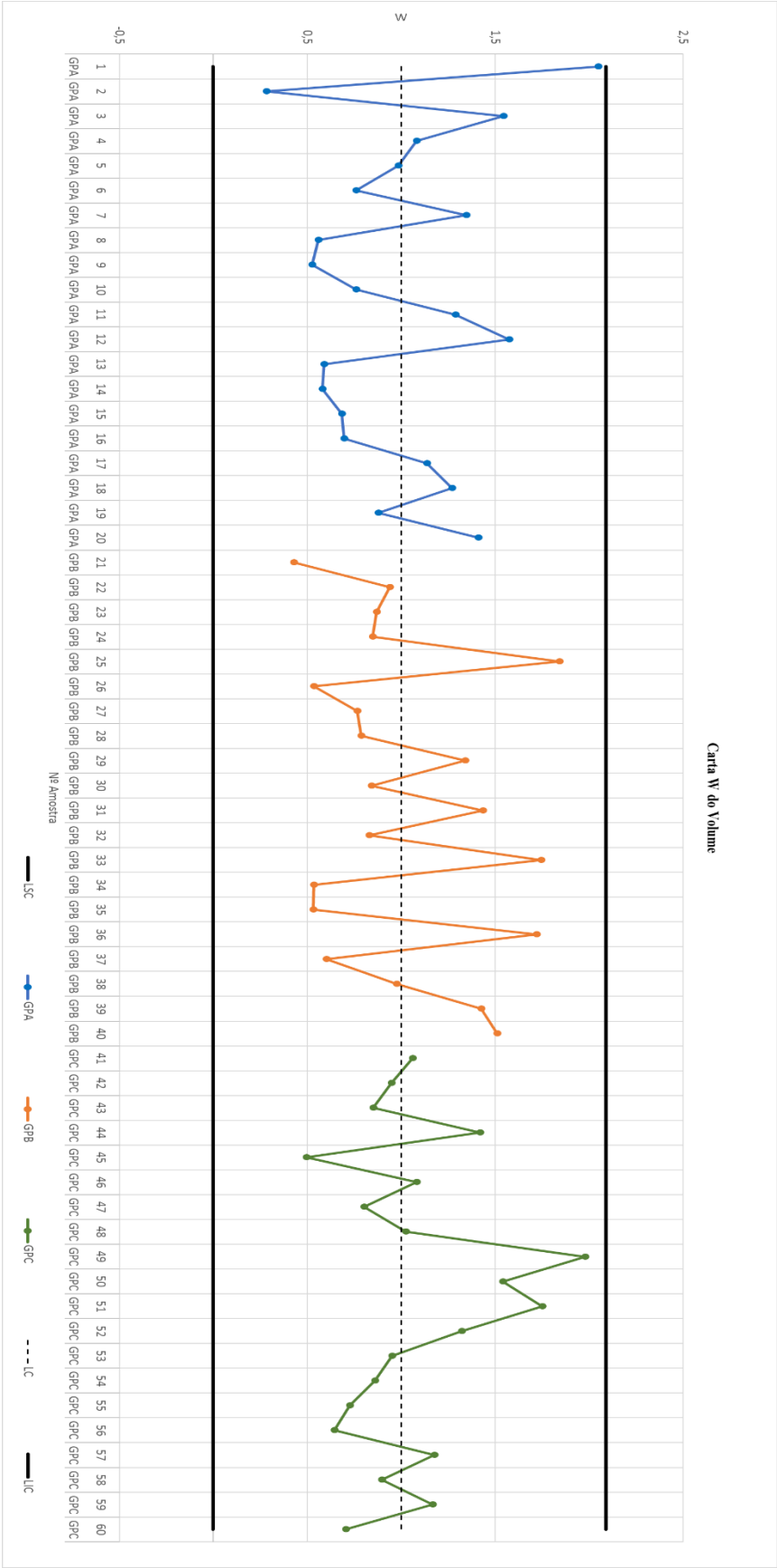

Figura 4.12 - Carta W do volume de enchimento

A tabela 4.24 apresenta um resumo da análise de causas especiais de variação para esta característica:

Tabela 4.24 - Causas especiais no torque cartas Z e W

Característica Torque na cápsula de vedação				
Produto	**Causas especiais na carta Z**	**Causas especiais na carta W**	**Capacidade**	**Processo Centrado**
GPA	-	-	Sim	Sim
GPB	Amostra 37	-	Sim	Sim
GPC	-	Amostra 55	Sim	Sim

C. Conclusões

Na Fase I do controlo estatístico foi possível verificar que existiam alguns problemas relacionados com a regulação do nível de enchimento, onde quer a gestão quer os operadores tomaram conhecimento e implementaram algumas medidas corretivas no sentido de garantir que o enchimento se mantinha adequado às exigências da empresa. Essa melhoria refletiu-se na Fase II do controlo estatístico onde não se verificaram situações associadas a esse problema durante a monitorização do processo. Em termos de capacidade verificou-se que ambos os processos apresentavam capacidade, no entanto para o volume de enchimento apenas no produto GPB o processo se apresentava aproximadamente centrado. Esta situação está relacionada com o facto da empresa optar pelo sobreenchimento de forma a garantir o cumprimento da legislação de controlo de capacidades. Isto leva a que existam discrepâncias entre os valores nominais e a média do processo.

4.4.2. Análise Multivariada

O estudo multivariado revela-se interessante uma vez que permite verificar o impacto nos diversos produtos, através do controlo simultâneo das diversas características em estudo. Uma vez verificado o pressuposto da Normalidade dos dados e assumindo que os dados são independentes pode então dar-se início a Fase I do controlo estatístico multivariado (MSPC) utilizando as cartas T^2.

Ao utilizar as cartas T^2 para o estudo multivariado procede-se ao cálculo da estatística de *Hotelling* (T^2) e se este valor for superior ao limite superior de controlo (LSC) então verifica-se a existência de uma causa especial de variação.

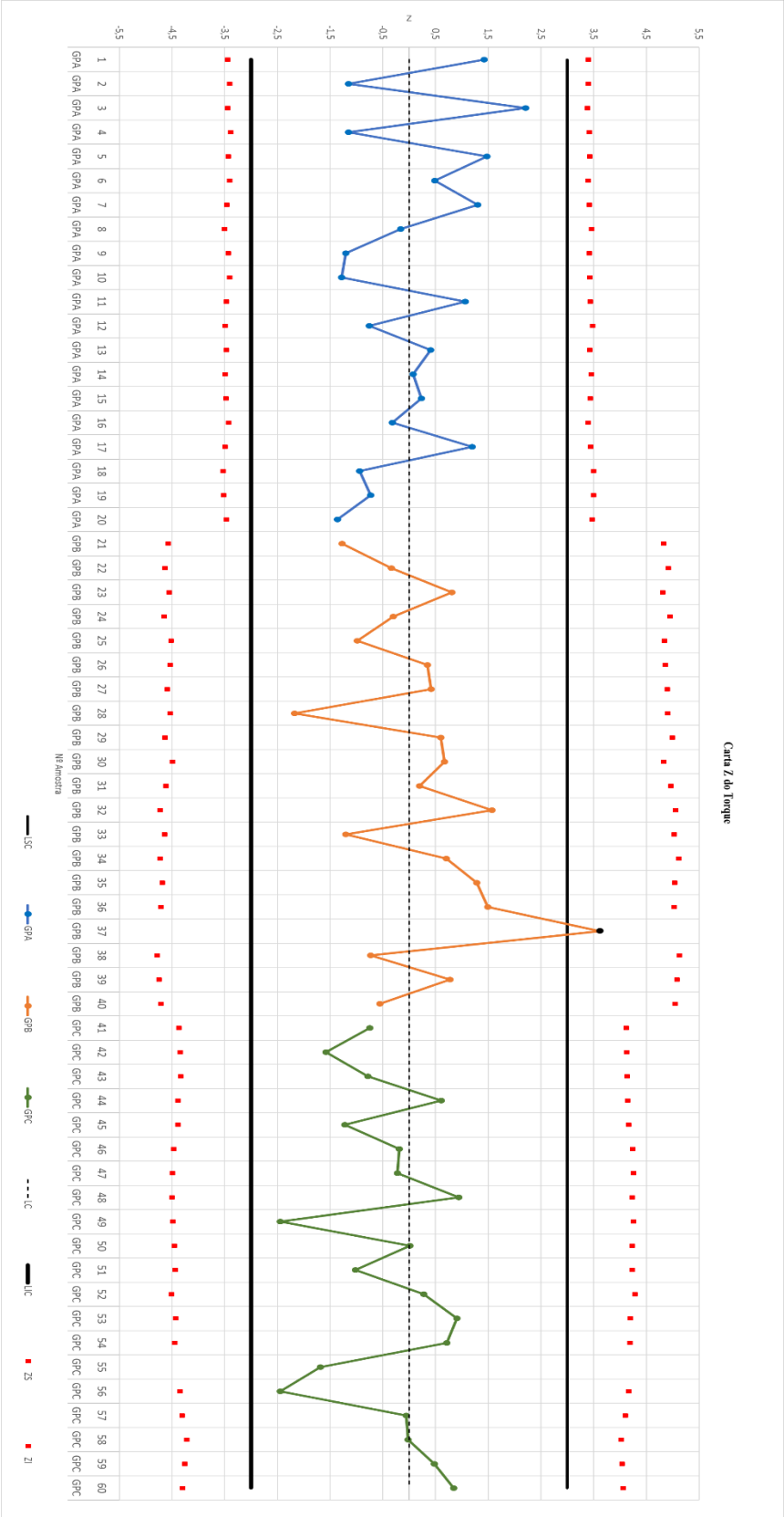

Figura 4.13 - Carta Z do torque

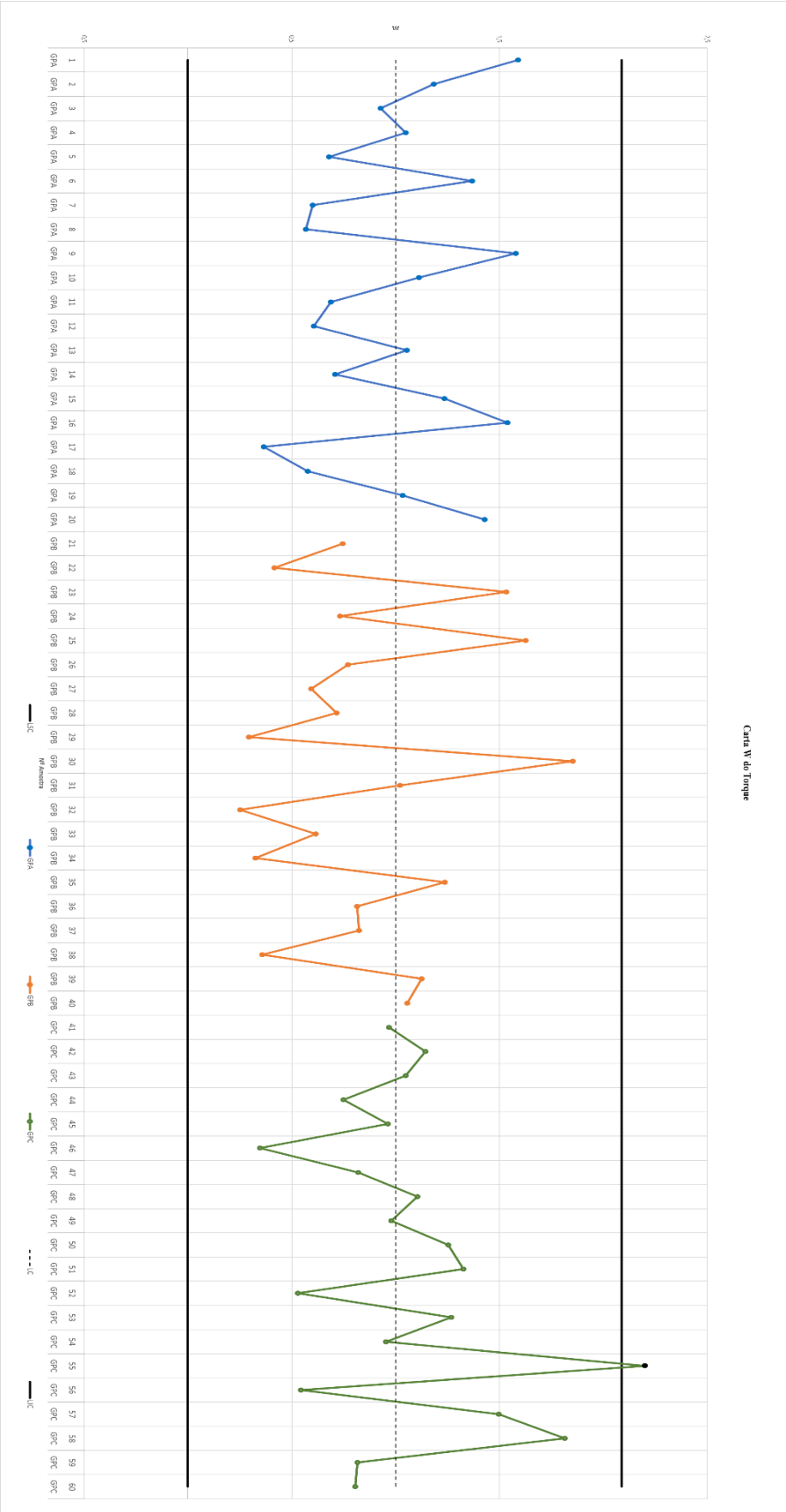

Figura 4.14 - Carta W do torque

Tal como no estudo univariado deve proceder-se à remoção da amostra em que se verificou a causa especial e devem ser recalculados os limites de controlo e as estatísticas T^2. Depois de se reconstruir a carta T^2 revista da Fase I pode então dar-se inicio ao estudo de capacidades onde são utilizados os índices C_{pM}, *PV e LI*.

A. Produto GPA, GPB e GPC

Analogamente ao que foi feito para o estudo univariado, apresenta-se apenas a construção da carta T^2 para a referência de produto GPA, uma vez que a linha de raciocínio é a mesma para os outros dois produtos, onde as suas cartas e matrizes relevantes se encontram no anexo H. Contruindo a carta T^2 para a Fase I do controlo estatístico multivariado e procedendo à sua análise, é possível verificar que não existem causas especiais de variação, sendo assim é possível avançar para o estudo multivariado da capacidade do processo.

Apesar do método da estatística *d* ser aplicado na Fase II, procedeu-se à sua utilização na Fase I apenas com o intuito de verificar que características eram responsáveis pelas causas especiais de variação evidenciadas.

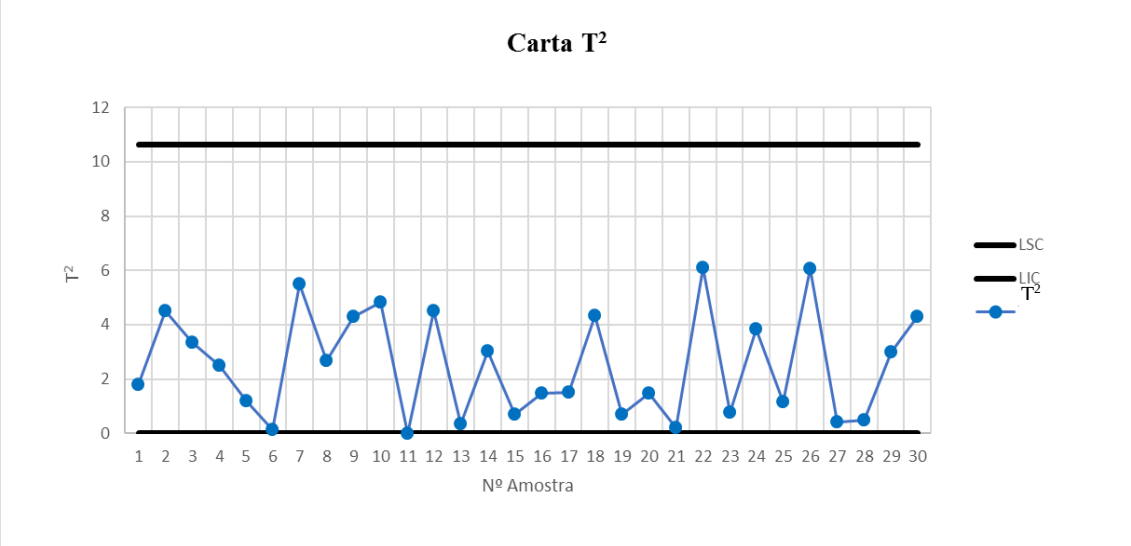

Figura 4.15 - Carta T^2 do produto GPA

Relativamente aos outros produtos, a tabela 4.25 apresenta um resumo das causas especiais verificadas e da característica ou características responsáveis por essas mesmas causas especiais.

Tabela 4.25 - Análise de causas especiais nas cartas multivariadas

Produtos	Causa Especial	T^2	LSC	T_1	T_2	d_1	d_2	$\chi^2_{\alpha;1}$	Característica Responsável
GPA	-	-	10,642	-	-	-	-	7,740	-
GPB	Amostra 24	14,280	10,642	0,038	14,202	14,242	0,078	7,740	Volume
GPC	Amostra 11	15,318	10,642	0,272	15,104	15,046	0,214	7,740	Volume
	Amostra 14	13,535	10,642	3,673	10,046	9,862	3,489	7,740	Volume
	Amostra 13	11,110	10,657	10,903	0,225	0,207	10,885	7,740	Torque

Analisando a tabela 4.25 é possível verifica que o único produto que não apresenta causas especiais de variação é o produto GPA. No produto GPB existe um ponto acima do limite superior de controlo, onde através da determinação da estatística *d* é possível verificar que a característica responsável por esta causa é o volume de enchimento. No produto GPC existem 3 causas especiais, uma das quais (na amostra 13) foi detetada após terem sido removidas as causas especiais referentes às amostras 11 e 14. A característica responsável pelas causas especiais de variação verificadas na amostra 11 e 14 foi o volume enquanto que na amostra 13 foi o torque aplicado na cápsula de vedação.

B. Estudo Multivariado da Capacidade dos Processos

Uma vez que todos os 3 produtos já se apresentam sem causas especiais de controlo e como já foram verificados os pressupostos associados à normalidade e independência, procede-se ao estudo de capacidades.

Tabela 4.26 - Especificações dos produtos em estudo

Volume de Enchimento				Torque na cápsula		
Especificação	GPA	GPB	GPC	GPA	GPB	GPC
LSP	757,601	754,186	754,278	22,650	18,702	22,141
LIP	748,930	746,543	747,905	11,276	10,720	12,634
LSE	760	756	760	25	22	25
LIE	740	744	740	9	8	9

Tabela 4.27 - Estudo de capacidades para os produtos em análise

Índices	GPA	GPB	GPC
PV	0,000002	0,6847	0,0423
LI	1	1	1
C_{pM}	1,801	1,659	2,298

Através da análise da tabela 4.27 (cujos cálculos associados a estes índices se encontram no anexo I) é possível verificar que todos os produtos apresentam um valor de *PV* baixo, significa isto que o vetor média do processo não se encontra centrado com o vetor dos valores nominais da especificação (**T**), isto deve-se ao facto da empresa pretender cumprir a legislação relativa ao controlo de capacidades e como tal proceder ao sobreenchimento. Isto leva a que a os valores da média do volume de enchimento não se encontrem centrados com os respetivos valores nominais. No que diz respeito ao índice *LI* verifica-se que em todos os produtos o intervalo [LIP, LSP] se encontra contido no intervalo de especificação técnica, o que garante que o processo é capaz. Por fim é possível observar que todos os valores de C_{pM} são bastante superiores a 1,33 o que nos indica que os processos têm capacidade potencial. Tendo em conta os valores dos três índices, é possível concluir que os processo não apresentam capacidade, ou seja, a empresa deverá de intervir de forma a alterar esta situação. Apesar de ser necessário que o processo apresente

capacidade para se avançar para a Fase II do MSPC, a empresa não teve oportunidade de intervir nesse sentido devido à grande prioridade de cumprir com a legislação em vigor relativa ao controlo de capacidade. Contudo foi decido proceder à recolha de dados de forma a ser implementada a Fase II do MSPC.

4.4.2.1. Fase II do Controlo Estatístico do Processo – Carta T^2

A abordagem para as cartas multivariadas é semelhante às univariadas onde, após ter sido verificada a estabilidade do processo e verificado se este apresentava capacidade, se procede à Fase II do controlo estatístico de processo. Nesta fase foram recolhidas 20 amostras de dimensão 5.

A. Produto GPA, GPB e GPC

Procedendo à construção da carta T^2 para os produtos GPA, GPB e GPC, que por sua vez se encontra na figura 4.16, é possível verificar que no produto GPB se deteta uma causa especial de variação. Como tal deve proceder-se à verificação da característica responsável por essa mesma causa especial.

Assim procedeu-se à determinação da estatística *d* de forma a verificar que característica foi responsável pela causa especial evidenciada. Na tabela 4.28 é possível verificar que como o valor de *d* associado à característica torque (*d*=13,470) é superior ao valor de $\chi^2_{\alpha;1}$(7,743), então esta será a característica responsável pela causa especial de variação.

Tabela 4.28 - Causa especial produto GPB

Amostra	T^2	$T_{(1)}$	$T_{(2)}$	d_1	d_2	$\chi^2_{\alpha;1}$	Responsável
37	15,620	13,225	2,149	2,395	13,470	7,743	Torque

4.4.3. Conclusões

4.4.3.1. Análise da Fase I – SPC vs MSPC

Após ter sido feita a implementação de técnicas de controlo estatístico univariado e multivariado para a Fase I interessa agora fazer uma análise comparativa das duas técnicas de controlo estatístico. Relativamente ao produto GPA não se verificou a presença de nenhuma causa especial de variação para ambas as características em análise no estudo univariado, contudo existiam alguns pontos (amostras 22 e 26) relativamente próximos do limite inferior de controlo, na característica volume de enchimento (figura 4.7).

