



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MONITORAMENTO DO CONTROLE ESTATÍSTICO
DO PROCESSO UTILIZANDO FERRAMENTAS
ESTATÍSTICAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sandro Luís Moresco Martins

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**MONITORAMENTO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO
PROCESSO UTILIZANDO FERRAMENTAS
ESTATÍSTICAS**

por

Sandro Luís Moresco Martins

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração em Qualidade e Produtividade, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Produção.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Leoni Pentiado Godoy

Santa Maria, RS, Brasil

2011

M386m Martins, Sandro Luís Moresco
 Monitoramento do controle estatístico do processo utilizando
 ferramentas estatísticas / por Sandro Luís Moresco Martins. – 2011.
 94 f. ; il. ; 30 cm

 Orientador: Leoni Pentiado Godoy
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro
 de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção,
 RS, 2011

 1. Engenharia de produção 2. Indústria fumageira 3. ACP 4. EWMA
 I. Godoy, Leoni Pentiado II. Título.

 CDU 658.511.3:663.97

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

© 2011

Todos os direitos autorais reservados a Sandro Luís Moresco Martins. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço Eletrônico: sandro.santiago.rs@gmail.com

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

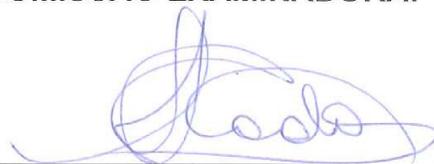
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**MONITORAMENTO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO
PROCESSO UTILIZANDO FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS**

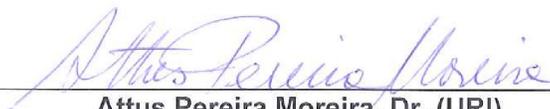
elaborada por
Sandro Luís Moresco Martins

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Produção

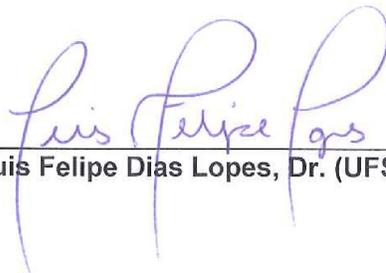
COMISSÃO EXAMINADORA:



**Leoni Pentiado Godoy, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)**



Attus Pereira Moreira, Dr. (URI)



Luis Felipe Dias Lopes, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 14 março de 2011

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar meu caminho e sempre me dar forças para seguir adiante;

À Prof. Dra. Leoni Pentiado Godoy, pela orientação e experiência disponibilizada a este trabalho e muitos outros, e principalmente pela sua amizade;

Ao Prof. Dr. Luis Felipe Dias Lopes, pela orientação dispensada a este trabalho;

Ao Prof. Dr. Alberto de Souza Schimdt, sempre disposto a ajudar e a transmitir seus conhecimentos;

Aos demais professores e colaboradores do PPGEF da UFSM;

Aos colegas de mestrado pelo companheirismo, amizade e aprendizado em equipe;

À banca examinadora pela contribuição de sugestões e melhorias dadas a esta pesquisa;

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo auxílio financeiro.

Aos meus pais, Fernando e Cleusa, que tanto me incentivaram nessa árdua caminhada;

Enfim, a todos que, de uma forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

MONITORAMENTO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO UTILIZANDO FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

AUTOR: Sandro Luís Moresco Martins
ORIENTADORA: Leoni Pentiado Godoy, Dra
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 14 de março de 2011.

O presente estudo utilizou-se dos dados de uma empresa fumageira que monitora o processo produtivo por meio do controle estatístico do processo. Objetivou-se a aplicação de ferramentas estatísticas multivariadas de Controle Estatístico do Processo, para monitorar a eficiência do processo produtivo da empresa em estudo. Esse processo produtivo é composto de quatro variáveis, monitoradas na fase de fabricação do cigarro, sendo: RDT (*Resistance to Draw*), peso, ventilação e circunferência. Esses dados foram verificados através da estatística descritiva, Teste de Normalidade, gráficos univariados X-barra e R, e Matriz de correlação. Após constatada a instabilidade do sistema, aplicou-se Análise de Componentes Principais – ACP, técnica de análise exploratória multivariada com o objetivo de aglutinar várias características das variáveis significativas na instabilidade do processo produtivo. Por último, foi aplicado EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average* - Médias Móveis Exponencialmente Ponderáveis) sobre as componentes principais. Demonstrou-se um processo instável, apresentando muita variabilidade, com muitos pontos fora dos limites de controle estatístico. Essa situação, apresenta alguns problemas, que geram transtornos e prejuízos à empresa, sendo que a mesma deverá rever seu processo fabril a fim de melhorar a produtividade e a qualidade, que contribuirá para tornar a empresa mais competitiva.

Palavras-chaves: empresa fumageira, ACP; EWMA.

ABSTRACT

Master's Degree Thesis
Post-Graduate Program in Production Engineering
Federal University of Santa Maria

MONITORING OF STATISTICAL PROCESS CONTROL USING STATISTICAL TOOLS

Author: Sandro Luís Moresco Martins
Advisor: Leoni Pentiado Godoy, Dra.
Submission: Santa Maria, March 14th, 2011

This study used the data from a tobacco company that monitors its production process through statistical process control. The objective of this study was to apply multivariate statistical tools of Statistical Process Control to monitor the efficiency of the production process of the company under study. This production process consists of four variables monitored during the manufacture of cigarettes: RDT (Resistance to Draw), weight, ventilation and circumference. These data were verified using descriptive statistics, test of normality, univariate R and X-bar charts and correlation matrix. After observing the instability of the system, the Principal Component Analysis (PCA) was applied. PCA is an exploratory multivariate analysis technique that aims at gathering various features of the significant variables in the instability of the production process. EWMA was then applied on the principal components. An unstable process presenting too much variability was observed, with several points outside the bounds of statistical control. This situation presents some problems that may cause inconvenience and loss to the company. This way, the company should review its manufacturing process in order to improve its productivity and quality that in turn may help the company to be more competitive.

Keywords: tobacco company, PCA, EWMA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estratégia para melhorias no CEP	36
Figura 2 - Carta de Controle	37
Figura 3 - Gráfico de Controle com padrão cíclico	45
Figura 4 - Gráfico de Controle com padrão mudança de média	45
Figura 5 - Gráfico de Controle com tendência linear	46
Figura 6 - Esquema da aplicação da Análise de Componentes Principais	59
Figura 7 - Representação gráfica dos autovalores e autovetores	62
Figura 8 - Fluxograma da fabricação do cigarro	69
Figura 9 - Histograma da Variável <i>RTD</i>	73
Figura 10 - Histograma da Variável Peso	73
Figura 11 - Histograma da Variável Ventilação	74
Figura 12 - Histograma da Variável Circunferência	74
Figura 13 - Gráfico X- barra da Variável <i>RTD</i>	75
Figura 14 - Gráfico X-barra e R da variável Peso.....	76
Figura 15 - Gráfico X-barra e R da variável Ventilação	76
Figura 16 - Gráfico X-barra e R da variável Circunferência	77
Figura 17 - Gráfico representativo dos Auto Valores	79
Figura 18 - Gráfico X-barra para a primeira componente principal.....	80
Figura 19 - Gráfico <i>EWMA</i> para a primeira <i>CP</i> com $\lambda= 0,05$ e $L = 2,5$	81
Figura 20 - Teste de Seqüência (Run Test)	82
Figura 21 - Gráfico X-barra para a segunda componente principal.....	83
Figura 22 - Gráfico <i>EWMA</i> para a segunda <i>CP</i> com $\lambda= 0,05$ e $L = 2,5$	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores das constantes d_2 e A_2	41
Quadro 2 - Valores da Constante E_2	42
Quadro 3 - Matriz de correlação das variáveis envolvidas no processo	77
Quadro 4 - Matriz de correlação das variáveis com as componentes principais	79
Quadro 5 - Teste de Seqüência da primeira CP	82
Quadro 6 - Teste de Seqüência da segunda CP	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>ARL</i> para diversos esquemas de <i>EWMA</i> com ARL_0 500	53
Tabela 2 - <i>ARL</i> para gráficos de controle Shewhart, <i>CUSUM</i> e <i>EWMA</i>	54
Tabela 3 - Estatística Descritiva	72
Tabela 4 - Resultados da Soma dos Quadrados Extraídos (Extração da Componente Principal)	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP - Análise de Componentes Principais

ARL- *Average Run Length* - comprimento médio da corrida até o alarme

ASQC - *American Society for Quality Control* (Sociedade Americana para o Controle da Qualidade)

CEP - Controle Estatístico do Processo

CP - Componentes Principais

CUSUM – *Cumulative Sum Control Charts* (Gráfico das Somas Acumuladas)

EWMA – *Exponentially Weighted Moving Average* (Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas)

FIR - Resposta Inicial Rápida

INC - incremento

JUSE - *Japanese Union of Scientists and Engineers* (União dos Cientistas e Engenheiros Japoneses)

KMO - *Kaiser-Meyer-Olkin*

LC - Linha Central

LIC - Limite Inferior de Controle

LSC - Limite Superior de Controle

ND - Número de Desvios

PCA - *Principal Component Analysis*

PDCA – (*Plan, Do, Check, Act*) – Planejar, Fazer, Corrigir, Agir

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização do tema	13
1.2 Tema e problema	14
1.3 Justificativa	15
1.4 Objetivos	16
1.4.1 Objetivo Geral	16
1.4.2 Objetivos Específicos	17
1.5 Limitação da pesquisa	17
1.6 Estrutura do trabalho	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Gestão da qualidade	19
2.1.1 Evolução da qualidade	19
2.1.2 Pesquisadores da qualidade	24
2.1.3 Conceitos da qualidade	28
2.2 Controle Estatístico do Processo	31
2.2.1 Histórico	31
2.2.2 Fundamentos do controle estatístico de processos	33
2.2.3 Cartas de controle para variáveis	36
2.2.4 Cálculo dos limites de controle	39
2.2.5 Interpretação da estabilidade do processo	43
2.2.6 Tipos de erros em gráficos de controle	46
2.3 Gráficos de controle multivariado	48
2.3.1 Gráfico de controle <i>EWMA</i>	49
2.3.2 Projeto dos gráficos de controle <i>EWMA</i>	56
2.4 Análise de Componentes Principais	58
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	64
3.1 Caracterização da empresa	65
3.1.1 Empresa de tabaco “X”	65
3.1.2 História do tabaco	66
3.1.3 O cultivo do fumo	67
3.1.4 Fabricação do cigarro	68

3.1.5 Variáveis do estudo	70
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	72
4.1 Análise gráfica da primeira CP através dos gráficos X-barra e EWMA	80
4.2 Análise gráfica da segunda CP através dos gráficos X-barra e EWMA.....	83
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e o acirramento da competição estão desencadeando uma busca na melhoria da qualidade e produtividade dos processos produtivos e, conseqüentemente, aperfeiçoamentos nos produtos finais. Atualmente, a sobrevivência do setor industrial está substancialmente baseada na melhoria contínua de seus processos e produtos.

1.1 Contextualização do tema

Neste contexto, diante da velocidade com que as mudanças tecnológicas se apresentam a utilização de ferramentas estatísticas, cada vez mais específicas, direcionadas ao aperfeiçoamento da qualidade, têm sido incrementada na maior parte das organizações para elevar os níveis de qualidade, buscando reduzir custos, permitindo, em longo prazo, a sobrevivência e o aumento da participação no mercado.

Nesta pesquisa, utilizaram-se dados provenientes de técnicas de controle estatístico do processo com abordagem univariada. Os gráficos de controle mais freqüentemente utilizados pelas empresas são gráficos de controle univariados, pois sempre tiveram uma ampla divulgação na literatura e seu emprego sempre foi mais acessível para os operadores.

Para Souza (2000), Malhotra (2001), Johnson e Wichern (2002), a análise multivariada é uma ferramenta estatística que processa as informações, de modo a simplificar a estrutura dos dados e a sintetizar essas informações, quando o número de variáveis envolvidas é muito grande, facilitando o entendimento do relacionamento existente entre as variáveis do processo.

A média móvel ponderada exponencialmente (*EWMA - Exponentially Weighted Moving Average*) tem encontrado aplicações em um grande número de diferentes áreas. É conhecida por evidenciar prognósticos rápidos e eficientes. Monitora pequenas mudanças na média de uma seqüência de observações independentes de sua normalidade. Outra ferramenta é a Análise de Componentes Principais (ACP), uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis num conjunto substancialmente menor

de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original.

Deve-se ressaltar que a análise de componentes principais proporciona a redução das variáveis a serem investigadas, mas principalmente verifica a identificação da variável ou conjunto de variáveis possivelmente causadoras de instabilidade no sistema.

A partir destas técnicas, busca-se analisar com eficiência os dados univariados da empresa em estudo, verificando o comportamento das variáveis principais, possibilitando aos gestores empresariais tomar decisões eficientes toda a vez que resultados gerados da análise de um conjunto de dados, apresentam variabilidade no processo.

1.2 Tema e problema

O tema da presente pesquisa é o controle estatístico multivariado, sendo que a empresa em estudo apresenta a monitoração do processo através do CEP (Controle Estatístico do Processo). As medidas obtidas nesse processo que seriam analisadas com a finalidade de verificar os desvios do processo, através de controles univariados, podem ter como base o estudo por meio de controles multivariados.

Controlar a qualidade faz parte do dia a dia dos gestores de empresas, portanto, a análise das medidas obtidas por meio de controles multivariados facilita a identificação das variáveis geradoras da falta de controle no processo. Nesta pesquisa, o problema proposto é de analisar a eficiência do controle multivariado através de dados levantados no CEP implantado na empresa em estudo; e, mostrando a contribuição dos gráficos de controle *EWMA* e Análise dos Componentes Principais para a melhoria contínua da qualidade.

Assim, a presente pesquisa apresenta uma análise de controles multivariados, sem que haja necessidade de ajuste, em todas as variáveis envolvidas no sistema, mas somente naquelas que apresentam uma situação de instabilidade, utilizando dados levantados em processos com controles univariados e multivariados.

1.3 Justificativa

O acirramento da concorrência nos mercados, tanto nacional como internacional, é cada vez maior. A globalização e a abertura de novos mercados exigem das indústrias incremento em sua competitividade, obtida por meio da qualidade nos processos produtivos. Nos últimos anos a qualidade tornou-se um tema central nas estratégias de negócios no cenário empresarial cada vez mais competitivo e clientes mais exigentes.

Além disso, a qualidade passou a ser um fator de decisão básico na escolha de produtos e serviços pelo cliente. Conseqüentemente, a qualidade é um dos fatores principais para o sucesso, o crescimento e vantagens competitivas das empresas no mercado. A melhoria contínua da qualidade de produtos, processos e serviços, vem sendo auxiliada por técnicas estatísticas, usadas nas indústrias e que auxiliam o controle de qualidade do processo como um todo.

Dessa forma, o interesse pela aplicação de métodos estatísticos tem aumentado em ritmo acelerado sem precedentes, devido à facilidade da aplicação de recursos computacionais como principal ferramenta na análise de dados.

O CEP proporciona melhores resultados, já que faz uso de métodos estatísticos em todos os estágios de desenvolvimento do processo produtivo, através da monitoração contínua da qualidade dos produtos, possibilitando a identificação das variáveis fora de controle, fazendo com que este, cada vez mais, desempenhe um papel de destaque.

Nas indústrias, o CEP é utilizado para avaliar variáveis que controlam o desempenho do processo, sendo que o monitoramento é realizado, através do uso de gráficos de controle univariados. Para uma resposta mais rápida diante da quantidade de informações geradas o ideal é a utilização de Gráficos de Controle Multivariado, o que se torna mais fácil a verificação para uma grande quantidade de produtos, ou no caso onde é preciso controlar vários fatores do processo e várias características do produto.

O CEP comprovadamente contribui no campo da qualidade seja pelo estudo univariado seja pelo multivariado dependendo da necessidade de cada empresa. O conceito multivariado foi desenvolvido para tentar chegar a um ponto em que a abordagem univariada não atinge mesmo com todo o esforço de uma equipe especializada.

Esse ponto é a inter-relação entre os diversos fatores que afetam um processo de fabricação. Então surgem os gráficos de controle *EWMA* e a importância de se estudar, profundamente, os métodos multivariados mais especificamente o gráfico de controle multivariado, baseado na estatística como uma alternativa eficaz, para a identificação de problemas, interpretação das causas e uma ação que os resolvam por definitivo.

Em relação ao meio acadêmico, pode-se afirmar que a contribuição é totalmente aceita, pois, as técnicas multivariadas são pouco difundidas na área da qualidade de maneira que esta pesquisa poderá ser objeto de futuros estudos. Em primeiro lugar vem incentivar que outras pesquisas sejam cada vez mais aprofundadas, por conseguinte, reforça a eficácia do meio acadêmico nos cenários nacional e internacional. Já o pesquisador terá um conhecimento que ampliará seu leque de oportunidades no meio profissional por deter diferenciais cientificamente comprovados da sua eficácia para a gestão da qualidade.

Em segundo lugar, a pesquisa é justificada mostrando a eficiência da análise das variáveis principais através de técnicas multivariadas, facilitando a identificação de variáveis fora de controle. Considera-se, ainda, que os controles multivariados apresentam mais sensibilidade do que os controles univariados, permitindo detectar mais rapidamente os possíveis problemas existentes no processo e com isso corrigi-los com mais agilidade.

1.4 Objetivos

Neste item, descreve-se o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearão a pesquisa.

1.4.1 Objetivo Geral

Aplicar ferramentas estatísticas multivariadas de Controle Estatístico do Processo para monitorar a eficiência do processo produtivo da empresa em estudo.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Revisar a literatura, acerca do tema Controle Estatístico do Processo, CEP com ênfase nos gráficos de controle univariado e multivariado;
- Mostrar a importância da análise multivariada no Controle Estatístico do Processo, por meio da Análise de Componentes Principais;
- Utilizar o Gráfico de Controle *EWMA* para que auxilie na avaliação da estabilidade do processo, a fim de obter um maior controle sobre os processos multivariados;

1.5 Delimitação da pesquisa

Este trabalho apresenta duas técnicas multivariadas úteis, ACP e *EWMA*, para identificar, monitorar e ajustar um processo produtivo, sendo que os dados são provenientes de um processo que utiliza CEP para controle, de forma univariada.

O emprego de controle multivariado envolve facilidades na análise de uma grande quantidade de dados amostrais, principalmente quanto a variáveis fora de controle que necessitam de ajustes imediatamente, permitindo às empresas aumentarem os lucros através da redução dos custos (desperdícios e retrabalhos no processo).

Existem outras pesquisas (Guarnieri, 2010; Souza, 2011) evidenciando o uso das ferramentas aqui utilizadas. Porém, evitou-se fazer um estudo comparativo, porque envolveria empresas que utilizam CEP. Portanto, os resultados obtidos são válidos apenas para o caso de processos que seguem essa metodologia de controle estatístico de processo.

1.6 Estrutura do Trabalho

Esta pesquisa foi estruturada em seis capítulos. O primeiro traz a Introdução, o tema da pesquisa, a justificativa e importância do trabalho, o problema de pesquisa, o objetivo geral e os específicos, a delimitação do tema e a estrutura do trabalho.

No capítulo dois, encontra-se a Fundamentação Teórica, em que se apresenta uma revisão de alguns conceitos controle estatístico do processo; Médias

Móveis Exponencialmente Ponderadas, abreviado para *EWMA* em inglês (*Exponentially Weighted Moving Average*); análise de componentes principais, bem como alguns testes necessários a sua aplicabilidade, pois todos esses tópicos são necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

Nos Procedimentos Metodológicos, no capítulo três, são apresentadas as etapas do estudo deste trabalho. Ainda no terceiro são comentados uma breve situação da empresa e do mercado, a origem e a história do tabaco, o cultivo fumageiro e a fabricação do cigarro.

O capítulo quatro, são demonstrados o desenvolvimento e resultados das análises realizadas neste estudo.

A conclusão está exposta no capítulo cinco e, após esse, no seis, estão relacionadas as Referências Bibliográficas

2 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

Este capítulo, mostra de forma resumida o histórico da qualidade, a importância de se destacar o termo qualidade nas organizações e posteriormente salienta-se o envolvimento do cliente na escolha de produtos.

Também foi feita uma breve introdução sobre o Controle Estatístico de Processo, CEP, apresentando uma breve revisão dos gráficos de controle tradicionais e dos gráficos de controle multivariados, mais especificamente o gráfico de controle de *EWMA* e Análise de Componentes Principais – ACP - que serão utilizados no decorrer do estudo verificando as medidas que foram levantadas no processo monitorado pelo CEP.

2.1 Gestão da Qualidade

A busca pela qualidade movimentou os diversos segmentos da economia mundial, motivada, sobretudo, pela implacável globalização econômica e competitividade dos mercados. O desenvolvimento da qualidade acaba sendo tão ou mais relevante que fatores como preço e nível de serviço. A seguir, mostra-se de forma resumida o histórico da qualidade, a importância de se destacar o termo qualidade nas organizações e posteriormente salienta-se o envolvimento do cliente na escolha de produtos.

2.1.1 Evolução da Qualidade

Os problemas relacionados com Qualidade são encontrados desde os chefes tribais, reis e faraós na antiguidade. Pode-se falar no Código de Hamurabi que é um dos mais antigos conjuntos de leis escritas já encontradas, e um dos exemplos mais bem preservados deste tipo de documento da antiga Mesopotâmia. Foi encontrado por uma expedição francesa em 1901 na região da antiga Mesopotâmia correspondente a cidade de Susa, atual Irã. Segundo os cálculos, estima-se que tenha sido elaborado pelo rei Hamurabi por volta de 1700 a.C.. O Código Hamurabi, conhecido como rígido pelos historiadores por suas características referentes à deveres, mas também aos direitos dos súditos. Portanto, apresenta uma postura

semelhante no que tangia à exatidão dos resultados das atividades diversas e ao tratamento dos desvios no processo de fabricação do mais arcaico objeto, os inspetores aceitavam ou rejeitavam produtos, de acordo com as especificações governamentais; de forma adjacente, ainda em 1400 a.C., os egípcios conferiam a forma de blocos de pedra com um barbante, enquanto o cortador os observava (KLUG e MARSHALL, 2003).