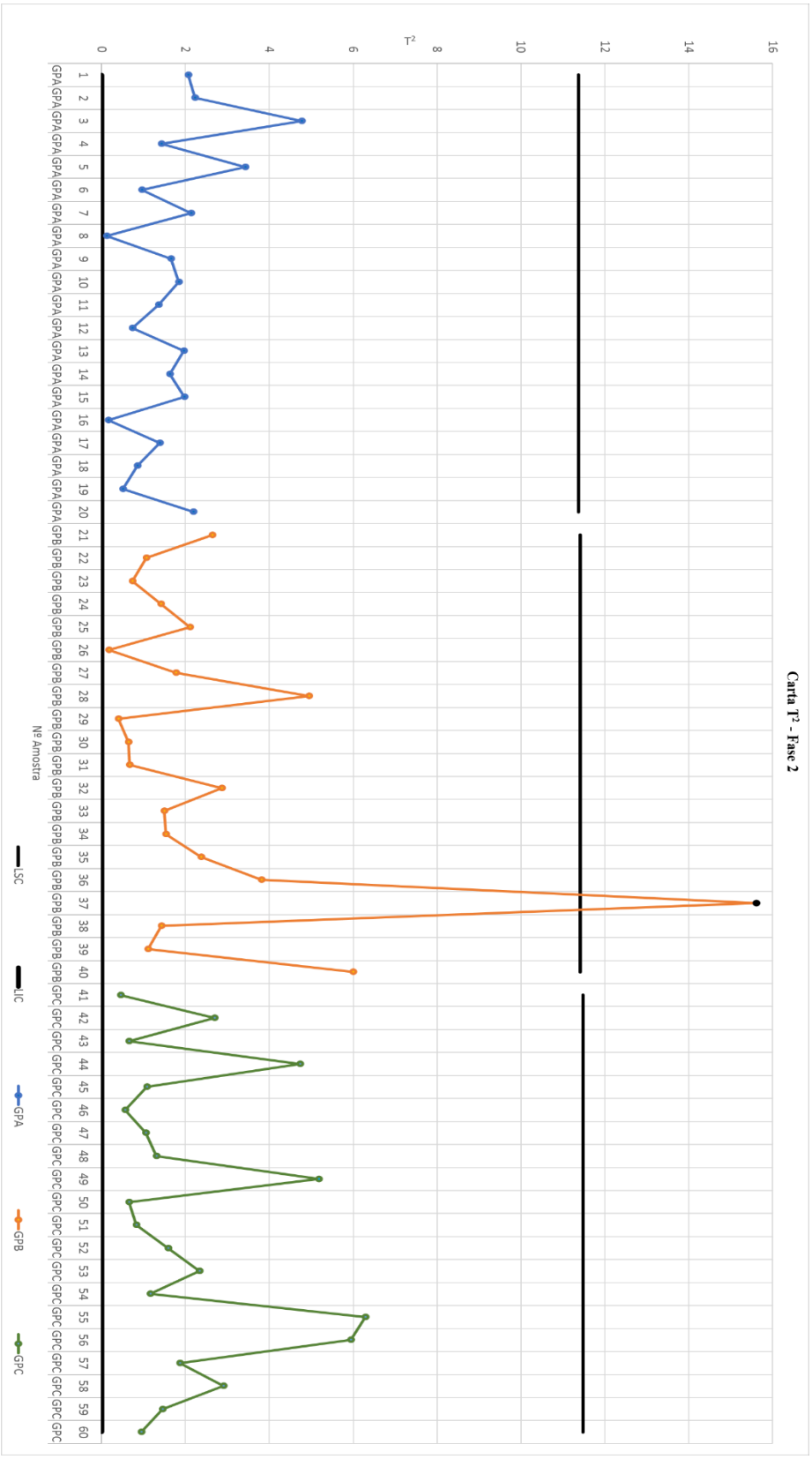

Figura 4.16 - Carta multivariada da Fase II

Observando a carta relativa ao torque aplicado na cápsula de vedação, que se encontra no anexo E, figura E.1, é possível verificar que estas mesmas amostras apresentam pontos relativamente próximos da linha central. Na carta multivariada, estes pontos apresentam os maiores valores da estatística T^2, o que acontece devido à proximidade para com o limite inferior de controlo verificada na carta univariada do volume de enchimento. Caso os valores destas amostras, na carta do torque, estivessem mais perto dos limites superior ou inferior de controlo, iriam ser verificadas situações de causas especiais. Já os pontos 6 e 11, na carta multivariada, assumem um valor de T^2 próximo de zero, verificando-se em ambas as cartas univariadas que estes pontos se encontrarem muito perto ou sob a linha central. Em termos de capacidade, no estudo univariado, verificou-se que tanto para o volume como para o torque aplicado na cápsula de vedação os processos apresentam capacidade, visto que os índices C_p e C_{pk} são superiores a 1,33, no entanto apenas o processo do torque se encontra centrado uma vez que os índices $\left(C_{pk}\right)_I = 1{,}544$ e $\left(C_{pk}\right)_S = 1{,}558$ são aproximadamente iguais. Já no volume de enchimento onde $\left(C_{pk}\right)_I = 3{,}287$ e $\left(C_{pk}\right)_S = 1{,}669$, existe uma grande discrepância entre os dois índices logo o processo não se encontra centrado, o que se traduz numa oportunidade de melhoria. No estudo de capacidade para a análise multivariada verificou-se que o processo apresenta um C_{pM} acima de 1,33 um PV=0,000002 e LI=1. Como os valores de C_p no estudo univariado eram relativamente elevados, sobretudo o do volume (tabelas 4.21 e 4.22) refletiram-se num índice C_{pM} relativamente elevado (C_{pM}=1,801), o que revela que o processo apresenta capacidade potencial, no entanto o valor de PV é zero, o que por sua vez vai ao encontro da analise univariada, uma vez que existe uma grande diferença entre os índices C_{pk} do processo do enchimento. Isto significa que os processos não se encontram centrados com os valores nominais, nomeadamente no enchimento, uma vez que a empresa não quer arriscar a não cumprir a legislação do controlo de volumes de enchimento, levando a que exista quase sempre sobreenchimento. Esta situação leva a que o processo não apresente capacidade, o que se reflete numa oportunidade de melhoria para a empresa, de forma a ser possível fazer a correta monitorização do processo.

No produto GPB, no estudo univariado, não se detetaram causas especiais de variação para a característica do torque (figura E.7 do anexo E.III), no entanto foi verificada a presença de uma causa especial na característica do volume de enchimento, mais concretamente na amostra 24 (figura E.3 do anexo E.II). No estudo multivariado (anexo H.II) é possível verificar a presença dessa mesma causa especial, bem como um ponto bastante próximo do limite superior de controlo, que por sua vez também foi verificado na carta univariada do volume de enchimento, nomeadamente a amostra 23. Como na carta univariada do torque a amostra 23 apresenta-se algo próxima da linha central, este ponto acaba por não ser causa especial na carta multivariada, apesar de se encontrar muito próximo do limite superior de controlo. Em termos de capacidade, no estudo univariado, verificou-se que tanto para o volume de enchimento como para o torque aplicado na

cápsula os processos apresentam capacidade, uma vez que tanto C_p como C_{pk} são superiores a 1,33. Em termos dos processos se encontrarem centrados, verifica-se que tanto no enchimento ($(C_{pk})_I = 1{,}607$ e $(C_{pk})_S = 1{,}815$), como no torque da cápsula de vedação ($(C_{pk})_I = 1{,}796$ e $(C_{pk})_S = 1{,}953$) os valores dos índices $(C_{pk})_I$ e $(C_{pk})_S$ são semelhantes, sobretudo no torque, logo é possível concluir que os processos se encontram suficientemente centrados. No estudo multivariado de capacidades verificou-se que o processo apresentava um C_{pM} superior a 1,33, *PV*=0,6847 e *LI*=1. Com base nos valores destes índices é possível concluir que o processo apresenta capacidade potencial, devido ao facto do índice C_{pM} ser superior a 1,33 mas não apresenta capacidade devido ao valor de *PV* não ser próximo de 1. No entanto, comparativamente com o produto GPA, não existe uma discrepância tão grande entre o vetor dos valores nominais do volume e o vetor média estimado do processo, havendo ainda assim uma oportunidade de melhoria.

Por fim, no produto GPC, foram detetadas duas causas especiais de variação, na carta univariada do volume de enchimento (figura E.9 no anexo E.IV), nomeadamente a amostra 11 e amostra 14 e uma causa especial na carta univariada do torque (figura E.13 no anexo E.V), na amostra 15. Na carta multivariada (figura H.3 no anexo H.III) é possível observar a presença das duas causas especiais referentes às amostras 11 e 14 e um ponto ligeiramente abaixo do limite superior de controlo, que está relacionado com a causa especial detetada na carta univariada do torque (amostra 15), no entanto após serem removidas as amostras 11 e 14 é possível verificar a presença de uma causa especial relativa a essa mesma amostra (figura H.4). Em termos de capacidade, no estudo univariado, ambos os processos apresentam capacidade uma vez que os índices C_p e C_{pk} são superiores a 1,33. Em termos dos processos se encontrarem centrados verifica-se que no enchimento, onde $(C_{pk})_I = 1{,}716$ e $(C_{pk})_S = 2{,}473$, o processo não se encontra centrado, devido à discrepância entre estes dois índices. Na aplicação de torque na cápsula de vedação, onde ($(C_{pk})_I = 1{,}796$ e $(C_{pk})_S = 1{,}953$, verifica-se que estes dois índices não são significativamente diferentes, logo é possível concluir que este processo se encontra suficientemente centrado. Existe assim uma oportunidade de melhoria no processo de enchimento. No estudo de capacidade multivariado verificou-se que C_{pM} é superior a 1,33 *PV*=0,0423 e *LI*=1. Com base nestes índices é possível verificar que o processo apresenta capacidade potencial, visto que C_{pM}=2,298, mas não se apresenta centrado, uma vez que o índice *PV* é praticamente igual a zero. Como tal é possível concluir que o processo não apresenta capacidade, havendo assim uma oportunidade de melhoria, tal como se verificou no estudo univariado.

Comparando os três produtos, o GPC é aquele que apresenta um maior valor de C_{pM}, o que era expectável visto que os respetivos índices C_p da análise univariada são ambos relativamente elevados, assumindo valores próximos de 2. Apesar de todos os produtos apresentarem

capacidade potencial, só no produto GPB é que o índice *PV* apresenta um valor suficientemente aceitável (*PV* =0,6847), uma vez que em todos os outros produtos o valor de *PV* é aproximadamente igual a zero. Esta situação está relacionada com o facto de existir uma grande discrepância, sobretudo nos produtos GPA e GPC, entre a média do volume de enchimento e o valor nominal, que por sua vez é justificada pela prioridade da empresa em garantir que são cumpridos os requisitos legais do controlo de volumes de enchimento.

4.4.3.2. Análise da Fase II – SPC vs MSPC

No produto GPA, na análise univariada (figuras 4.11,4.12, 4.13 e 4.14), não foram detetadas causas especiais de variação em ambas as características o que se refletiu numa carta univariada sem causas especiais, no entanto na carta *Z* do torque verifica-se que a amostra 3 se destaca, uma vez que é o único ponto na zona A. Em termos de capacidade, em ambas as características se verifica que os índices Z_S e Z_I são superiores a 3 e inferiores a -3, respetivamente, no entanto o único processo centrado é o de aplicação de torque na cápsula de vedação, uma vez que os valores absolutos dos índices Z_S e Z_I são semelhantes. No processo de enchimento verifica-se uma grande discrepância entre os índices Z_S e Z_I o que revela uma oportunidade de melhoria. Relativamente ao estudo multivariado do produto GPA (figura 4.16) não se detetaram causas especiais nem existem pontos alarmantes. A amostra que apresenta maior valor da estatística T^2 (amostra 3) reflete a situação de na carta *Z* do torque essa mesma amostra se encontrar na zona A.

No produto GPB, na análise univariada (figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14), foi detetada uma causa especial na carta Z da característica torque, na amostra 37. Nesta característica também se destaca a amostra 28, que apesar de não ser causa especial, é o único ponto, excluindo a amostra 37, que se encontra na zona A. Em termos de capacidade o processo do torque apresenta capacidade, uma vez que os índices Z_I e Z_S são inferiores a -3 e superiores a +3, respetivamente. Em termos de capacidade verifica-se que o processo de aplicação de torque na cápsula se encontra aproximadamente centrado, uma vez que os valores absolutos dos índices Z_I e Z_S são semelhantes. Relativamente à característica volume de enchimento todos os pontos se encontram nas zonas B e C à exceção de um único ponto (amostra 40), que se encontra na zona A. O processo de enchimento apresenta capacidade, uma vez que os índices Z_S e Z_I são superiores a +3 e inferiores a -3, respetivamente, e encontra-se centrado uma vez que os valores absolutos destes dois índices são semelhantes. No que diz respeito ao estudo multivariada do produto GPB (figura 4.16) apresenta três pontos que se destacam face ao resto das amostras. A primeira é a amostra 28 que não é causa especial de variação, mas apresenta um valor de T^2 elevado comparativamente com as amostras anteriores, isto está relacionado com o facto de na carta *Z* do torque essa mesma amostra se encontrar na zona A, no entanto na carta *Z* do volume essa amostra apresenta-se próxima da linha central, o que leva a que a amostra não seja alarmante. Já a amostra 37, na carta

multivariada, é um ponto a ter em atenção, uma vez que reflete uma causa especial ($T^2>LSC_T^2$) que está relacionada com o facto de na carta *Z* do volume essa amostra assumir um valor na zona B e de na carta do *Z* do torque esse ser efetivamente uma causa especial de variação. A conjugação destas duas situações leva então a uma causa especial com um valor de T^2 relativamente elevado na carta multivariada. Por fim a último ponto que se destaca é a amostra 40 que apesar de não ser causa especial de variação, reflete a situação de na carta *Z* do volume esta mesma amostra se apresentar na zona A, mas na carta *Z* do torque o valor encontra-se relativamente próximo da linha central, o que leva a que esta amostra não seja alarmante.

No produto GPC, na análise univariada (figuras 4.11,4.12, 4.13 e 4.14), foi apenas detetada uma causa especial na carta W da característica do torque, já na carta *Z* existem dois pontos que se destacam, nomeadamente a amostra 49 e a amostra 56, uma vez que são os únicos pontos na zona A. Em termos de capacidade verifica-se que o processo é capaz uma vez que os valores dos índices Z_S e Z_I são superiores a +3 e inferiores a -3, respetivamente. O processo também se encontra aproximadamente centrado uma vez que o valores absolutos dos dois índices são semelhantes. No que diz respeito ao volume de enchimento, não existem causas especiais, mas destacam-se 2 pontos que se encontram na zona A, um na amostra 44 e outro na amostra 55, todos os outros pontos se encontram nas zonas B ou C. Em termos de capacidade verificou-se que em todos os pontos os índices Z_S e Z_I são superiores a +3 e inferiores a -3, respetivamente, porém o processo de enchimento não se encontra centrado uma vez que os valores absolutos destes índices não são semelhantes, o que se revela como uma oportunidade de melhoria. Por fim, na carta multivariada do produto GPC (figura 4.16), é possível observar que existem quatro pontos que se destacam, mas que não são causas especiais de variação. O primeiro é referente à amostra 44 que reflete a situação de na carta *Z* do volume essa mesma amostra apresentar um ponto na zona A, mas na carta *Z* do torque apresenta um valor pouco afastado da linha central (figura 4.16), o que leva a que este ponto não seja alarmante. O ponto seguinte que se destaca é a amostra 49 que reflete a situação de na carta *Z* do torque essa mesma amostra se encontrar na zona -A e na carta *Z* do torque se encontrar na zona C. O ponto seguinte é referente à amostra 55 que apresenta o maior valor de T^2 e está relacionado com o facto de na carta *Z* do torque esse ponto se encontrar na zona B e de na carta *Z* do volume se encontrar na zona A. Já o último ponto de destaque, a amostra 56, é bastante similar à amostra anterior, com a diferença de que na carta *Z* do torque esse mesmo ponto encontra-se na zona dos A e na carta *Z* do volume de enchimento encontra-se na zona dos B, no entanto não é um ponto alarmante.

5. Conclusões e Sugestões

5.1. Conclusões relativas ao estudo realizado

O propósito da realização deste estudo foi a implementação de técnicas de Controlo Estatístico do Processo numa indústria vinícola, no sentido de melhorar o seu produto final. Para tal foram estudadas duas características da qualidade, o volume de enchimento e o torque necessário para abrir a cápsula vedante em duas fases do processo, a primeira relativa ao enchimento e a segunda associado à aplicação de cápsula roscada.

Este estudo incidiu apenas numa das linhas de engarrafamento da empresa, nomeadamente a linha 2, que por sua vez era uma das linhas que apresentava equipamento mais antigo. Antes de se proceder à aplicação do SPC e do MSPC foi feito um estudo preliminar de forma a analisar as fontes de variação existentes. Essas mesmas fontes de variação estavam associadas à matéria prima, nomeadamente às garrafas de vidro vazias, ao volume de enchimento de cada uma das trinta e duas válvulas da máquina de enchimento e à variação existente na aplicação de cápsula roscada por parte das cinco cabeças da máquina.

A análise de fontes de variação, recorrendo à ANOVA e ao teste de Bartlett, permitiu concluir que existem diferenças significativas nas médias das massas, não só entre lotes de garrafas de vidro vazias de um mesmo fornecedor, mas também entre os próprios fornecedores. Relativamente à máquina de enchimento verificou-se que existiam diferenças significativas entre as médias dos volumes de enchimento das trinta e duas válvulas. Posto isto e recorrendo à estatística *LSD* e à *Análise ABC* foi possível classificar as diversas válvulas de enchimento, mediante a sua prioridade na implementação de ações corretivas. Através da construção do diagrama de causa e efeito foi possível identificar potenciais causas para este problema de forma a que fosse possível implementar medidas corretivas. A última das fontes de variação analisadas estava associada ao valor médio de torque necessário para abrir a cápsula roscada de cada uma das cinco cabeças da máquina, nas quais não se verificaram diferenças significativas, tanto na média como no desvio padrão.

Após terem sido tomadas medidas no sentido de corrigir o problema associado às diferenças entre as médias dos volumes de enchimento das válvulas da máquina, foi possível recolher dados relativos ao volume de enchimento e ao torque aplicado na cápsula roscada e dar inicio ao SPC e ao MSPC. Estas técnicas estatísticas foram implementadas a dois grupos de produtos, um primeiro grupo constituído por três produtos em que existia um número insuficiente de dados para a estimação dos parâmetros do processo e um segundo grupo, igualmente constituído por três produtos, mas em que o número de dados era suficiente para se proceder à estimação conveniente dos parâmetros. Para o primeiro grupo foram construídas as cartas $Q(\overline{X})$ e $Q(S^2)$ para os três

produtos, e para o produto em que simultaneamente se estudaram as duas características da qualidade (volume e torque) foi construída a carta $MQ(\overline{X})$. A implementação deste tipo de técnicas de Controlo Estatístico revelou-se bastante importante, uma vez que a empresa utiliza um *software* de Controlo Estatístico e de Controlo de Capacidades que constrói o mesmo tipo de cartas quer se trate de produtos em que existe um número suficiente de dados ou por sua vez se trate de produtos onde o número de dados é insuficiente para se proceder à estimação dos parâmetros do processo, o que por sua vez poderá conduzir a conclusões pouco fiáveis acerca da estabilidade do processo. Através da construção das respetivas cartas $Q(\overline{X})$, $Q(S^2)$ e $MQ(\overline{X})$ foi possível verificar que o processo se encontrava sob controlo estatístico e que por sua vez apresentava capacidade para produzir de acordo com a especificação técnica, no entanto existe espaço para melhoria no que diz respeito aos processos que não se encontram centrado

No segundo grupo de produtos em análise foram construídas as cartas $\overline{X}$ e S, na Fase I, onde se verificou que os processos se encontravam sob controlo estatístico e, mediante o estudo de capacidade dos processos, se conclui que os três produtos apresentam capacidade, mas o processo do enchimento não se encontra centrado. Esta situação deve-se ao facto da empresa optar pelo sobreenchimento dos seus produtos de forma a garantir que são cumpridos os requisitos legais do controlo de capacidades. Após se ter verificada a estabilidade do processo e de ter sido feito o estudo de capacidade dos processos, foi possível dar início à Fase II, que por sua vez permite a monitorização do processo, através da construção das cartas Z e W. Uma vez que neste tipo de cartas é possível fazer a monitorização em tempo real da capacidade, verificando-se que todos os três produtos se apresentam capazes para produzir de acordo com a especificação, mas existem sempre problemas relacionados com o facto do processo de enchimento não se encontrar centrado. Depois de ter sido realizado o estudo univariado procedeu-se ao estudo multivariado através da construção das cartas T^2. Esta abordagem mostra-se relevante devido ao facto de permitir a análise simultânea de todas as características da qualidade em estudo, o que poderá garantir maior sensibilidade na deteção de causas especiais de variação. Na Fase I procedeu-se à construção das cartas T^2 onde se verificou que os processos se encontravam sob controlo estatístico, no entanto, depois de se proceder ao estudo de capacidade dos processos foi possível verificar que os três produtos apresentavam capacidade potencial, mas os seus valores do índice PV se encontram afastados do valor 1, o que significa que os processos não estão centrados com as suas especificações técnicas. Como tal, através do estudo multivariado, foi possível verificar que os processos não apresentam capacidade para produzir de acordo com a especificação técnica. Como foi referido anteriormente, esta situação está relacionada com a preocupação da empresa em pretender garantir o cumprimento dos requisitos legais do controlo de volumes de enchimento, o que leva a que a média estimada do volume de enchimento se encontre acima do valor nominal. A empresa teve conhecimento desta situação, mas não foi possível implementar melhorias no

sentido de corrigir o sucedido. Como tal, e apesar de não ser ideal, procedeu-se à implementação da Fase II do MSPC.

O estudo feito no âmbito desta dissertação permitiu verificar que existiam alguns problemas relacionados com o desgaste da máquina de enchimento, uma vez que este equipamento já opera há várias décadas, e como tal não apresenta flexibilidade o que por vezes conduz a situações de sobreenchimento. A grande variação existente nas características da matéria prima (garrafas de vidro vazias) dificulta a estabilidade do processo, o que leva a empresa a optar pelo sobreenchimento de forma a garantir que se encontra salvaguardada face à legislação do controlo de volumes de enchimento. Esta situação leva a que exista uma discrepância entre os parâmetros estimados do processo de enchimento e o valor nominal. Como tal sugere-se a realização da análise de variação das válvulas de enchimento com alguma frequência, para que seja possível mitigar o risco de haver grandes discrepâncias entre as médias dos volumes. Deve também ser realizada uma redefinição dos limites de controlo, do *software* utilizado pela empresa, com alguma frequência bem como a implementação de cartas *Z* e *W*, na fase de monitorização, de forma a ser possível estudar a capacidade dos processos em tempo real. Sugere-se ainda uma atualização do mecanismo de regulação do nível de enchimento, de forma a garantir que este apresenta maior flexibilidade e menor variação na média do volume de enchimento.

5.2. Sugestões para futuros trabalhos

Após a elaboração da presente Dissertação propõe-se a realização de um estudo similar ao que foi feito, utilizando técnicas do SPC e MSPC, mas para as outras duas linhas de enchimento, nomeadamente a linha 1 e a linha 3.

Quando se verificar que o processo se encontra estável e apresenta capacidade poderá ser pertinente a utilização das cartas de controlo de somas acumuladas (CUSUM) e as cartas de controlo de médias móveis exponencialmente amortecidas (EWMA), uma vez que permitem detetar pequena e moderadas alterações nos parâmetros dos processos, bem como as cartas multivariadas MCUSUM e MEWMA.

Caso seja possível atualizar o mecanismo de regulação dos níveis de enchimento das máquinas enchedoras sugere-se a utilização do Desenho de Experiências (DOE) para averiguar qual o melhor nível.

Referências Bibliográficas

Alt, F. B. (1985) 'Multivariate Quality Control', *Encyclopedia of the Statistical Series*, 6, pp. 110–122.

Borrego, P. (2009) *Diferenciação Adiada de Vinhos na Supply Chain*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia e Segurança Alimentar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Box, G. E. P. and Cox, D. R. (1964) 'An Analysis of Transformations', *Journal of the Royal Statistical Society*, Series B 2, pp. 211–246.

Carvalheira, J. (s.d.) Engarrafamento e Rolhamento dos Vinhos. Acedido a 20 de Abril de 2017, disponível em: http://evb.drapc.min-agricultura.pt/documentos/vinho/engarrafamento_e_rolhamento_jose_carvalheira_2012.pdf

Chan, L. Y. *et al.* (2003) 'A two-stage decision procedure for monitoring processes with low fraction nonconforming', *European Journal of Operational Research*, 150, pp. 420–436.

Chen, K. S. and Pearn, W. L. (1997) 'An Application of Non-Normal Process Capability Indices', *Quality and Reliability Engineering International*, 13, pp. 355–360.

Clements, J. A. (1989) 'Process Capability Calculations for Non-Normal Distributions', *Quality Progress*, 22, pp. 95–100.

Cristóvão, L. (2013) Manual da Qualidade, Ambiente e Segurança Alimentar. *José Maria da Fonseca*.

Crosby, P. B. (1979) *Quality is Free*. New York: McGraw-Hill, Inc.

Crosier, R. B. (1988) 'Multivariate Generalizations of Cumulative Sum Quality Control Schemes', *Technometrics*, 30, pp. 291–303.

Feigenbaum, A. V. (1981) *Total Quality Control*. 3º edição. McGraw-Hill, Inc.

Fisher, S. R. A. (1971) *The Design of Experiments*. 9º Edição. London: Macmillan.

Ganji, Z. A. and Gildeh, B. S. (2015) 'A modified multivariate process capability vector', *Int J Adv Manuf Technol*, 83, pp. 1221–1229.

Garvin, D. A. (1987) 'Competing on the Eight Dimensions of Quality', *Harvard Business Review*, 65(6), pp. 101–109.

Gu, K. *et al.* (2015) 'Yield-Based Capability Index for Evaluating', (November 2013). doi: 10.1002/qre.1602.

Hayter, A. J. and Tsui, K. (1994) 'Identification and Quantification in Multivariate Quality Control Problems', *Journal of Quality Technology*, 26, pp. 197–208.

Holmes, D. S. and Mergen, A. E. (1998) 'A Multivariate Test for Randomness', *Quality Engineering*, 11(1), pp. 55–59.

Hotelling, H. (1947) 'Multivariate Quality Control', *Techniques of Statistical Analysis*. Edited by Eisenhart, Hastay, and Wallis. New York: McGraw-Hill, Inc.

Hsiang, T. C. and Taguchi, G. (1985) 'Tutorial on Quality Control and Assurance - The Taguchi Methods', in *Joint Meetings of the American Statistical Association*, p. 188.

Huwang, L., Yeh, A. B. and Wu, C. (2007) 'Monitoring multivariate process variability for individual observations', *Journal of Quality Technology*, 39, pp. 258–278.

Infovini (2017) – O Portal do Vinho Português. Acedido a 20 de Abril de 2017, disponível em: http://infovini.com

IVV (2017) Informações. Acedido a 22 de Março de 2017, disponível em: http://www.ivv.min-agricultura.pt

Jackson, J. E. (1980) 'Principal Components and Factor Analysis: Part I - Principal Components', *Journal of Quality Technology*, 12, pp. 201–213.

Jackson, J. E. (1981a) 'Principal Components and Factor Analysis: Part II - Aditional Topics Related to Principal Components', *Journal of Quality Technology*, 13, pp. 46–58.

Jackson, J. E. (1981b) 'Principal Components and Factor Analysis: Part III - Whats is Factor Analysis?', *Journal of Quality Technology*, 13, pp. 125–130.

Jackson, J. E. (1985) 'Multivariate Quality Control', *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 14, pp. 2657–2688.

Jalili, M., Bashiri, M. and Amiri, A. (2012) 'A new multivariate process capability index under both unilateral and bilateral quality characteristics', *Quality and Reliability Engineering International*, 28(8), pp. 925–941. doi: 10.1002/qre.1284.

James, W. and Stein, C. (1961) 'Estimation with quadratic loss', in *Proceedings of the fourth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, p. Vol. 1, pp. 361–379.

JMF (2017) História. Acedido a 10 de Abril de 2017, disponível em http://www.jmf.pt/index.php?id=90

Juran, J. M. (1999) *Juran's Quality Handbook*. 5º Edição. New York: McGraw-Hill, Inc.

Kotz, S. and Johnson, N. L. (2002) 'Process Capability Indices - A Review, 1992-2000', *Journal of Quality Technology*, 34, pp. 2–19.

Lowry, C. A. *et al.* (1992) 'A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart', *Technometrics*, 34, pp. 46–53.

Mason R. L., Chou, Y. and Young, J. C. (1997) 'A Practical Approach for Interpreting Multivariate T2 Control Chart Signals', *Journal of Quality Technology*, 29, pp. 396–406.

Mason R. L., Young, J. C. and Tracy, N. D. (1995) 'Decomposition of T2 for Multivariate Control Chart Interpretation', *Journal of Quality Technology*, 27, pp. 99–108.

McCormack, D. W. *et al.* (2000) 'Capability Indices for Non-Normal Data', *Quality Engineering*, 12(4), pp. 489–495.

Mitra, A. (2016) *Fundamentals of Quality Control and Improvement*. 4º Edição. New York: Wiley & Sons.

Montgomery, D. C. (2012) *Introduction to Statistical Quality Control*. 7th edn. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Murteira, B. *et al.* (2010) *Introdução à Estatística*. 3º Edição. Lisboa: Escolar Editora.

Nedumaran, G. and Pignatiello, J. J. (1998) 'Diagnosing Signals from T2 and chi Multivariate Control Charts', *Quality Engineering*, 10(4), pp. 657–667.

Oakland, J. (2008) *Statistical Process Control*. Edited by 6º Edição. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Patrick Thomson (2017). Equipamentos. Acedido a dia 21 de Abril de 2017, disponível em: http://www.patrickthompson.pt/equipamentos.html

Pearn, W. L., Chen, K. S. and Lin, G. H. (1995) 'Estimating Process Capability Indices for Non-Normal Pearsonian Populations', *Quality and Reliability Engineering International*, 11, pp. 386–388.

Pearn, W. L., Kots, S. and Johnson, N. L. (1992) 'Distributional and Inferential Properties of Process Capability Indices', *Journal of Quality Technology*, 24, pp. 216–231.

Pearn, W. L., Kotz, S. and Johnson, N. L. (1999) 'A Generalization of Clements Method for Non-Normal Pearsonian Process with Asymmetric Tolerances', *Journal of Quality Technology*, 16(5), pp. 507–521.

Perakis, M. and Xekalaki, E. (2012) 'On the implementation of the principal component analysis-based approach in measuring process capability', *Quality and Reliability Engineering International*, 28(4), pp. 467–480. doi: 10.1002/qre.1260.

Pereira, Z. L. and Requeijo, J. G. (2012) *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. 2º Edição. Lisboa: Fundação da FCT/UNL.

Pignatiello, J. J. and Runger, G. C. (1990) 'Comparisons of Multivariate CUSUM Charts', *Journal of Quality Technology*, 22, pp. 173–186.

Qiu, P. (2014) *Introduction to Statistical Process Control*. CRC Press.

Reynolds, M. R. and Cho, G. Y. (2006) 'Multivariate Control Charts for Monitoring the Mean Vector and Covariance Matrix', *Journal of Quality Technology*, 38, pp. 250–253.

Reynolds, M. R. and Stoumbos, Z. G. (2008) 'An Investigation of Combinations of Multivariate Shewhart and MEWMA Control Charts for Monitoring the Mean Vector and Covariance Matrix', (8), pp. 1–43.

Runger, G. C., Alt, F. B. and Montgomery, D. C. (1996) 'Contributors to a Multivariate Statistical Process Control Signal', *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 25, pp. 2203–2213.

Schneider, H., Pruett, J. and Lagrange, C. (1995) 'Uses of Process Capability Indices in Supplier Certification Process', *Quality Engineering*, 8(2), pp. 225–235.

Shahriari, H., Hubele, N. F. and Lawrence, F. P. (1995) 'A Multivariate Process Capability Vector', in *Proceedings of the 4th Industrial Engineering Research Conference*. Nashville, pp. 303–308.

Sogrape Vinhos (2017). Acedido a 20 de Abril de 2017, disponível em: http://www.sograpevinhos.com/enciclopedia/guia_vinho

Wang, F. K. *et al.* (2000) 'Comparison of three multivariate process capability indices', *Journal of Quality Technology*, 32(263–275).

Wang, H., Huwang, L. and Hung, J. (2015) 'Multivariate control charts based on the James – Stein estimator', *European Journal of Operational Research*. Elsevier Ltd., 246(1), pp. 119–127. doi: 10.1016/j.ejor.2015.02.046.

Wang, H., Yang, J. and Hao, S. (2016) 'Computers & Industrial Engineering Two Inverse Normalizing Transformation methods for the process capability analysis of non-normal process data', *Computers & Industrial Engineering*. Elsevier Ltd, 102, pp. 88–98. doi: 10.1016/j.cie.2016.10.014.

Woodall, W. H. and Montgomery, D. C. (1999) 'Research Issues and Ideas in Statistical Process Control', *Journal of Quality Technology*, 31, pp. 376–386.

Wright, P. A. (1995) 'A Process Capability Index Sensitive to Skewness', *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 52, pp. 195–203.

Zwick, D. (1995) 'A Hybrid Method for Fitting distributions to Data and its Use in Computing Process Capability Indices', *Quality Engineering*, 7(3), pp. 601–613.

ANEXOS

A. Tabelas de apoio

Tabela A.1 -Distribuição da Estatística D

Valores críticos da distribuição da estatística $D = \sup_{x} \text{remo} \left| S(x) - F_0(x) \right|$ para populações Normais e parâmetros estimados a partir de amostras de dimensão *n*.

	α				
N	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
4	0,300	0,319	0,352	0,381	0,417
5	0,285	0,299	0,315	0,337	0,405
6	0,265	0,277	0,294	0,319	0,364
7	0,247	0,258	0,276	0,300	0,348
8	0,233	0,244	0,261	0,285	0,331
9	0,223	0,233	0,249	0,271	0,311
10	0,215	0,224	0,239	0,258	0,294
11	0,206	0,217	0,230	0,249	0,284
12	0,199	0,212	0,223	0,242	0,275
13	0,190	0,202	0,214	0,234	0,268
14	0,183	0,194	0,207	0,227	0,261
15	0,177	0,187	0,201	0,220	0,257
16	0,173	0,182	0,195	0,213	0,250
17	0,169	0,177	0,189	0,206	0,245
18	0,166	0,173	0,184	0,200	0,239
19	0,163	0,169	0,179	0,195	0,235
20	0,160	0,166	0,174	0,190	0,231
25	0,149	0,153	0,165	0,180	0,203
30	0,131	0,136	0,144	0,161	0,187
> 30	$\frac{0,736}{\sqrt{n}}$	$\frac{0,768}{\sqrt{n}}$	$\frac{0,805}{\sqrt{n}}$	$\frac{0,886}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,031}{\sqrt{n}}$

Tabela A.2 - Fatores para construção de cartas de controlo tradicionais

Factores para construção das cartas de controlo de variáveis

Dimensão Amostra	Carta da Média					Carta do Desvios Padrão				Carta da Amplitudes				
	Factores Limites Controlo			Factores Linha Central		Factores para Limites de Controlo				Factores para Limites de Controlo				
n	A	A_2	A_3	d_2	c_4	B_3	B_4	B_5	B_6	d_3	D_1	D_2	D_3	D_4
2	2,121	1,881	2,659	1,128	0,7979	0	3,267	0	2,606	0,853	0	3,686	0	3,267
3	1,732	1,023	1,954	1,693	0,8862	0	2,568	0	2,276	0,888	0	4,358	0	2,574
4	1,500	0,729	1,628	2,059	0,9213	0	2,266	0	2,088	0,880	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	2,326	0,9400	0	2,089	0	1,964	0,864	0	4,918	0	2,114
6	1,225	0,483	1,287	2,534	0,9515	0,030	1,970	0,029	1,874	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	2,704	0,9594	0,118	1,882	0,113	1,806	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	2,847	0,9650	0,185	1,815	0,179	1,751	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	2,970	0,9693	0,239	1,761	0,232	1,707	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	3,078	0,9727	0,284	1,716	0,276	1,669	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	3,173	0,9754	0,321	1,679	0,313	1,637	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	3,258	0,9776	0,354	1,646	0,346	1,610	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	3,336	0,9794	0,382	1,618	0,374	1,585	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693
14	0,802	0,235	0,817	3,407	0,9810	0,406	1,594	0,399	1,563	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	3,472	0,9823	0,428	1,572	0,421	1,544	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	3,532	0,9835	0,448	1,552	0,440	1,526	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	3,588	0,9845	0,466	1,534	0,458	1,511	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622
18	0,707	0,194	0,718	3,640	0,9854	0,482	1,518	0,475	1,496	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	3,689	0,9862	0,497	1,503	0,490	1,483	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	3,735	0,9869	0,510	1,490	0,504	1,470	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585
21	0,655	0,173	0,663	3,778	0,9876	0,523	1,477	0,516	1,459	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575
22	0,640	0,167	0,647	3,819	0,9882	0,534	1,466	0,528	1,448	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	3,858	0,9887	0,545	1,455	0,539	1,438	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	3,895	0,9892	0,555	1,445	0,549	1,429	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548
25	0,600	0,153	0,606	3,931	0,9896	0,565	1,435	0,559	1,420	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541

Para $n > 25$

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \qquad A_3 = \frac{3}{c_4\sqrt{n}} \qquad c_4 \approx \frac{4(n-1)}{4n-3} \qquad B_3 = 1 - \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \qquad B_4 = 1 + \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \qquad B_5 = c_4 - 3\sqrt{1-c_4^2} \qquad B_6 = c_4 + 3\sqrt{1-c_4^2}$$

B. José Maria da Fonseca

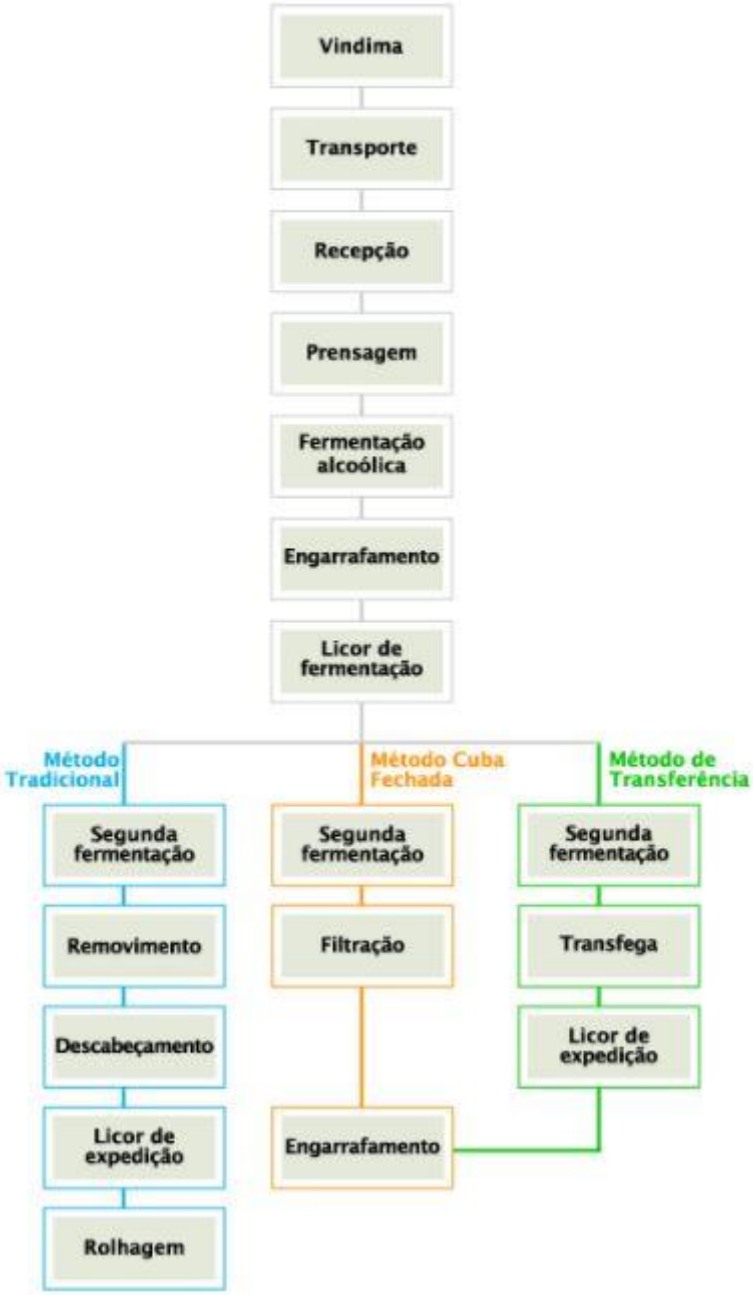

Figura B.1 - Etapas de produção de vinhos espumantes (Extraído de Infovini,2014)

Figura B.2 - Etapas de produção de vinhos generosos (Extraído de Infovini,2014)

Tabela B.1 - Lista de Produtos de empresa JMF

Grandes Marcas	Brancos	Albis
		BSE
		VVH
		Lancers Branco
		Montado Branco
		Periquita Branco
		Terras Altas Branco
		Twin Vines
		Avis Rara
		JMF Branco
	Espumantes	Lancers Bruto
		Lancers Rosé Bruto
	Rosés	Lancers Rosé
		Periquita Rosé
	Tintos	Montado Tinto
		Periquita tinto
		Terras Altas Tinto
		JMF Tinto
		Vinhas de Algeruz
		Ripanço
		Vinya
	Sem Álcool	Lancers Free Branco
		The Spritzer Berry
		The Spritzer Orange
		The Spritzer Branco
		Lancers Free Rosé
Vinhos Premium	Brancos	Camarate Branco Doce
		Camarate Branco Seco
		Coleção Privada Domingos Soares Franco
		Pasmados Branco
		DSF - Sauvignon Blanc
	Tintos	Camarate Tinto
		Domini
		Periquita Reserva
		José de Sousa
		José de Sousa Reserva
		Mágico
		Pasmados Tinto
	Rosés	DSF Moscatel Roxo Rosé
		Quinta de Camarate Rosé
Vinhos Super Premium	Tintos	Periquita Superior
		FSF - Fernando Soares Franco
		J
		Hexagon
		José de Sousa Mayor
		Domini Plus
	Brancos	Hexagon Branco
	Espumantes	Alambre Ice
Vinhos de Sobremesa	Aguardente	Aguardente Espírito
		Aguardente Velha Reserva 1964
	Licorosos	Alambre 10 anos
		Alambre 20 Anos
		Alambre 30 anos
		Alambre 40 anos
		Alambre
		Alambre Roxo
		Moscatel Roxo 20 anos
		Triologia
		Bastardinho
		DSF Moscatel de Setúbal Armagnac
		DSF Moscatel Roxo
		DSF Moscatel de Setúbal Cognac