Garvin (2002) comenta que no século XIII, surgiram as denominadas guildas, que nada mais eram do que associações de negociantes e artesãos, e então, desenvolveu-se a formação profissional baseada no ensino aos aprendizes de ofício. A partir do mesmo período, o governo definia e estabelecia padrões, como pesos e medidas, possibilitando que os profissionais não somente produzissem, de acordo com definições correntes, mas também inspecionassem seus trabalhos. Durante séculos, a manufatura foi tida como arte, cada artesão era responsável por definir a compra de matéria-prima, o preço de venda, o horário de trabalho e o volume a ser produzido. Mas, no século XIX, era necessário um ajuste às inovações – não somente de material ou instrumentos para manufatura, mas também de conceitos – trazidos pela produção em larga escala na Revolução Industrial.

Também, a manufatura se caracterizou pela saída dos artesãos de suas casas para as fábricas, deixando de ser proprietários de um processo para se tornarem colaboradores. A produção em massa de bens manufaturados se viabilizou diante da divisão do trabalho e da criação de peças intercambiáveis (GARVIN, 2002).

No final do século XVIII e princípio do século XIX, a Qualidade era alcançada de uma forma muito diferente dos dias atuais. A atividade produtiva era basicamente artesanal e em pequena escala. Os artesãos eram os responsáveis pelo produto e pela qualidade final.

Nos fins do século XIX, surgia um moderno sistema industrial para produção em massa que se expandia. Após, o início pioneiro de Frederick W. Taylor e Jules H. Fayol, quanto aos estudos das teorias de produção e gerenciamento científico. Já no século XX se iniciava uma era técnica que possibilitou a maioria da população obter produtos anteriormente reservados aos ricos, pois as indústrias começaram de fato a produção em larga escala baixando muito os preços.

O conceito de qualidade passou por algumas fases, que podem ser diferenciadas pelo tipo de abordagem que era definido. Cada uma dessas fases foi denominada, por David Garvin (2002) como “Era”, sendo em número de quatro:

- **Era da Inspeção (1900 – 1930)**

Durante vários anos, o controle da qualidade esteve limitado à inspeção e às atividades de contagem, classificação e reparo. A busca de causas e soluções para os problemas era considerada fora do alcance daqueles indivíduos responsáveis pela verificação dos produtos. A inspeção formal tornou-se necessária somente com o crescimento da produção, agora em série, de modo que, com o amadurecimento da produção, foi formalizado pela teoria do gerenciamento científico de Taylor, legitimando, também, a função de inspetor.

No início do século XX, Frederick W. Taylor, um engenheiro industrial criou os fundamentos ou princípios da Administração Científica, e G. S. Radford, com a publicação do livro *The Control of Quality of Quality in Manufacturing*, validaram a função do inspetor de qualidade, delegando a ele a responsabilidade e autoridade pela qualidade dos produtos.

Garvin (2002) comentar que no início do século XX, Frederick W. Taylor deu mais legitimidade à atividade de inspeção, separando-a como tarefa a ser atribuída a um dos oito chefes funcionais encarregados a um bom gerenciamento da fábrica.

Em 1913, Henry Ford aplicou as idéias de F.W. Taylor a respeito da "organização científica" do trabalho na produção de automóveis. Assim, dividindo operações complexas em procedimentos simples, que podiam ser executados por trabalhadores não habilitados, em produtos altamente técnicos, e com baixo custo. Obviamente, parte desse processo era uma inspeção para separar produtos chamados de não-conformes daqueles em acordo com as normas e requisitos estabelecidos (KLUG e MARSHALL, 2003).

O objetivo nesta fase era obter qualidade igual e uniforme em todos os produtos e a ênfase centrou na conformidade, sendo que esta prevaleceu por muitos anos, não havia uma análise crítica das causas do problema ou dos defeitos.

Por um longo período de tempo, o processo interativo de fazer, inspecionar, aceitar ou rejeitar foi a base da indústria. Mas, somente com o passar dos anos, percebe-se a necessidade de um conceito mais eficiente e econômico de gerenciamento da produção, tornando possível o fazer certo na primeira tentativa.

- **Era do Controle Estatístico da Qualidade (1930 – 1950)**

Entre os anos 1930 e 1950, diante da rápida transformação da tecnologia industrial, se consolidava o Controle Estatístico da Qualidade, introduzido em 1924, pelo matemático Walter A. Shewart na *Bell Telephone Laboratories*, a quem também se atribui a criação do ciclo *PDCA (Plan, Do, Check, Act)*, posteriormente difundido por Edwards Deming. Mas o período posterior a estas décadas sofreria marcas inesquecíveis, diante do avanço tecnológico que teve como catalisador a Segunda Guerra Mundial (GARVIN, 2002).

O grupo pioneiro da qualidade era composto por: Walter A. Shewart criador da Carta de Controle que foi aluno do professor Clarence Irwin Lewis com sua Teoria Pragmática do Conhecimento, Harold Dodge, Harry Romig, G. D. Edwards e, posteriormente, Joseph Juran que dedicou esforços consideráveis em pesquisas que levaram ao surgimento do Controle Estatístico de Processos.

Em 1931, Shewart publicou um livro que descrevia as técnicas estatísticas simples e métodos gráficos por ele desenvolvidos – como, por exemplo, as cartas de controle, atualmente bastante aplicadas – para o controle estatístico de processo, com o objetivo de monitorar os processos e determinar seus limites de controle (GARVIN, 2002).

Neste mesmo período, outros pesquisadores aperfeiçoavam as técnicas de amostragem, elemento de grande relevância para o controle estatístico da qualidade. Tais técnicas partiam da premissa de que a inspeção de todos os produtos é um recurso ineficiente, principalmente diante da explosão da produção vivida nos momentos que circundavam a Segunda Guerra Mundial, aquela tida como melhor solução foi a inspeção de alguns itens selecionados em um lote de produtos.

No período pós guerra, delinear-se as impactantes inovações em termos de conceitos de qualidade e de métodos para monitoramento e melhoria. No ano de 1946, segundo o discurso do presidente eleito da Sociedade Americana para o Controle da Qualidade (*ASQC - American Society for Quality Control*), Deming, afirmando que, a qualidade assumiria uma posição de destaque ao lado da competição em custo e preço de venda, e a empresa não poderia fracassar em seu esforço para a garantia da qualidade, porque, aí encontraria um tipo de concorrência que jamais conseguiria vencer (KLUG e MARSHALL, 2003). Em 1946, no Japão, era fundada a União Japonesa dos Cientistas e Engenheiros (*JUSE - Japanese Union of Scientists and Engineers*), cujo primeiro Presidente foi Kaoru Ishikawa. Neste

mesmo momento ocorre a criação do Grupo de Pesquisa de Controle da Qualidade, que em 1950 – teria a participação de Edwards Deming.

- **Era da Garantia da Qualidade (1950 – 1980)**

Entre 1950 e 1960 em plena atividade da Escola de Recursos Humanos e com trabalhos de Maslow, McGregor e Herzberg no estudo da motivação humana, vários trabalhos foram publicados no campo da qualidade. Mais uma ferramenta foi criada a prevenção e as técnicas foram além das ferramentas estatísticas, incluindo conceitos, habilidades e técnicas gerenciais.

Os quatro principais movimentos que compõe esta era são: a quantificação dos custos da qualidade; controle total da qualidade; técnicas de confiabilidade e programa Zero Defeitos de Crosby.

Anterior ao ano de 1951, Juran publicou o Manual de Controle da Qualidade, enfatizando a necessidade de investimentos em prevenção, seguindo o princípio de que os ganhos com a redução de falhas justificavam os custos de prevenção e avaliação (Garvin, 2002).

Em 1956, Armand Feigenbaum publica a obra "*Total Quality Control*", onde evidenciava que a qualidade era responsabilidade cada um dos envolvidos em um processo de produção. Logo, pessoas de marketing, desenvolvimento, pessoal, compras, fabricação, expedição e serviços ao cliente deveriam ser envolvidos, para sucesso da organização, uma vez que as falhas em potencial poderiam ocorrer em quaisquer passos do processo, devendo ser diagnosticadas o quanto antes, visando evitar que se tornassem problemas ao final do processo, ou até mesmo nas mãos do cliente (GARVIN, 2002).

A garantia da qualidade nasceu da necessidade de se atender às especificações rigorosas de programas militares, eletrônicos e espaciais. Ao mesmo tempo, o movimento em busca da inexistência de defeitos e as teorias sobre motivação e necessidade de autonomia para os colaboradores, trouxeram o foco para os aspectos estratégicos da qualidade.

- **Era da Gestão Estratégica da Qualidade (anos 1980 até o momento)**

Esta Era teve início a partir da invasão no mercado americano dos produtos japoneses de alta qualidade no final da década de 1970. A Era da Gestão da Estratégica é a soma e consequência das eras anteriores que a precederam e está em curso até hoje, onde se posiciona dentro dos enfoques da moderna Gestão Estratégica de Porter, Mintzberg, Prahalad & Hamel entre outros.

A responsabilidade da qualidade, segundo a visão atual, é da organização como um todo, exigindo que a direção exerça uma liderança ativa, deixando claros princípios e diretrizes dos processos. A gestão estratégica pode ser definida como o processo de busca de compatibilização da organização com o seu ambiente externo, por meio de planejamento, implementação e controle – observar as etapas básicas do *PDCA* – abrangendo variáveis técnicas, econômicas, sociais, psicológicas e políticas.

Evidencia-se que gerir a qualidade, estrategicamente, é eliminar a inadequação dos produtos e serviços ao mercado, ou seja, considerar o meio externo à organização, garantindo, em última instância a sobrevivência da organização.

Muitos programas de qualidade ainda aplicam conceitos e fundamentações similares às características de eras anteriores, como o controle estatístico da qualidade, custos da má qualidade, e “zero defeitos”. Vale observar, portanto, que cada uma das eras tratadas neste item inclui e é mais abrangente que a era anterior, o que viabiliza a aplicação de conceitos e técnicas estabelecidos na qualidade sob a ótica do cliente. Portanto a qualidade pode se definida no campo administrativo como eficiência e eficácia e no campo econômico como rentabilidade e produtividade. Neste contexto, salienta-se que a qualidade está diretamente ligada ao CEP, controle univariado, e conseqüentemente ao controle multivariado, para análise da qualidade do processo produtivo.

2.1.2 Pesquisadores da Qualidade

A seguir são apresentados os principais pesquisadores que contribuíram para introdução, evolução e difusão dos conceitos de qualidade no mundo.

William Edwards Deming

O Dr. Deming era consultor de renome internacional, sendo destaque em sua atuação junto às empresas japonesas após a Segunda Guerra Mundial, que passaram a adotar princípios da administração, revolucionando a qualidade de seus produtos e serviços e a produtividade de seus funcionários.

O autor desenvolveu os 14 Princípios de Administração, também conhecidos como os 14 Princípios da Qualidade, que constituíram a base para a transformação da indústria americana. A adoção desses princípios, acompanhados das ações

correspondentes, é um indicativo de que a administração pretende manter a empresa em atividade, e visa proteger os investidores e os empregados (Deming, 1990). Os princípios são:

1. Estabeleça constância de propósito para a melhoria do produto e do serviço objetivando tornar-se competitivo e manter-se em atividade, assim como criar novos empregos;
2. Adote nova filosofia. O administrador deve despertar-se para o desafio, ter consciência de suas responsabilidades e assumir a liderança no processo de transformação;
3. Interrompa a inspeção em massa. Elimine a necessidade de inspeção para atingir a qualidade. Introduza a qualidade do produto desde seu primeiro estágio;
4. Acabe com a prática de aprovar orçamentos apenas com base no preço. Ao invés disto, procure minimizar o custo total. Desenvolva um fornecedor para cada item, num relacionamento de longo prazo, fundamentado na lealdade e na confiança;
5. Melhore constantemente o sistema de produção e de prestação de serviços, de modo a melhorar a qualidade e produtividade, assim como reduzir sistematicamente os custos;
6. Treine o pessoal no local de trabalho. Esta prática motiva as pessoas e ainda demonstra o reconhecimento que a empresa tem perante seus funcionários;
7. Adote e institua lideranças. O objetivo da administração não é supervisionar, e sim liderar. Isto deve ajudar as pessoas a executarem melhor o trabalho;
8. Afaste o medo, de modo que todos trabalhem de forma eficaz para a empresa;
9. Rompa as barreiras entre os diversos departamentos. Todos os setores devem estar engajados, de modo a preverem problemas de produção e de utilização do produto e serviço;
10. Elimine lemas, exortações e metas que exijam nível zero de falhas. Estabeleça novos níveis de produtividade. As exaltações apenas geram inimizades, com resultados negativos. A causa de baixa produtividade e qualidade, na sua grande maioria, é do sistema, fora do alcance dos trabalhadores;
11. Elimine os padrões de trabalho (quotas) na linha de produção. Elimine a administração por objetivos ou quotas, cifras e objetivos numéricos. Substitua-os pela administração por processos, através da liderança;
12. Remova as barreiras que privam as pessoas do justo orgulho pelo trabalho bem executado. A responsabilidade dos chefes deve ser mudada de números absolutos para a qualidade. Exclua a avaliação anual de desempenho ou mérito e da administração por objetivos. Substitua pelo trabalho em equipe, pelo mérito do todo;
13. Institua um forte programa de educação e auto-aprimoramento. O investimento em educação continuada para funcionários demonstra o comprometimento da administração, além da suposta garantia de permanência no emprego;
14. Tome a iniciativa para realizar a transformação. Engaje todos no processo de transformação da empresa. A mudança é da competência de todos. A administração terá que ter a coragem de romper com a tradição, mesmo que enfrente a rejeição de alguns e instituir um plano de ação.

Deming demonstrava uma enorme preocupação com a desmotivação dos funcionários provocada por alguns estilos gerenciais da época. Para Deming (1990),

as pessoas são os recursos mais importantes de uma organização e, ao estimular sua cooperação sincera e eficiente, obtêm-se resultados extraordinários em alguns pontos como a produtividade.

Philip B. Crosby

Philip Crosby é o criador da filosofia “Zero Defeito”, que segundo ele é um padrão gerencial de desempenho que educa os empregados a acertar desde a primeira vez (Crosby, 1986). Ele complementa dizendo que o conceito do “Zero Defeito” se baseia no fato de que os enganos podem acontecer devido a duas causas principais: falta de conhecimento e desatenção.

De acordo com Guazzi (1999), Crosby ficou conhecido por meio de sua atuação na indústria de armamentos *Martin-Marietta Company*, nos EUA, da qual era Diretor de Qualidade e que, com suas sugestões, conseguiu entregar produtos sem nenhuma discrepância. A partir de então, o “Zero Defeito” tornou-se a meta da indústria americana.

Para sedimentar sua filosofia Crosby (1999) instituiu 14 pontos, que constituem as etapas de implementação do Programa de Melhoria da Qualidade:

1. Garantir a dedicação da alta gerência e comprometimento por meio da elaboração de um documento com a política e os objetivos da empresa;
2. Constituir equipes multifuncionais para melhoria da qualidade, coordenadas pelos gerentes;
3. Criar sistema de medição dos resultados da qualidade por meio de indicadores. Identificar o que medir e como medir;
4. Avaliar os custos da qualidade;
5. Conscientizar para a qualidade. Estabelecer um canal de comunicação com todos os integrantes da equipe;
6. Promover reuniões formais para identificação de causas fundamentais dos problemas ocorridos;
7. Estabelecer um comitê especial para o programa Zero Defeito, para a divulgação e manutenção do mesmo;
8. Educar e treinar todos os envolvidos no processo, inclusive os fornecedores;
9. Criar o dia Zero Defeito, onde os resultados anuais são divulgados e o reconhecimento a todos os participantes do programa é realizado;
10. Estabelecer metas e objetivos para todas as áreas envolvidas;
11. Remover as causas de erros, por meio da análise de fenômeno conduzida por operários;
12. Criar mecanismos de incentivo, com reconhecimento e/ou recompensa para aqueles que consigam suas metas;
13. Formar os conselhos da qualidade, responsáveis pela troca de informações e proposição de novas idéias para o programa;
14. Etapa final: fazer tudo de novo, melhorando o processo continuamente.

Segundo Fiates (1995), essa filosofia é voltada mais para o comportamento humano, como meio para garantir a qualidade. O comportamento humano “Zero

Defeito” é conseguido com motivação. Esta abordagem em curto prazo pode atingir alguns resultados positivos, no entanto, em longo prazo a motivação das pessoas acaba diminuindo e a sustentação do programa de qualidade fica comprometida. É necessário que haja meios bem definidos, por meio de uma metodologia bem estruturada, para garantir o sucesso do programa e a conquista da qualidade.

Armand V. Feigenbaum

O autor contribuiu para a idéia de que a qualidade deveria ser a principal estratégia de uma empresa, sendo a implantação do Controle de Qualidade Total responsável pelo aumento da lucratividade das empresas por meio do aumento de *market share*, obtido com a satisfação das necessidades dos clientes, e da redução dos custos operacionais, das perdas de produção e da otimização de utilização dos recursos.

O autor também difundiu o conceito de que a qualidade dos produtos e serviços de uma empresa não era de responsabilidade exclusiva do pessoal de produção, mas sim uma responsabilidade interfuncional que permeava todos os setores da organização com objetivo de garantir o sucesso comercial e a fidelidade do consumidor.

Para Feigenbaum (1994) a qualidade dos produtos e serviços é influenciada por nove áreas básicas, chamadas de 9M's. Para manter a nomenclatura (9M) será descrito as áreas com a palavra em inglês, mantendo-se a letra inicial “M”, e traduzindo-se (entre parênteses) para o português. As áreas são: *Market* (Mercado); *Money* (Dinheiro); *Management* (Gerenciamento); *Men* (Recurso Humano); *Motivation* (Motivação); *Materials* (Materiais); *Machines and Mechanization*; *Modern Information Methods* (Métodos Modernos de Informação) e *Mouting Product Requirements* (Quantidade de Requisitos do Produto).

Para Feigenbaum, o sistema de qualidade é composto por um conjunto de procedimentos técnicos e gerenciais, estabelecidos em consenso por todas as áreas da empresa, que balizam as ações coordenadas das pessoas e dos recursos tecnológicos para garantir a satisfação dos consumidores e a produção em níveis econômicos.

Joseph M. Juran

Considerado um dos pesquisadores que mais contribuiu para a evolução dos conceitos de qualidade no mundo, Juran teve participação ativa na transição da fase do Controle Estatístico da Qualidade para a do Controle de Qualidade Total.

Também teve papel fundamental na sensibilização dos níveis hierárquico superiores quanto à implantação dos programas de qualidade nas empresas japonesas, durante o pós-guerra.

Phillips (2004) relata que Juran é conhecido por adicionar a dimensão ser humano à qualidade e que, os vários problemas de relacionamento humano têm uma causa fundamental: resistência à mudança, também chamada de resistência cultural.

Segundo Juran (1992), a melhoria da qualidade deve ser analisada passo-a-passo, pois cada etapa do processo afeta a próxima etapa e assim por diante. Quando um produto passa de um colaborador para outro, o receptor do produto é um cliente neste relacionamento, e o processo torna-se um encontro de necessidades. O foco para a melhoria da qualidade de Juran é concentrar esforços na prevenção de erros e de produtos defeituosos, examinando todo o processo produtivo desde o fornecedor de matéria-prima até o usuário final.

Para isso, Juran (1992) recomenda que as empresas formem pequenos grupos ensinando os colaboradores a trabalharem em conjunto mediante identificação dos relacionamentos de causa-e-efeito dos problemas.

Juran (1990) propôs três processos gerencias básicos para que a qualidade implantada nas empresas atingisse os resultados esperados. Esses processos são conhecidos como a “Trilogia de Juran”. São eles: Planejamento da Qualidade; Controle da Qualidade e; Melhoria da Qualidade.

As atividades de Planejamento da Qualidade têm a função de fornecer aos meios de produção a capacidade de fazer produtos que atendam as necessidades dos clientes. O Controle da Qualidade é exercido pelas equipes que recebem o planejamento, devendo atuar de modo que não ocorram problemas inesperados durante a produção. A Melhoria da Qualidade é o aperfeiçoamento de pontos que devam sofrer mudanças para que atendam nova exigência ou reclamação do cliente, assim que se define qualidade a partir das colocações desses pensadores.

2.1.3 Conceitos de Qualidade

A melhoria da qualidade dá lugar, natural e inevitavelmente, a um aumento de produtividade e, por conseqüência na lucratividade das organizações (Deming,

1990). O trabalho de garantir a qualidade parte do envolvimento de todos na empresa em fazer melhor tudo aquilo que deve ser feito (Crosby, 1999). Esta estratégia precisa partir da alta gerência, porque reflete diretamente na satisfação dos consumidores (NETO, 1992).

Percebe-se que a qualidade em produtos e serviços constitui um elemento importante para a competitividade organizacional. Primeiramente por ser um requisito de mercado que necessita ser identificado e gerido estrategicamente e operacionalmente e, por consequência, resultar de esforço sinérgico de todos os envolvidos no processo, direta e indiretamente.

Deste modo, toda a organização deve estar voltada para a qualidade, o que representa a busca contínua da satisfação das necessidades dos clientes (CAMPOS, 2004).

Portanto, a qualidade exerce um papel de destaque na gestão das empresas. A satisfação do consumidor com a qualidade dos produtos são fatores determinantes à vantagem competitiva das organizações que disputam obstinadamente seu espaço no turbulento mercado.