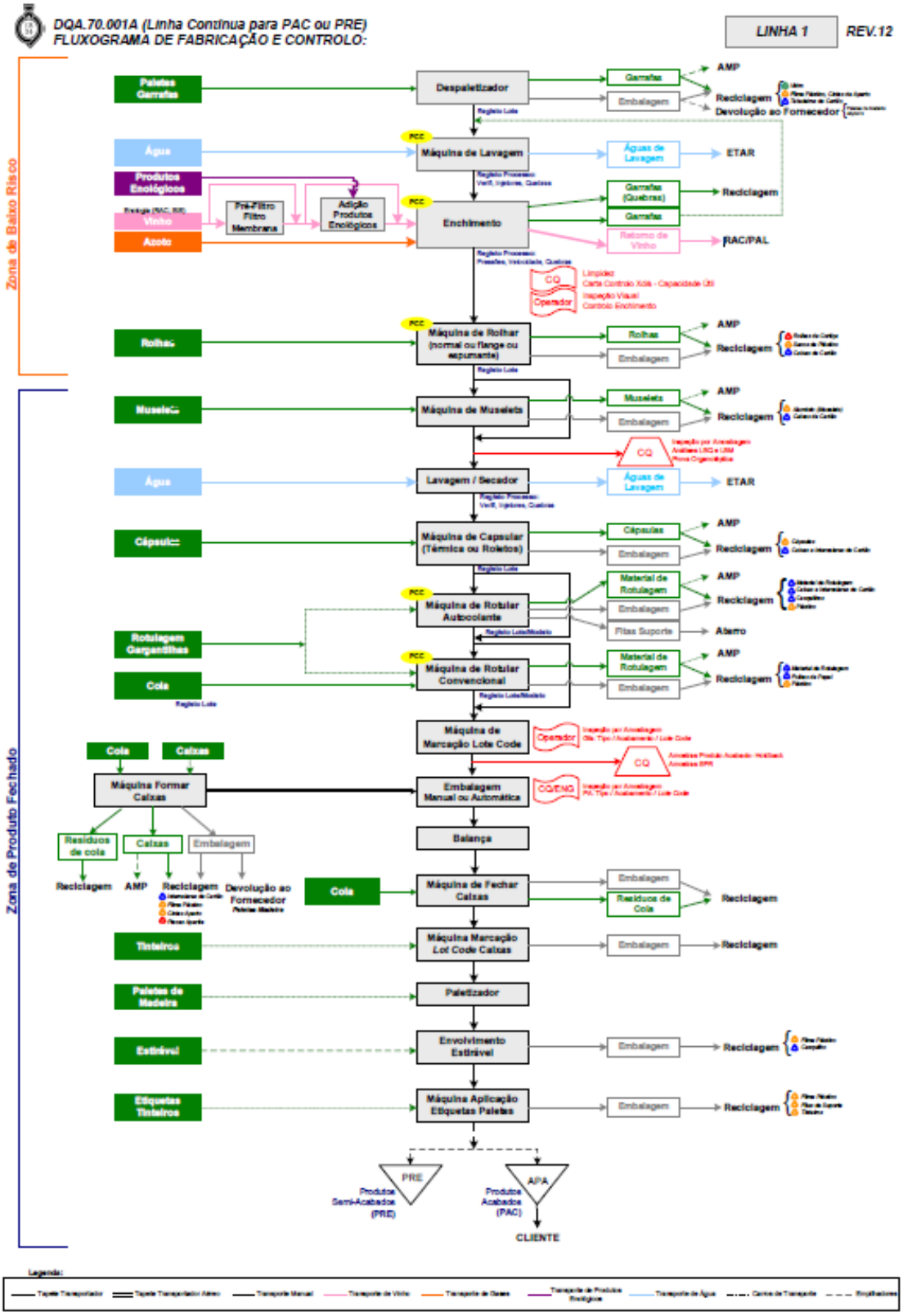

Figura B.3 - Fluxograma Linha 1

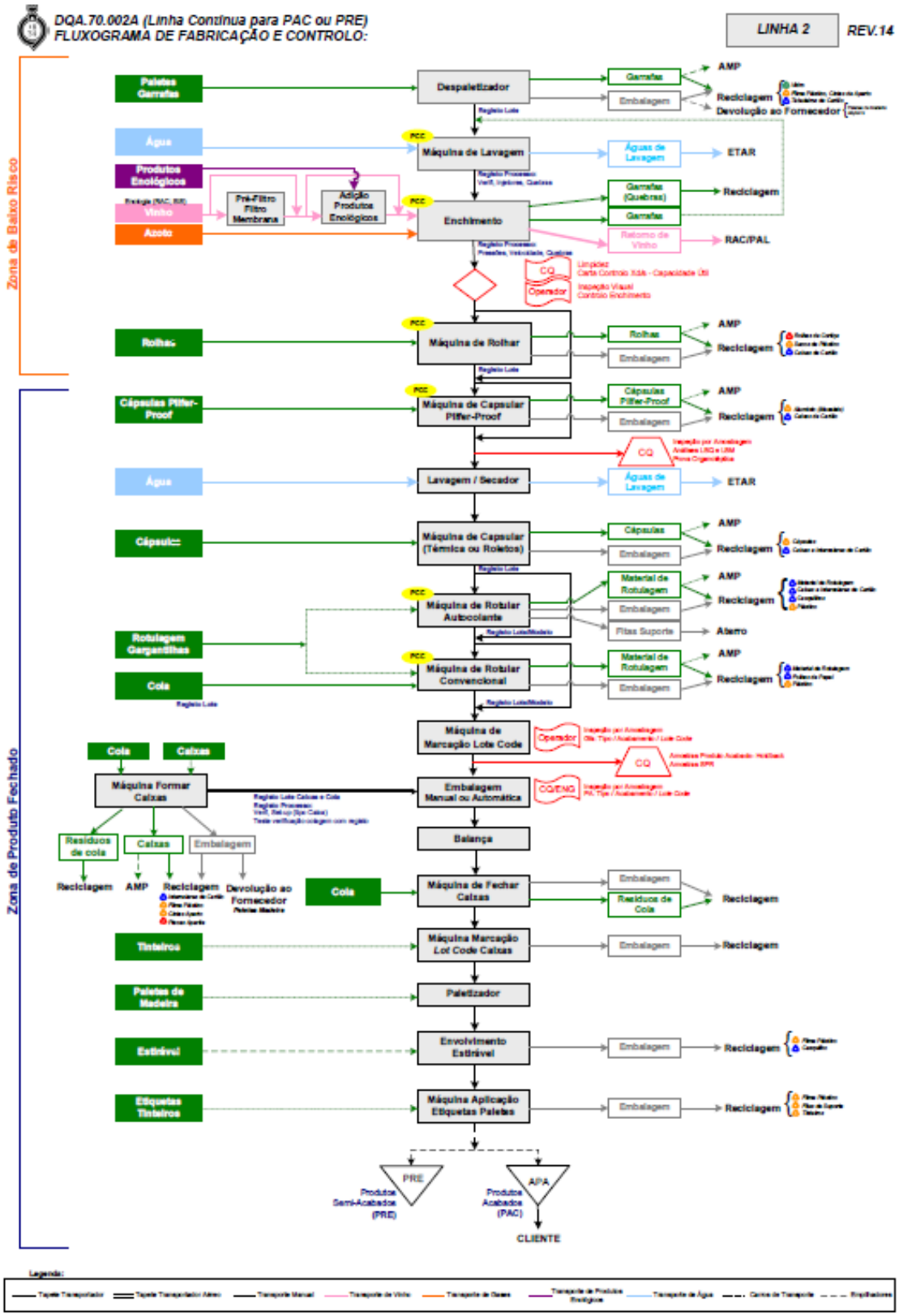

Figura B.4 - Fluxograma da linha 2

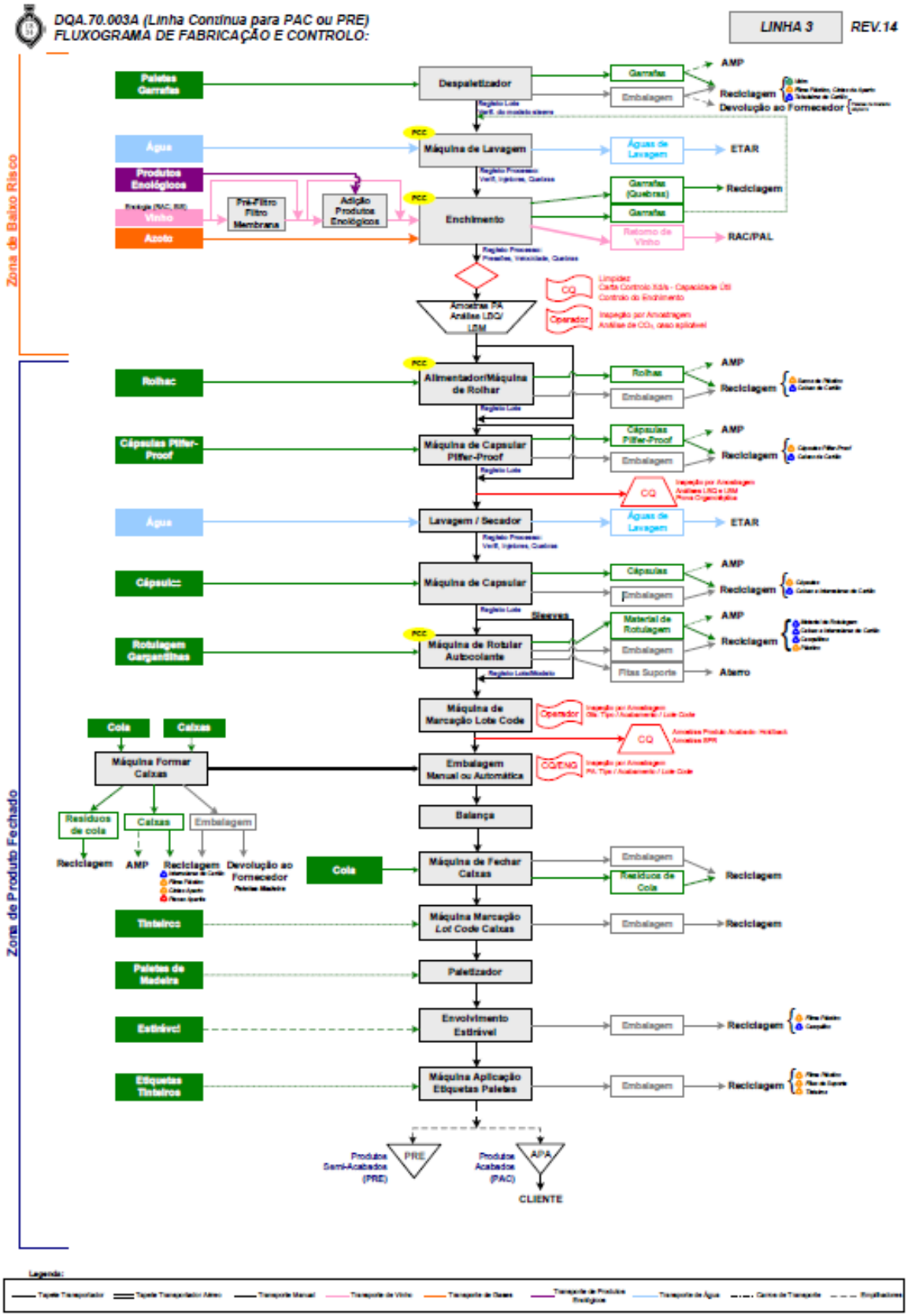

Figura B.5 - Fluxograma da linha 3

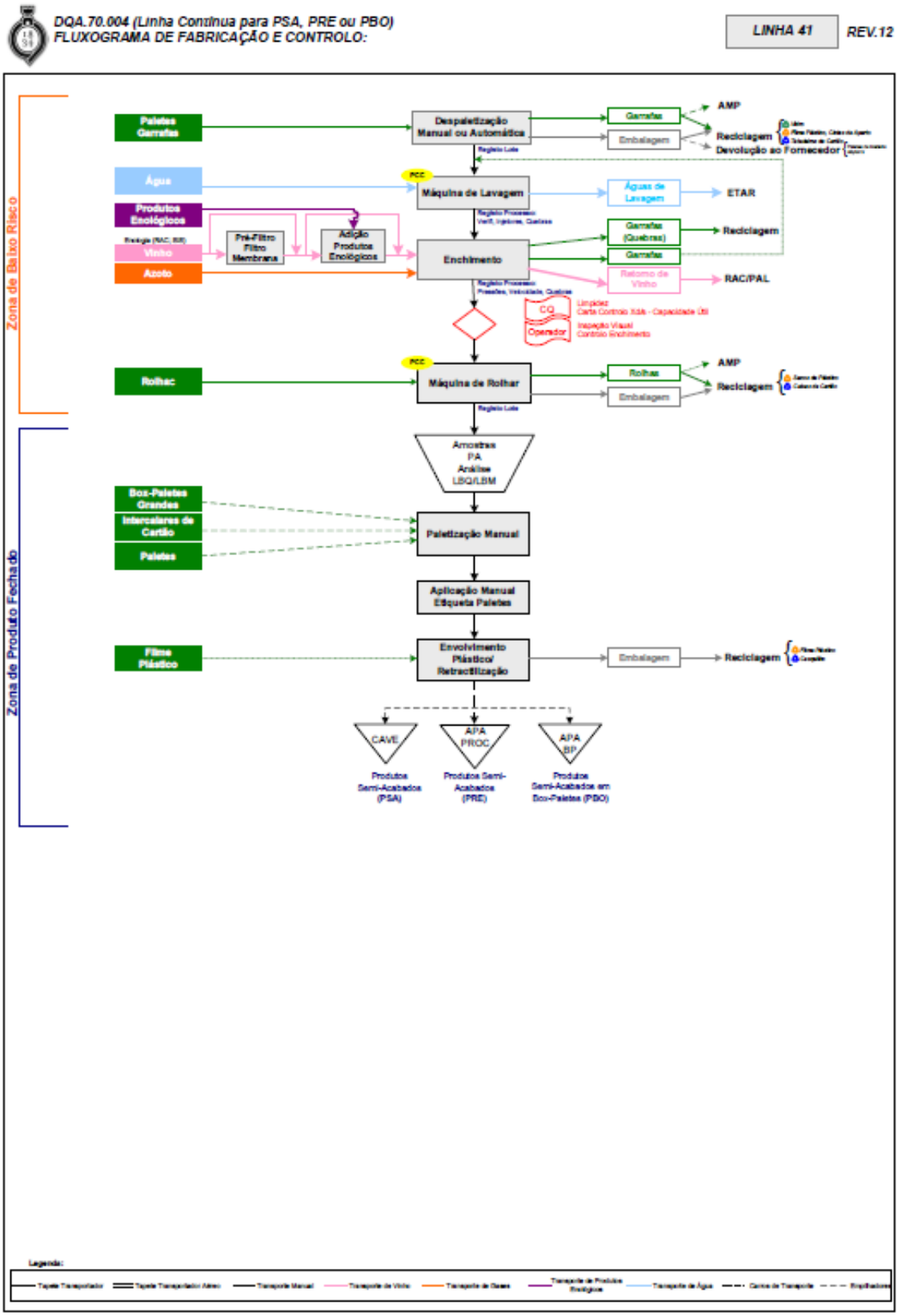

Figura B.6 - Fluxograma da linha 4

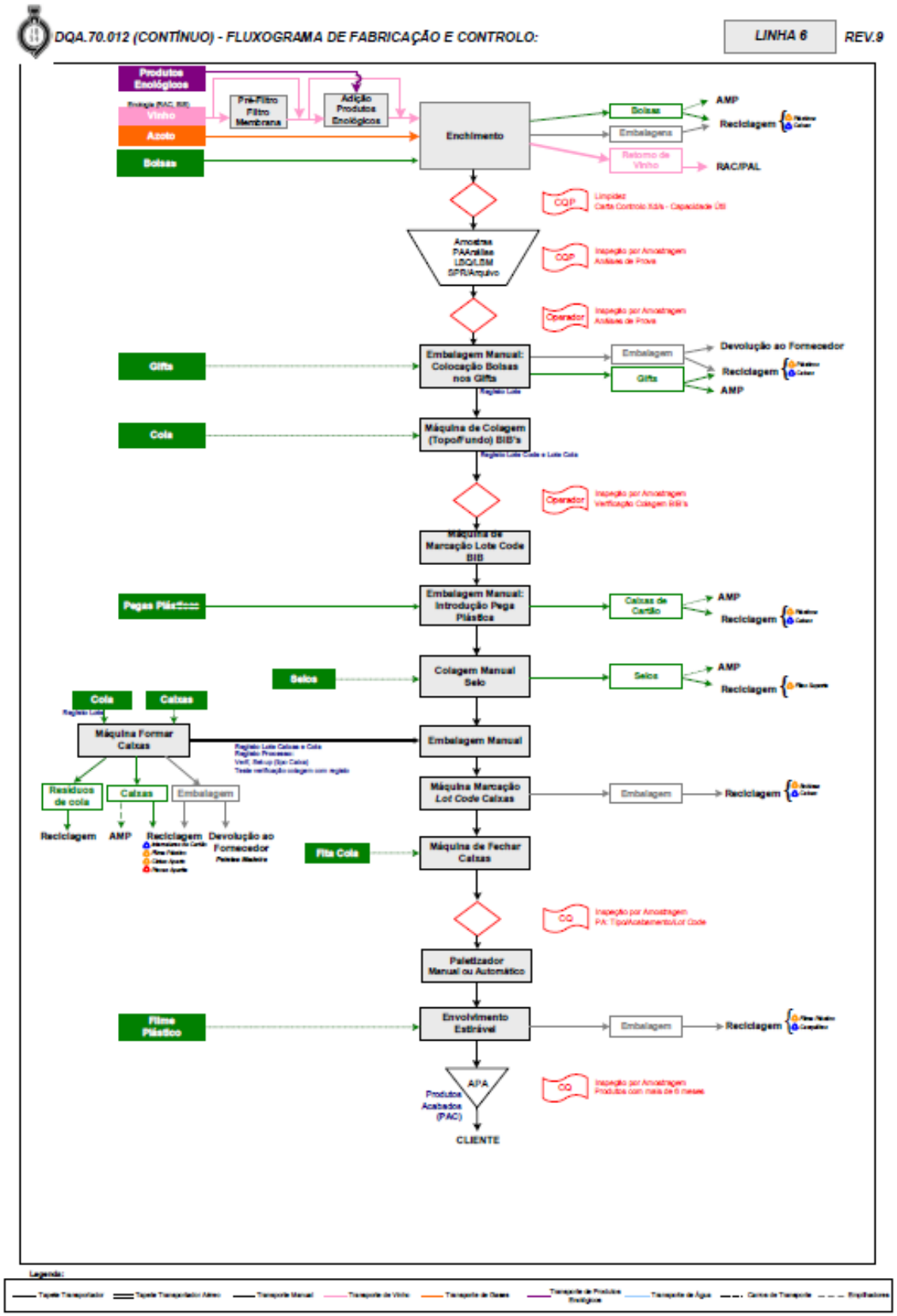

Figura B.7 - Fluxograma da linha 6

C. Análise de Fontes de Variação

I. Matéria Prima – Garrafas de vidro vazias

Tabela C.1 - Massa das taras dos respetivos fornecedores

Massa das taras (g)	
Fornecedor A	**Fornecedor B**
422,67	418,52
421,66	418,67
421,79	417,59
422,25	419,73
422,89	418,36
421,84	419,65
422,39	418,19
419,71	419,61
419,74	418,29
419,58	417,39
426,4	418,18
426,36	418,06
427,77	419,02
426,08	417,16
426,87	418,8
427,05	420,75
426,78	422,46
426,32	420,07
427,37	421,4
426,86	420,91
419,65	411,78
417,81	410,97
417,52	411,7
415,52	415,43
419,77	414,65
419,87	411,16
419,88	413,52
415,62	411,67
416,25	411,4
416,92	411,3
416,82	402,4
417,58	402,68
416,14	403,26
416,25	403,11
416,92	403,17
417,49	415
418,04	413,26
417,82	415,37
416,77	413,49
416,32	414,57

II. Válvulas da máquina de enchimento

Tabela C.2 - Volumes de enchimento recolhidos para cada válvula

Válvulas	Volume de enchimento (ml)									
Válvula 1	750,27	750,84	753,32	752,78	750,21	750,07	748,69	753,15	750,71	749,89
Válvula 2	751,99	752,94	752,94	750,76	753,92	748,63	750,57	751,04	748,02	750,94
Válvula 3	750,20	750,85	750,55	749,94	750,21	752,32	751,13	750,85	751,17	750,02
Válvula 4	749,57	749,60	753,13	749,39	750,96	752,46	748,46	750,22	749,42	751,94
Válvula 5	752,26	754,24	750,52	750,19	750,78	750,42	749,43	747,17	750,61	749,80
Válvula 6	752,08	748,85	752,05	748,85	752,05	748,18	750,15	748,91	749,23	750,23
Válvula 7	754,96	748,95	751,09	749,79	751,55	753,96	752,41	751,23	750,36	751,04
Válvula 8	751,34	752,22	753,15	753,41	753,04	753,01	751,52	751,37	755,20	753,19
Válvula 9	752,53	751,66	752,24	751,31	750,21	754,32	749,67	750,96	751,18	750,26
Válvula 10	752,57	752,88	751,97	749,12	749,17	748,17	748,80	748,82	751,57	747,71
Válvula 11	754,03	752,64	753,82	756,41	752,98	752,59	750,04	750,12	751,19	751,86
Válvula 12	751,34	751,51	750,35	754,31	752,64	753,97	750,05	750,06	748,82	749,82
Válvula 13	752,24	752,55	750,72	756,55	747,90	754,65	747,64	749,17	749,87	749,02
Válvula 14	751,17	750,01	747,22	749,17	750,95	747,02	749,22	749,11	751,04	748,74
Válvula 15	751,08	751,72	754,36	752,13	747,78	749,92	749,31	752,30	749,09	750,61
Válvula 16	751,99	753,79	751,23	753,50	754,67	747,82	750,44	750,88	749,80	753,49
Válvula 17	750,76	753,75	751,28	752,71	751,85	751,03	751,80	752,38	753,88	747,75
Válvula 18	753,80	748,86	751,13	749,88	749,14	749,38	751,87	752,87	754,54	750,32
Válvula 19	754,25	752,95	753,84	751,38	755,32	752,96	749,92	753,44	751,65	752,93
Válvula 20	751,11	755,12	751,05	751,58	753,50	750,28	750,17	750,09	749,88	751,91
Válvula 21	752,51	751,61	750,82	751,99	755,70	753,54	753,44	754,91	753,73	753,55
Válvula 22	749,47	756,45	748,97	752,13	751,72	752,62	750,25	756,35	749,28	752,71
Válvula 23	753,62	755,72	750,62	750,81	754,33	753,67	749,79	753,63	751,18	750,83
Válvula 24	754,36	752,66	753,04	753,81	753,68	750,24	753,14	755,36	753,94	751,37
Válvula 25	747,90	750,62	751,51	754,59	754,39	750,61	752,65	752,15	748,70	755,81
Válvula 26	753,48	752,12	752,38	750,81	754,52	754,64	750,74	751,02	750,12	755,54
Válvula 27	752,82	750,56	754,66	752,62	750,31	753,39	751,82	751,29	750,91	749,62
Válvula 28	751,53	751,06	749,47	756,09	752,07	751,47	752,19	750,07	751,65	752,48
Válvula 29	752,32	755,01	754,15	753,54	751,73	751,95	750,87	749,99	753,86	751,07
Válvula 30	749,19	751,77	752,09	751,76	751,65	750,33	756,59	754,77	751,28	751,83
Válvula 31	754,62	752,23	757,27	751,84	756,06	753,83	749,92	754,90	754,74	752,79
Válvula 32	748,08	749,57	754,12	750,51	752,96	754,39	747,33	754,28	750,92	748,16

Tabela C.3 - Diferenças entre os valores médios dos volumes de enchimento

	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3	Válvula 4	Válvula 5	Válvula 6	Válvula 7	Válvula 8	Válvula 9	Válvula 10	Válvula 11	Válvula 12	Válvula 13	Válvula 14	Válvula 15	Válvula 16
Válvula 1	0,00	0,18	0,27	0,48	0,45	0,93	0,54	1,75	0,44	0,92	1,57	0,29	0,04	1,63	0,16	0,77
Válvula 2	0,18	0,00	0,45	0,66	0,63	1,12	0,36	1,57	0,26	1,10	1,39	0,11	0,14	1,81	0,34	0,59
Válvula 3	0,27	0,45	0,00	0,21	0,18	0,66	0,81	2,02	0,71	0,65	1,84	0,56	0,31	1,36	0,11	1,04
Válvula 4	0,48	0,66	0,21	0,00	0,03	0,46	1,02	2,23	0,92	0,44	2,05	0,77	0,52	1,15	0,32	1,25
Válvula 5	0,45	0,63	0,18	0,03	0,00	0,48	0,99	2,20	0,89	0,47	2,02	0,74	0,49	1,18	0,29	1,22
Válvula 6	0,93	1,12	0,66	0,46	0,48	0,00	1,47	2,69	1,37	0,02	2,51	1,23	0,97	0,69	0,77	1,70
Válvula 7	0,54	0,36	0,81	1,02	0,99	1,47	0,00	1,21	0,10	1,45	1,03	0,25	0,50	2,17	0,70	0,23
Válvula 8	1,75	1,57	2,02	2,23	2,20	2,69	1,21	0,00	1,31	2,67	0,18	1,46	1,71	3,38	1,91	0,98
Válvula 9	0,44	0,26	0,71	0,92	0,89	1,37	0,10	1,31	0,00	1,35	1,13	0,15	0,40	2,07	0,60	0,33
Válvula 10	0,92	1,10	0,65	0,44	0,47	0,02	1,45	2,67	1,35	0,00	2,49	1,21	0,95	0,71	0,75	1,69
Válvula 11	1,57	1,39	1,84	2,05	2,02	2,51	1,03	0,18	1,13	2,49	0,00	1,28	1,54	3,20	1,73	0,80
Válvula 12	0,29	0,11	0,56	0,77	0,74	1,23	0,25	1,46	0,15	1,21	1,28	0,00	0,25	1,92	0,45	0,48
Válvula 13	0,04	0,14	0,31	0,52	0,49	0,97	0,50	1,71	0,40	0,95	1,54	0,25	0,00	1,67	0,20	0,73
Válvula 14	1,63	1,81	1,36	1,15	1,18	0,69	2,17	3,38	2,07	0,71	3,20	1,92	1,67	0,00	1,47	2,40
Válvula 15	0,16	0,34	0,11	0,32	0,29	0,77	0,70	1,91	0,60	0,75	1,73	0,45	0,20	1,47	0,00	0,93
Válvula 16	0,77	0,59	1,04	1,25	1,22	1,70	0,23	0,98	0,33	1,69	0,80	0,48	0,73	2,40	0,93	0,00
Válvula 17	0,72	0,54	0,99	1,20	1,17	1,66	0,19	1,03	0,29	1,64	0,85	0,43	0,69	2,35	0,89	0,05
Válvula 18	0,19	0,00	0,46	0,66	0,64	1,12	0,35	1,57	0,25	1,10	1,39	0,11	0,15	1,82	0,35	0,58
Válvula 19	1,87	1,69	2,14	2,35	2,32	2,81	1,33	0,12	1,43	2,79	0,30	1,58	1,83	3,50	2,03	1,10
Válvula 20	0,48	0,30	0,75	0,96	0,93	1,41	0,06	1,27	0,04	1,39	1,10	0,19	0,44	2,11	0,64	0,29
Válvula 21	2,19	2,01	2,46	2,67	2,64	3,12	1,65	0,44	1,75	3,10	0,61	1,90	2,15	3,82	2,35	1,42
Válvula 22	1,00	0,82	1,27	1,48	1,45	1,94	0,46	0,75	0,56	1,92	0,57	0,71	0,96	2,63	1,16	0,23
Válvula 23	1,43	1,25	1,70	1,91	1,88	2,36	0,89	0,32	0,99	2,34	0,15	1,13	1,39	3,06	1,59	0,66
Válvula 24	2,17	1,99	2,44	2,65	2,62	3,10	1,63	0,42	1,73	3,08	0,59	1,88	2,13	3,80	2,33	1,40
Válvula 25	0,90	0,72	1,17	1,38	1,35	1,83	0,36	0,85	0,46	1,81	0,68	0,61	0,86	2,53	1,06	0,13
Válvula 26	1,55	1,36	1,82	2,02	2,00	2,48	1,01	0,21	1,11	2,46	0,03	1,25	1,51	3,17	1,71	0,78
Válvula 27	0,81	0,62	1,08	1,29	1,26	1,74	0,27	0,95	0,37	1,72	0,77	0,51	0,77	2,44	0,97	0,04
Válvula 28	0,81	0,63	1,08	1,29	1,26	1,75	0,28	0,94	0,38	1,73	0,76	0,52	0,78	2,44	0,98	0,04
Válvula 29	1,46	1,28	1,73	1,94	1,91	2,39	0,92	0,29	1,02	2,37	0,12	1,17	1,42	3,09	1,62	0,69
Válvula 30	1,13	0,95	1,40	1,61	1,58	2,07	0,59	0,62	0,69	2,05	0,44	0,84	1,09	2,76	1,29	0,36
Válvula 31	2,83	2,65	3,10	3,31	3,28	3,76	2,29	1,08	2,39	3,74	1,25	2,54	2,79	4,46	2,99	2,06
Válvula 32	0,04	0,14	0,31	0,52	0,49	0,97	0,50	1,71	0,40	0,95	1,54	0,25	0,00	1,67	0,20	0,73

Tabela C.4 - Diferenças entre os valores médios dos volumes de enchimento (continuação)

	Válvula 17	Válvula 18	Válvula 19	Válvula 20	Válvula 21	Válvula 22	Válvula 23	Válvula 24	Válvula 25	Válvula 26	Válvula 27	Válvula 28	Válvula 29	Válvula 30	Válvula 31	Válvula 32
Válvula 1	0,72	0,19	1,87	0,48	2,19	1,00	1,43	2,17	0,90	1,55	0,81	0,81	1,46	1,13	2,83	0,04
Válvula 2	0,54	0,00	1,69	0,30	2,01	0,82	1,25	1,99	0,72	1,36	0,62	0,63	1,28	0,95	2,65	0,14
Válvula 3	0,99	0,46	2,14	0,75	2,46	1,27	1,70	2,44	1,17	1,82	1,08	1,08	1,73	1,40	3,10	0,31
Válvula 4	1,20	0,66	2,35	0,96	2,67	1,48	1,91	2,65	1,38	2,02	1,29	1,29	1,94	1,61	3,31	0,52
Válvula 5	1,17	0,64	2,32	0,93	2,64	1,45	1,88	2,62	1,35	2,00	1,26	1,26	1,91	1,58	3,28	0,49
Válvula 6	1,66	1,12	2,81	1,41	3,12	1,94	2,36	3,10	1,83	2,48	1,74	1,75	2,39	2,07	3,76	0,97
Válvula 7	0,19	0,35	1,33	0,06	1,65	0,46	0,89	1,63	0,36	1,01	0,27	0,28	0,92	0,59	2,29	0,50
Válvula 8	1,03	1,57	0,12	1,27	0,44	0,75	0,32	0,42	0,85	0,21	0,95	0,94	0,29	0,62	1,08	1,71
Válvula 9	0,29	0,25	1,43	0,04	1,75	0,56	0,99	1,73	0,46	1,11	0,37	0,38	1,02	0,69	2,39	0,40
Válvula 10	1,64	1,10	2,79	1,39	3,10	1,92	2,34	3,08	1,81	2,46	1,72	1,73	2,37	2,05	3,74	0,95
Válvula 11	0,85	1,39	0,30	1,10	0,61	0,57	0,15	0,59	0,68	0,03	0,77	0,76	0,12	0,44	1,25	1,54
Válvula 12	0,43	0,11	1,58	0,19	1,90	0,71	1,13	1,88	0,61	1,25	0,51	0,52	1,17	0,84	2,54	0,25
Válvula 13	0,69	0,15	1,83	0,44	2,15	0,96	1,39	2,13	0,86	1,51	0,77	0,78	1,42	1,09	2,79	0,00
Válvula 14	2,35	1,82	3,50	2,11	3,82	2,63	3,06	3,80	2,53	3,17	2,44	2,44	3,09	2,76	4,46	1,67
Válvula 15	0,89	0,35	2,03	0,64	2,35	1,16	1,59	2,33	1,06	1,71	0,97	0,98	1,62	1,29	2,99	0,20
Válvula 16	0,05	0,58	1,10	0,29	1,42	0,23	0,66	1,40	0,13	0,78	0,04	0,04	0,69	0,36	2,06	0,73
Válvula 17	0,00	0,54	1,15	0,25	1,46	0,28	0,70	1,44	0,17	0,82	0,08	0,09	0,73	0,41	2,10	0,69
Válvula 18	0,54	0,00	1,68	0,29	2,00	0,81	1,24	1,98	0,71	1,36	0,62	0,63	1,27	0,95	2,64	0,15
Válvula 19	1,15	1,68	0,00	1,39	0,32	0,87	0,44	0,30	0,97	0,32	1,06	1,06	0,41	0,74	0,96	1,83
Válvula 20	0,25	0,29	1,39	0,00	1,71	0,52	0,95	1,69	0,42	1,07	0,33	0,34	0,98	0,66	2,35	0,44
Válvula 21	1,46	2,00	0,32	1,71	0,00	1,19	0,76	0,02	1,29	0,64	1,38	1,37	0,73	1,06	0,64	2,15
Válvula 22	0,28	0,81	0,87	0,52	1,19	0,00	0,43	1,17	0,10	0,55	0,19	0,19	0,46	0,13	1,83	0,96
Válvula 23	0,70	1,24	0,44	0,95	0,76	0,43	0,00	0,74	0,53	0,12	0,62	0,61	0,03	0,29	1,40	1,39
Válvula 24	1,44	1,98	0,30	1,69	0,02	1,17	0,74	0,00	1,27	0,62	1,36	1,35	0,71	1,03	0,66	2,13
Válvula 25	0,17	0,71	0,97	0,42	1,29	0,10	0,53	1,27	0,00	0,65	0,09	0,08	0,56	0,23	1,93	0,86
Válvula 26	0,82	1,36	0,32	1,07	0,64	0,55	0,12	0,62	0,65	0,00	0,74	0,73	0,09	0,41	1,28	1,51
Válvula 27	0,08	0,62	1,06	0,33	1,38	0,19	0,62	1,36	0,09	0,74	0,00	0,01	0,65	0,33	2,02	0,77
Válvula 28	0,09	0,63	1,06	0,34	1,37	0,19	0,61	1,35	0,08	0,73	0,01	0,00	0,64	0,32	2,01	0,78
Válvula 29	0,73	1,27	0,41	0,98	0,73	0,46	0,03	0,71	0,56	0,09	0,65	0,64	0,00	0,32	1,37	1,42
Válvula 30	0,41	0,95	0,74	0,66	1,06	0,13	0,29	1,03	0,23	0,41	0,33	0,32	0,32	0,00	1,69	1,09
Válvula 31	2,10	2,64	0,96	2,35	0,64	1,83	1,40	0,66	1,93	1,28	2,02	2,01	1,37	1,69	0,00	2,79
Válvula 32	0,69	0,15	1,83	0,44	2,15	0,96	1,39	2,13	0,86	1,51	0,77	0,78	1,42	1,09	2,79	0,00