O termo qualidade possui uma definição intuitiva, gerada pela utilização da palavra no cotidiano das pessoas. Desta forma, sintetizar uma definição técnica única para a palavra qualidade torna-se uma tarefa crítica, visto que é um termo abrangente; dinâmico e de domínio público (PALADINI, 2004).

Desde o início do desenvolvimento humano, já eram presenciados indícios dos significados do termo que usualmente era empregado pelos primitivos na seleção dos melhores materiais para ferramentas e utensílios. O conceito para os egípcios, vinha à tona a partir do livro dos mortos – documento no qual formalizaram as práticas para os procedimentos de sepultamento; passando pelos povos gregos e romanos com a meticulosidade das exigências de suas construções; e pela idade média, através da qualidade dos bens fornecidos nas associações mercantis e armamentos (SILVA, 2008).

A qualidade tornou-se um dos mais importantes fatores de decisão dos consumidores na seleção de produtos e serviços que competem entre si. O fenômeno é geral, independente do fato de o consumidor ser um indivíduo ou uma organização industrial ou uma loja de varejo ou um programa militar de defesa.

Montgomery (2004) comenta que a qualidade é o fator chave que conduz a empresa ao sucesso, ao crescimento e a uma melhor posição de competitividade no mercado. A melhor qualidade e o emprego bem-sucedido da qualidade como parte integrante da estratégia geral da empresa produzem retorno substancial sobre o investimento. Montgomery (2004) cita, ainda, outras faces da qualidade, afirmando que qualidade é inversamente proporcional à variabilidade, definindo também a melhoria da qualidade como sendo a redução da variabilidade nos processos e produtos, a qual foi implementada pelos japoneses.

Não se pode afirmar qual, o conceito mais abrangente ou completo da qualidade, existem diversos cientistas com seu pensamento sobre qualidade, pois, esta é muito mais uma filosofia para suas ações.

Sob o ponto de vista de Juran (1999), qualidade tem dois significados principais:

1. Consiste nas características do produto que vão ao encontro das necessidades dos clientes, proporcionando satisfação em relação ao produto;
2. Consiste na ausência de falhas.

Deming (1990) define qualidade como sendo o aperfeiçoamento contínuo e firmeza de propósitos, compreender o que acontece, construir e interpretar estatísticas e agir aperfeiçoando. Não há respostas corretas, apenas respostas geradas pelos métodos usados para gerá-las. O objetivo devem ser as necessidades do usuário, presentes e futuras.

Crosby (1999) menciona que qualidade é a conformidade com os requisitos estabelecidos pela organização. O atendimento desses requisitos resulta na redução de desperdício e aumento da produtividade. Uma não conformidade representa a ausência da qualidade. Assim, quando um produto é feito dentro dos padrões na primeira vez, então é um produto de qualidade.

Para Slack (2002) definir o que se quer dizer com qualidade é importante para qualquer organização; se você não sabe o que ela é, é improvável que você consiga melhorá-la; e certamente o desempenho da empresa seja insatisfatório.

A qualidade é uma palavra de domínio público, conhecida no dia-a-dia de todas as pessoas. Esta condição impõe dificuldades à sua conceituação. No entanto, o problema não está nos equívocos cometidos ao definir qualidade, mas nos reflexos críticos desses equívocos no processo de gestão e operacionalização do conceito nas organizações (PALADINI, 2004).

Um produto de qualidade, na visão de Campos (2004), é aquele que atende perfeitamente, de forma confiável, acessível, segura e no tempo certo todas as necessidades do cliente.

A dificuldade em definir qualidade está na renovação das necessidades futuras do consumidor em características mensuráveis, possibilitando que o produto seja projetado e modificado visando a satisfação do cliente, por um preço que este esteja disposto a pagar (DEMING, 1990).

Certamente este não é um trabalho fácil. Para tanto, o escopo do gerenciamento da qualidade deve estar em garantir a satisfação das pessoas, a partir da identificação de suas necessidades e expectativas. Este trabalho deve ser coordenado com o objetivo de atender a satisfação de uma forma cada vez melhor e com menor custo (GODOY, 2000). É nesse contexto que se deve ter clareza do papel da gerência da qualidade: melhorar os negócios; aperfeiçoar o gerenciamento e atividades técnicas. Para, ao mesmo tempo, permitir que sejam atingidas a satisfação do consumidor, a eficiência de recursos humanos e menores custos, o que contribuirá decisivamente à competitividade da organização em seu mercado de atuação (FEIGENBAUM, 1994).

O item a seguir apresenta o Controle Estatístico do Processo, CEP, descrevendo desde a sua evolução, aplicabilidade, importância até a interpretação da capacidade dos processos. Evidencia-se que, através dessa ferramenta gerencial flui informações por meio de gráficos e facilita o rastreamento das reais causas de instabilidade. Mas, os gráficos multivariados são eficazes para monitorar o processo, quando já implementado gráficos univariados como o CEP.

2.2 Controle Estatístico do Processo

2.2.1 Histórico

O rápido crescimento de tecnologias e o uso de computadores para o monitoramento dos processos produtivos em tempo real, com menores custos, possibilitando monitorar simultaneamente várias características da qualidade ou variáveis de processo correlacionadas.

Diante desta realidade, tem-se verificado nos últimos anos um crescente interesse em desenvolver técnicas de controle de qualidade mais robustas, que

incorporem todas estas múltiplas variáveis correlacionadas a uma única vez tais como os procedimentos de gráficos de controle estatístico de processos, portanto foi o pesquisador Walter Shewhart que realizou contribuições para os métodos estatísticos, principalmente o Controle Estatístico do Processo.

A contribuição mais importante de Walter Shewhart tanto para a Estatística quanto para a indústria foi o desenvolvimento do CEP. A idéia era incorporar o uso de variáveis aleatórias independentes e serem distribuídas também aleatoriamente. O princípio geral da idéia era sobre o processo em estado de controle e seguindo uma distribuição particular com certos parâmetros o propósito é determinar quando o processo se afasta deste estado e as ações corretivas que devem ser tomadas.

O Dr. Walter A. Shewhart, do *Bell Telephone Laboratories*, enquanto estudava os dados de um dos processos de seu laboratório, na década de 20, foi o primeiro a formalizar a distinção entre variação controlada e não controlada, que corresponde ao que chamamos de causas comuns e causas especiais (conforme veremos mais a frente). Ele desenvolveu uma ferramenta simples, mas poderosa, para separar esses dois tipos de causas, que chamou de carta de controle.

Desde essa época, as cartas de controle têm sido usadas com sucesso numa grande variedade de situações de controle de processo. A experiência tem mostrado que as cartas de controle efetivamente evidenciam causas especiais de variação quando elas aparecem, e refletem a extensão da variação de causas comuns que devem ser reduzidas com a melhoria do processo. O processo de Shewhart, desenvolvido em 1924, resolveu este problema. Este procedimento fornece um sinal de quando o processo se alterou da média "M". Shewhart desenvolveu "linhas de ação" do tipo $m \pm k.s/raiz(n)$, onde "S" é o desvio padrão e "K" é uma constante que ele determinou como sendo aproximadamente três. Se o processo se desvia da média fixada, um sinal é dado se a média da amostra cai fora das linhas de ação. Shewhart demonstrou sua idéia de controle estatístico através da utilização de gráficos de controle e diagramas de corrida (*run chart*) que ele apresentou aos seus superiores em 16 de maio de 1924.

Os métodos estatísticos são ferramentas eficazes para a melhoria da qualidade do processo produtivo e redução de seus defeitos. Para Kume (1993), os métodos estatísticos são abordagem direta e, são muito eficientes oferecendo objetividade e exatidão, dando maior importância aos fatos do que aos conceitos abstratos.

Segundo Montgomery (2004) a qualidade na definição moderna é inversamente proporcional à variabilidade. Os métodos de controle de qualidade nos dias de hoje mostram que a melhoria do processo produtivo pode ser monitorado, e rapidamente corrigidas as falhas encontradas no processo, mas é fundamental a utilização eficiente de gráficos de controle multivariado.

Em 1920 e 1930, Shewhart desenvolveu gráficos de controle de qualidade, que são considerados como o início formal do Controle Estatístico do Processo, o CEP (Pan, 2006). A contribuição mais importante de Shewhart, tanto para a Estatística quanto para a indústria foi o desenvolvimento desta ferramenta para melhorar a qualidade do processo, em consequência a qualidade dos produtos.

Walter Shewhart começou a colocar em prática nas fábricas alguns conceitos básicos em Estatística e Metodologia Científica na década de 1930 nos Estados Unidos. Shewhart foi o pioneiro da área de Controle Estatística de Processo (CEP), atualmente as indústrias utilizam essa ferramenta, pela facilidade e essa consegue a melhoria nos processos de produção.

Shewhart afirma que a qualidade e a variabilidade são conceitos antagônicos no sentido de que onde tem muito de um terá necessariamente pouco do outro. Assim que, Shewhart entendeu que medindo, analisando e monitorando variabilidade dos processos produtivos, poderia se chegar a melhores níveis de qualidade, no entanto, isso significa menor variabilidade em medidas do processo e do produto e mais exatidão em alcançar metas e objetivos da organização.

2.2.2 Fundamentos do controle estatístico de processos

O principal elemento do CEP é a carta de controle de processo, que através de um histórico de dados, permite identificar o comportamento do processo ao longo do tempo e detectar a incidência de causas especiais, permitindo ações que previnam e evitem sua reincidência. O CEP possibilita um controle eficaz da qualidade, feito pelo próprio operador e em tempo real. Assim, promove-se um aumento do comprometimento do colaborador com a qualidade do item que está sendo produzido pelo processo por ele controlado. As atividades de supervisão são reduzidas, permitindo à gerência centralizar seus esforços em ações que visem a melhoria dos processos de um modo geral (PIRES, 2000).

O CEP fornece uma descrição detalhada do comportamento do processo, identificando sua variabilidade e possibilitando seu controle ao longo do tempo, através da coleta continuada de dados e da análise e correção de possíveis causas especiais, responsáveis pela instabilidade do processo em estudo. No CEP, o monitoramento do processo pode ser executado pelos próprios operadores, possibilitando uma rápida identificação de anomalias, além de proporcionar maior consistência e previsibilidade no processo, com vistas à atuação e tomada de decisões na busca de melhorias (DIAS, 2004).

O CEP encontra-se fundamentado na utilização de métodos e técnicas de natureza estatística. Alguns métodos estatísticos surgiram em busca de soluções para problemas relacionados à qualidade, entendimento e previsibilidade dos processos e melhorias dos mesmos (PITT, 1994). O CEP compartilha destes mesmos objetivos, o que justifica sua base estatística (FOGLIATTO, 2003).

Conforme Campos (1992) e Moraes (2006), o CEP é parte integrante dos programas de Qualidade Total, adotados por inúmeras empresas como estratégia habilitadora de sua permanência e expansão nos mercados globalizados.

O controle da qualidade no CEP utiliza-se de cartas de controle para acompanhamento e monitoramento do processo. O objetivo das cartas de controle é possibilitar uma avaliação da estabilidade do processo e identificação de causas especiais de variação (CORTIVO, 2005). Logo, o CEP provê subsídios à tomada de decisões gerenciais relacionadas à eliminação de causas especiais. Além disso, Montgomery (2004) comenta que a utilização de cartas de controle de processo apresenta vantagens como:

- prevenir a incidência de defeitos;
- evitar ajustes desnecessários no processo;
- proporcionar aumentos de produtividade; e
- fornecer um diagnóstico da situação atual dos processos.

As Cartas de Controle utilizam como dados de entrada medições realizadas de uma determinada característica de qualidade ou parâmetro de processo que influencie na qualidade dos produtos manufaturados. As medições são realizadas em pontos espaçados de tempo ou volume de produção, sendo registradas graficamente nas cartas, depois comparadas contra limites de controle pré-estabelecidos (MICHEL, 2001).

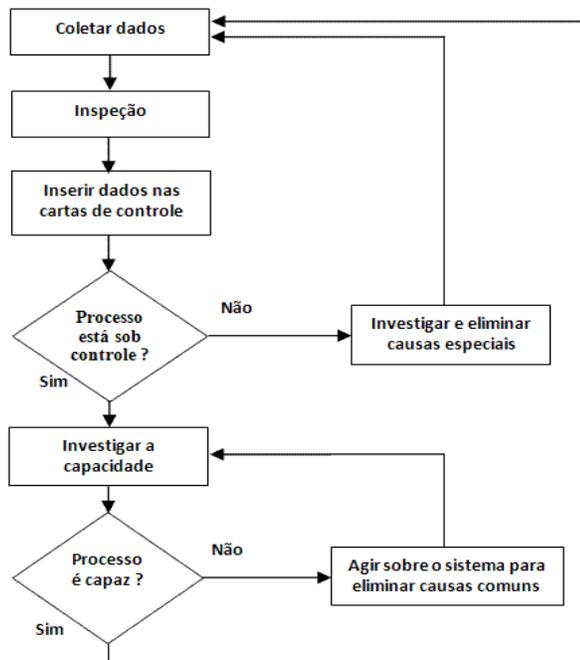
Segundo Montgomery (2004), há pelo menos cinco boas razões para sua popularidade:

1. o gráfico de controle é uma técnica comprovada para a melhoria da produtividade, reduzindo sucatas e retrabalho e, conseqüentemente, aumento de produtividade e baixo custo do produto;
2. são eficazes na prevenção de defeitos, pois, com o processo sob controle, a organização produz certo da primeira vez;
3. com os gráficos de controle, o operador intervém sobre o processo com a certeza, de um fundamento teórico e provável, de que o processo está fora de controle, ou seja, “se não está quebrado, não conserte”;
4. fornecem informações de diagnóstico. Para um operador ou engenheiro experiente, pode-se tirar, por meio dos pontos do gráfico de controle, uma possível mudança no processo que melhore seu desempenho;
5. fornecem informações sobre a capacidade do processo, informam os valores de seus parâmetros mais importantes e também a estabilidade ao longo do tempo, permitindo que se estime a capacidade do processo em atender às especificações dos clientes.

Para Pires (2000), através das cartas de controle, o CEP auxilia na identificação de causas especiais e comuns de variação. As causas comuns de variação, são aquelas que não fazem parte do processo ou sistema; exemplos: desregulagem de uma máquina ou irregularidades em uma matéria-prima. As causas especiais são anômalas ao processo, podendo ser prejudiciais à qualidade do produto manufaturado. O monitoramento e ação corretiva sobre causas especiais é de responsabilidade da área operacional da empresa. Uma vez identificadas as causas especiais, pode-se atuar imediatamente sobre elas buscando a estabilização do processo.

Segundo Grant e Leavenworth (1986) e depois Pires (2000), as causas comuns atuam continuamente sobre o processo, sendo de natureza essencialmente aleatória e de difícil controle. Atuar sobre causas comuns normalmente requer investimentos na melhoria de equipamentos, troca de matérias primas ou treinamento de colaboradores. Uma vez mantidas em níveis razoáveis, as causas comuns não afetam de maneira nociva a qualidade dos itens manufaturados.

A Figura 1 permite identificar as etapas envolvidas na operacionalização do controle estatístico de processos. A utilização de informações oriundas das cartas de controle na tomada de decisão sobre ações de melhoria é evidenciada na figura.



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Caten (1998)

Figura 1 - Estratégia para melhorias no CEP

O sucesso na implantação do CEP depende do grau de entendimento e compreensão da empresa acerca das cartas de controle por ela utilizadas (HRADESKY, 1988). O autor Torminato (2004) afirma que essas cartas de controle fornecem informações que podem ser utilizadas para reduzir defeitos em curto período de tempo, auxiliando na identificação de ações a serem tomadas nos processos sendo monitorados

2.2.3 Cartas de controle para variáveis

Os gráficos de controle são registros dos dados em um determinado momento do processo, construídos num sistema de coordenadas cartesianas e o eixo das ordenadas é representado pelas medições feitas de uma determinada característica do produto e o eixo das abscissas representado pelos subgrupos. A Figura 2 apresenta o gráfico de controle de *Shewhart*, o qual apresenta três linhas paralelas ao eixo da abscissa, denominadas de linha central (*LC*) que é comumente definida a partir do valor médio, o limite superior de controle (*LSC*) e o limite inferior de controle (*LIC*). No processo de construção desses limites comumente são usados em geral

3σ (desvios padrões), que pode ser justificado pelos bons resultados obtidos na prática, com o nível de confiança estabelecido de 99,73% na análise dos dados (MONTGOMERY, 2004).

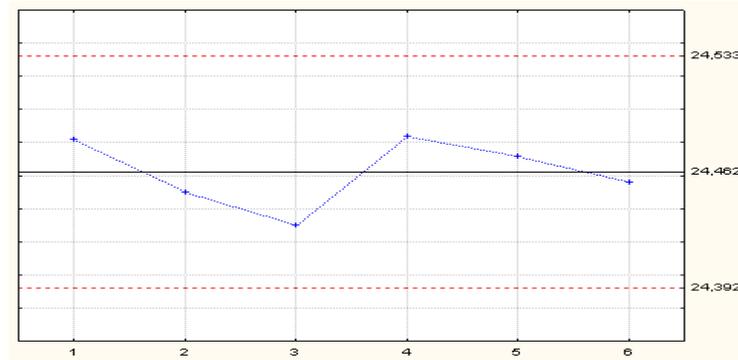


Figura 2 – Carta de Controle

Podemos também que as características de qualidade expressas através de valores contínuos são denominadas variáveis. O engenheiro Walter A. Shewhart em 1924 classificou a variabilidade como sendo provocada por causas comuns (pequenas variações aleatórias inerentes ao processo) e por causas especiais (presença de eventos anormais no processo que prejudicam a qualidade do produto). Segundo Hradesky (1988), a principal vantagem proporcionada pelo CEP é a realimentação de informações sobre o próprio processo em tempo real.

Os gráficos de controle devem ser implementados para monitorar as variáveis que influenciam a qualidade dos itens produzidos. Dessa forma, uma determinada variável de qualidade ou característica de qualidade é monitorada por meio de sucessivas amostras espaçadas no tempo ou por volume de produção. Os gráficos de controle possibilitam análise das amostras coletadas numa etapa do processo como observações individuais ou com a formação de subgrupos (FALCÃO, 2001).

Segundo Siqueira (1997) e Konrath (2002), um subgrupo pode ser definido como uma divisão racional da amostra coletada, de modo a facilitar a identificação de uma possível causa especial que seja assinalada no gráfico de controle. Porém, o tamanho dessa divisão depende do tipo de gráfico que estiver sendo usado, volume de produção, custo de inspeção e importância da informação obtida, ou periodicidade da coleta da amostra.

As medições obtidas em cada amostra são representadas em ordem cronológica num gráfico e comparadas com os limites de controle obtidos da amostra. Caso alguma medição ultrapasse os limites de controle, o referido processo é considerado fora dos limites de controle estatístico. Se uma seqüência de medições apresentarem um comportamento sistemático não aleatório, mesmo que nenhuma medição ultrapasse os limites de controle do processo, o referido processo também poderá ser considerado fora dos limites de controle (PIRES,2000).

Segundo Montgomery (2004) as cartas de controle mais utilizadas no monitoramento de variáveis são as cartas \bar{X} e R , respectivamente para monitorar média e amplitude. As médias amostrais ou valor alvo de uma variável é monitorado através do gráfico \bar{X} . Já o gráfico R é utilizado para monitorar, a partir de amplitudes amostrais, a variabilidade do processo.

O autores Pylro (2008) e Guarnieri (2010) ressaltam que os limites de controle estatísticos não podem ser confundidos com especificações ou tolerâncias de projeto, esses limites refletem as variações aleatórias do processo impostas pelas chamadas causas comuns de variação, enquanto as especificações ou tolerâncias referem-se a cálculos determinadas na concepção do projeto.

Ross (1994) e Guimarães (2003) comentam que observações coletadas de variáveis de processo podem seguir diferentes distribuições de probabilidade. A determinação dos limites de controle utilizados nas cartas demanda o cálculo de probabilidades. Esse cálculo torna-se complexo na medida em que as variáveis de interesse assumem distribuições de probabilidade assimétricas (distribuição Exponencial), ou com alguns momentos indefinidos (distribuição de Cauchy).

Para Mood et al. (1974) e Pires (2000) a maioria dos casos, a distribuição pressuposta para as variáveis monitoradas através das cartas de controle é a distribuição Normal. Assim, trabalhando-se com médias ao invés de observações individuais da variável, o Teorema do Limite Central garante a Normalidade da distribuição da média das médias. A popularidade das cartas de controle para variáveis pode ser justificada, em grande parte, por essa propriedade.

Angelis (2003) afirma que Teorema do Limite Central estabelece que a soma de um grande número (n) de variáveis aleatórias independentes apresenta uma distribuição aproximadamente Normal, independentemente da distribuição de probabilidade dos valores individuais. O Teorema do Limite Central apresenta dois

condicionantes: (a) todas as variáveis aleatórias consideradas devem seguir uma mesma distribuição (qualquer) de probabilidade; e (b) a medida em que a distribuição das variáveis aleatórias consideradas torna-se mais assimétrica, o valor de n aumenta. Em aplicações práticas das cartas de controle, tais suposições em geral são satisfeitas.

A distribuição Normal é descrita por dois parâmetros: um parâmetro μ que corresponde à média ou centro da distribuição, e um parâmetro σ que corresponde à dispersão ou desvio-padrão da distribuição. Os parâmetros da Normal podem ser estimados a partir de amostragem aleatória da variável de interesse. Ao trabalhar-se com K amostras de tamanho n , como normalmente é o caso em aplicações das cartas de controle para variáveis, os parâmetros da normal podem ser estimados através das equações:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_k}{k} ; \quad (2.1)$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} . \quad (2.2)$$

O \bar{x}_k mostra a média aritmética da $K^{\text{ésima}}$ amostra. Na equação 2.2 pode-se verificar que o desvio-padrão da média amostral, representado por $\sigma_{\bar{x}}$, está relacionado com a variabilidade individual das unidades, representado por σ_x , e ao tamanho da amostra por n .

2.2.4 Cálculo dos limites de controle

Os limites de controle superior e inferior de refletem a variabilidade inerente do processo, resultante da incidência de causas comuns de variabilidade. Os limites de controle são calculados de tal forma que, na ausência de causas especiais atuando sobre o processo, a probabilidade de um ponto qualquer ultrapassar os limites de controle seja inferior a 1% (geralmente 0,27%). Assim, pontos fora dos limites de controle representam um forte indício da presença de causas especiais (SOUZA, 2002).

O cálculo dos limites de controle de uma carta de controle para variáveis pode ser feito após coleta de 20 amostras ou mais, sem que o processo gerador das amostras apresente indícios de uma situação anormal ou fora de controle. Assim, coletados os dados, calculam-se os limites de controle para a média e amplitude, e comparam-se essas mesmas amostras com os limites de controle programados para o processo. Havendo pontos fora dos limites de controle devem ser retirados das amostras e recalculados os limites de controle, esses pontos são desconsiderados somente para fins de cálculo dos limites, permanecendo no gráfico de controle para registro histórico do processo produtivo (KONRATH, 2002).

O cálculo dos limites de controle para as médias baseia-se na média e na dispersão de amostras das características de qualidade de interesse coletadas do processo, uma vez calculados, os limites são inseridos nas cartas de controle para seu monitoramento futuro. As equações 2.3 e 2.4 apresentam o cálculo dos limites de controle para a carta de médias. Inicialmente, calcula-se a amplitude e a média para cada amostra. A seguir, calculam-se a média das médias das amostras ($\bar{\bar{x}}$) e a média das amplitudes (\bar{R}), conforme apresentado (\bar{R}) nas equações (2.3) e (2.4), onde x_i e R_i representam a média e amplitude da $i^{\text{ésima}}$ amostra, e K o número total de amostras:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{k}, \quad (2.3)$$

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_k}{k}. \quad (2.4)$$

Uma vez determinados $\bar{\bar{x}}$ e \bar{R} calculam-se os limites de controle para as médias (equação 2.5). Os limites correspondem a seis desvios-padrão (6σ), medidos a partir de $\bar{\bar{x}}$. Para Montgomery (2004), mediante suposição de médias normalmente distribuídas, os limites de controle compreendem 99,73% dos valores de médias amostrais:

$$LC = \bar{\bar{x}} \pm 3\sigma_{\bar{x}}, \quad (2.5)$$

onde $\sigma_{\bar{x}}$ representa a variabilidade das médias amostrais, dada na equação (2.2). A variabilidade dos valores individuais é estimada a partir das amplitudes dos subgrupos, através da equação 2.6, onde d é uma constante tabelada determinada pelo tamanho da amostra, (ver Quadro 1). Substituindo as equações (2.2) e (2.6) na equação (2.5), obtém-se a equação (2.7), a seguir:

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}; \quad (2.6)$$

$$LC = \bar{\bar{x}} \pm \frac{3\bar{R}}{\sqrt{nd_2}}. \quad (2.7)$$

Quadro 1 - Valores das constantes de d_2 e A_2

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078
A_2	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308

Fonte: Adaptado de Montgomery (2004)

A equação (2.7) pode ser simplificada pela substituição de valores de A_2 apresentados no Quadro 1 para diferentes tamanhos de amostra. As equações utilizadas no cálculo dos limites de controle em cartas para médias vêm dadas nas equações (2.8) e (2.9).

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}; \quad (2.8)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}. \quad (2.9)$$

Um segundo tipo de carta de controle para variáveis de interesse neste trabalho são as cartas para valores individuais. Essas cartas são bastante utilizadas segundo Montgomery (2004), em:

- processos onde a coleta e análise de dados são automatizadas e todas as unidades coletadas são analisadas;
- processos onde a taxa de produção é muito baixa, não possibilitando a formação de grupos num espaço razoável de tempo;
- processos químicos, onde medições de uma mesma característica de qualidade utilizando amostras distintas resultam diferentes, essencialmente por erros nos procedimentos de análise laboratorial.

Por pressuporem amostras individuais e não grupos, a utilização das cartas individuais depende do ajuste dos dados obtidos da característica de qualidade de interesse à uma distribuição Normal (FALCÃO, 2001). O formulário para o cálculo dos limites de controle para valores individuais normalmente distribuídos é apresentado na equação (2.10) e (2.11).

$$LIC = \bar{x} - E_2 \bar{R} ; \quad (2.10)$$

$$LSC = \bar{x} + E_2 \bar{R} , \quad (2.11)$$

onde \bar{x} e \bar{R} correspondem a média e média das amplitude móveis dos valores individuais, respectivamente, e o E_2 é uma constante que depende do tamanho da amostra, está apresentada no Quadro 2.

Nos gráficos \bar{x} e R, as constantes D_3 e D_4 estão no Quadro 2, onde os limites de controle são obtidos utilizando, respectivamente, as seguintes fórmulas:

$$LIC_x = \bar{x} - A_2 \bar{R} \quad (2.12)$$

$$LSC_x = \bar{x} + A_2 \bar{R} \quad (2.13)$$

$$LIC_R = D_4 \times \bar{R} \quad (2.14)$$

$$LSC_R = D_3 \times \bar{R} . \quad (2.15)$$

Quadro 2 - Valores das Constantes E_2 , D_3 e D_4

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_2	2,660	1,772	1,457	1,290	1,184	1,109	1,054	1,010	0,975
D_3	0	0	0	0	0	0,076	0,136	0,184	0,223
D_4	3,267	2,574	2,282	2,115	2,004	1,924	1,864	1,816	1,777

Fonte: Adaptado de Montgomey (2004)

Montgomery (2004) afirma que esses tipos de gráficos devem ser aplicados a um conjunto de dados que possuam uma distribuição normal e que não possuam autocorrelação serial, pois a violação desses pressupostos pode levar a interpretações erradas e, conseqüentemente, a conclusões distorcidas sobre o processo. Além disso, esses gráficos apresentados são indicados para detectar

variações no processo acima de 2σ (desvio-padrão), não sendo tão eficaz na detecção de variações pequenas, ou abaixo de 2σ . Segundo este valor de 2σ com um valor mínimo de sensibilidade do gráfico de controle de Shewhart é recomendado pela maioria dos autores da área.

Assim, as expressões citadas anteriormente são estabelecidas para a construção dos gráficos de controle por variáveis desenvolvidas por Shewhart, servindo como base para o desenvolvimento de outros gráficos de controle (SOUZA, 2010).

2.2.5 Interpretação da estabilidade do processo

Todo processo apresenta variabilidade, parte desta sendo originada por elementos vitais ao processo, como matérias-primas, máquinas, métodos, gerenciamento e mão-de-obra (PITT, 1994). Esta variabilidade pode ser verificada através da análise das cartas de controle para as características de qualidade estudadas (GUIMARÃES, 2003).

Para Pires (2000), quando apenas causas comuns estiverem presentes, o processo é considerado estável, sendo que, a totalidade dos pontos inseridos na carta de controle deve estar contidos dentro dos limites determinados.

A presença de causas especiais em processos resulta em instabilidade operacional. Nessas condições, são esperados pontos fora dos limites de controle ou padrões não aleatórios na seqüência de pontos na carta, ambos os casos apontam para uma provável presença de causas especiais. Assim, causas especiais devem ser identificadas e removidas para redução na variabilidade e para estimativa correta dos limites de variabilidade no processo produtivo (BALDO, 2003).

A atividade de eliminar causas especiais traz como consequência a redução da variabilidade do processo (PITT, 1994). Após atuar sobre causas especiais, deve-se agir nas causas comuns de variação que serem investigadas e modificadas para reduzir ainda mais a variabilidade do processo. Em geral, no início do monitoramento, os processos apresentam várias causas especiais. Uma vez tomadas ações corretivas através das cartas de controle, causas especiais vão sendo gradativamente identificadas e eliminadas.

Para Baldo (2003), nos casos em que um processo apresente variabilidade excessiva associada exclusivamente a causas comuns, é de responsabilidade de a

gerência atuar sobre o sistema para reduzi-la. Neste contexto, tomadas de decisão por parte da gerência devem ser necessárias, nas causas comuns, devido aos custos envolvidos para eliminar esse tipo de causa, geralmente fazem parte em mais de um processo na empresa, mas, causas comuns só serão eliminadas se compensar economicamente.

Segundo Montgomery (2004), a eliminação de causas comuns de variabilidade em processos gera mudanças no sistema gerencial como um todo, tais como:

- Verificação no projeto do produto e equipamentos;
- Análise das matérias-primas utilizadas; e
- Revisão das metodologias, política gerencial e ambiente de trabalho.

Balestrassi (2000) comenta que atuar sobre causas comuns como se fossem causas especiais pode levar a um aumento indesejado da variabilidade do processo, além de representar um custo desnecessário para a empresa. Por outro lado, se causas especiais passarem despercebidas, estas podem ser incorporadas ao resultado do processo, tornando aceitável um produto que deveria ser rejeitado. Além disso, ignorando-se causas especiais, perdem-se oportunidades de melhoria no produto ou processo. Além de verificar os pontos fora dos limites de controle (causas especiais), também é importante investigar no processo eventuais padrões na seqüência de pontos. Eventos como sete pontos em seqüência acima ou abaixo da linha central ou sete pontos em seqüência ascendente ou descendente, podem indicar a presença de causas especiais, sendo de grande importância investigar essas ocorrências.

Balestrassi (2000) acrescenta também que eventualmente podem ocorrer padrões não aleatórios, como: (a) padrões cíclicos, (b) mudança na média e (c) tendência linear na distribuição dos pontos na carta. Tais padrões são indícios de causas especiais e podem apontar para ações que favoreçam melhorias permanentes no processo.

A Figura 3 apresenta um exemplo de padrão cíclico nos pontos de uma carta de controle. Esse tipo de padrão pode ser causado por mudanças na manufatura, tais como flutuação da temperatura ou pressão, rotatividade ou fadiga dos operadores, variação na produtividade dos equipamentos, entre outros.

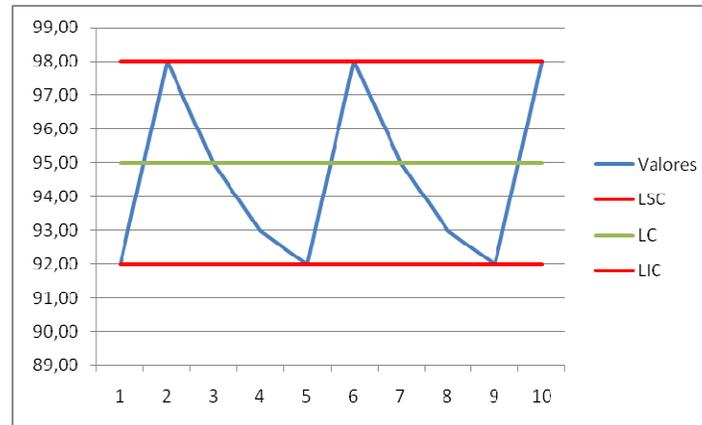


Figura 3 - Gráfico de Controle com padrão cíclico

A Figura 4 apresenta um exemplo de mudança na média de um processo. Esse padrão de distribuição dos pontos em uma carta de controle pode ser resultado, por exemplo: introdução de novos operadores, métodos, máquinas e matéria-prima; troca de método de inspeção e padrões, ou mudança no *setup*.

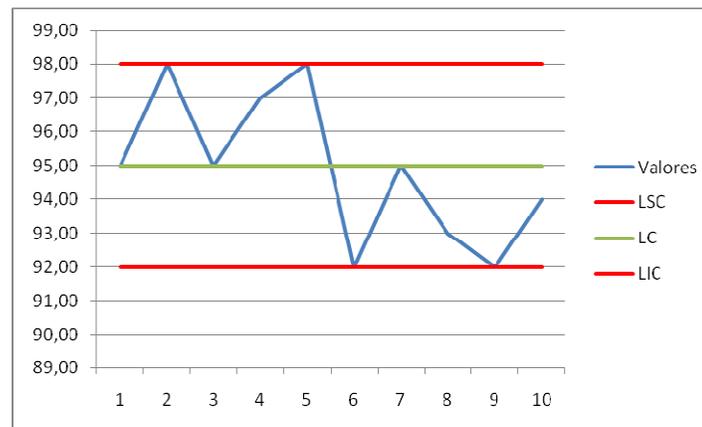


Figura 4 - Gráfico de Controle com padrão mudança de média

A Figura 5 apresenta um exemplo de tendência linear ou movimento contínuo dos pontos da carta de controle em uma única direção. A tendência linear pode ser causada pelo desgaste de uma ferramenta ou componente crítico do processo, também pode ser devido a causas como fadiga dos operadores, falta de supervisão e monitoramento.

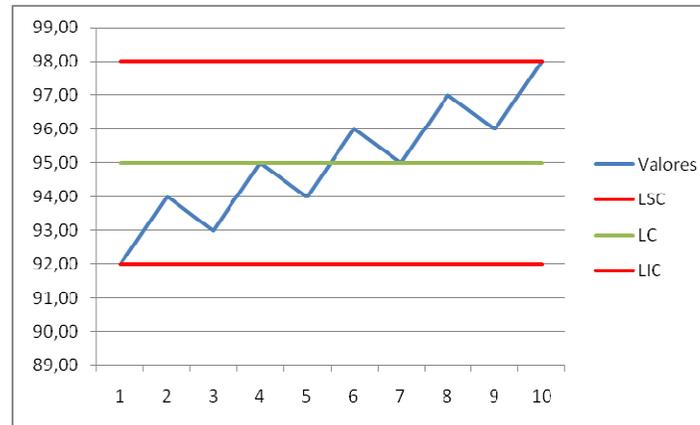


Figura 5 - Gráfico de Controle com tendência linear

Para Falcão (2001), os limites de controle são calculados de tal forma que, na ausência de causas especiais incidindo sobre o processo, a probabilidade de uma amostra estar fora dos limites seja muito pequena (0,27% ou 3σ). Assim, no caso dos pontos estarem dentro dos limites de controle, a hipótese de que os parâmetros do processo (média e amplitude) permanecem os mesmos, é aceita. Caso apareçam amostras fora dos limites de controle, há um forte indício de mudança no processo, devido a presença de causas especiais. Se ações de melhorias estão sendo tomadas, o processo deve apresentar um desempenho mais consistente, com redução da variabilidade. Nestas circunstâncias, os limites de controle devem ser recalculados para que seja possível analisar a estabilidade do processo no futuro.

2.2.6 Tipos de Erros em Gráficos de Controle

Existem dois tipos de erros possíveis de ocorrer no monitoramento de processos por meio dos gráficos de controle. Quando um gráfico de controle indica um sinal, mas não houve realmente a ocorrência de mudança no processo, tal sinal é caracterizado como um alarme falso (ZANINI, 2006).

O erro cometido na tomada de decisão neste caso indica-se por Erro Tipo I e a probabilidade dele ocorrer representa-se por α . Se o processo é considerado sob controle, a presença de causas determinísticas, diz-se que ocorre o Erro Tipo II e a probabilidade dele ocorrer representa-se por β . A escolha dos limites de controle influencia diretamente as probabilidades de ocorrência dos Erros Tipo I e Tipo II. Quanto mais distantes da linha central estiverem os limites de controle, menor será a

probabilidade do Erro Tipo I, aumentando, proporcionalmente, a probabilidade do Erro Tipo II. Em contrapartida, aproximar os limites de controle da linha central provoca uma situação inversa. Outro aspecto indispensável ao planejamento de um gráfico de controle é a determinação do tamanho da amostra e da frequência de amostragem. Para tanto, deve ser considerado o custo de amostragem, as perdas pela produção de produtos de baixa qualidade e o custo para identificar as causas especiais (KONRATH, 2002).

Alves (2009) comenta que devem ser levados em consideração aspectos estatísticos, como a minimização de alarmes falsos. Isto é, a ocorrência de uma causa especial quando não houve alteração no processo e, ainda, maximizar a capacidade de detecção de mudanças reais no processo.

Assim, o tamanho da amostra e a frequência de amostragem devem ser definidos tendo em vista: (a) o tamanho da mudança no processo a ser detectada pelo gráfico de controle e (b) a rapidez com que se deseja detectar esta mudança. Desta forma, pequenas mudanças no processo podem ser rapidamente detectadas utilizando-se grandes amostras tomadas freqüentemente, embora esta estratégia possa ser economicamente inviável (MICHEL e FOGLIATTO, 2000).

Santos (2006) acrescenta que outra forma de definir o tamanho da amostra e a frequência de amostragem é através do comprimento médio da corrida (*ARL - Average Run Length*) do gráfico de controle. O *ARL* é o número médio de pontos que devem ser plotados antes que um ponto indique uma causa especial no gráfico de controle. O *ARL* pode ser usado também para avaliar o desempenho do gráfico de controle.

Segundo Montgomery (1996), para um gráfico de controle de Shewhart, o *ARL* pode ser calculados na 2.16, onde *P* significa Pontos fora de controle e considera-se um *ARL*₀(2.17) sob controle e para fora de controle (2.18):

$$ARL = \frac{1}{P} \quad (2.16)$$

$$ARL_0 = \frac{1}{\alpha} \quad (2.17)$$

$$ARL_1 = \frac{1}{1 - \beta} \quad (2.18)$$

Os limites de controle utilizados no gráfico de controle de Shewhart são dados na equação (2.8) e (2.9). Assim, $\alpha = 0,0027$, ou seja, existe uma probabilidade de 0,27% do gráfico de controle acusar incorretamente uma mudança na média do processo. O tamanho médio da corrida para este processo, na ausência de causas especiais, é dado por $ARL_0 = 1/\alpha = 1/0,0027 \approx 370$ amostras. Isto significa que, estando o processo sob controle, espera-se retirar, em média, 370 amostras sucessivas antes que o gráfico gere um alarme falso (KONRATH, 2002).

Kurcrevski (2003) confirma que p é a probabilidade que qualquer ponto exceda o limite de controle. Então se para um gráfico \bar{X} com 3σ , $p = 0.0027$ é a probabilidade de que um ponto esteja fora do limite quando o processo está sob controle. Isso significa que se o processo está sob controle, só haverá um indicativo de processo fora da média, após 370 amostras, em média.

Quando a média do processo desviar-se do valor nominal em um desvio padrão $ARL_1 = 1/(1-\beta) = 1/0,0228 \approx 44$ amostras, onde $(1-\beta)$ é a probabilidade de que o gráfico detecte um desvio de 1σ na média do processo, isto significa que serão necessárias 44 amostras sucessivas para que o gráfico sinalize uma mudança na média do processo. Uma prática adequada, bastante utilizada na indústria, é a escolha entre pequenas amostras tomadas freqüentemente ou grandes amostras tomadas em intervalos de tempo maiores (MICHEL e FOGLIATTO, 2000).

2.3 Gráficos de Controle Multivariado

A diferença entre o controle univariado e o multivariado é o aumento da complexidade e dos níveis de automação dos processos produtivos, auxiliado pela crescente disponibilidade de suporte computacional. Esse fato é responsável pela expansão do controle multivariado dentro das indústrias monitorando simultaneamente as várias características de qualidade, também chamadas de variáveis do processo apresentada por (MONTGOMERY, 2004).

Para Machado (2009) os trabalhos voltados a processos multivariados são poucos e recentes surgindo com Bernard (2001), Skinner (2002), Thomas (2002), Konrath (2002), Grigoryan (2003) e Testik (2003), a autora se refere a complexidade dos modelos multivariado. Mas, as técnicas e métodos científicos da estatística multivariada procuram contemplar todas as variáveis de uma forma integrada, onde

as inter-relações são exploradas em sua máxima profundidade e as soluções para os problemas são mais consistentes e úteis.

Os gráficos de controle multivariados são utilizados no monitoramento conjunto de duas ou mais variáveis do processo ou produto. Segundo Mason et al. (1995), a utilização dos gráficos de controle multivariados é para monitorar processos industriais que estão se tornando cada vez mais difundidos e complexos. Esse monitoramento deve-se ao avanço da atual tecnologia de realizar em tempo real diversas medições sobre as variáveis do processo e da qualidade final do produto, disponibilizando-se inúmeras informações sobre o processo.

Em situações onde exista correlação significativa entre as variáveis a serem monitoradas, os gráficos de controle multivariados são particularmente recomendados, pois as variáveis interferem e sofrem interferências entre si. Em casos em que as variáveis não sejam fortemente correlacionadas e seja aplicado o gráfico de controle multivariado, há possibilidade de surgirem alarmes falsos no processo investigado, já que o operador pode constatar problemas em uma determinada variável que não esteja necessariamente interferindo no processo.

Os gráficos utilizados para avaliar a estabilidade do processo são o de Shewhart e o de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas - MMEP - em inglês (*EWMA*) "*Exponentially Weighted Moving Average*". O Shewhart tem como objetivo detectar grandes variações na média do processo, enquanto que o EWMA é mais utilizado para capturar pequenos desvios da média.

2.3.1 Gráficos de controle *EWMA*

O gráfico de controle EWMA foi apresentado inicialmente por Roberts (1959) e introduzido por Wortham e Henrick (1972) para aplicações em processos em indústria química, finanças e outras situações onde amostras unitárias por período de tempo estivessem disponíveis. Esse gráfico é uma alternativa para aos gráficos de Shewhart quando se pretende identificar pequenos deslocamentos na média do processo.

A observação unitária pode ser uma média, um valor individual, uma fração ou uma observação similar (Wadsworth, 2001). Assim, a estatística *EWMA* pode ser utilizada tanto para dados individuais quanto para subgrupos racionais.

Robinson e Ho (1978), Crowder (1987a, 1989) e Lucas e Saccucci (1990) apresentaram procedimentos numéricos e avanços que permitiram que os gráficos *EWMA* se tornassem mais simples de serem utilizados e operados. O desempenho dos gráficos *EWMA* é praticamente equivalente ao Gráfico de Somas Acumulativas (*CUSUM*), com a diferença de que o *EWMA* é mais fácil para construir e operar.