Tabela C.5 - Análise ABC para as diferenças entre válvulas

Válvulas	%categ	Nºdiferenças	Freq.cumul	%diferenças	Percentagem	Classe	Tipo de Intervenção
Válvula14	3%	24	24	9%	9%	**A**	**Válvulas prioritárias a intervervir.**
Válvula31	6%	23	47	9%	18%		
Válvula6	9%	15	62	6%	24%		
Válvula10	13%	15	77	6%	30%		
Válvula21	16%	15	92	6%	36%		
Válvula24	19%	15	107	6%	42%		
Válvula19	22%	12	119	5%	47%	**B**	**Válvulas com menor importância**
Válvula8	25%	10	129	4%	51%		
Válvula3	28%	9	138	4%	54%		
Válvula4	31%	9	147	4%	58%		
Válvula5	34%	9	156	4%	61%		
Válvula11	38%	7	163	3%	64%		
Válvula15	41%	7	170	3%	67%		
Válvula26	44%	7	177	3%	69%		
Válvula13	47%	6	183	2%	72%		
Válvula29	50%	6	189	2%	74%		
Válvula32	53%	6	195	2%	76%		
Válvula1	56%	5	200	2%	78%		
Válvula2	59%	5	205	2%	80%		
Válvula18	63%	5	210	2%	82%		
Válvula23	66%	5	215	2%	84%		
Válvula9	69%	4	219	2%	86%		
Válvula12	72%	4	223	2%	87%		
Válvula16	75%	4	227	2%	89%		
Válvula20	78%	4	231	2%	91%		
Válvula22	81%	4	235	2%	92%		
Válvula25	84%	4	239	2%	94%		
Válvula27	88%	4	243	2%	95%		
Válvula28	91%	4	247	2%	97%		
Válvula30	94%	4	251	2%	98%		
Válvula7	97%	2	253	1%	99%		
Válvula17	100%	2	255	1%	100%		

Tabela C.6 - Volumes de enchimento recolhidos para cada válvula após ações corretivas

Válvulas	Volume de enchimento (ml)									
Válvula 1	754,56	752,31	750,76	754,42	754,31	752,66	748,65	751,03	753,12	748,06
Válvula 2	750,67	752,26	753,22	751,85	750,19	752,68	753,01	752,78	749,83	749,69
Válvula 3	753,00	753,45	755,76	755,89	751,66	750,24	751,79	748,08	753,25	751,29
Válvula 4	752,65	751,82	751,15	752,15	749,73	749,78	753,24	756,08	750,81	752,05
Válvula 5	751,96	751,26	748,15	748,97	751,87	748,02	750,22	752,73	749,55	751,23
Válvula 6	755,03	750,83	749,90	751,71	751,87	752,44	750,74	752,23	749,84	754,10
Válvula 7	751,82	751,88	751,94	753,27	755,34	748,76	750,28	747,71	753,53	754,43
Válvula 8	754,58	756,23	752,24	751,53	752,44	750,19	752,71	752,43	751,05	751,28
Válvula 9	751,70	751,84	753,78	752,02	749,77	749,35	752,08	754,10	753,69	754,62
Válvula 10	751,56	753,45	756,95	754,05	750,75	750,79	751,77	752,30	750,28	751,25
Válvula 11	752,90	753,22	751,91	747,83	751,52	750,25	750,15	750,96	749,66	753,44
Válvula 12	751,42	750,53	749,63	752,27	749,93	754,24	750,99	749,55	752,59	753,05
Válvula 13	753,07	750,31	753,28	750,84	755,77	750,81	751,16	755,03	750,42	754,43
Válvula 14	752,52	752,90	753,25	751,87	751,47	753,36	755,25	752,26	752,10	754,02
Válvula 15	752,46	752,48	752,48	751,58	751,02	752,72	748,98	751,17	750,75	750,77
Válvula 16	752,58	752,07	754,11	751,27	750,95	755,82	754,02	751,79	753,13	750,19
Válvula 17	747,89	754,24	752,04	752,30	752,67	752,35	749,86	751,96	755,10	751,30
Válvula 18	751,46	752,13	748,98	753,98	749,06	752,83	753,05	750,06	752,01	751,87
Válvula 19	751,22	751,00	752,18	754,01	755,05	751,78	749,54	749,98	751,39	753,39
Válvula 20	750,00	749,64	752,75	749,90	751,58	750,18	756,25	753,27	753,79	749,61
Válvula 21	752,05	748,03	750,49	753,06	751,11	751,07	752,46	754,10	752,59	753,70
Válvula 22	752,60	752,46	752,88	752,63	746,09	752,23	753,00	749,95	754,93	752,08
Válvula 23	750,37	751,38	752,84	754,18	750,32	751,98	749,75	751,78	751,25	751,05
Válvula 24	751,07	752,47	751,51	752,37	753,37	752,88	749,89	754,09	751,64	749,36
Válvula 25	749,85	752,17	749,36	751,45	749,00	749,99	748,53	749,64	752,23	750,12
Válvula 26	748,92	749,89	755,15	754,20	752,50	751,30	751,75	751,24	752,16	750,91
Válvula 27	749,34	750,42	754,84	750,05	751,78	749,87	752,58	748,94	748,57	748,40
Válvula 28	749,32	749,11	753,33	751,23	751,00	753,15	753,40	754,32	752,73	752,59
Válvula 29	754,04	754,75	748,70	750,00	754,46	751,16	752,34	754,11	753,74	750,12
Válvula 30	749,03	753,03	749,92	752,01	755,38	751,03	750,96	752,05	750,80	748,97
Válvula 31	750,26	750,72	750,14	753,68	748,04	750,70	752,36	753,33	751,63	751,62
Válvula 32	750,13	749,42	751,24	751,79	750,97	755,15	748,64	751,96	750,54	752,44