Woodall e Maragah (1990) complementam que para a aplicação prática os gráficos *EWMA* são mais fáceis de serem compreendidos pelos usuários devido a sua semelhança com os gráficos de Shewhart. Segundo Hunter (1986), as principais diferenças entre os gráficos de Shewhart, *CUSUM* e *EWMA* dizem respeito a maneira com que cada um dos métodos utiliza as informações coletadas no processo. Enquanto o gráfico Shewhart depende unicamente do último ponto coletado, o *CUSUM* atribui um peso semelhante para todos os pontos plotados no gráfico e no *EWMA* o peso das amostras mais recentes é o maior e o das amostras anteriores é sucessivamente menor, decrescendo de forma geométrica da mais recente até a antiga.

Nos gráficos *EWMA*, as médias móveis passadas e atuais inseridas nos gráficos para as quais os valores cujas médias são calculadas recebem pesos que decrescem exponencialmente a distribuição dos dados. Assim, os valores de média são influenciados de forma mais forte pelo desempenho das mais recentes do processo. Esta ponderação é realizada com a utilização de uma constante de suavização λ , a qual é um dos parâmetros de projeto do gráfico. O *EWMA* pode ser considerado uma média ponderada de todas as observações passadas e atuais, ele é pouco sensível a suposição de normalidade (CORTIVO, 2005).

Borror et al. (1999) faz uma comparação entre o desempenho dos gráficos Shewhart X_i e *EWMA* para dados individuais com relação a distribuição dos dados. Alves (2003) completa que o desempenho de um gráfico de controle costuma ser medida em termos do número de amostras coletadas até a emissão de um sinal (*ARL – Average Run Length*). Este desempenho representa o número de amostras coletadas ao nível de qualidade antes que o gráfico de controle detecte uma alteração de média do processo e emita um sinal.

Para Zago (2009) a emissão de um sinal pode ser tanto um alarme falso ou um sinal de que o processo realmente está fora de controle após um desvio médio do valor nominal. Este aumento de ocorrências de alarmes falsos pode ocasionar ajustes desnecessários no processo, falta de confiança na ferramenta e perda de

produtividade, embora ambos os gráficos sejam capazes de uma detecção rápida das anomalias.

O *EWMA* é capaz de manter o índice de *ARL* na detecção de pequenas alterações tanto para as distribuições normais quanto para as não-normais, mostrando-se mais robusto que o gráfico Shewhart com relação a não-normalidade. Borror et al. (1999) recomenda também a utilização dos parâmetros $\lambda = 0,05$ e $L = 2,492$ para gráficos *EWMA* da média que necessitem de elevada robustez a não-normalidade, mantendo o valor de ARL_0 em aproximadamente 370.

Segundo Crowder (1987a) e Zago (2009) o gráfico *EWMA* serve para o caso de observações não necessariamente normais, recorrendo ao Método da Equação Integral para obter os momentos da distribuição do RL (número de amostras desde o re-início do processo até o instante em que é emitido um sinal fora de controle, excluindo a amostra responsável pela emissão do sinal).

Os valores apresentados para o caso de observações normais obtidos por este método são consistentes com os resultados de simulação apresentados por Roberts (1959) e com os obtidos por Robinson e Ho (1978) através de desenvolvimentos em série de Edgeworth.

O autor Wheeler (1995) distinguiu duas utilizações diferentes do gráfico *EWMA*: a) o de prever observações futuras para os processos com mudanças (já que o valor de Y^i é uma predição do valor de μ no instante $i+1$, e pode ser de grande valia na decisão do ajuste necessário para o processo retornar ao seu valor nominal); e b) o de monitorar processos sujeitos a mudanças ocasionais no nível da média.

Assim o *EWMA* pode ser empregado como base para um algoritmo dinâmico de controle de processo (Hunter, 1986). Segundo Zago (2009) se a previsão mostra um desvio elevado do objetivo no futuro, um controle do processo devem estar monitorando e ser capaz de tomar uma ação corretiva.

Para o caso de utilização do *EWMA* como ferramenta de previsão, Hunter (1986), Wheeler (1995) e Montgomery (2004), apresentam a estatística plotada de uma amostra anterior à amostra mais recente como forma do gráfico *EWMA* fornecer um mecanismo dinâmico de controle.

Crowder (1989) afirma que os processos com variação essencialmente aleatória com desvios periódicos no nível médio do processo, o gráfico *EWMA* é

uma ferramenta a ser utilizada no monitoramento. Em processos onde o desvio for gradual, o *EWMA* torna-se uma ferramenta de previsão.

Lucas e Saccucci (1990) criaram o procedimento Resposta Inicial Rápida denominado - FIR - para o gráfico *EWMA*, semelhante ao adotado para o gráfico *CUSUM* (Somat Comulativas) e o procedimento Shewhart-*EWMA* para melhorar a capacidade de detectar tanto pequenos quanto grandes desvios do valor nominal.

Souza (2000) comenta que o gráfico *EWMA* apresenta alguma similaridade com o gráfico Shewhart quando comparados os procedimentos de tomada de decisão sobre a situação do processo, principalmente no que diz respeito aos limites de controle. Durante a plotagem dos dados *EWMA* no gráfico, se algum ponto é plotado além dos limites de controle, o processo é dito fora de controle estatístico. Como não há necessidade de qualquer outra regra para a tomada de decisão, o gráfico *EWMA* se torna uma ferramenta simples.

A equação que define o gráfico de controle *EWMA* é a seguinte:

$$z_t = \lambda x_t + (1 - \lambda)z_{t-1} , \quad (2.19)$$

onde:

λ é a constante de suavização, $0 < \lambda < 1$;

T é o índice ($t = 1$);

x_t é o valor atual da amostra;

z_t é o valor atual do peso da média móvel (Z_0 deve ser estimado para a primeira amostra e pode assumir o valor nominal do processo).

Pode-se definir a estatística *EWMA* de duas formas funcionalmente equivalentes. Uma que utiliza os dados na forma original, conforme equação acima, e a outra que envolve a padronização dos dados apresentados, ou seja, os valores da variável X_i seguem a distribuição $N(0,1)$. Para isso, utiliza-se a fórmula:

$$y_i = \frac{(x_i - \mu_0)}{\sigma / \sqrt{n}} . \quad (2.20)$$

Sendo que variável padronizada desses valores, onde λ representa um dos parâmetros do gráfico responsável pela atribuição do peso às observações recente e

anteriores e Z_0 , que usualmente considera-se igual a zero, é o valor inicial desta estatística. Assim, a estatística *EWMA* que envolve a padronização dos dados pode ser definida como:

$$Z_i = \lambda y_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}, i = 1, 2, 3. \quad (2.21)$$

O gráfico de controle *EWMA* é uma média ponderada de todas as médias amostrais anteriores, pode ser escrita como:

$$\lambda \sum_{j=0}^{t-1} (1 - \lambda)^j \bar{x}_{t-j} + (1 - \lambda)^t z_0. \quad (2.22)$$

Zago (2009) afirma que constante de suavização $\lambda \in (0,1)$ representa a memória do gráfico. Os valores de *ARL* para o gráfico *EWMA* com ARL_0 500 se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 - *ARL* para diversos esquemas de *EWMA* com ARL_0 500

Mudança na média	L = 3,054 $\lambda = 0,40$	L = 2,998 $\lambda = 0,25$	L = 2,962 $\lambda = 0,20$	L = 2,814 $\lambda = 0,10$	L = 2,615 $\lambda = 0,05$
0	500	500	500	500	500
0,25	224	170	150	106	84,1
0,50	71,2	48,2	41,8	31,3	28,8
0,75	28,4	20,1	18,2	15,9	16,4
1,00	14,3	11,1	10,5	10,3	11,4
1,50	5,9	5,5	5,5	6,1	7,1
2,00	3,5	3,6	3,7	4,4	5,2
2,50	2,5	2,7	2,9	3,4	4,2
3,00	2,0	2,3	2,4	2,9	3,5
4,00	1,4	1,7	1,9	2,2	2,7

Fonte: Adaptado de Lucas e Saccucci (1990)

O valor de λ é determinado através de tabelas ou gráficos baseados na performance do *ARL* desejado. Por exemplo, se $\lambda = 0,2$, o peso atribuído para a última amostra é 0,2, e o peso para as amostras precedentes é 0,16; 0,128; 0,1024, e assim por diante. Para $\lambda = 1$, o *EWMA* se transforma em um gráfico Shewhart, e para valores de λ próximos a 0, a observação recente tem pouco peso, e o gráfico se aproxima do *CUSUM*. Uma comparação entre o desempenho dos gráficos Shewhart, *CUSUM* e *EWMA* através do *ARL* para diferentes mudanças de média se encontra na Tabela 2

Baseado no *ARL*, os gráficos *EWMA* e *CUSUM* apresentam desempenho muito semelhante e superior ao Shewhart, principalmente para os pequenos desvios, ao passo que os gráficos Shewhart parecem ter melhor desempenho com grandes desvios. Para amenizar este problema, Reynolds e Stoumbos (2006) sugerem um modelo adaptado de *EWMA*, utilizado associado ao gráfico de Shewhart ou com outro *EWMA* baseado no desvio quadrado.

Essa associação é capaz de reduzir a inércia do processo (aumentar velocidade de detecção) e detectar grandes alterações no processo mesmo que o valor de λ seja pequeno. Assim, o gráfico se comporta como um gráfico *EWMA* quando os dados coletados estão na região próxima a estatística inicial e como um gráfico Shewhart em outras regiões (ZAGO,2009).

Tabela 2 - *ARL* para gráficos de controle Shewhart, *CUSUM* e *EWMA*

Mudança na média	Shewhart	CUSUM	EWMA
0	500	500	500
0,50	214,5	30	36
1,00	65,2	10,5	10,20
1,50	18,2	5,4	6,0
2,00	7,35	3,4	4,0
3,00	2,2	2,6	2,63

Fonte: Adaptado de Montgomery (2004)

Conforme Lucas e Saccucci (1990), se \bar{x}_i são variáveis randomicamente independentes com variância $\frac{\sigma^2}{n}$, então a variância Z_t é:

$$\sigma_z^2 = \frac{\sigma^2}{n} \left(\frac{\lambda}{2-\lambda} \right). \quad (2.23)$$

A medida que t aumenta até um valor limite:

$$\sigma_{z_t}^2 = \frac{\sigma^2}{n} \left(\frac{\lambda}{2-\lambda} \right) [1 - (1-\lambda)^{2t}]. \quad (2.24)$$

Obtido o valor da variância $\sigma_{z_t}^2$, os limites de controle do gráfico *EWMA* são levantados com o valor assintótico da variância $\sigma_{z_t}^2$. Estimado o desvio padrão do processo, os limites de controle do gráfico *EWMA* são:

$$LSC = \mu_0 + L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad (2.25)$$

$$LC = \mu_0 \quad (2.26)$$

$$LIC = \mu_0 - L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} . \quad (2.27)$$

Nas equações (2.25) e (2.27) o fator L é a extensão dos limites de controle, ou seja, o número de múltiplos de desvio padrão em que os limites de controle estarão distantes da linha central (LC), e n é o tamanho da amostra. O termo $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$ aproxima-se da unidade i tornando grande. Isto significa que, após o gráfico de controle *EWMA* ter percorrido diversos períodos de tempo, os limites de controle aproximar-se-ão dos valores de posição fixa, dados:

$$LSC = \mu_0 + L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad (2.28)$$

$$LC = \mu_0 \quad (2.29)$$

$$LIC = \mu_0 - L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} . \quad (2.30)$$

Para Montgomery (2004), consideram-se os limites de controle simétricos em relação a zero, ou seja, $LSC = LIC$, com o $L = 3$ estes limites são equivalentes aos limites de controle 3σ do gráfico de Shewhart. Recomenda-se usar diretamente os limites de controle LSC e LIC para valores pequenos de i . Isto melhora muito o desempenho de um gráfico de controle em detectar imediatamente um processo fora do objetivo após a *EWMA* ser iniciada.

O processo será considerado sob controle se todos os pontos estiverem dentro dos limites estabelecidos em pelas Equações do LIC e do LSC. Geralmente um controle combinado dos gráficos de Shewhart e *EWMA* é utilizado, sendo que o primeiro avalia o sistema por meio do \bar{X} , procurando por grandes variações e o segundo é usado para avaliar pequenas discrepâncias (SOUZA, 2000).

2.3.2 O projeto dos gráficos de controle *EWMA*

O projeto de um gráfico *EWMA* consiste em encontrar um par (λ, L) que minimize o valor de ARL_1 para o valor de ARL_0 especificado. De uma forma geral, Crowder (1989) coloca que os Erros Tipo I e Tipo II são caracterizados por estes *ARLs* – a combinação (λ, L) escolhida deve ser ótima no sentido de que para uma probabilidade de Erro Tipo I fixada, resulte na menor possibilidade de um Erro Tipo II para um certo nível de alteração no processo. Obtidas as especificações de ARL_0 , ARL_1 e do desvio do valor médio que se deseja detectar, são obtidos os parâmetros λ e L para a confecção do gráfico.

Seguindo por Crowder (1989), ele explica que o valor do *ARL* correspondente ao erro tipo I é equivalente ao valor de ARL_0 , ou seja, o número médio de observações antes que uma situação fora de controle seja sinalizada. Já o valor de *ARL* correspondente ao erro tipo II, que é o número de observações obtidas até detectar um desvio real Δ do valor nominal do processo, equivale ao ARL_1 .

Ainda na linha de Crowder (1987a, 1989) apresentou três possíveis procedimentos para se projetar um gráfico *EWMA*:

1 - Método gráfico: através de um procedimento gráfico em que para dados valores de ARL_0 obtêm-se os parâmetros λ e L em função do desvio δ que o analista deseja verificar. É fornecido um gráfico $\delta \times \lambda$ com valores de ARL_0 fixos. Tendo o valor de ARL_0 e de δ desejado, obtêm-se o valor de λ . Com esta informação, é possível encontrar o valor de L em outro gráfico $\lambda \times L$ fornecido para alguns valores fixos de *ARL*.

2 - Método computacional: o valor do *ARL* é encontrado através de um cálculo computacional. O usuário especifica o valor da constante de suavização λ , o valor de L , o número de desvios (ND) e o seu incremento (INC) e o programa fornece o valor do *ARL*.

3 - Valores tabelados de *ARL*: são apresentadas tabelas de valores de *ARL* para o gráfico *EWMA* bilateral e do desvio padrão de *ARL* para o gráfico *EWMA*. As duas contêm valores de L , de λ e os respectivos valores de *ARL* e de desvio padrão para cada par (λ, L) . Os valores presentes nestas tabelas foram obtidos pelo método da integração numérica. Com o valor do desvio δ a ser detectado, ARL_0 e ARL_1 , verifica-se na tabela os possíveis pares de valores (λ, L) que otimizem os valores de *ARL*. Este costuma ser o procedimento mais comumente utilizado. Na tabela de desvio padrão dos valores de *ARL* para o *EWMA* bilateral, também fornecida pelo autor, é possível escolher o par (λ, L) baseado no valor médio *ARL* e no seu desvio padrão.

Robinson e Ho (1978) também descrevem outra forma de encontrar o *ARL*. Os autores apresentam tabelas de valores de *ARL* contemplando o tamanho da amostra como um dos parâmetros para o projeto do gráfico para valores de L e de λ

em função do desvio $\sqrt{n}\delta$. Neste caso devem ser especificados os valores de ARL_0 e de ARL_1 , encontra-se o menor valor de $\sqrt{n}\delta$ na tabela e os respectivos valores de λ e L e o tamanho da amostra que satisfaçam as especificações.

Crowder (1989) sugere o seguinte algoritmo para a escolha dos parâmetros para otimizar o gráfico EWMA, onde pode ser aplicado tanto o método gráfico quanto o uso de valores tabelados:

1. Escolher o menor valor aceitável de ARL para o caso de nível de mudança zero no processo. Esta escolha corresponde em fixar o nível de alarmes falsos (Erro tipo I);
2. Decidir qual magnitude de mudança no processo deve ser detectada rapidamente, ou seja, um valor mínimo de ARL. À partir deste valor escolher o λ que resulte no menor ARL para aquele nível de mudança.
3. Tendo o valor de λ , escolhe-se o valor da constante L respeitando o ARL sob controle escolhido anteriormente.
4. Fazer uma análise detalhada comparando os ARLs fora de controle (Erro tipo II) para a combinação (λ, L) ótima, com outras combinações (λ, L) que produzam o mesmo ARL em controle (Erro tipo I). Desta análise, deve ser escolhida a combinação (λ, L) que resulte na melhor performance em termos de erro Tipo II.

No passo 1, a escolha do ARL geralmente tem embasamento econômico, como por exemplo o custo associado a alarmes falsos. No passo 2, a escolha da magnitude da mudança capaz de ser detectada dependerá de fatores como capacidade de processo e custos dos ajustes no processo. Diversas tabelas e gráficos são fornecidos pelo autor e por outros autores, como Robinson e Ho (1978) e Lucas e Sacucci (1990), para embasar a escolha dos parâmetros.

O valor do ARL sob controle, formado de um comprimento médio de 370 observações para o gráfico \bar{x} foi considerado como referência na escolha dos parâmetros do gráfico EWMA. Estes valores são baseados nas simulações feitas por Crowder (1987) em seus estudos.

Hunter (1986) explica que a escolha de λ deve ficar a cargo do analista de controle de qualidade. No geral, valores de λ no intervalo de $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$ apresentam bons resultados na prática, com $\lambda = 0,05$; $\lambda = 0,10$ e $\lambda = 0,20$ sendo escolhas populares. Uma boa regra é utilizar pequenos valores de λ para detectar pequenas mudanças (CROWDER, 1989). Ainda, $L = 3$ é um bom valor, com exceção de quando $\lambda \leq 0,10$, situação onde é preferível utilizar valores de L entre 2,6 e 2,8.

Assim como o Gráfico de Somas Acumulativas (*CUSUM*), o *EWMA* tem um ótimo desempenho para pequenas mudanças, mas no caso de alterações maiores, o gráfico Shewhart consegue uma detecção mais rápida. No entanto, a *EWMA* é normalmente superior ao *CUSUM* para mudanças maiores, principalmente se $\lambda > 0,10$ (MONTGOMERY, 2004).

Combinar o gráfico Shewhart com o *EWMA* é uma maneira interessante de melhorar a sensibilidade do procedimento de controle para mudanças maiores sem sacrificar a habilidade em detectar rapidamente pequenas mudanças, completa KURCREVSKI (2003).

2.4 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais é uma técnica de análise exploratória multivariada que transforma um conjunto de variáveis correlacionadas num conjunto menor de variáveis independentes, combinações lineares das variáveis originais, designadas por Componentes Principais. Descrita desta forma a ACP geralmente é encarada como um método de redução de dados, mas além desse objetivo, a ACP permite resumir a informação de várias variáveis correlacionadas em uma ou mais combinações lineares independentes (Componentes Principais) que resumem a maior parte das informações contidas nas variáveis originais. Essas CPs podem depois serem utilizadas como índice ou indicadores que resumem as informações contidas nas variáveis. O autor cita um exemplo da utilização dessa técnica é nas bolsas de valores, onde os analistas costumam analisar as 20 maiores empresas com volume de negócios, todas 20 estão contidas em um único índice (essas 20 empresas formam a Componente Principal), pois é mais fácil para os analistas avaliar o comportamento de uma única variável do que de 20 variáveis independentes destas empresas e mais ainda as outras quase 500 ações menos trabalhadas (MOROCO, 2003).

A ACP foi originalmente concebida por Pearson (1901) e, posteriormente, desenvolvida e aprimorada por Hotelling em 1933. Basicamente a ACP consiste em uma técnica estatística que permite reduzir um modelo multivariado a um conjunto de poucas componentes, não correlacionadas, que carregam a maior parte da informação contida no modelo original.

Para a determinação das componentes principais, é necessário calcular

a matriz de variância-covariância (Σ) ou a matriz de correlação (R), encontrar os autovalores e os autovetores e, por fim, escrever as combinações lineares que serão as novas variáveis, denominadas de componentes principais (SOUZA, 2000). Para o estudo deste item, segue-se o esquema na Figura 6.

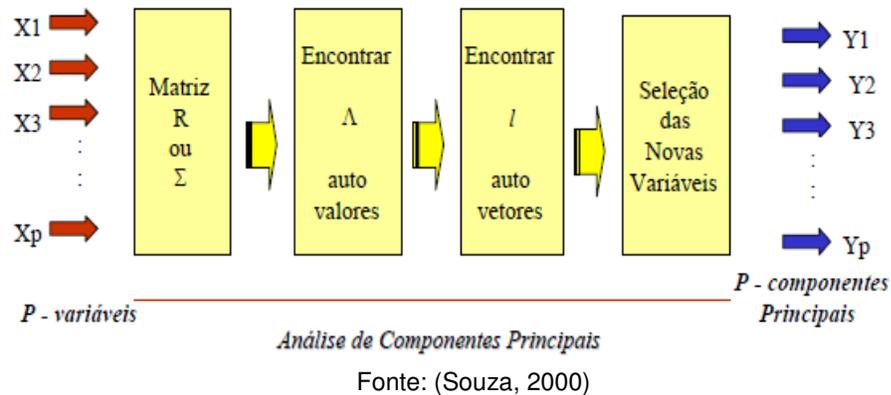


Figura 6 - Esquema da aplicação da Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (CPs) é uma técnica estatística utilizada para resumir informações em conjuntos de dados multivariados. Considere um conjunto de dados composto de realizações de p variáveis aleatórias. Tal conjunto de dados possui p CPs, sendo cada CP formado por uma combinação linear distinta das p variáveis aleatórias originais. Essas combinações são determinadas através de manipulações algébricas na matriz de covariâncias das p variáveis, conforme apresentado mais adiante. Cada CP captura uma *direção de variabilidade* do conjunto de dados originais. As direções capturadas por cada CP são ortogonais entre si. Isso equivale a dizer que os CPs são variáveis aleatórias independentes (ROSA, 2001).

A idéia matemática do método de Análise de Componentes Principais (ACP) é conhecida há muito tempo, apesar do cálculo das matrizes dos autovalores e autovetores não ter sido possível até o advento da evolução dos computadores. O desenvolvimento desta técnica foi conduzida, em parte, pela necessidade de se analisar conjuntos de dados com muitas variáveis correlacionadas (SOUZA, 2000).

A análise de componentes principais tem como objetivo explicar a estrutura de variâncias e covariâncias de um conjunto de variáveis de interesse através de combinações lineares das variáveis X_1, X_2, \dots, X_p que são correlacionadas entre si (MINGOTI, 2005). Ainda Johnson e Wichern (2002) e Mingoti (2005) comentam que

geometricamente, essas combinações lineares representam a seleção de um novo sistema de coordenadas obtidas através da rotação do sistema original, tendo como coordenadas os novos eixos Y_1, Y_2, \dots, Y_p .

Segundo Rosa e Fogliatto (1999) o objetivo da determinação de CPs pode ser melhor entendido ao considerar-se que grande parte da variabilidade do conjunto de dados pode ser descrito por menos que a totalidade dos CPs. Assim, pode-se reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados (reduzir o número de variáveis aleatórias), sem perda significativa de informações. Além disso, substitui-se um grande número de variáveis aleatórias dependentes por um número menor de variáveis aleatórias independentes.

Rosa e Fogliatto (1999) argumentam ainda que CPs são combinações lineares de variáveis aleatórias, identificadas por X^i , $i = 1, \dots, p$, com realizações designadas por (X^1, X^2, \dots, X^p) . Essas combinações são obtidas a partir da matriz de covariâncias, associadas às p variáveis aleatórias. A determinação algébrica dos CPs é apresentada na sequência. Na exposição que se segue, matrizes são identificadas por letras maiúsculas em negrito, p.ex. **A**, e seus transpostos por **A^t**; vetores são identificados por letras minúsculas em negrito, p.ex. **a**, e seus transpostos por **a^t**.

Seja Σ a matriz de covariâncias, de dimensão $(p \times p)$, associada a matriz de variáveis aleatórias $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_p]$. A dimensão de \mathbf{X} é $(n \times p)$, ou seja, dispõe-se de n observações de cada variável aleatória. O vetor \mathbf{x}_t denota uma linha qualquer de \mathbf{X} . Os p autovalores de Σ são designados por λ_i , $i = 1, \dots, p$, e os p autovetores designados por \mathbf{e}_i , $i = 1, \dots, p$, com elementos dados por (e_{i1}, \dots, e_{ip}) completa ROSA (2001).

Os autovalores e autovetores de uma matriz quadrada não-singular qualquer são determinados através de sua equação característica, argumenta Strang (1988). Para Paula et. al. (2001), associado a cada autovalor λ_i existe um autovetor \mathbf{e}_i . Assim, os pares $(\lambda_1, \mathbf{e}_1)$, $(\lambda_2, \mathbf{e}_2)$, ..., $(\lambda_p, \mathbf{e}_p)$ correspondem aos autovalores e autovetores de Σ , com autovalores arranjados tal que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$.

Segundo Seber (1986) e Rosa e Fogliatto (1999), o $i^{\text{ésimo}}$ CP, pode ser obtido pela expressão:

$$Y_i = \mathbf{x}_t^t \mathbf{e}_i = e_{i1} X_1 + e_{i2} X_2 + \dots + e_{ip} X_p \quad (2.31)$$

Na equação 2.31 os elementos do autovetor e_i funcionam como pesos de importância de X_1, \dots, X_p na composição do $i^{\text{ésimo}}$ CP, e são denominados *cargas* do CP. Em CPs obtidos a partir de variáveis aleatórias padronizadas, a magnitude da carga associada a uma variável descreve sua importância relativa na composição dos CPs. Pode ocorrer que alguns CPs sejam majoritariamente descritos por uma única variável aleatória. O valor observado de Y^i para um determinado vetor (X_1, \dots, X_p) de realizações de (X_1, \dots, X_p) é denominado *escore* do CP. Cada CP apresenta n escores, correspondendo ao número total de realizações disponíveis de cada variável aleatória. (ROSA, 2001).

Para Rosa e Fogliato (1999) cada CP descreve uma das direções de variabilidade do conjunto de dados. Em outras palavras, cada CP descreve uma porção da variância total apresentada pelo conjunto das p variáveis aleatórias. Sabe-se que a diagonal principal de Σ apresenta os valores de variância associados a cada variável aleatória. Logo, a variância total no conjunto de dados é dada pela soma dos elementos da diagonal principal de Σ . Este valor é igual à soma dos autovalores de Σ , já que o traço de uma matriz quadrada é igual à soma de seus autovalores, comenta Rencher (1995). Assim, pode-se utilizar os autovalores de S para determinar quanto da variabilidade total presente no conjunto de dados está sendo descrita por cada CP. Mais especificamente, a proporção da variância total descrita pelo $i^{\text{ésimo}}$ CP é dada por:

$$CP = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + K + \lambda_p} . \quad (2.32)$$

Através da equação pode-se definir o número de CPs a serem utilizados na representação do conjunto de dados originais. Essa definição é essencialmente qualitativa. Um analista pode considerar satisfatória uma representação dada por um grupo de CPs que descreva 70% da variabilidade original (MOROCO, 2003). Algumas regras auxiliares na definição do número de CPs que melhor representam o conjunto de dados em estudo são apresentadas em RENCHER (1995).

Geometricamente, os CPs podem ser representados por um sistema de eixos ortogonais com origem posicionada na média do conjunto de dados. O primeiro CP segue a direção de maior variabilidade dos dados. O segundo CP segue a segunda direção de maior variabilidade, ortogonal ao primeiro CP. Os demais CPs são

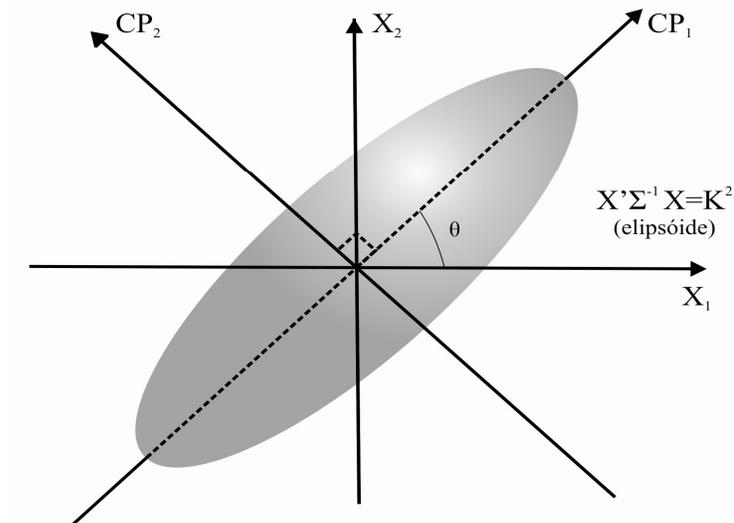
posicionados no espaço p -dimensional seguindo a mesma lógica. À primeira e assim por diante (LOPES, 2001).

Suponha duas variáveis aleatórias X_1, X_2 , seguindo uma distribuição Normal bivariada $N_2(\mu, \Sigma)$, com vetor de médias dado por μ e matriz de covariâncias Σ . A função de densidade de $N_2(\mu, \Sigma)$ é dada pela equação da elipse centrada em μ :

$$(x - \mu)^t \Sigma^{-1} (x - \mu) = c^2, \quad (2.33)$$

onde \mathbf{x} denota o vetor que contém as variáveis aleatórias X_1 e X_2 . Os eixos da elipse em (3) são dados por $\pm c(\lambda_i)^{1/2} e_i, i=1,2$ (ROSA, 2001).

Os CPs $Y_1 = x^t e_1$ e $Y_2 = x^t e_2$ estão posicionados nas direções dos eixos da elipse de densidade constante, conforme ilustrado na Figura 7.



Fonte: Adaptado de Lopes (2001)

Figura 7 – Representação gráfica dos autovalores e autovetores.

Segundo Johnson e Wichern (1992) e depois Lopes (2001), o primeiro componente corresponde ao maior eixo da elipsóide (CP_1) e o comprimento desse eixo é proporcional a $\sqrt{\lambda_1}$. O eixo de menor variância (CP_2) é perpendicular ao eixo maior. Esse eixo chama-se segundo componente principal e seu comprimento é

proporcional a $\sqrt{\lambda_2}$. Assim, a análise dos componentes principais toma os eixos X_1 e X_2 e coloca-os na direção da maior variabilidade.

Para Souza (2011), é possível encontrar tantas componentes principais quantas forem as variáveis envolvidas na análise. Mas, como um dos principais objetivos da análise é a redução de dimensionalidade, é necessário selecionar o número de componentes a serem consideradas no estudo.

Alexander (2005), diz que a análise de componentes principais trata de um método usual na extração das mais importantes fontes não-autocorrelacionadas de variação de um sistema multivariado.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A finalidade deste trabalho será a monitoração por meio de ferramentas estatísticas (gráficos de controle) univariado e multivariado de uma linha de produção, no caso, uma única marca de cigarro da empresa “X” produzida no mês de setembro de 2010.

Num primeiro momento foi realizada uma revisão de literatura para que se embasasse o estado da arte no que diz respeito ao controle estatístico de processo. Esta revisão foi estendida para duas ferramentas, que serão utilizadas na monitoração do processo produtivo na empresa em estudo.

Após uma revisão detalhada das técnicas que serão empregadas neste trabalho, buscou-se a aplicabilidade das mesmas em um conjunto de amostras referentes a linha de produção em estudo.

No presente estudo será necessário o emprego de técnicas de monitoramento de produção univariada para suporte aos gráficos de controle multivariados, onde serão utilizados os programas Statistica 7.0 e o SPSS 16, programas estes exclusivamente dedicados às rotinas estatísticas.

O primeiro passo será a determinação das medidas descritivas das quatro variáveis envolvidas no processo. Logo em seguida será elaborado o Histograma das variáveis com a finalidade de verificar se as mesmas apresentam Distribuição Normal (Teste de Kolmogorov-Smirnov). Na seqüência serão utilizados os gráficos univariados para visualizar o comportamento do processo. A próxima etapa será a construção da matriz de correlação (Correlação de Pearson) e a aplicação do teste de Kaiser-Meyer-Olkin ou KMO para verificar a adequação das variáveis para a realização da análise de componentes principais.

O KMO é a razão da soma dos quadrados das correlações de todas as variáveis dividida por essa mesma soma, acrescentando a soma dos quadrados das correlações parciais de todas as variáveis. Quando as correlações parciais forem muito pequenas, o KMO terá valor próximo de 1 e indicará perfeita adequação dos dados para a Análise de Componentes Principais e análise fatorial (PEREIRA, 2001).

A seguir far-se-á o cálculo do número de componentes principais através da visualização do Gráfico de Cattell ou pelo valor do autovalor acima de 1.

A determinação da componente principal tem por objetivo aglutinar as características das variáveis mais significativas.

Após essa etapa, utilizaremos o gráfico \bar{X} nas Componentes Principais para verificar a existência de amostras fora de controle ou em não conformidade. O passo final é a aplicação do gráfico de controle da Média Móvel Exponencialmente Ponderada - EWMA – (*Exponentially Weighted Moving Average*) na ou nas componentes principais, pois este é um excelente gráfico quando se necessita diagnosticar pequenas mudanças nos valores das amostras do processo estudado.

3.1 Caracterização da empresa

Neste capítulo apresenta-se uma breve abordagem sobre o setor de produção das empresas do ramo fumageiro. É apresentada também, a história do tabaco, o cultivo e a fabricação do cigarro, finalizando com uma descrição das variáveis trabalhadas no estudo. No entanto, não haverá nenhum detalhamento sobre a empresa para permanecer no anonimato conforme a exigência da mesma, quando feito o levantamento de dados.

3.1.1 Empresa de tabaco “X”

No presente trabalho, os dados foram levantados no setor de produção de uma empresa do ramo fumageiro localizada na região denominada como Vale do Rio Pardo, no estado do Rio Grande do Sul.

A indústria do fumo é o conjunto de empresas que atuam na elaboração do tabaco em seus derivados, sendo o produto não comestível mais plantado e comercializado no mundo, tão importante para a economia brasileira que suas folhas estão no brasão da república. Utilizando uma das mais agressivas políticas de dividendos do País, a empresa de cigarros superou organizações poderosas como a Embraer e o banco Itaú, tradicionalmente conhecidos também por seus altos índices de retorno aos acionistas (AFUBRA, 2011).

Na média de cinco anos – portanto, de 1998 a 2002 – as indústrias do fumo registrou 48,5% de rentabilidade sobre o patrimônio. No período, distribuiu R\$ 3,3 bilhões aos acionistas. Só no ano passado, dos R\$ 961 milhões de lucro líquido, R\$

763 milhões viraram dividendos. Foi a maior quantia paga superando os R\$ 756 milhões distribuídos em 2000.

Os principais desafios que as organizações fumageiras enfrentam, estão o contrabando e a falsificação; a alta carga de tributação; os aspectos de saúde pública; o controle ao tabagismo; e as Leis, que restringem cada vez mais a utilização do tabaco e seus derivados.

No Brasil, a cadeia do fumo comporta todos os elos da cadeia produtiva do setor: do plantio ao processamento do fumo em folha e fabricação de cigarros e de outros derivados do tabaco, como charutos e cigarrilhas.

Na fabricação dos cigarros, é muito importante que as plantações de fumo em folha estejam situadas próximas às fábricas onde ocorre o beneficiamento do fumo e a fabricação dos cigarros, para que haja a redução do custo com transporte e, principalmente, com a distância entre o plantio e as fábricas. Assim, como cerca de 90% das plantações de fumo se concentram na região Sul do país, a maioria das fábricas de cigarros também está no Sul.

O cigarro é uma pequena porção de tabaco ou fumo seco e picado, enrolado em papel fino ou em palha de milho cigarro de palha, para se fumar. Sendo que o enrolado em papel fino, é industrializado e o palha, manufaturado. O cigarros podem, ou não, dispor de um sistema de filtro, geralmente de fibras de acetato de celulose.

3.1.2 História do tabaco

O tabaco é uma planta, cientificamente chamada *Nicotiana tabacum*, sendo que, o histórico de sua existência apresenta controvérsias sobre sua origem. Suas formas mais antigas foram atestadas na América Central por volta do século IX na forma de cachimbos feitos de bambu. Outros historiadores, afirmam que os índios os maias e posteriormente os astecas, fumavam várias drogas psicoativas durante rituais religiosos, estes cerimoniais eram frequentemente retratados em cerâmicas e gravuras em seus templos.

O tabaco chegou ao Brasil provavelmente pela migração de tribos tupis-guaranis. Quando Pedro Álvares Cabral chegou ao Brasil, em 1500, as tribos Tubinambá tinham o costume do cultivo do fumo por toda a costa brasileira, especialmente na costa da Bahia, conforme Nardi (1985). Alguns marinheiros da

esquadra de Cabral, levaram o fumo para consumi-lo em alto mar, através do uso em pó sobre as feridas devido à crença das propriedades cicatrizantes e milagrosas, ou para fumá-lo, como forma de ajudar os viajantes a reduzir a solidão das navegações que duravam meses ou mesmo, anos.

A expansão mundial do fumo é decorrente, em grande parte, da interação de Portugal com o Brasil - Colônia, que fez com que o produto fosse difundido por toda a Europa e, até mesmo, a África e Ásia, onde o tabaco foi moeda forte de troca para todo tipo de comércio.

A partir do século XVI, o seu uso disseminou-se pela nobreza da Europa, introduzido por Jean Nicot, diplomata francês que atuou em Portugal, com utilização para curar as enxaquecas de Catarina de Médici, rainha da França.

Assim, é possível verificar que o tabaco foi um produto que passou a fazer parte dos costumes europeus, logo após sua chegada ao continente americano. A classe social que primeiro teve acesso ao produto, excetuando-se os marinheiros que chegaram ao Novo Mundo, foi a nobreza, cuja expansão se deu rapidamente entre os nobres europeus e depois às demais classes sociais dos países do Velho Mundo.

Nos séculos seguintes, com uma produção organizada e cada vez maior, o produto se disseminou entre todas as classes sociais, tornou-se acessível e facilmente encontrado, hoje é consumido em todos os países do mundo.

3.1.3 O cultivo do fumo

A cultura do fumo no Brasil iniciou já nos primórdios da colonização, sendo cultivados pelos portugueses poucas décadas após o descobrimento. O produto foi apreciado pelos europeus logo nas primeiras viagens ao Novo Mundo, havendo sempre mercado garantido para a cultura. Os primeiros portugueses que vieram para o continente sul americano trataram de organizar o cultivo e comércio do tabaco para vende-lo a Europa.

Hoje, a grande maioria dos produtores são minifundiários com propriedades que têm, em média 16,3 hectares de extensão, dos quais apenas dois hectares por propriedade, são empregados na produção de fumo. A colheita rende aproximadamente dois mil quilos de fumo por hectare. No restante da propriedade, o

fumicultor diversifica as plantações produzindo outras culturas e criando animais, principalmente suínos, aves e bovinos (AFUBRA, 2011).

Os fumos cultivados são do tipo Virgínia ou Burley. A alta produtividade e estabilidade do mercado, em que os preços mínimos são estabelecidos antes da safra, fazem dessa a principal atividade econômica das pequenas propriedades espalhadas por mais de 700 municípios nos três estados da região Sul (AFUBRA, 2011).

O grande interesse dos agricultores na produção vem do fato de que o fumo, no Brasil, é um dos poucos produtos agrícolas que devido ao sistema integrado (parceria) de produção, tem a sua venda garantida e ainda apresenta altos níveis retorno financeiro (AFUBRA, 2011).

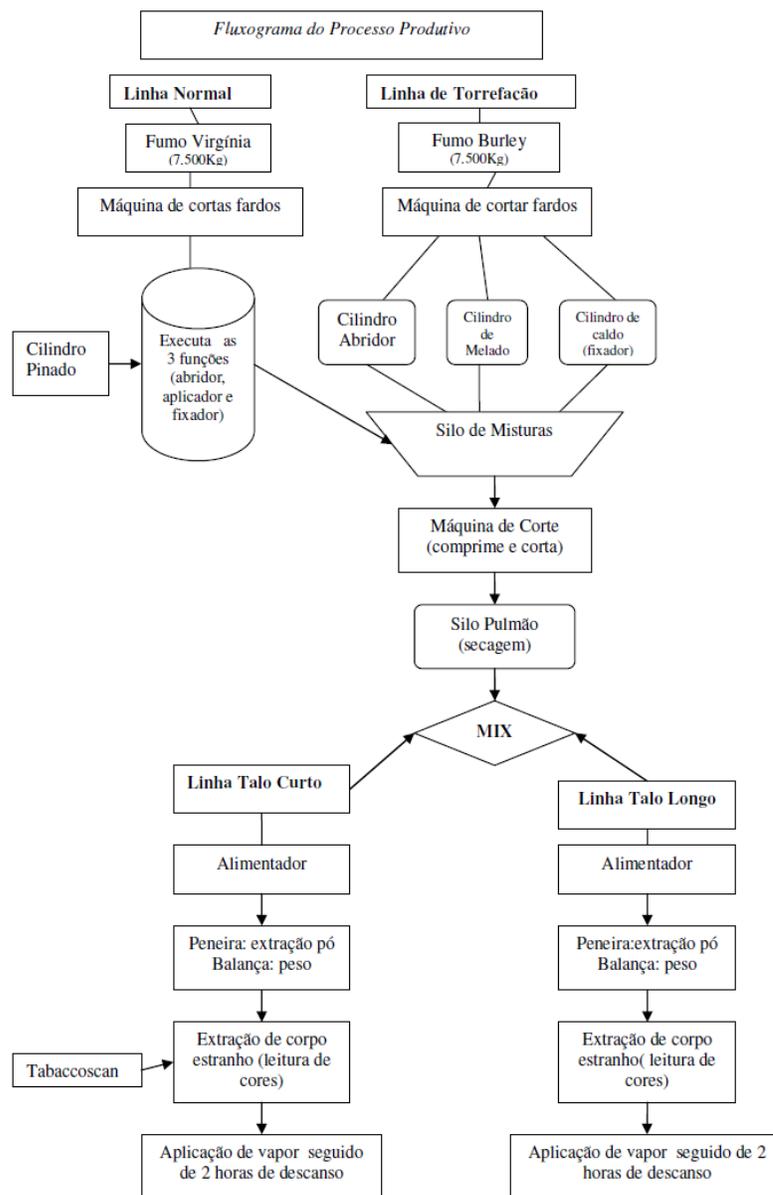
Segundo a AFUBRA (2011), na safra 2009/2010, na região sul do Brasil foram plantados no Brasil 370.830ha de fumo, sendo envolvidas 870.250 pessoas, com uma renda bruta na safra de 4,350 bilhões de reais, gerando em toda cadeia produtiva 2,530 milhões de empregos no Brasil.

A cultura é extremamente taxada em impostos, nas últimas três safras proporcionou aos cofres públicos 7,860 bilhões, 8,496 bilhões e 8,426 bilhões de reais em impostos respectivamente (AFUBRA, 2011).

3.1.4 Fabricação do cigarro

A fabricação do cigarro segue uma linha geral de etapas, mas difere um pouco de empresa para empresa, alguns processos são patenteados, portanto somente podem ser utilizados pelas empresas detentoras das patentes ou associadas ou licenciadas.