D. Cartas de Controlo para Pequenas Produções

I. Produto SPA

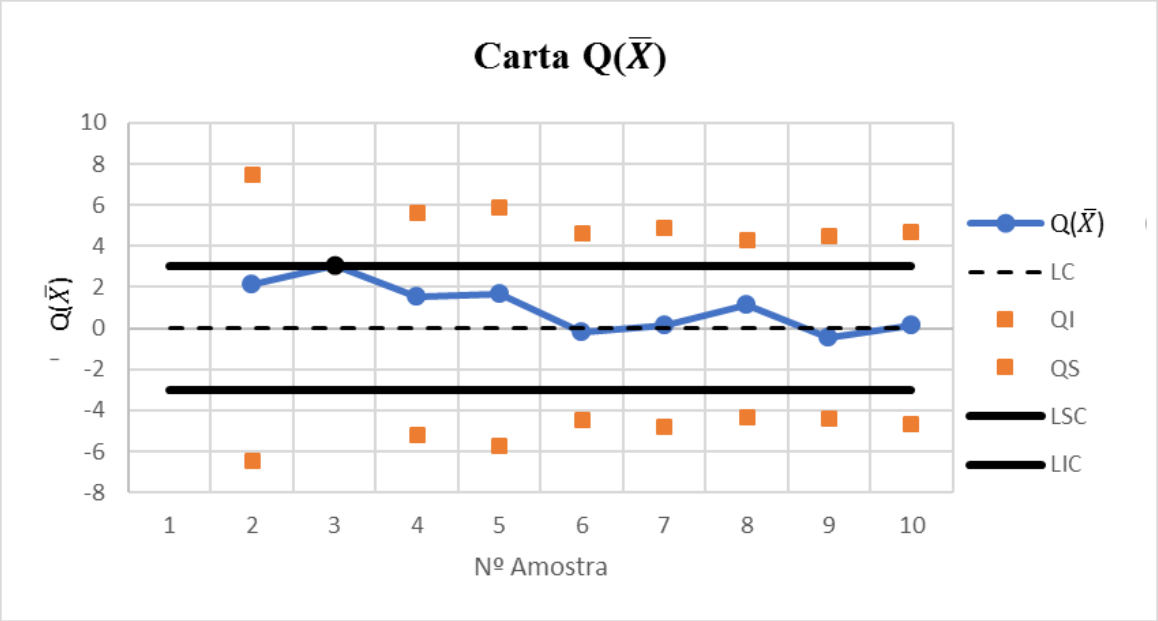

Figura D.1 - Carta Q($\bar{X}$) do volume de enchimento para o produto SPA

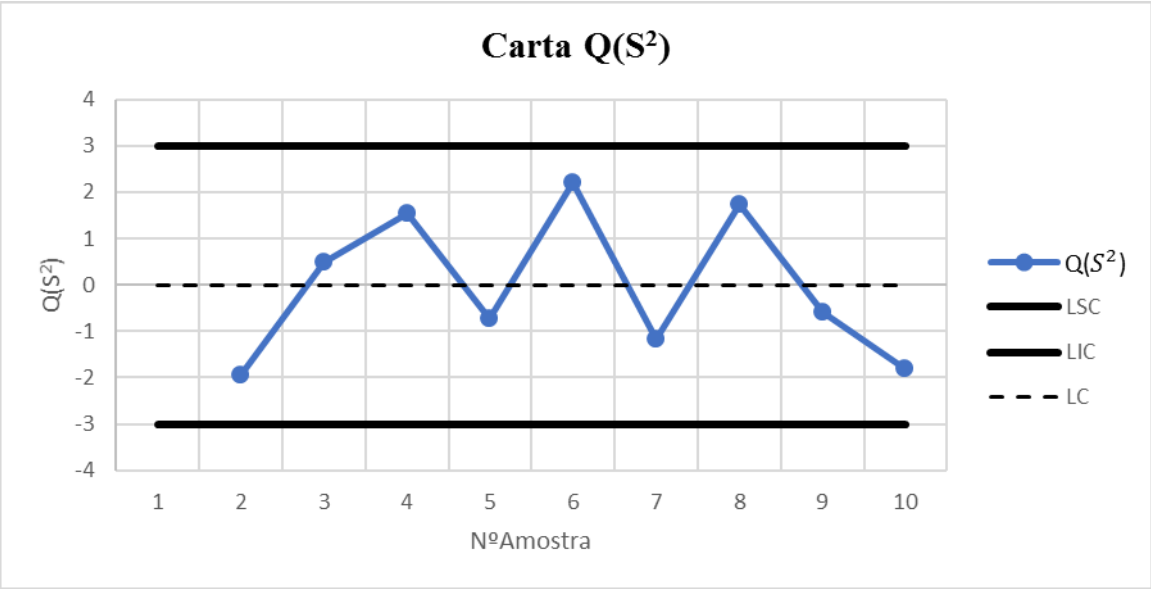

Figura D.2 Carta Q(S^2) do volume de enchimento para o produto SPA

II. Produto SPB

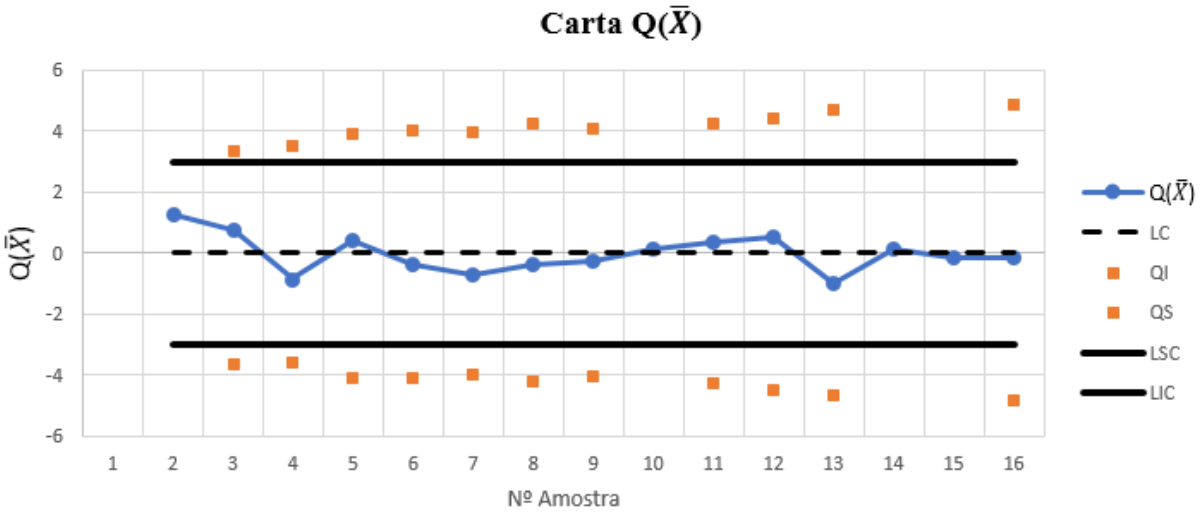

Figura D.3 - Carta Q($\bar{X}$) do volume de enchimento para o produto SPB

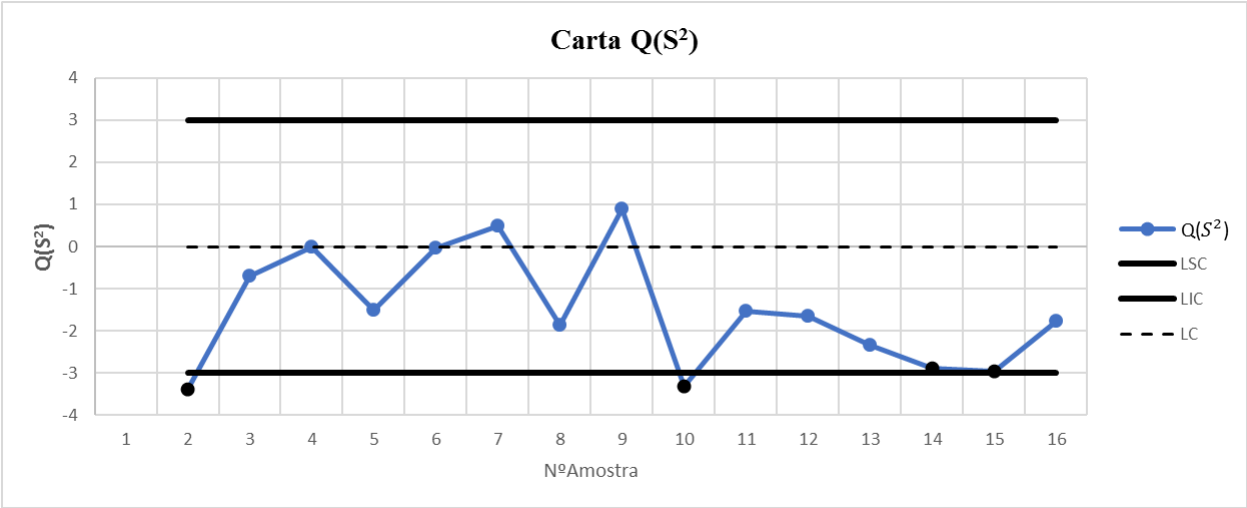

Figura D.4 - Carta Q(S^2) do volume de enchimento para o produto SPB

III. Produto CA – Característica Torque na Cápsula de Vedação

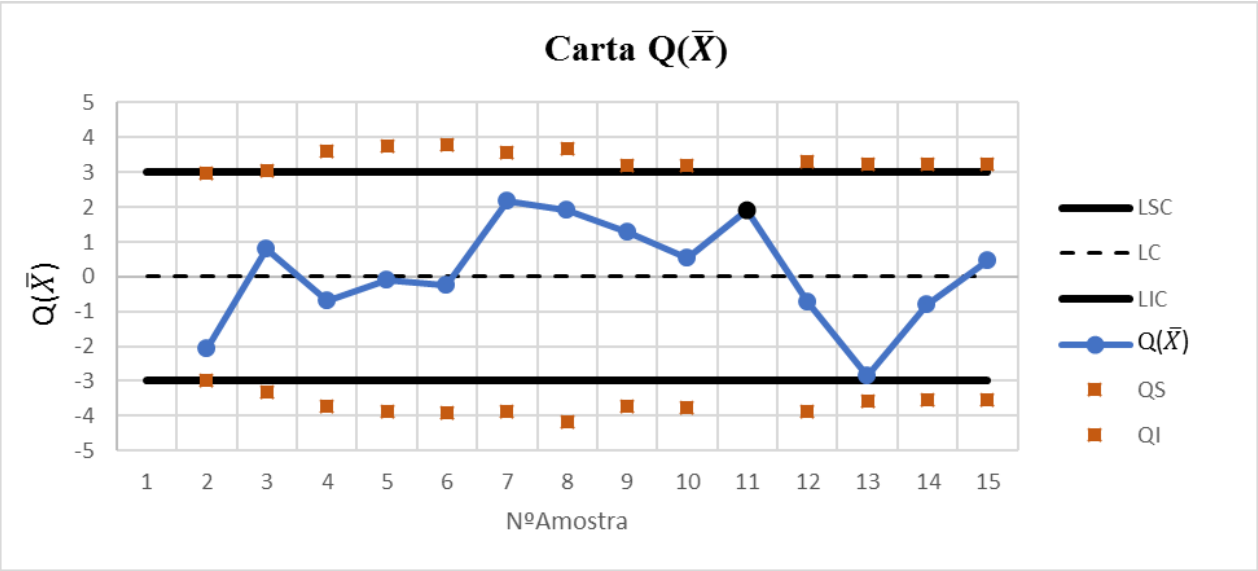

Figura D.5 - Carta Q($\bar{X}$) do torque na cápsula para o produto CA

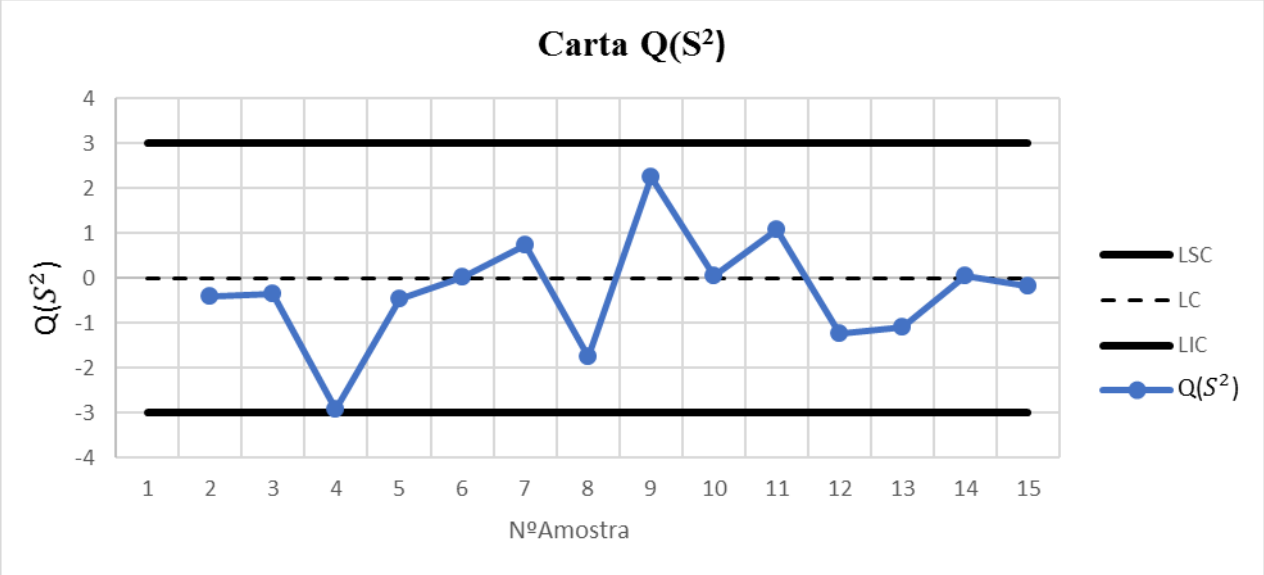

Figura D.6 - Carta Q(S^2) do torque na cápsula para o produto CA

E. Cartas de Controlo para Grandes produções – Fase I

I. Produto GPA– Característica Torque na Cápsula de Vedação

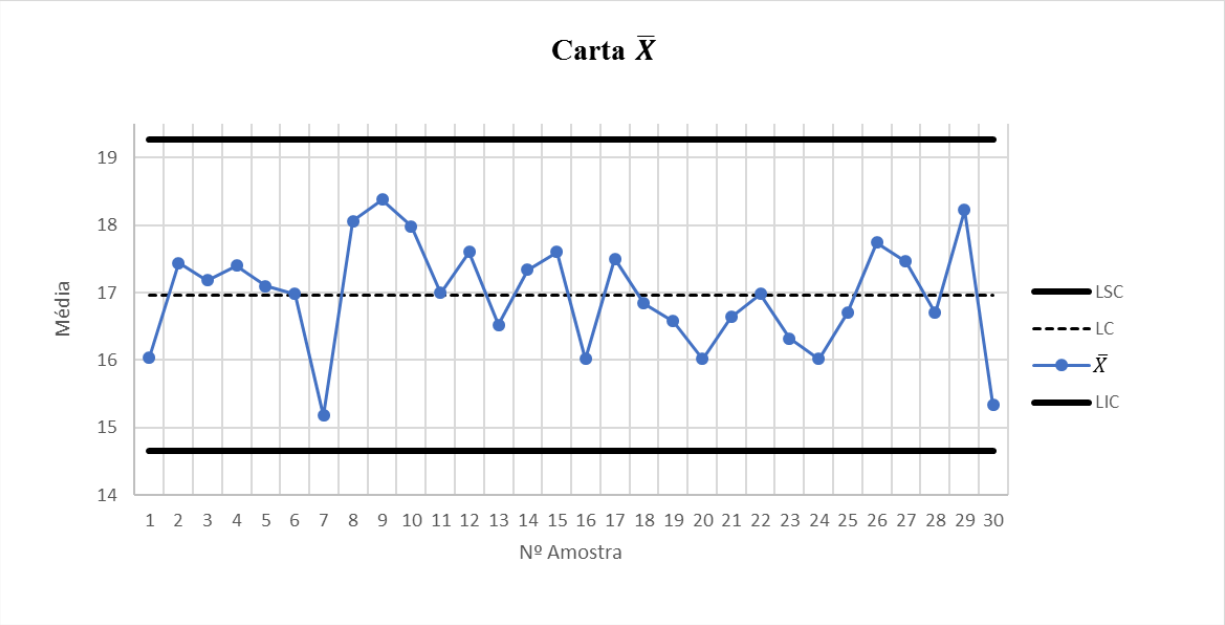

Figura E.1 - Carta da média do torque na cápsula para o produto GPA

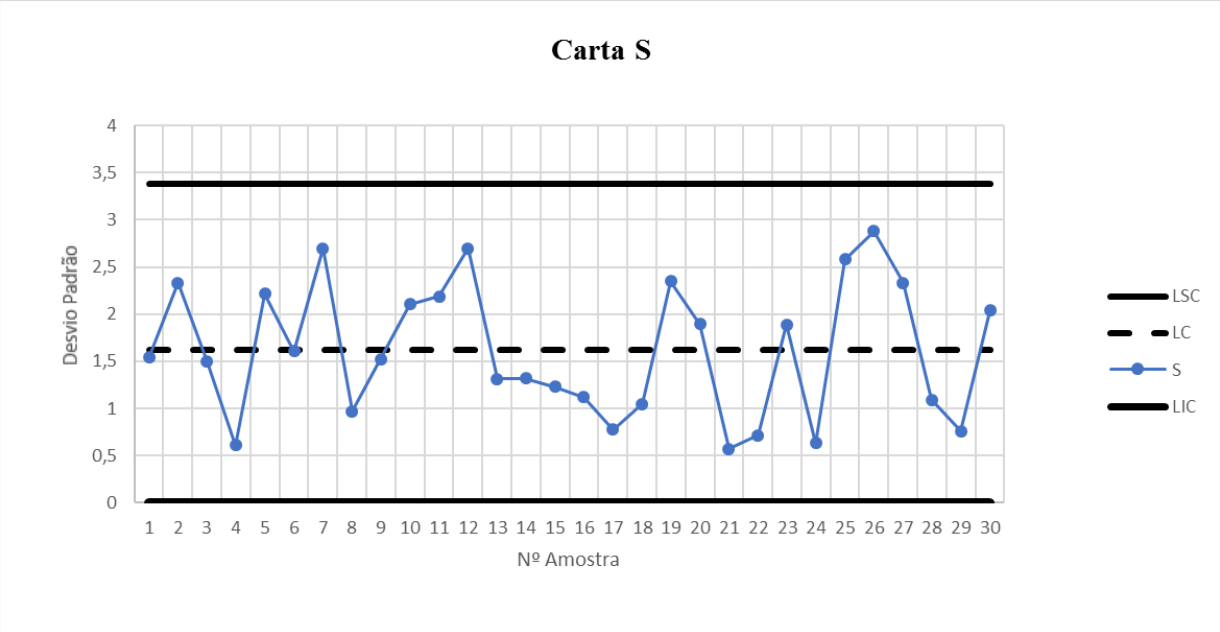

Figura E.2 - Carta do desvio padrão do torque na cápsula para o produto GPA

II. Produto GPB– Característica Volume de Enchimento

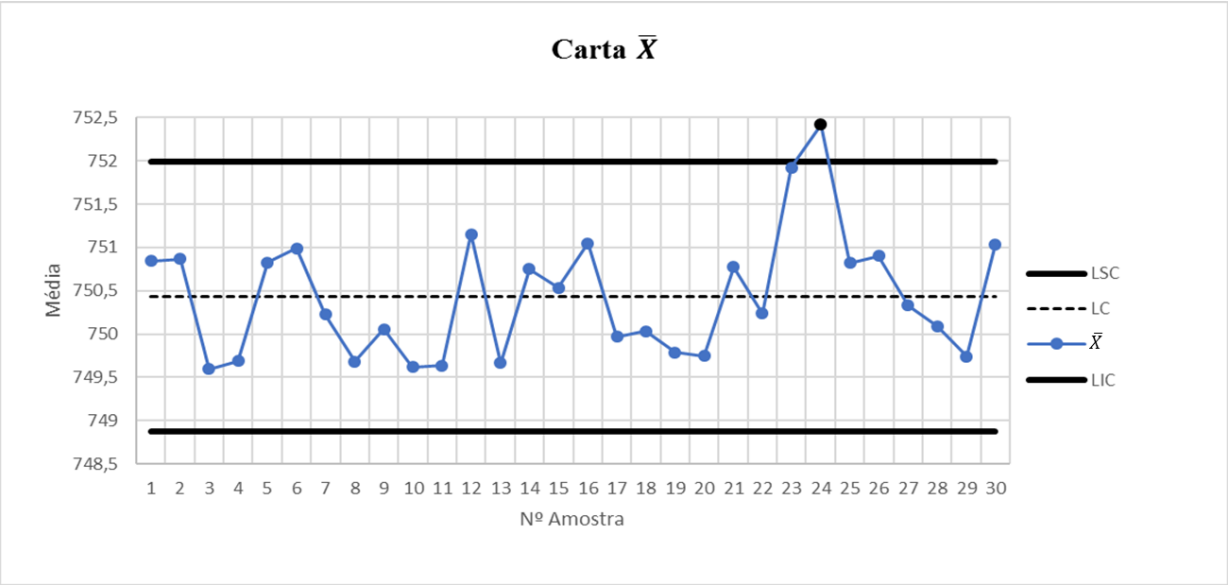

Figura E.3 - Carta da média do volume de enchimento para o produto SPB

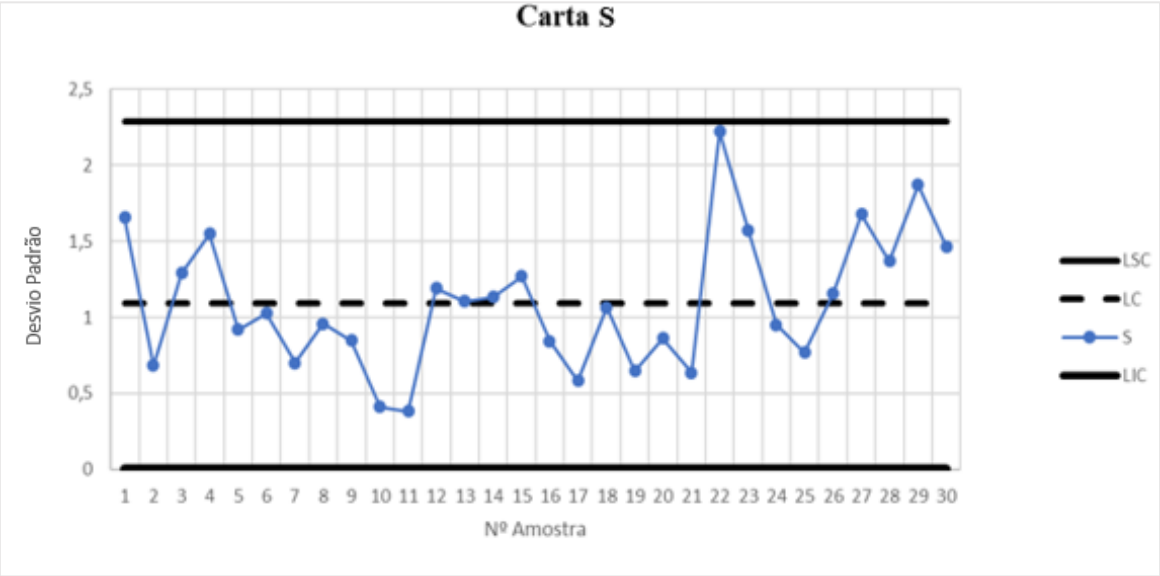

Figura E.4 - Carta do desvio padrão do volume de enchimento para o produto GPB

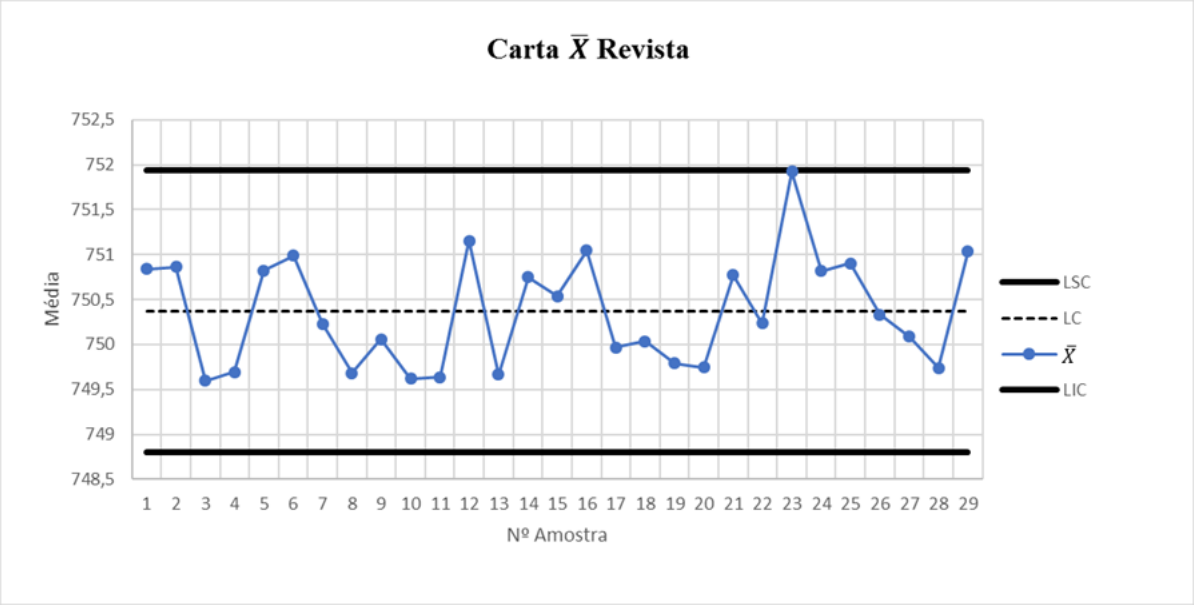

Figura E.5 - Carta revista da média do volume de enchimento para o produto GPB

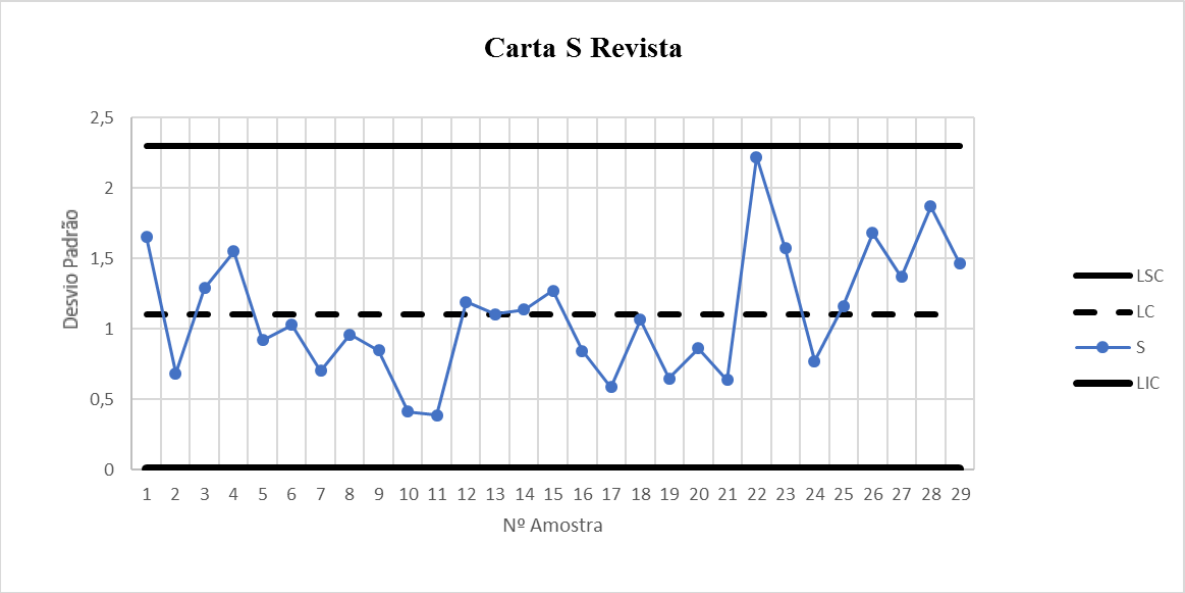

Figura E.6 - Carta revista do desvio padrão do volume de enchimento para o produto GPB

III. Produto GPB– Característica Torque aplicado na cápsula de vedação

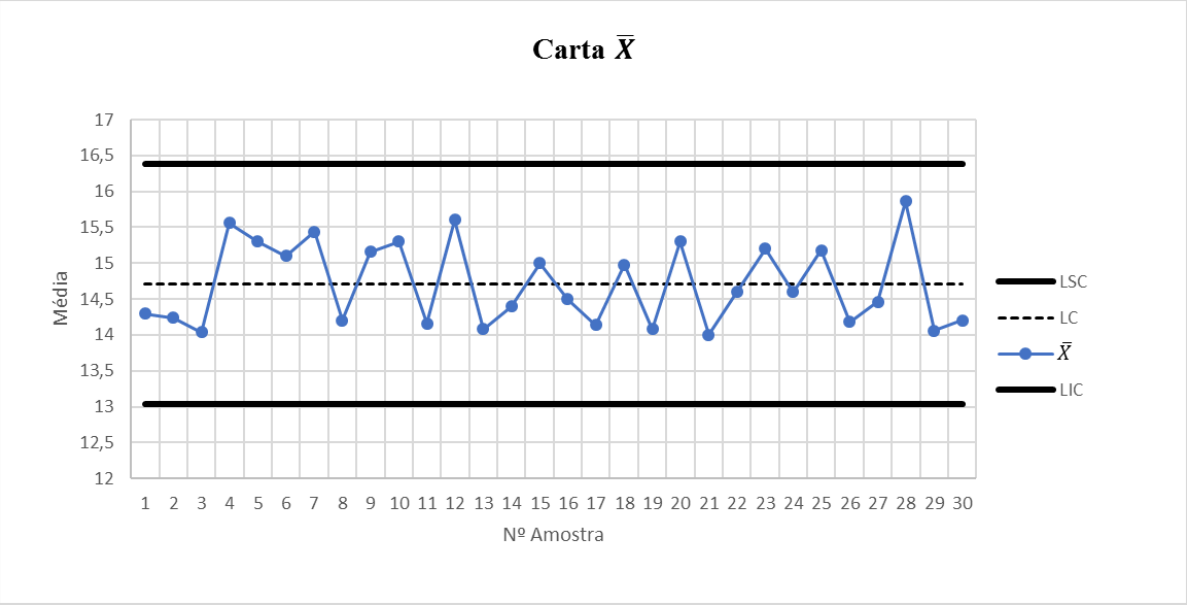

Figura E.7 - Carta da média do torque na cápsula para o produto GPB

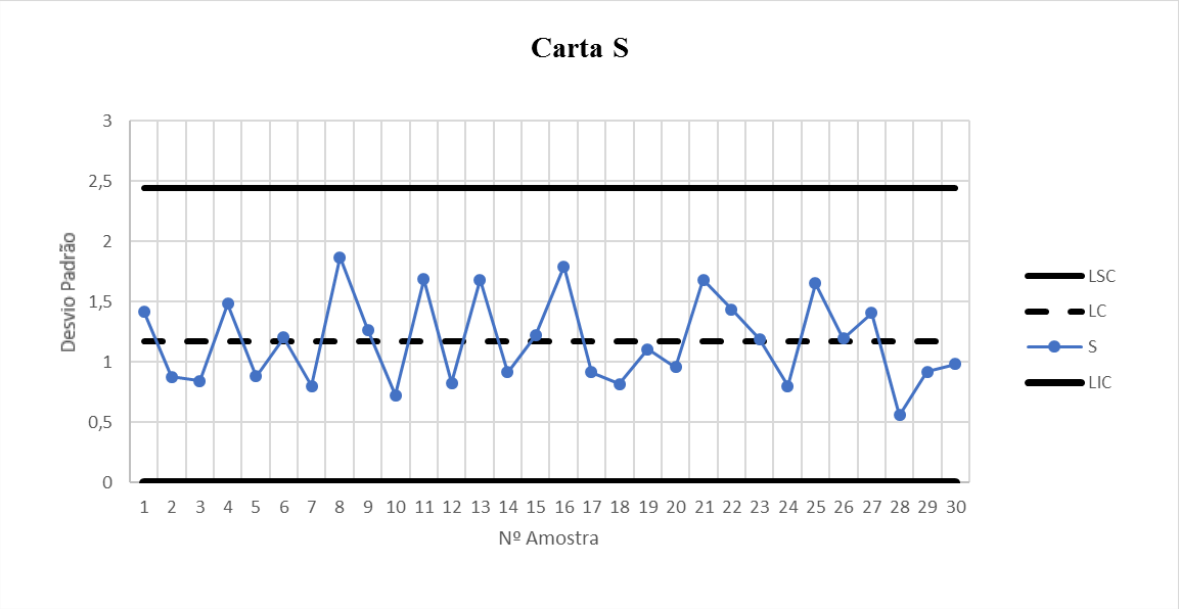

Figura E.8 - Carta do desvio padrão do torque na cápsula para o produto GPB

IV. Produto GPC – Característica Volume de Enchimento

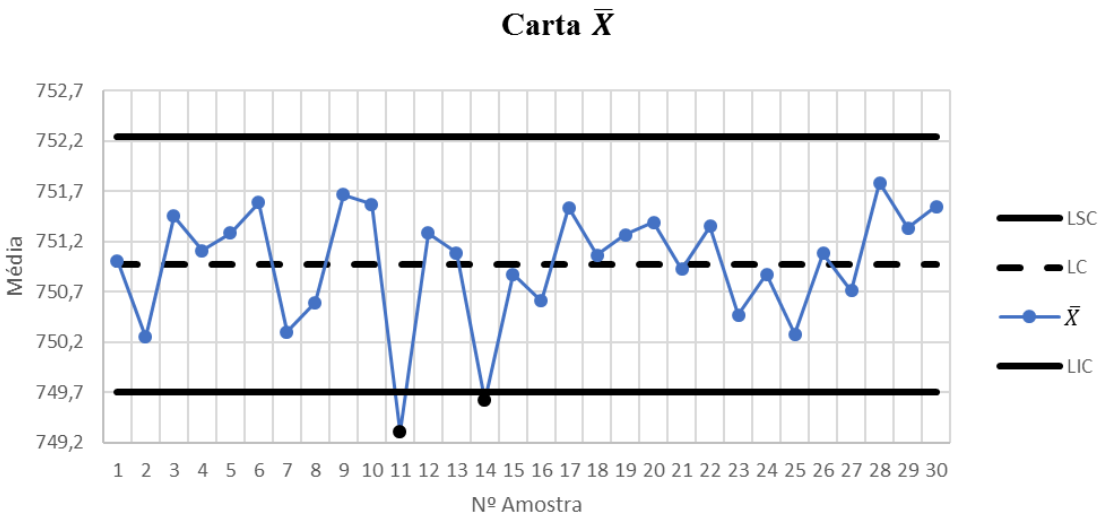

Figura E.9 - Carta da média do volume de enchimento para o produto GPC

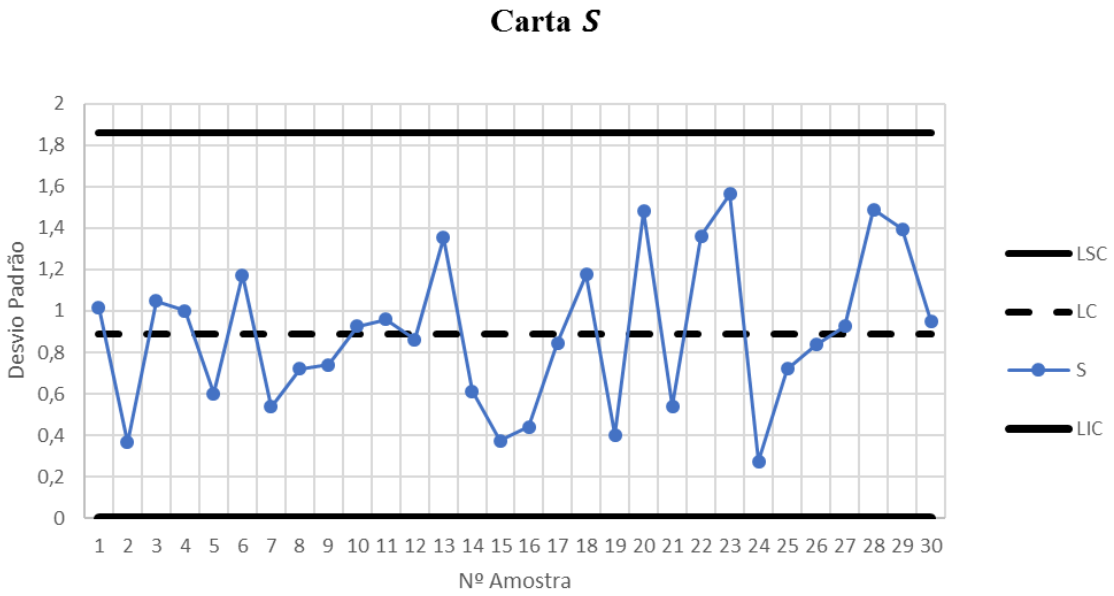

Figura E.10 - Carta do desvio padrão do volume de enchimento para o produto GPC

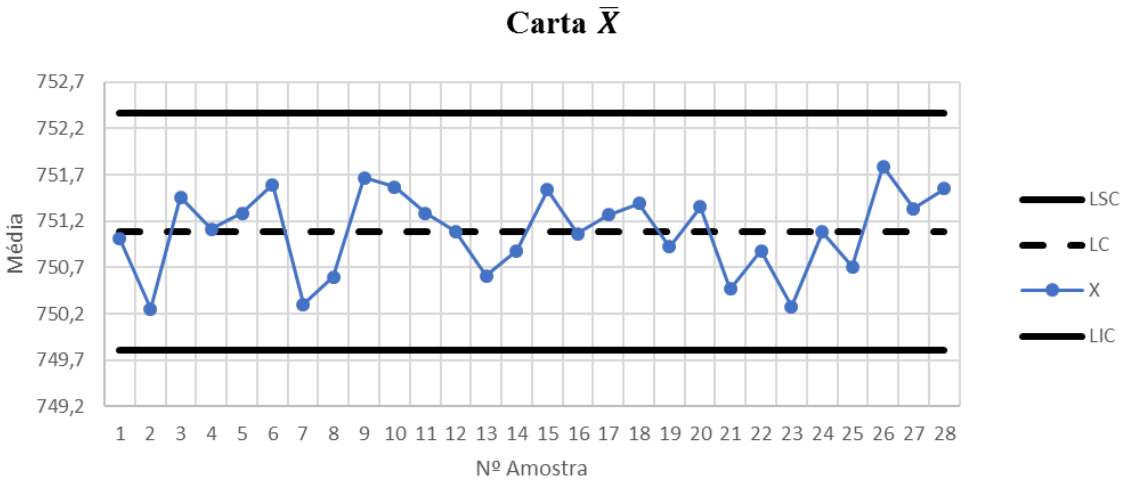

Figura E.11 - Carta revista da média do volume de enchimento para o produto GPC

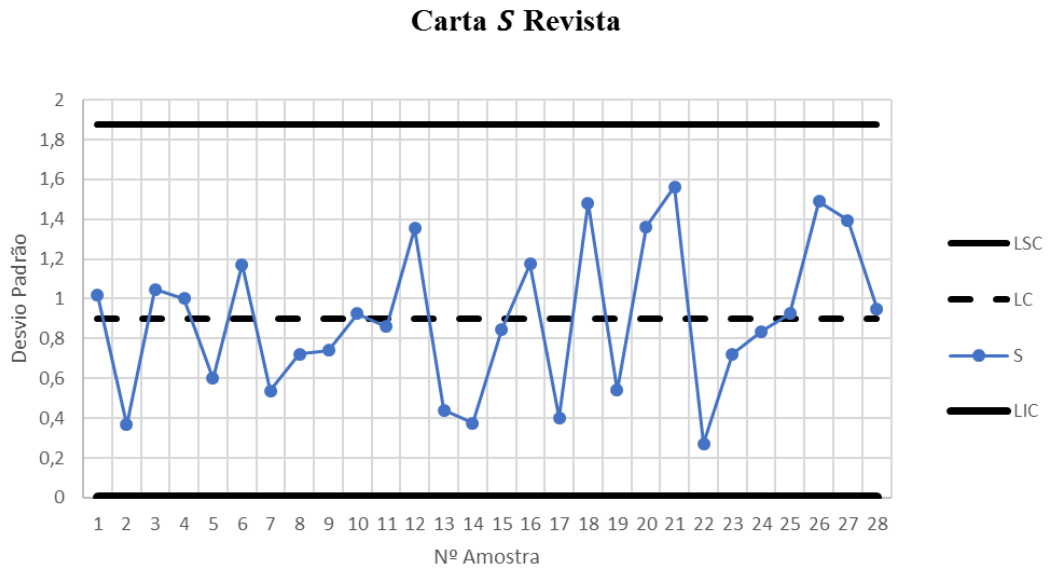

Figura E.12 - Carta revista do desvio padrão do volume de enchimento para o produto GPC