O processo de fabricação descrito na Figura 8, é um processo genérico onde podem ocorrer pequenas diferenças entre uma empresa e outra. Esse processo descrito por Previttalli (2004) é composto por 4 linhas de produção em função das matérias-primas, quais sejam: fumo normal, fumo de torrefação, talo longo e talo curto que, ao final do processo, sofrem uma mixagem (mistura) constituindo a base para as diferentes marcas de cigarro. A folha de fumo é separada nas usinas, de modo que o processamento transforma os fardos que chegam à fábrica, distinguindo-se as folhas em Fumo Virgínia (seco em estufa) e Fumo Burley (seco ao ar livre).



Fonte: Previttalli (2004)

Figura 8 - Fluxograma da fabricação do cigarro

O processamento do fumo é marcado pelo constante controle de umidade e temperatura. O rígido controle das variações de umidade e temperatura tem como principal objetivo evitar que a matéria-prima seja degradada ou não chegue nas condições ideais de processamento, ocasionando maior desgaste das máquinas e desperdício de insumos. A variação de custo dos cigarros produzidos encontra-se diretamente ligado com a qualidade da principal matéria-prima utilizada (folha de

fumo). Dessa forma, quanto mais mixado o cigarro, menor o preço final, pois as adições (talo, essências, extratos) possuem menores custos e descaracterizam o sabor do tabaco original (Previttalli, 2004). A produção semanal é determinada pela gerencia de produção, que define marca e quantidade de cigarros produzidos por cada linha de produção da empresa.

3.1.5 Variáveis do estudo

O processo produtivo em estudo é composto de quatro variáveis monitoradas na fase de fabricação do cigarro. Conforme mencionado anteriormente cada empresa tem as suas técnicas próprias de transformação do tabaco em cigarro. A fabricação embora toda automatizada, sofre influência de alguns fatores. A umidade e temperatura são monitoradas a todo instante, pois influenciam no sabor e no desempenho da linha de produção.

Nesse estudo utilizou-se uma única marca de cigarro em uma única linha produtiva. As medições das amostras são realizadas de forma totalmente automatizada, onde retira-se cinco amostras (cigarro pronto) da linha de produção em intervalos que variam de 20 a 40 minutos. Essa amostra de cigarros passa automaticamente para um testador eletrônico ao lado da linha produtiva, onde o laboratório automatizado testa um a um dos cinco cigarros informando o seu resultado a um banco de dados. Após leitura e interpretação dos resultados, o operador toma a decisão de agir corretivamente se necessário ou de até parar a linha produtiva dependendo da gravidade da não conformidade.

As quatro variáveis a serem estudadas são: *RTD (Resistance to Draw)*, peso, ventilação e circunferência, onde cada marca de cigarro tem suas especificações determinadas no projeto de produto.

A variável *RTD (Resistance to Draw)* refere-se a pressão que se faz para tragar o cigarro, sua unidade de medida é em mm.w.g. (é a pressão que determinada coluna d'água exerceria na base), quanto maior a força necessária para sugar a fumaça mais forte é o sabor do cigarro.

O peso é o valor total do cigarro pronto expresso em miligramas, também influi no sabor, quanto mais tabaco dentro do cigarro, maior será a pressão interna, maior será a força necessária para tragá-lo, mais forte será o sabor.

A circunferência é medida do corpo do cigarro, ela é verificada em milímetros. Uma circunferência maior, mais tempo necessário para fumar um cigarro.

Ventilação é a percentagem de transposição do ar, é medida pela percentagem de ar que consegue transpor a ponteira (*tiping*). Ela é determinada pelo tipo de filtro e papel usado por cada marca, mais facilidade do ar transpor a ponteira, mais fraco é o sabor do cigarro.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente estudo refere-se a amostras referentes a todo mês de setembro de 2010 de uma linha produtiva. Essa amostra mensal é composta de 20940 medições, sendo 5235 medições para cada uma das 4 variáveis, fez-se a média das 5 mostras totalizando 1047 médias para cada uma das 4 variáveis.

Após o tratamento dos dados a fim de transformá-los em uma planilha Excell reconhecida para uso no Statistica 7.0 e SPSS 16, estuda-se, através da estatística descritiva o comportamento das variáveis. Estas são mostradas na Tabela 3, onde se tem: o número de amostras de cada variável, a Média, o Desvio-padrão, o Mínimo e Máximo de todos os valores das amostras.

1º Passo: Medidas Descritivas das variáveis em estudo

Tabela 3 - Estatística Descritiva

Variável	n	Média	D. Padrão	Mínimo	Máximo
RTD	5235	95,82	5,4680	61,00	131,00
Peso	5235	959,45	27,6146	856,00	1052,000
Ventilação	5235	43,12	3,2345	31,50	53,800
Circunferência	5235	24,45	0,08195	23,90	25,25

Num primeiro momento será realizado o Teste de Normalidade (Teste de Kolmogorov-Smirnov, para amostras acima de 2000 unidades) das variáveis, onde observou-se que todas apresentaram proximidade com a distribuição normal necessárias para a utilização das mesmas no trabalho ($p > 0,05$).

2º Passo: Histograma e Teste de Normalidade das variáveis

As figuras 9 a 12 apresentam o histograma das variáveis estudadas:

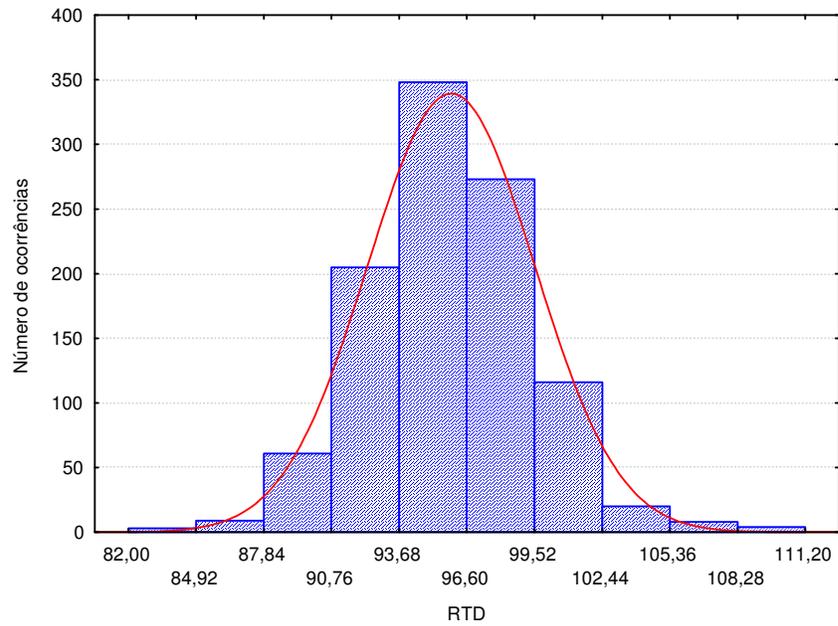


Figura 9 - Histograma da Variável *RTD*

Na Figura 9 observa-se que, a variável *RTD* segue o comportamento da distribuição normal.

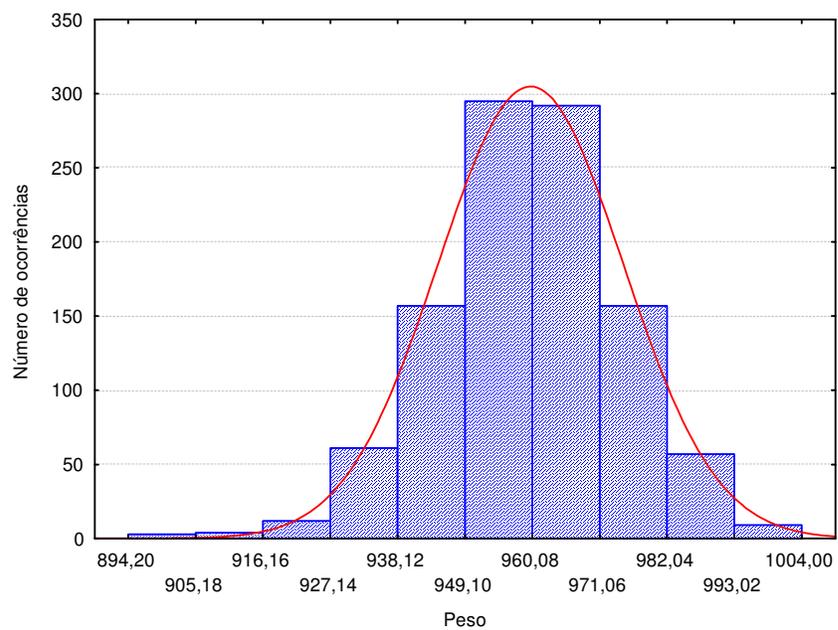


Figura 10 - Histograma da Variável *Peso*

Na Figura 10, também se evidencia que a mesma apresenta uma distribuição normal.

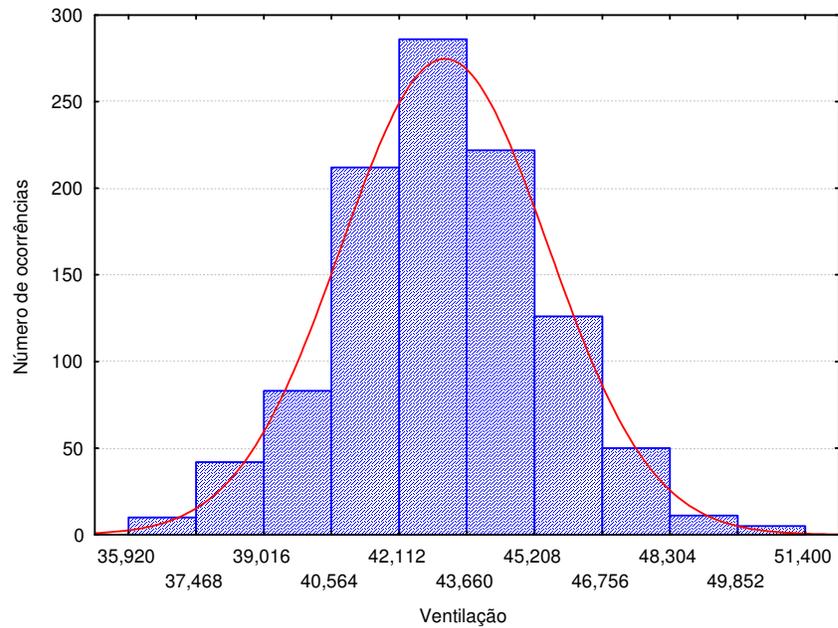


Figura 11 - Histograma da Variável Ventilação

Na Figura 11 mostra que a Ventilação apresenta uma distribuição normal.

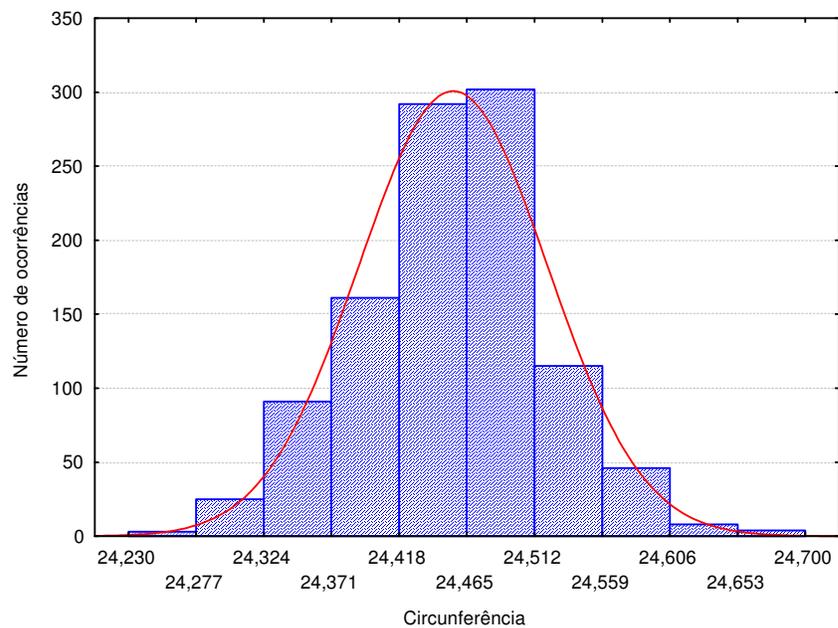


Figura 12 - Histograma da Variável Circunferência

Na Figura 12 observa-se que a Circunferência apresenta o comportamento de uma distribuição normal. Portanto, o requisito de normalidade (Normalidade pelo Teste de Kolmogorov-Smirnov, $p > 0,05$) é satisfeito pelas quatro variáveis, sendo

que é possível aplicar o Controle Estatístico de Processo ao grupo de amostras da empresa em estudo.

Em seguida foi elaborado o Gráfico de Controle de \bar{X} e R das quatro variáveis, para verificar se os mesmos possuem pontos fora de controle ou em não conformidade.

3º Passo: Gráficos de Controle Univariado

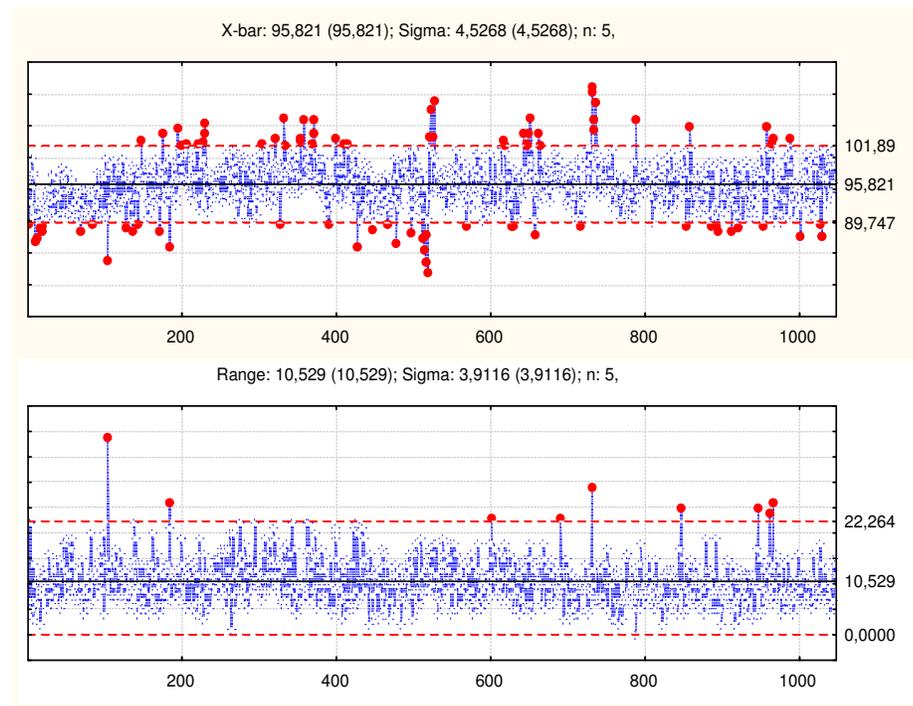


Figura 13 – Gráfico \bar{X} e R da variável *RTD*

Na Figura 13, verifica-se que no Gráfico \bar{X} do *RTD* apresenta inúmeros pontos fora de controle e que no Gráfico R apresentar alguns valores em não conformidade. Conforme mencionado anteriormente, esses limites são estatísticos de padrão 3σ de controle de qualidade, não sendo os limites de projeto de produto utilizados na empresa.

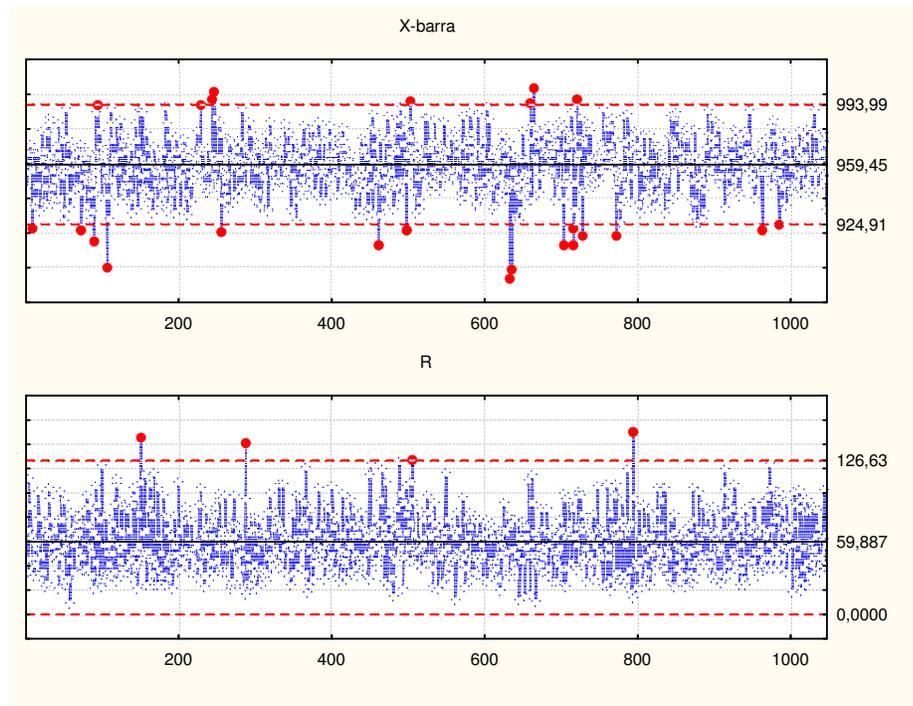


Figura 14 – Gráfico \bar{X} e R da variável Peso

Observa-se que no Gráfico \bar{X} do Peso apresenta alguns pontos fora de controle e que no Gráfico R apresentar 4 amostras não-conformes.

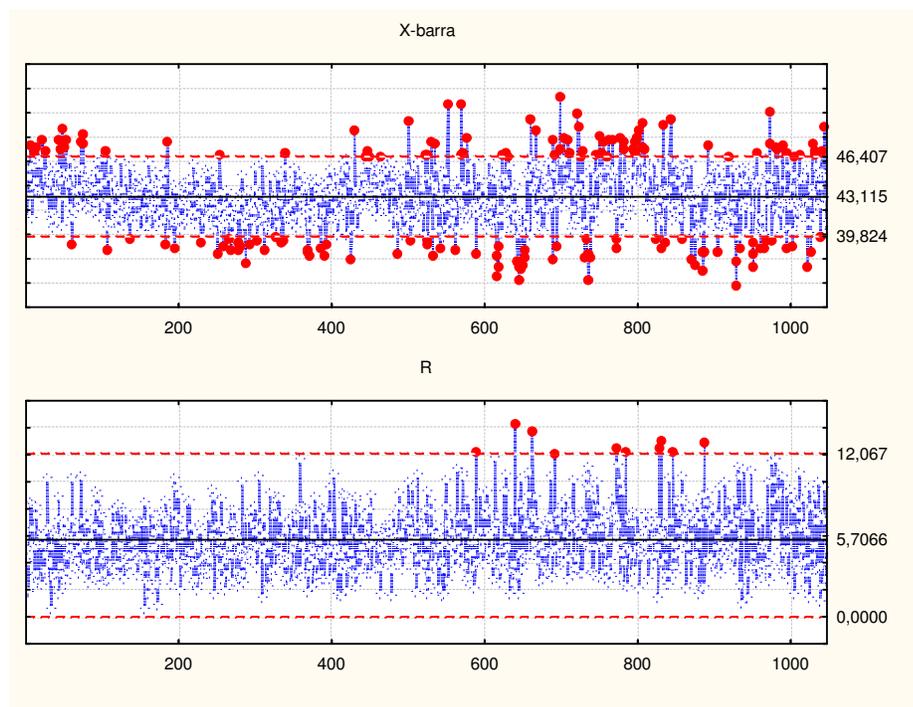


Figura 15 – Gráfico \bar{X} e R da variável Ventilação

Pode-se verificar que no Gráfico \bar{X} e R da ventilação apresentam inúmeros pontos fora de controle ou não conformes.

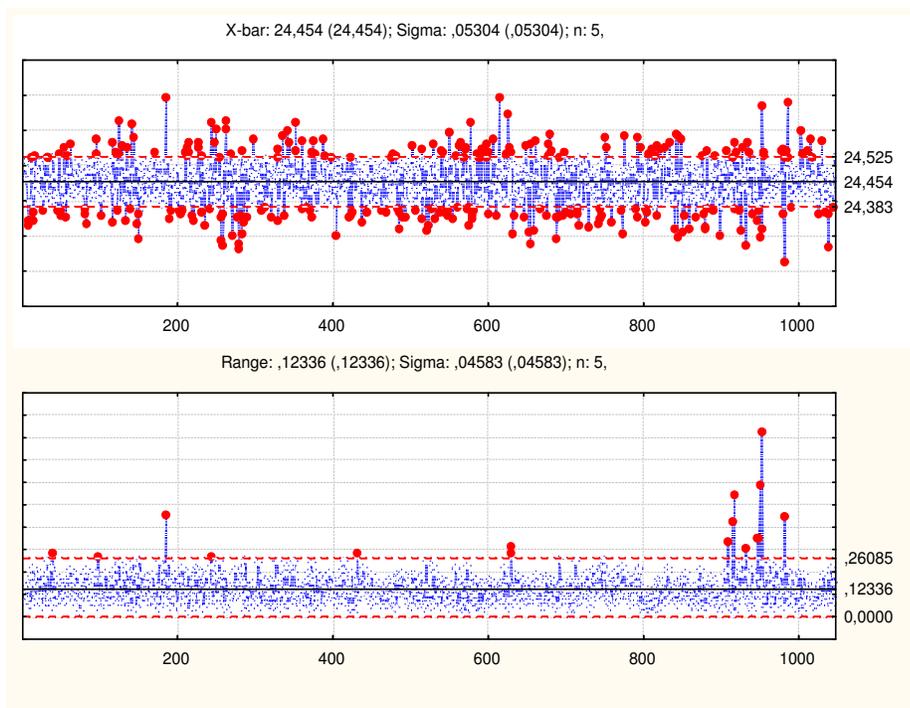


Figura 16– Gráfico \bar{X} e R da Variável Circunferência

Pode-se verificar que no Gráfico \bar{X} da circunferência apresenta inúmeros pontos fora de controle em todo período de análise do processo e no Gráfico R apresenta alguns valores em não conformidade.