V. Produto GPC– Característica Torque na Cápsula de Vedação

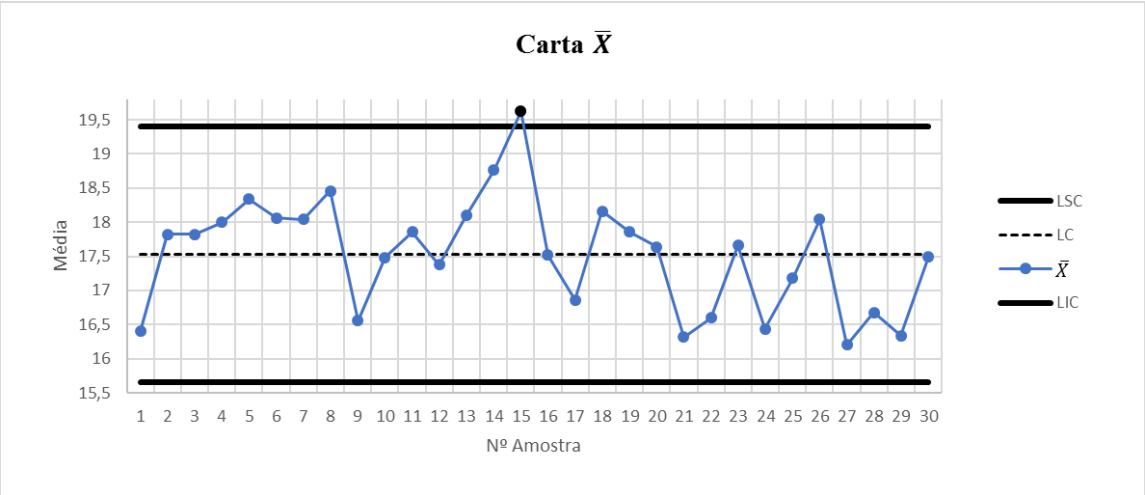

Figura E.13 - Carta da média do torque na cápsula para o produto GPC

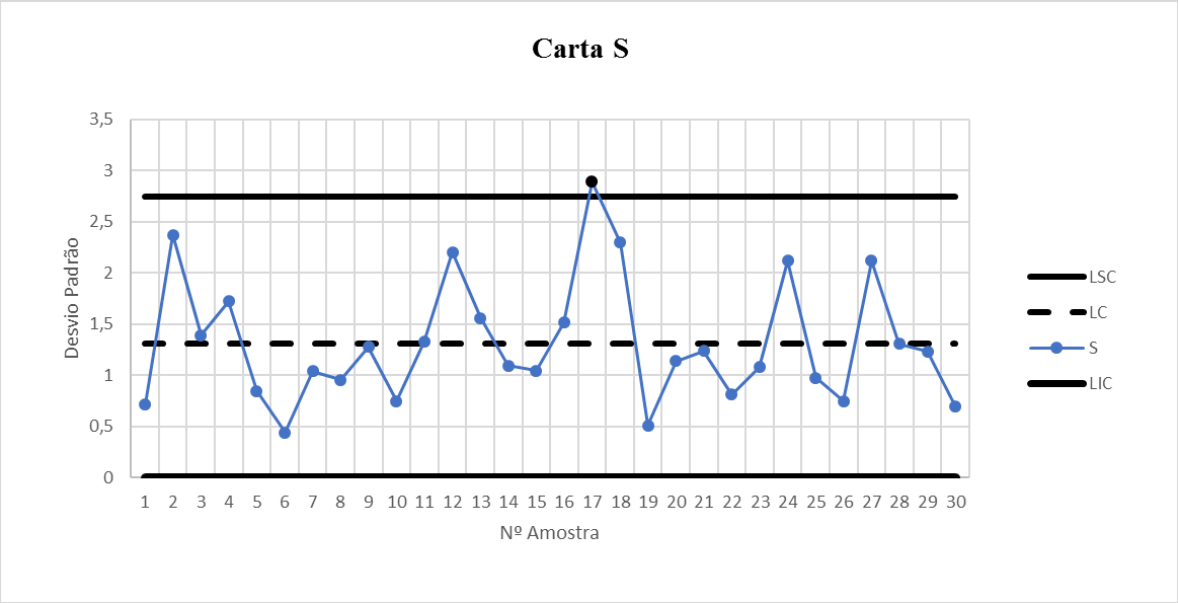

Figura E.14 - Carta do desvio padrão do torque na cápsula para o produto GPC

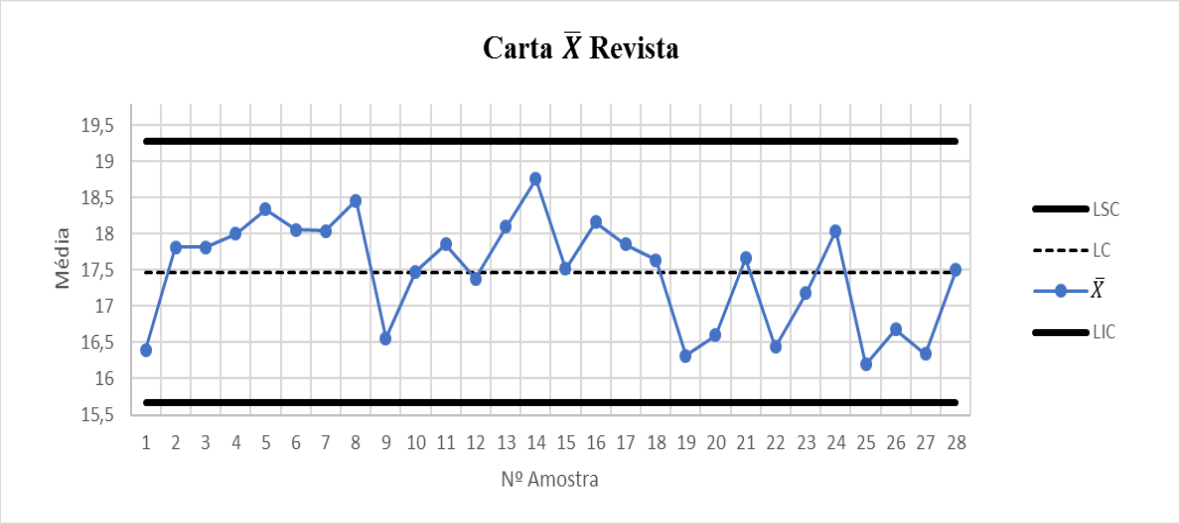

Figura E.15 - Carta revista da média do torque na cápsula para o produto GPC

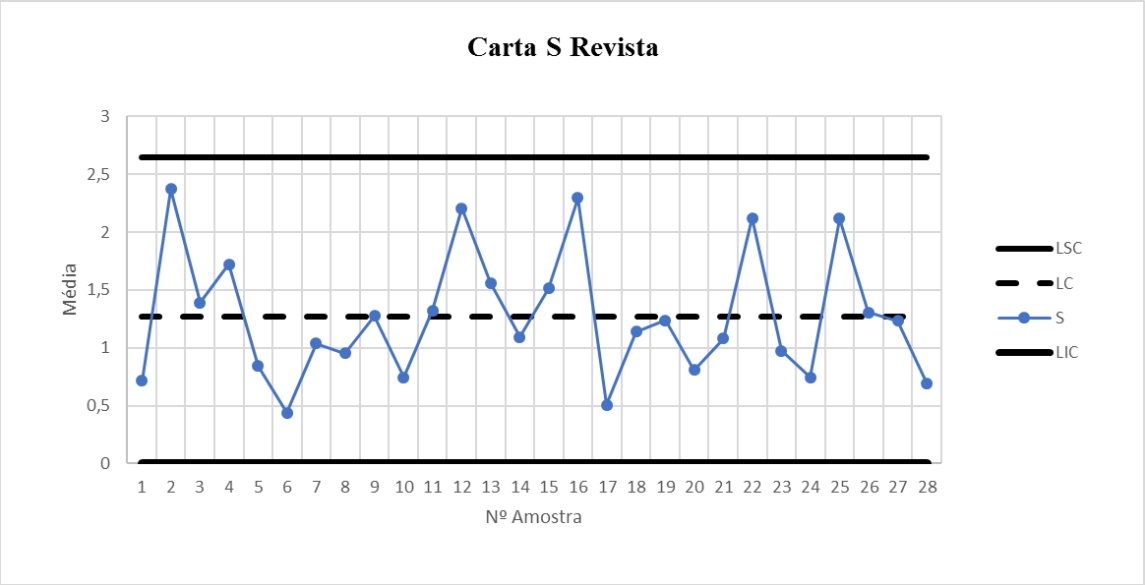

Figura E.16 - Carta revista do desvio padrão do torque na cápsula para o produto GPC

F. Figuras obtidas recorrendo ao software Statistica – Padrões não aleatórios

I. Produto GPA

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPA - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet14) X-bar Chart Center line: 753,265505 Sigma: 0,601616	
	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.1 - Padrões não aleatórios da carta da média do volume para o produto GPA

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPA - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet14) S Chart Center line: 1,264520 Sigma: 0,459020	
	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.2 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão do volume para o produto GPA

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPA - Torque ; Runs Tests (Spreadsheet59) X-bar Chart Center line: 16,962667 Sigma: 0,769041	
	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.3 - Padrões não aleatórios da carta da média do torque para o produto GPA

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPA-Torque ; Runs Tests (Spreadsheet59) S Chart Center line: 1,616426 Sigma: 0,586761	
	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.4 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão do torque para o produto GPA

II. Produto GPB

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPB - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet76 in Workbook2) X-bar Chart Center line: 750,364493 Sigma: 0,522745	
	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.5 - Padrões não aleatórios da carta da média do volume para o produto GPB

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPB - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet76 in Workbook2) S Chart Center line: 1,098743 Sigma: 0,398843	
	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.6 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão do volume para o produto GPB

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPB - Torque ; Runs Tests (Spreadsheet67) X-bar Chart Center line: 14,707333 Sigma: 0,556634				
	from sample	to sample			
9 samples on same side of center	OK	OK			
6 samples in row in/decreasing	OK	OK			
14 samples alternating up & down	OK	OK			
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK			
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK			
15 samples in Zone C	OK	OK			
8 samples beyond Zone C	OK	OK			

Figura F.7 - Padrões não aleatórios da carta da média do torque para o produto GPB

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPB - Torque ; Runs Tests (Spreadsheet67) S Chart Center line: 1,169974 Sigma: 0,424700				
	from sample	to sample			
9 samples on same side of center	OK	OK			
6 samples in row in/decreasing	OK	OK			
14 samples alternating up & down	OK	OK			
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK			
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK			
15 samples in Zone C	OK	OK			
8 samples beyond Zone C	OK	OK			

Figura F.8 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão do torque para o produto GPB

III. Produto GPC

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPC - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet5) X-bar Chart Center line: 751,084010 Sigma: 0,426941 **from sample**	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.9 - Padrões não aleatórios da carta da média do volume para o produto GPC

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPC - Volume ; Runs Tests (Spreadsheet5) S Chart Center line: 0,897376 Sigma: 0,325747 **from sample**	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.10 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão do volume para o produto GPC

Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	GPC - Torque ; Runs Tests (Spreadsheet10) X-bar Chart Center line: 17,472143 Sigma: 0,602338 **from sample**	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura F.11 - Padrões não aleatórios da carta da média do torque para o produto GPC

	GPC - Torque ; Runs Tests (Spreadsheet10) S Chart Center line: 1,266038 Sigma: 0,459571				
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	**from sample**	to sample			
9 samples on same side of center	OK	OK			
6 samples in row in/decreasing	OK	OK			
14 samples alternating up & down	OK	OK			
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK			
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK			
15 samples in Zone C	OK	OK			
8 samples beyond Zone C	OK	OK			

Figura F.12 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão para o produto GPC

G. Figuras obtidas recorrendo ao software Statistica – Normalidade

I. Produto SPA

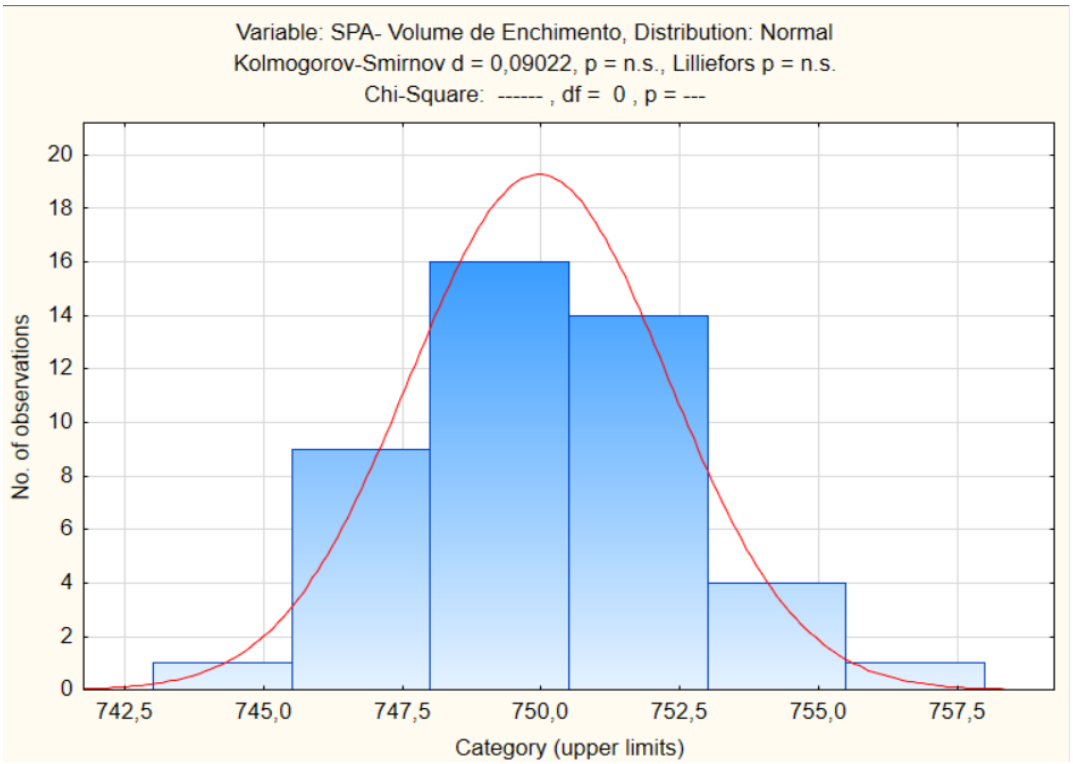

Figura G.1 - Normalidade dos dados relativos ao volume de enchimento do produto SPA

II. Produto SPB

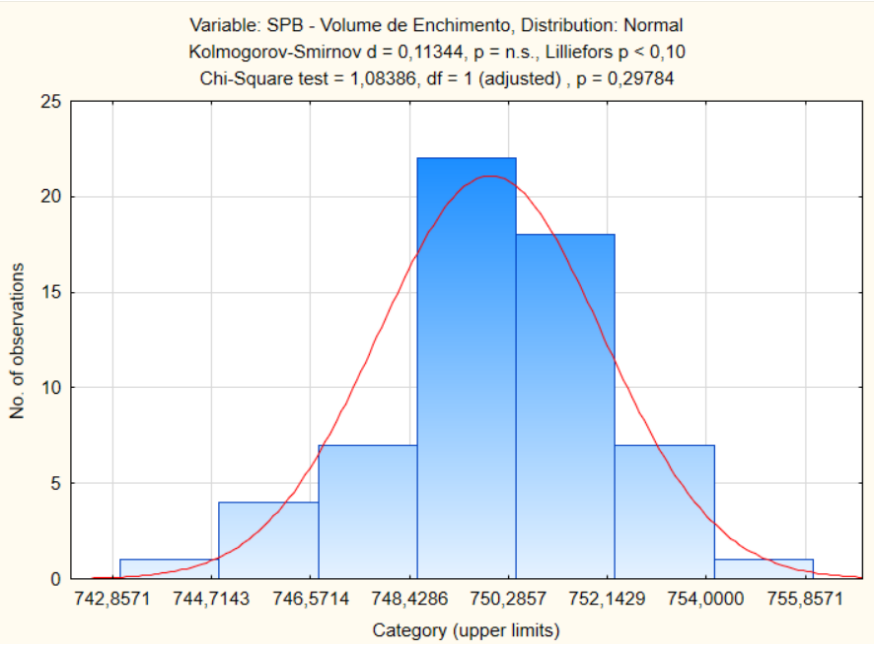

Figura G.2 - Normalidade dos dados relativos ao volume de enchimento do produto SPB

III. Produto CA

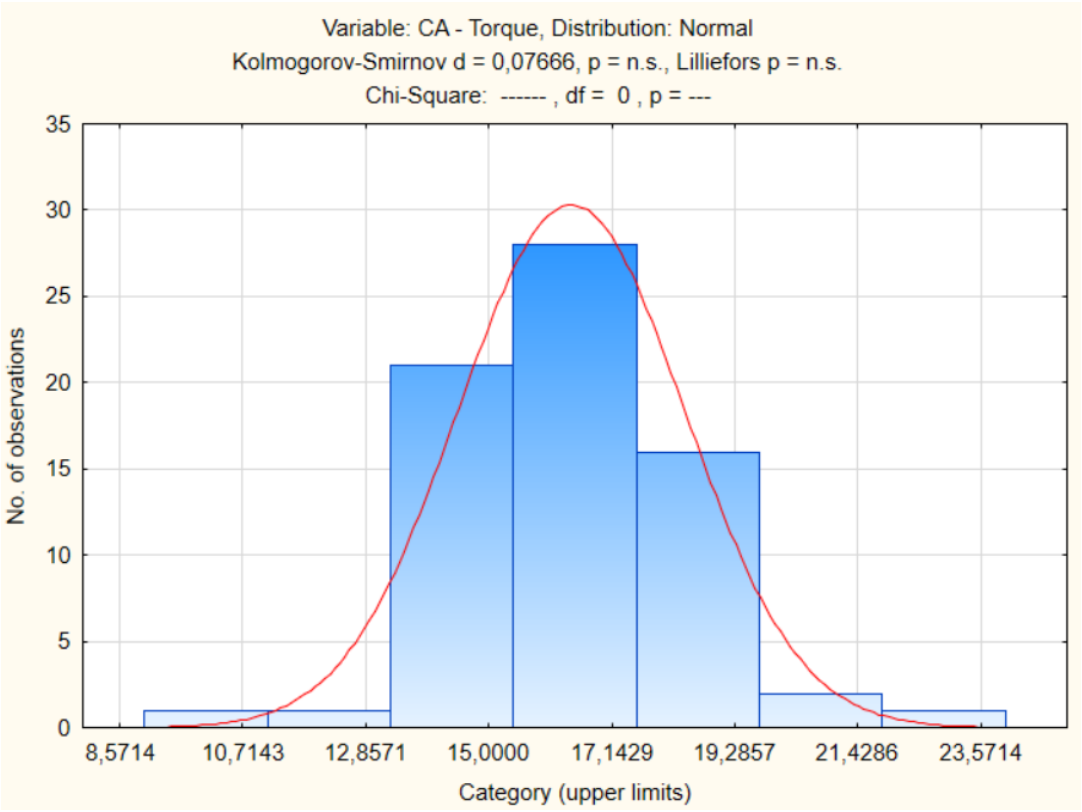

Figura G.3 - Normalidade dos dados relativos ao torque na cápsula para o produto CA

IV. Produto GPA

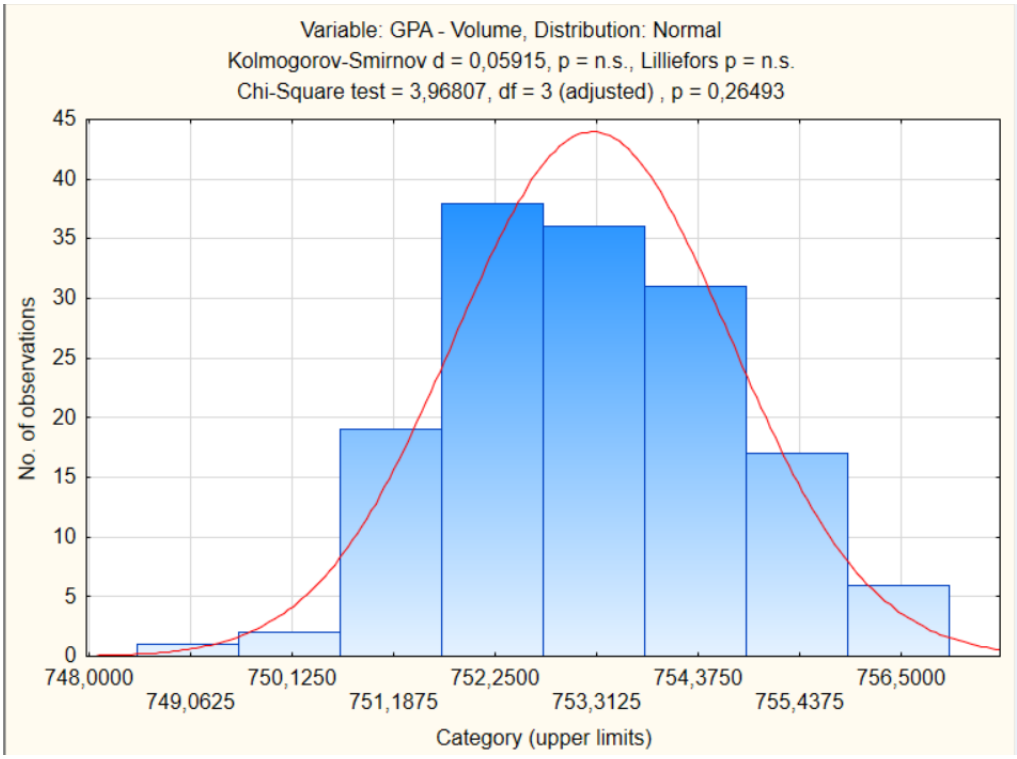

Figura G.4 - Normalidade dos dados relativos ao volume de enchimento para o produto GPA

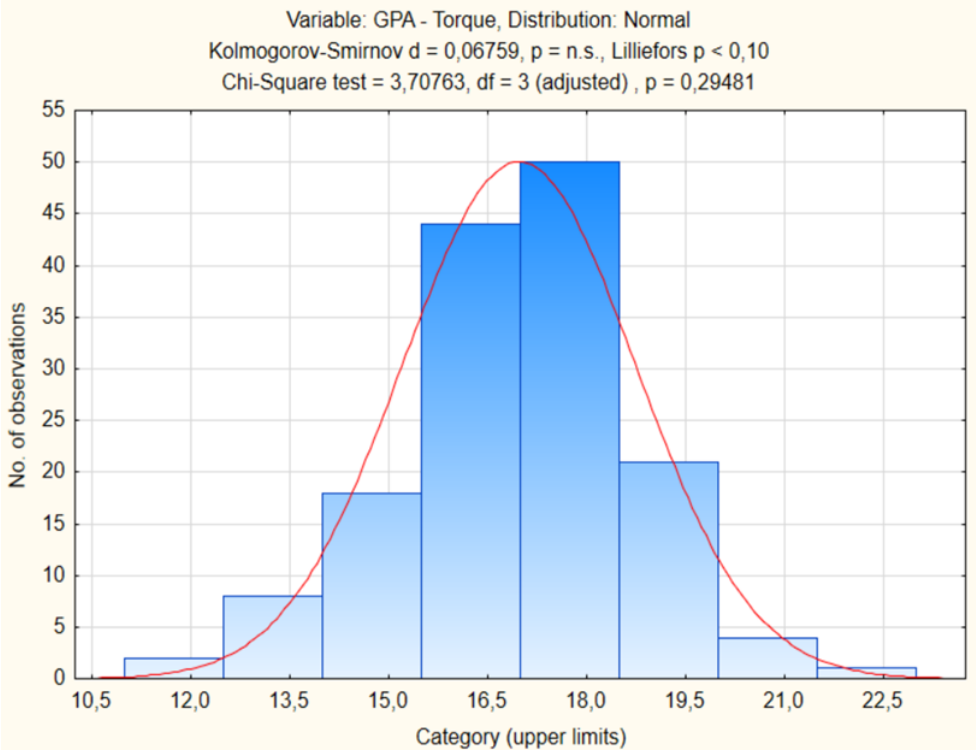

Figura G.5 - Normalidade dos dados relativos ao torque na cápsula para o produto GPA

V. Produto GPB

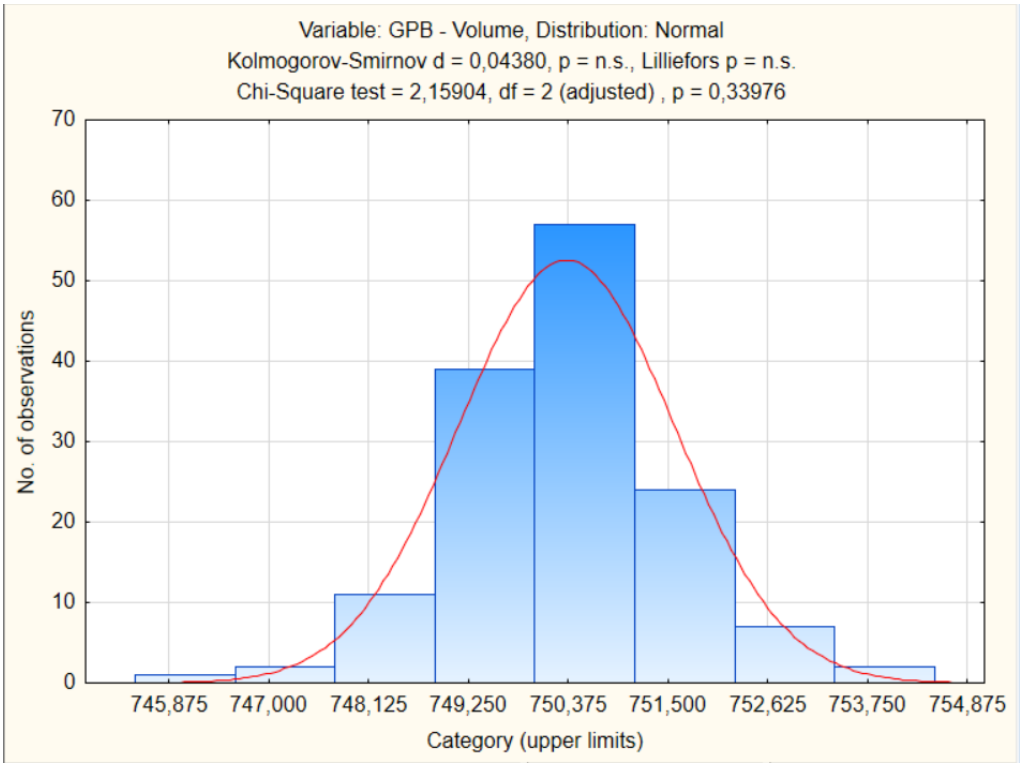

Figura G.6 - normalidade dos dados relativos ao volume de enchimento do produto GPB

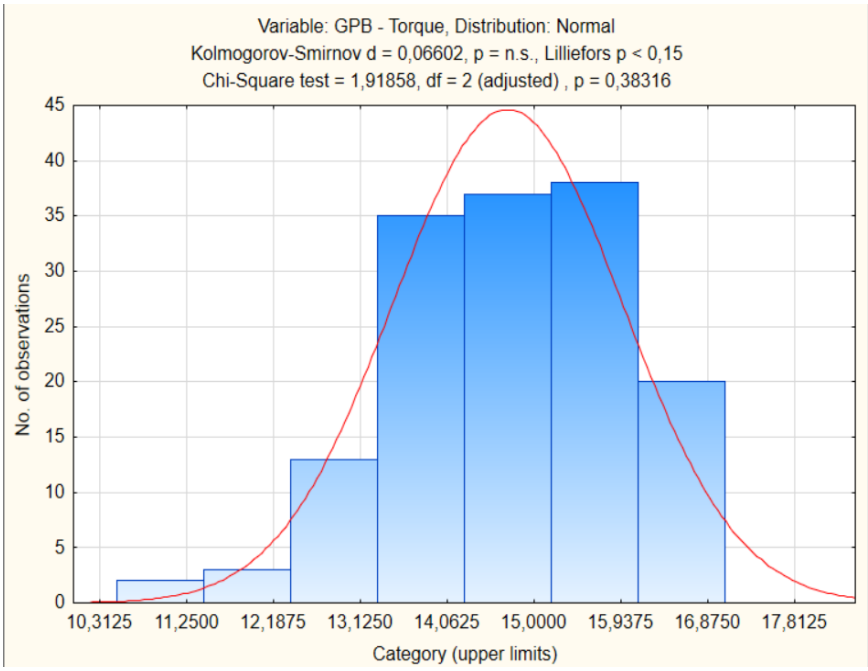

Figura G.7 - Normalidade dos dados relativos ao torque na cápsula para o produto GPB

VI. Produto GPC

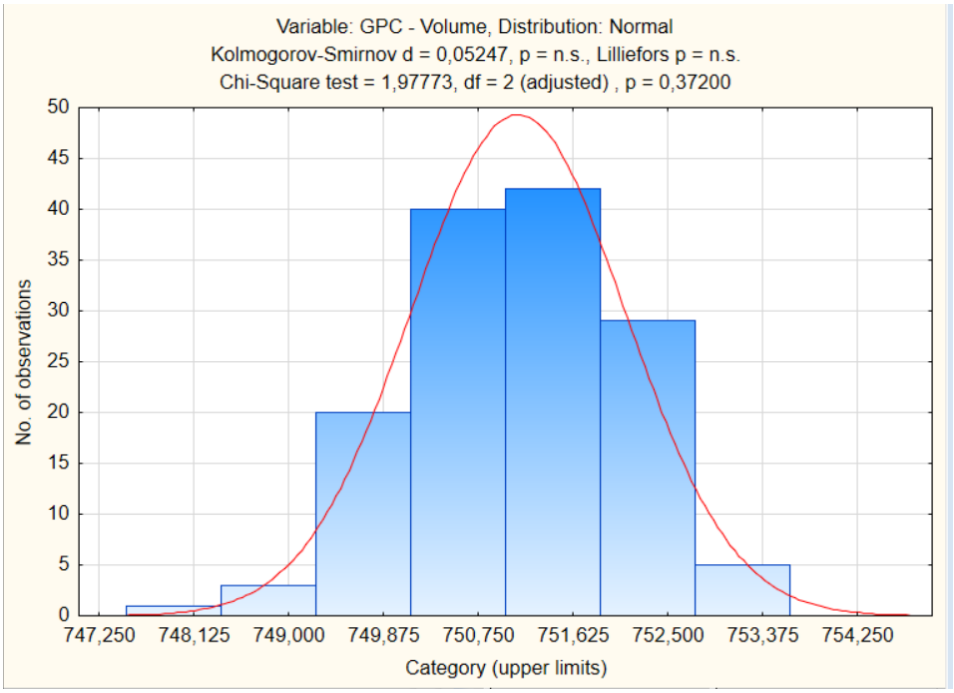

Figura G.8 - Normalidade dos dados relativos ao volume de enchimento para o produto GPC

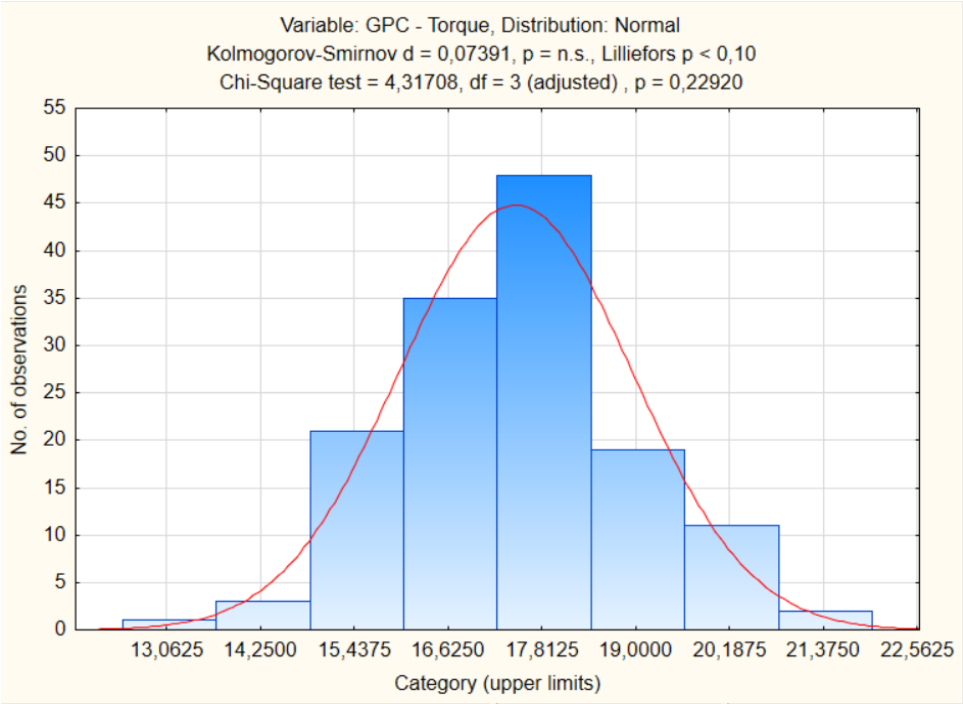

Figura G.9 - Normalidade dos dados relativos ao torque na cápsula para o produto GPC

H. Cartas de Controlo Multivariadas – Fase I

I. Produto GPA

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 753{,}2655 \\ 16{,}963 \end{bmatrix} \qquad S = \begin{bmatrix} 1{,}80206 & -0{,}09140 \\ -0{,}09140 & 3{,}10093 \end{bmatrix}$$

II. Produto GPB

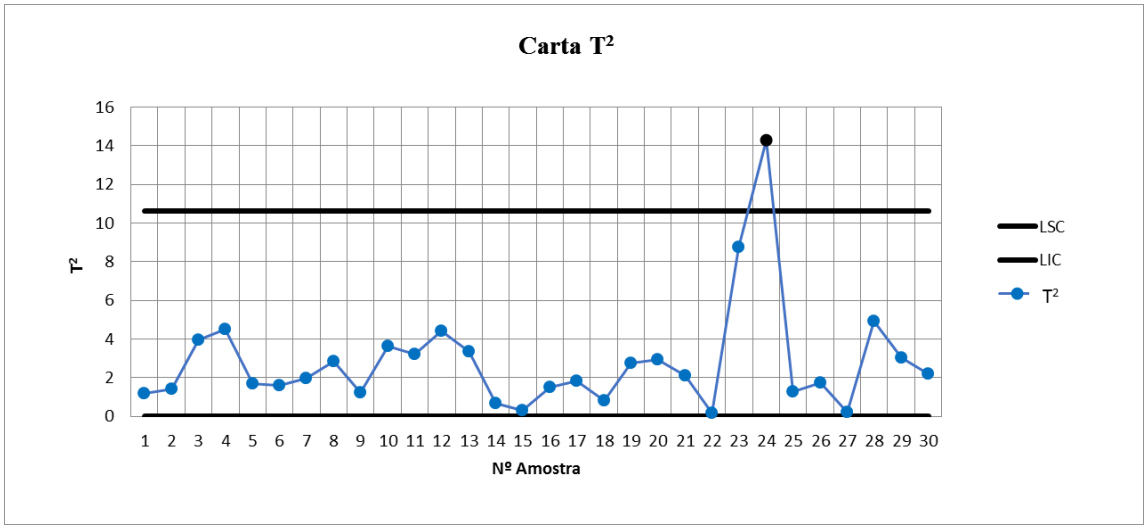

Figura H.1 - Carta multivariada da fase I para o produto GPB

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 750{,}4328 \\ 14{,}707 \end{bmatrix} \qquad S = \begin{bmatrix} 1{,}38248 & 0{,}03142 \\ 0{,}03142 & 1{,}49633 \end{bmatrix}$$

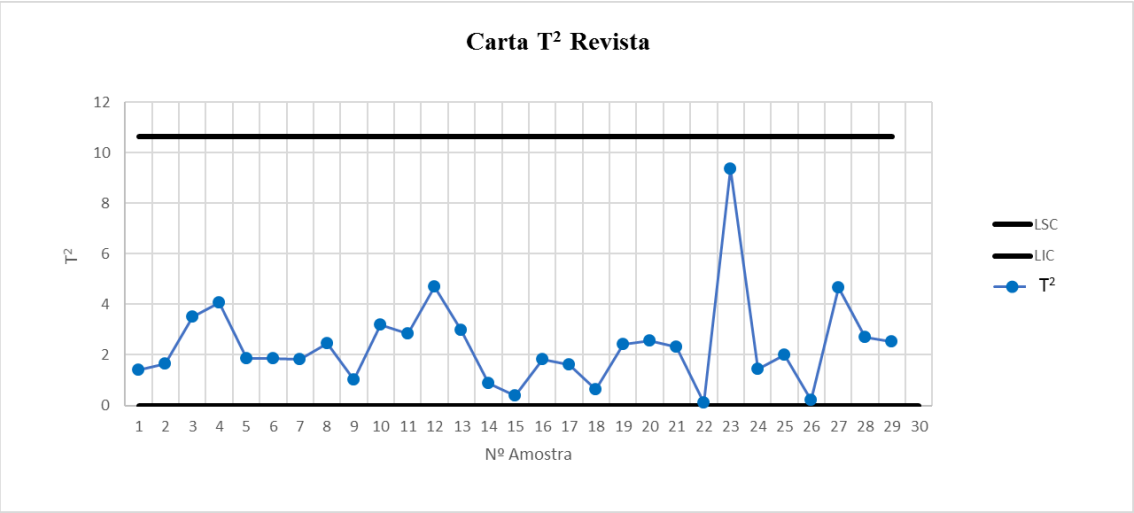

Figura H.2 - Carta multivariada revista da fase I para o produto GPB

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 750{,}3645 \\ 14{,}711 \end{bmatrix} \qquad S = \begin{bmatrix} 1{,}39886 & 0{,}03255 \\ 0{,}03255 & 1{,}52586 \end{bmatrix}$$

III. Produto GPC

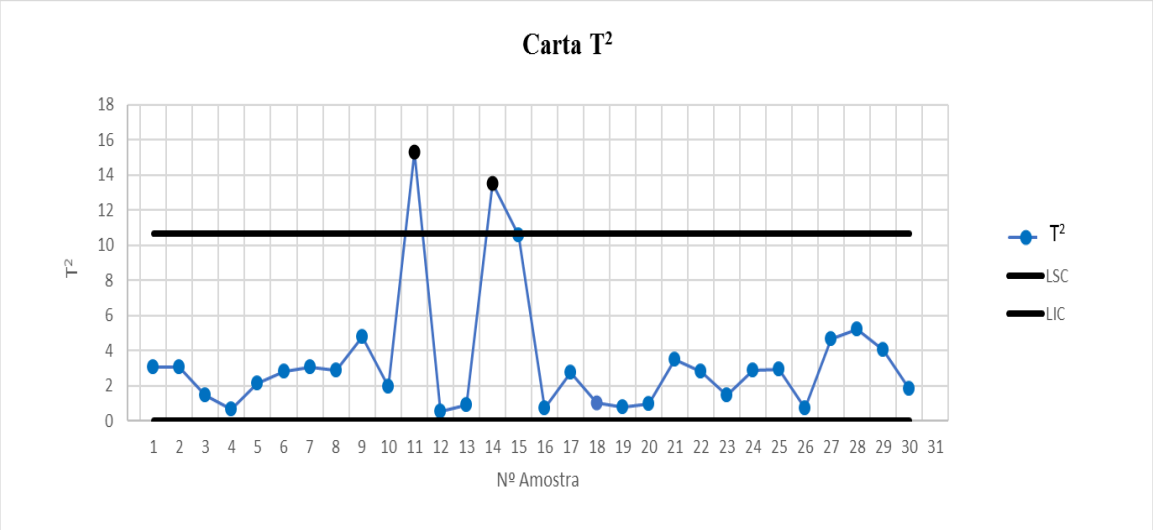

Figura H.3 - Carta multivariada da fase I para o produto GPC

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 750{,}9757 \\ 17{,}523 \end{bmatrix} \qquad S = \begin{bmatrix} 0{,}92292 & -0{,}02131 \\ -0{,}02131 & 2{,}08210 \end{bmatrix}$$

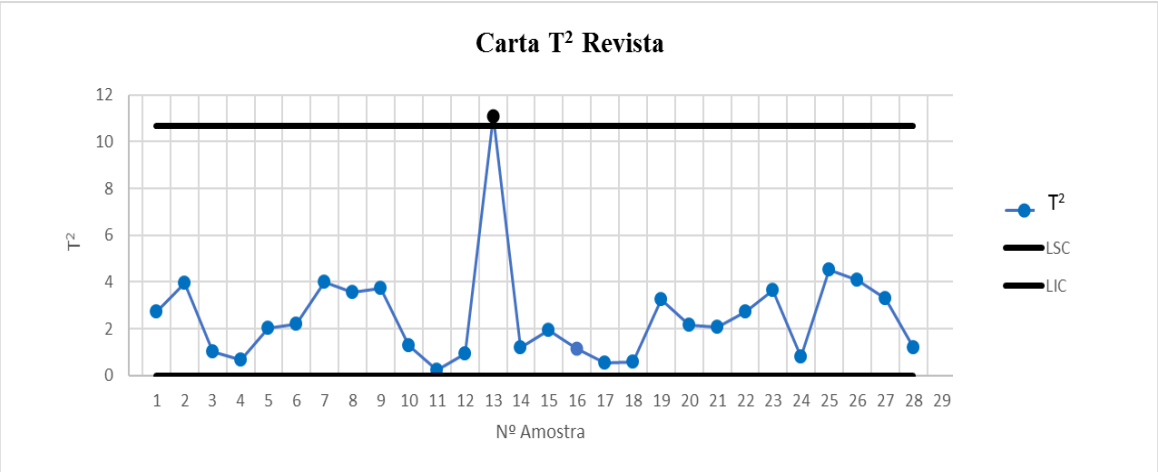

Figura H.4 - Carta multivariada revista da fase I para o produto GPC

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 751{,}0840 \\ 17{,}467 \end{bmatrix} \qquad S = \begin{bmatrix} 0{,}94260 & -0{,}00849 \\ -0{,}00849 & 2{,}12543 \end{bmatrix}$$

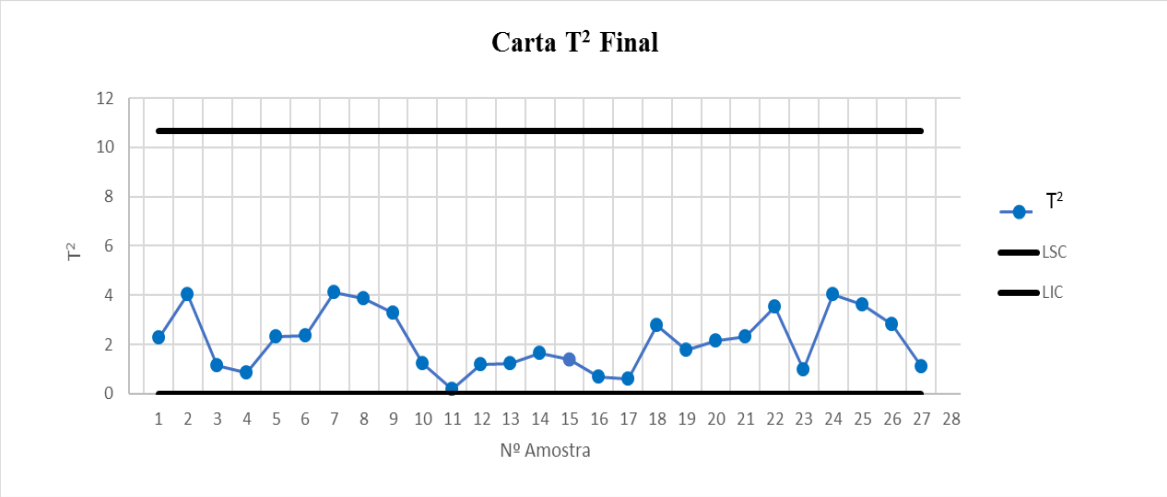

Figura H.5 - Carta multivariada final da fase I para o produto GPC

$$\bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 751{,}0916 \\ 17{,}387 \end{bmatrix} \qquad S = \begin{bmatrix} 0{,}97232 & -0{,}01678 \\ -0{,}01678 & 2{,}16370 \end{bmatrix}$$

I. Cartas de Controlo Multivariadas – Estudo de Capacidade dos Processos

I. Produto GPA

Tabela I.1 - Cálculos do estudo de capacidade produto GPA

Produto GPA	
LSP (Volume)	$LSP_1 = \mu_1 + \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_1^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 753{,}27 + 4{,}34 = 757{,}60$
LIP (Volume)	$LIP_1 = \mu_1 - \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_1^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 753{,}27 - 4{,}34 = 748{,}93$
LSP (Torque)	$LSP_2 = \mu_2 + \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_2^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 16{,}96 + 5{,}69 = 22{,}65$
LIP (Torque)	$LIP_2 = \mu_2 - \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_2^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 16{,}96 - 5{,}69 = 11{,}28$
CPM	$C_{pM} = \left(\dfrac{\prod_{i=1}^{p}\left(LSE_i - LIE_i\right)}{\prod_{i=1}^{p}\left(LSP_i - LIP_i\right)}\right)^{\frac{1}{p}} = \left(\dfrac{(760-740)\times(25-9)}{(757{,}60-748{,}93)\times(22{,}65-11{,}28)}\right)^{\frac{1}{2}} = 1{,}80$
PV	$PV = \left(29{,}61 > \dfrac{2\times(150-1)}{150-2}\right)F_{2,150-2} = 0{,}0000$

$$\bar{\bar{\mathbf{X}}} = \begin{matrix} 753{,}27 \\ 16{,}96 \end{matrix} \qquad \mathbf{S} = \begin{matrix} 1{,}80 & -0{,}09 \\ -0{,}09 & 3{,}10 \end{matrix}$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \begin{matrix} 0{,}56 & 0{,}016 \\ 0{,}016 & 0{,}32 \end{matrix}$$

II. Produto GPB

Tabela I.2 - Cálculos do estudo de capacidades do Produto GPB

Produto GPB	
LSP (Volume)	$LSP_1 = \mu_1 + \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_1^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 750{,}36 + 3{,}82 = 754{,}19$
LIP (Volume)	$LIP_1 = \mu_1 - \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_1^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 750{,}36 - 3{,}82 = 746{,}54$
LSP (Torque)	$LSP_2 = \mu_2 + \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_2^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 14{,}71 + 3{,}99 = 18{,}70$
LIP (Torque)	$LIP_2 = \mu_2 - \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\boldsymbol{\Sigma}_2^{-1}\right)}{\det(\boldsymbol{\Sigma}^{-1})}} = 14{,}71 - 3{,}99 = 10{,}72$
CPM	$C_{pM} = \left(\dfrac{\prod_{i=1}^{p}\left(LSE_i - LIE_i\right)}{\prod_{i=1}^{p}\left(LSP_i - LIP_i\right)}\right)^{\frac{1}{p}} = \left(\dfrac{(754-744)\times(22-8)}{(754{,}19-746{,}54)\times(18{,}70-10{,}72)}\right)^{\frac{1}{2}} = 1{,}66$
PV	$PV = \left(0{,}765 > \dfrac{2\times(145-1)}{145-2}\right) F_{2,145-2} = 0{,}6847$

$$\bar{\bar{\mathbf{X}}} = \begin{matrix} 750{,}36 \\ 14{,}707 \end{matrix} \qquad \mathbf{S} = \begin{matrix} 1{,}40 & 0{,}03 \\ 0{,}03 & 1{,}53 \end{matrix}$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \begin{matrix} 0{,}72 & -0{,}015 \\ -0{,}015 & 0{,}66 \end{matrix}$$

III. Produto GPC

Tabela I.3 - Cálculos do estudo de capacidade do produto GPC

Produto GPC	
LSP (Volume)	$LSP_1 = \mu_1 + \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\mathbf{\Sigma}_1^{-1}\right)}{\det(\mathbf{\Sigma}^{-1})}} = 751{,}09 + 3{,}19 = 754{,}28$
LIP (Volume)	$LIP_1 = \mu_1 - \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\mathbf{\Sigma}_1^{-1}\right)}{\det(\mathbf{\Sigma}^{-1})}} = 751{,}09 - 3{,}19 = 747{,}91$
LSP (Torque)	$LSP_2 = \mu_2 + \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\mathbf{\Sigma}_2^{-1}\right)}{\det(\mathbf{\Sigma}^{-1})}} = 17{,}39 + 4{,}75 = 22{,}14$
LIP (Torque)	$LIP_2 = \mu_2 - \sqrt{\dfrac{\chi^2_{\alpha;p}\det\left(\mathbf{\Sigma}_2^{-1}\right)}{\det(\mathbf{\Sigma}^{-1})}} = 17{,}39 - 4{,}75 = 12{,}63$
CPM	$C_{pM} = \left(\dfrac{\prod_{i=1}^{p}\left(LSE_i - LIE_i\right)}{\prod_{i=1}^{p}\left(LSP_i - LIP_i\right)}\right)^{\frac{1}{p}} = \left(\dfrac{(760-740)\times(25-9)}{(754{,}28-747{,}91)\times(22{,}14-12{,}63)}\right)^{\frac{1}{2}} = 2{,}30$
PV	$PV = \left(6{,}51 > \dfrac{2\times(135-1)}{135-2}\right)F_{2,135-2} = 0{,}0423$

$$\bar{\bar{\mathbf{X}}} = \begin{matrix} 751{,}09 \\ 17{,}39 \end{matrix} \qquad \mathbf{S} = \begin{matrix} 0{,}97 & -0{,}017 \\ -0{,}017 & 2{,}16 \end{matrix}$$

$$\mathbf{S}^{-1} = \begin{matrix} 1{,}03 & 0{,}008 \\ 0{,}008 & 0{,}46 \end{matrix}$$

J. Equipamento de medição

Figura J.1 – Balança Digital

Figura J.2 - Torquímetro