4º Passo: Matriz de Correlação e Teste KMO

Quadro 3 - Matriz de Correlação das variáveis envolvidas no processo

Valor de r signif.	RTD	Peso	Ventilação	Circunferência
RTD	1,0000			
	p= ---			
Peso	0,1986	1,0000		
	p=0,00	p= ---		
Ventilação	-0,1499	0,3307	1,0000	
	p=0,00	p=0,00	p= ---	
Circunferência	-0,1028	0,1905	0,2549	1,0000
	p=,000	p=0,00	p=0,00	p= ---

Observa-se que todas as variáveis se correlacionam significativamente entre elas, isso é uma excelente pressuposição para a aplicação da Análise de Componentes Principais.

Para confirmar a pressuposição a cima aplicou-se também o teste de Kaiser-Meyer-Olkin. O KMO que tem a finalidade de examinar o ajuste dos dados, tomando todas as variáveis simultaneamente, e provê uma informação sintética sobre os dados.

O teste KMO foi significativo, obtendo como resultado $KMO=0,488$ ($p=0,0001$) satisfazendo a pressuposição de que as variáveis poderão ser agrupadas pelas componentes principais.

5º Passo: Determinação do número de componentes principais

A fim de identificar as variáveis que apresentam maior variabilidade, ou, as possíveis causadoras da instabilidade no sistema, utilizam-se as primeiras componentes, que são representadas pelos maiores autovetores. Neste caso, a seleção das componentes será feita utilizando os critérios de Kaiser (1960) que diz que, em geral, uma explicação em torno de 70% são suficiente para que as componentes sejam selecionadas e o Critério gráfico de Cattell (1966) vem a ser um critério alternativo.

Segundo os critérios de seleção segundo Kaiser (1960), escolhem-se apenas os autovalores maiores do que 1, ou que representem em torno de 70% da variância acumulada.

Tabela 4 – Resultados da Soma dos Quadrados Extraídos (Extração da Componente Principal)

Componente	Autovalor Inicial			Soma dos Quadrados Extraídos		
	Valor	% da Variância	% da Var. Acumulada	Total	% da Variância	% da Var. Acumulada
1	1,524	38,097	38,097	1,524	38,097	38,097
2	1,164	29,096	67,193	1,164	29,096	67,193
CP	3	,775	19,387	86,580		
	4	,537	13,420	100,000		

Observando a Tabela 4, serão escolhidas as duas primeiras componentes com uma explicação total do conjunto de dados de 67,193%, sendo que a primeira

(CP₁) acumula 38,097% das características das variáveis e a CP₂ 29,096%, num total de 76,193%.

Na Figura 17 observa-se os autovalores necessários para a seleção do número de componentes que devem ser utilizadas para análise segundo o critério gráfico de Cattell (1966) (valores acima da linha em vermelho).

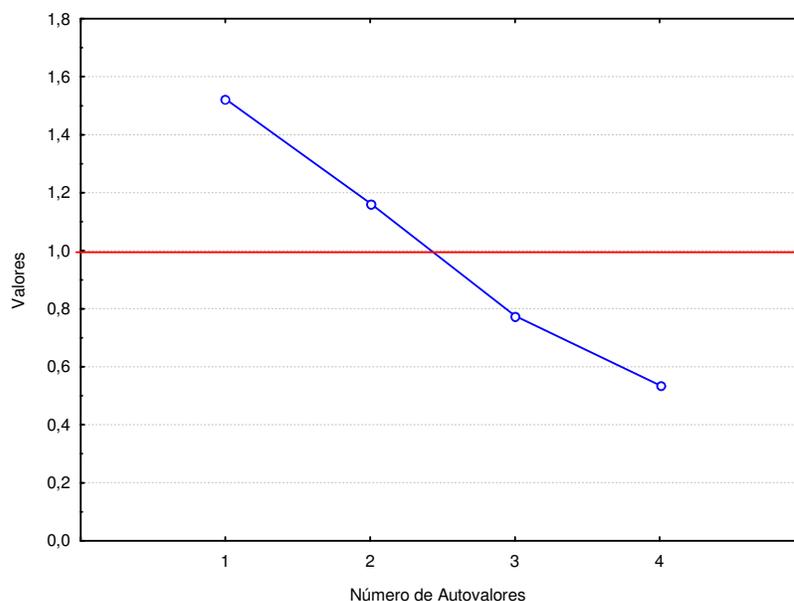


Figura 17 – Gráfico representativo dos Auto Valores

6º Passo: Correlação das variáveis iniciais e as componentes principais

Quadro 4 – Matriz de correlação das variáveis com as componentes principais

Valor de R	Componentes	
	CP ₁	CP ₂
Significância		
<i>RTD</i>	-0,087 p = 0,001	0,909 p = 0,001
Peso	0,696 p = 0,001	0,509 p = 0,001
Ventilação	0,781 p = 0,001	-0,162 p = 0,001
Circunferência	0,650 p = 0,001	-0,230 p = 0,001

Observamos que no Quadro 4, que a CP_1 incorporou as características das variáveis: peso, ventilação e circunferência, e a CP_2 incorporou as características da variável RTD .

7º Passo: Análise das componentes principais

4.1 Análise gráfica da primeira CP através dos gráficos \bar{X} e EWMA

A Figura 18 apresenta a análise do gráfico \bar{X} da primeira Componente Principal, pode-se observar vários pontos em vermelho, estes pontos estão fora dos limites de 3σ , portanto causam instabilidade ao processo.

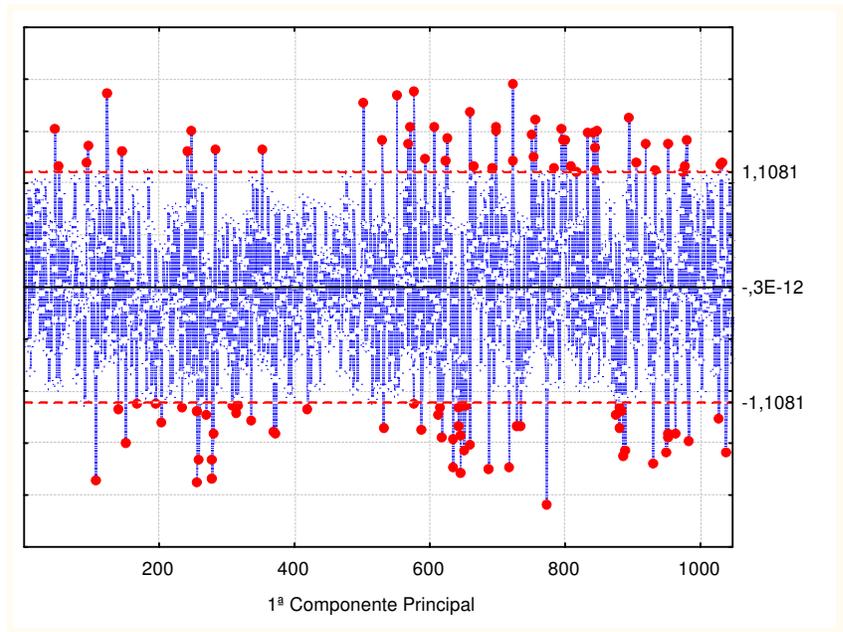


Figura 18 - Gráfico X-barra para a primeira componente principal

A fim de melhor analisar os gráficos \bar{X} , utilizar-se-ão os testes de seqüência (*Run Test*) aplicados sobre o gráfico *EWMA*, os quais ajudarão a identificar os pontos fora de controle ou em não conformidade no processo produtivo.

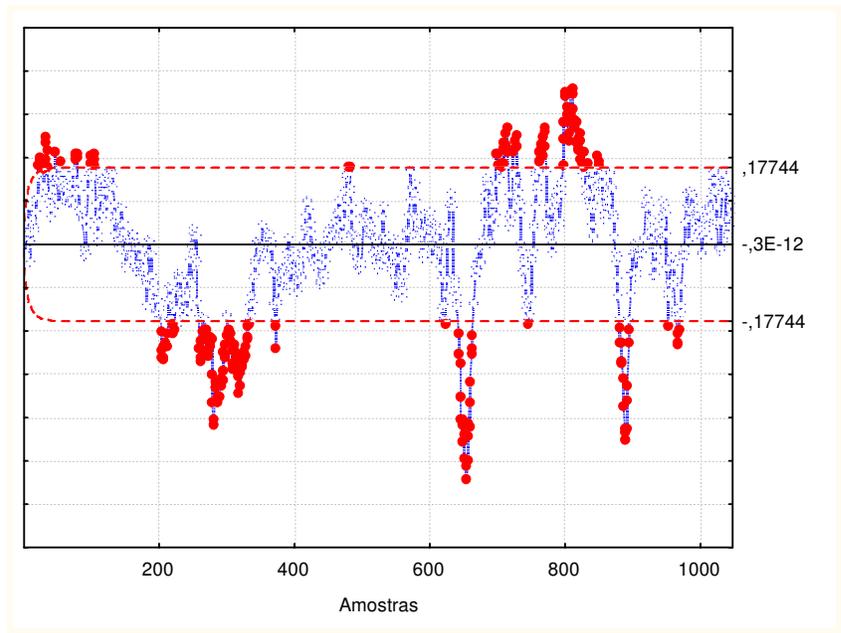


Figura 19 - Gráfico *EWMA* para a primeira *CP* com $\lambda = 0,05$ e $L = 2,5$

A análise dos gráficos de controle possibilita a identificação se o processo está ou não sob controle, o que significa a ausência de causas especiais de variação. Quando um processo está controlado ocorre um padrão normal de variação, pois os pontos distribuem-se aleatoriamente em torno da média, indicando a ausência de tendências crescentes ou decrescentes, ciclos, estratificações ou misturas e pontos que ultrapassaram os limites de controle.

Há uma regra básica para verificar se o processo se encontra estável: basta dividir o intervalo entre os limites superior e inferior de controle em seis faixas, ou seja, cerca de 34% dos pontos devem estar em cada faixa C, 13,5% dos pontos em cada faixa B e 2,5% dos pontos em cada faixa A, conforme mostra a figura 20, com algumas adaptações.

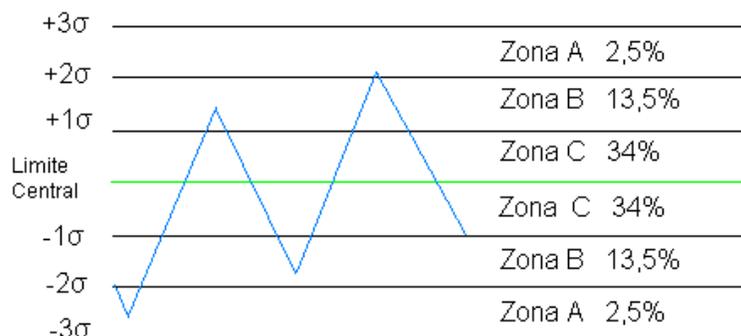


Figura 20 – Teste de Seqüência (*Run Test*)

No Quadro 5, verifica-se que o Teste de Seqüência localiza por Zonas onde se encontra o ponto fora de controle, e relata de forma detalhada qualquer indício de instabilidade.

Quadro 5 – Teste de Seqüência da primeira CP

Amostras fora dos limites de controle	de	até
9 amostras do mesmo lado do centro	216	224
	306	314
	323	331
	721	729
	1015	1023
6 amostras em linha decrescente	49	54
14 amostras alternando para cima e para baixo	OK	OK
2 de 3 amostras na zona A ou além	149	151
	182	184
	448	450
	485	487
	503	505
	772	774
	914	916
	980	982
	983	985
4 de 5 amostras na zona B ou além	625	629
	912	916
	979	983
15 amostras na Zona C	641	655
	686	700
	806	820
8 amostras para além da zona C	OK	OK

Os testes de seqüência, observados no Quadro 5, indicam a existência de algumas variações no processo, estas quais devem ser eliminadas ou reduzidas.

Conforme a quadro temos 9 amostras do mesmo lado do centro: de 216 até 224, de 306 até 314, de 323 até 331, de 721 até 729 e de 1015 até 1023.

Constatou-se também 6 amostras em linha decrescente de 49 até 54; ocorrem também 2 de 3 amostras na Zona A ou além de 149 até 151, de 182 até 184, de 448 até 450, de 485 até 487, de 503 até 505, de 772 até 774, de 914 até 916, de 980 até 982 e de 983 até 985.

Visualizou-se que 4 de 5 amostras estão na Zona B ou além de 625 até 629, de 912 até 916 e de 979 até 973; temos também 15 anos atrás na Zona C ou além de 641 até 655, de 868 até 700 e de 806 até 820.

Esses resultados, obtidos com a utilização do teste de seqüência nos confirma os testes anteriores, a primeira componente apresenta vários pontos em não conformidade com os limites de 3σ utilizados no Controle Estatístico do Processo.

4.2 Análise gráfica da segunda CP através dos gráficos \bar{X} e EWMA

Agora será analisada a segunda CP da mesma forma que a primeira, onde na Figura 21 também constatou-se vários pontos em não conformidade.

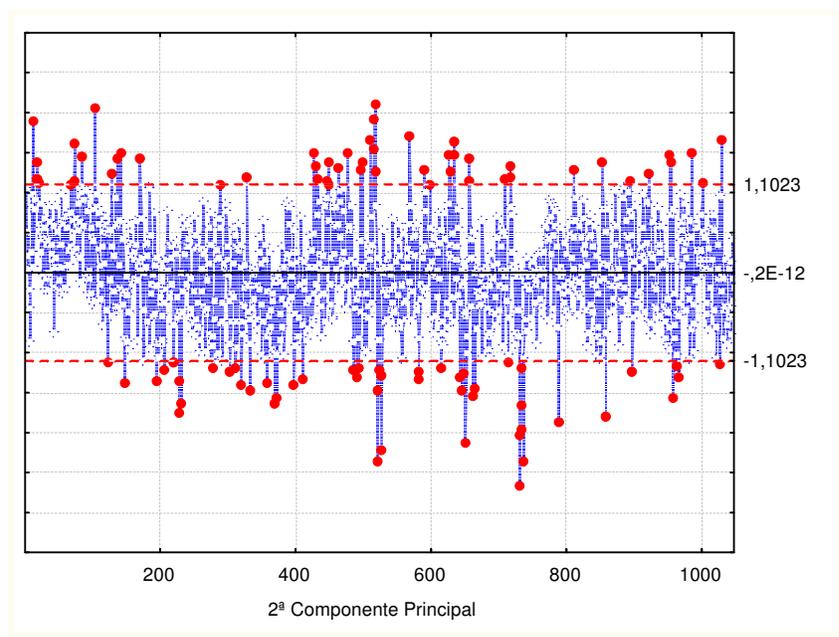


Figura 21 - Gráfico \bar{X} para a segunda componente principal

Abaixo tem-se o gráfico *EWMA* com vários pontos vermelhos, também evidenciando a instabilidade do processo na CP_2 .

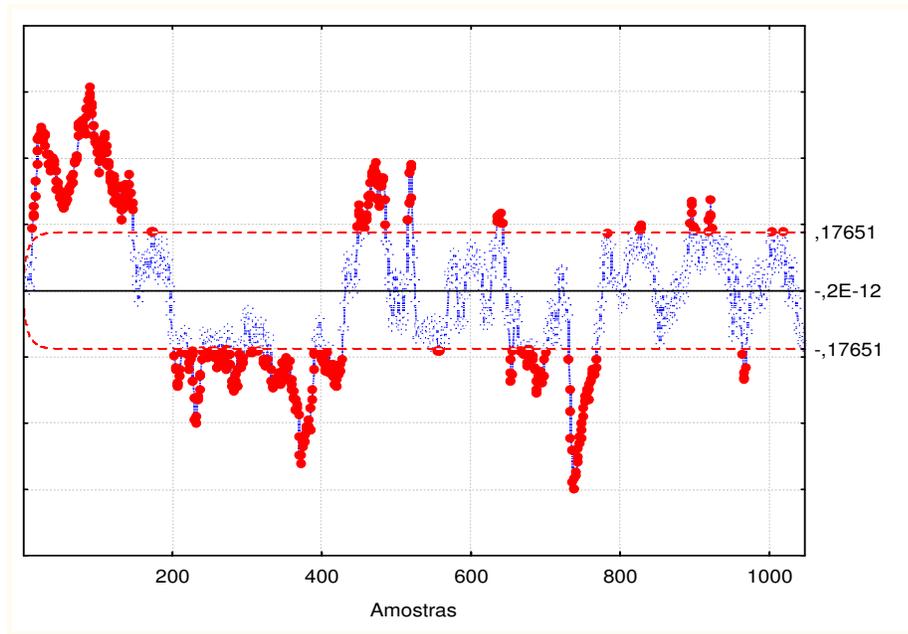


Figura 22 - Gráfico *EWMA* para a segunda CP com $\lambda = 0,05$ e $L = 2,5$

No Quadro 6 o Teste de Seqüência da CP_2 , demonstra muitos pontos não conformes, como na CP_1 , o processo apresenta muita variabilidade.

Quadro 6 – Teste de Seqüência da segunda CP

Amostras fora dos limites de controle	de	até
9 amostras do mesmo lado do centro	584	592
	778	786
	795	803
	827	835
	958	966
	1033	1041
6 amostras em linha decrescente	OK	OK
14 amostras alternando para cima e para baixo	OK	OK
2 de 3 amostras na zona A ou além	45	47
	182	184
	360	362
	425	427
	599	601
4 de 5 amostras na zona B ou além	360	364
	397	401
	432	436
	959	963
	1037	1041
15 amostras na Zona C	854	868
8 amostras para além da zona C	OK	OK

Os testes de seqüência do Quadro 6, também indicam a existência de variações no processo. Tem-se 9 amostras do mesmo lado do centro: de 584 até 592, de 778 até 786, de 795 até 803, de 827 até 835, de 958 até 966 e de 1033 até 1041.

Observa-se que 2 de 3 amostras estão na Zona A ou além, em 45 até 47, de 182 até 184, de 360 até 362, de 425 até 427 e de 599 até 601. Ocorrem também 4 de 5 amostras na Zona B ou além de 360 até 364, de 397 até 401, de 432 até 436, de 959 até 963 e de 1037 até 1041. Ainda existem 15 amostras na Zona C em 854 até 868.

A segunda componente também mostra a instabilidade que ocorre no processo, ela é tão acentuada como na primeira componente, pois sua variabilidade é tão instável quanto a primeira CP.

Após a análise dos gráficos X-barra e *EWMA* da primeira e segunda Componente Principal, conclui-se que o processo produtivo apresenta falhas de controle de qualidade, pois em todo período estudado as duas CPs apresentaram ocorrências além dos limites de controle de 3σ .

O processo produtivo deve ser revisado, a fim de se verificar as falhas durante a fabricação do produto. Essa etapa deve envolver todos os colaboradores da linha produtiva e a gerência de produção, pois processos e metodologias devem ser revistos e corrigidos.

Por fim, acrescenta-se ainda, que as metodologias das ferramentas ACP e *EWMA* incrementam e completam o Controle Estatístico de Processo, pois produzem várias informações de variações e instabilidade na linha produtiva, auxiliando tanto o operador como a gerência na tomada de decisões.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi aplicar ferramentas estatísticas multivariadas de Controle Estatístico do Processo para monitorar a eficiência do processo produtivo da empresa “X” na fabricação de cigarros.

Utilizando o auxílio de gráficos de controle univariados e multivariados, verificou-se a caracterização do sistema quanto a sua normalidade e estabilidade.

A revisão de literatura foi importante, pois subsidiou a agregação de conhecimentos e procedimentos para a utilização correta dos gráficos.

Neste contexto, a Análise dos Componentes Principais (ACP) é um método estatístico linear que calcula os autovalores e autovetores da matriz de covariância dos dados e, com esse resultado, possibilita a redução dimensional dos dados e a análise dos padrões principais de variabilidade presentes.

Assim, a contribuição da ACP pode ser percebida quando se analisou os valores de variância e o desvio padrão da estimativa. Os valores destas medidas calculados pelo modelo usando a primeira componente principal tornando evidentes as falhas do processo produtivo. Além disso, evidenciou o conjunto de variáveis mais significativas causadoras de instabilidade no sistema, satisfazendo o objetivo específico relacionado à importância da análise multivariada no Controle Estatístico do Processo por meio da Análise de Componentes Principais.

O gráfico *EWMA* aplicado nas Componentes Principais evidenciou as falhas, mesmo pequenas, na linha produtiva mostrando sua importância para detectar os pequenos desvios da média, auxiliando na avaliação da estabilidade do processo, em termos de obter um maior controle sobre os processos multivariados.

À medida que os desperdícios vão sendo diminuídos, novos padrões de desempenho são alcançados. Assim, a sua eliminação contínua conduz melhoramentos de produtividade e qualidade e redução de custos de produção, contribuindo para uma maior competitividade.

Portanto, pode-se afirmar que os objetivos foram atingidos, pois os resultados da pesquisa evidenciam a não-conformidade das amostras em diversos pontos do processo. Com isso, espera-se ter contribuído para a evolução da abordagem multivariada na análise da qualidade do produto através do monitoramento do processo produtivo.

REFERÊNCIAS

AFUBRA. **Associação dos Fumicultores do Brasil**. Disponível em: < http://www.afubra.com.br/principal.php?acao=conteudo&u_id=1&i_id=1&menu_site_id=10> Acesso em: 2 de fev. de 2011.

ALEXANDER, C. **Modelos de Mercado**: um guia para a Análise de Informações Financeiras/Carol Alexander. Trad: José Carlos de Souza e Santos. São Paulo: Bolsa de Mercadorias & Futuros, 2005.

ALVES, C.C. **Gráficos de Controle CUSUM: um enfoque dinâmico para a análise estatística de processos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

_____. **O método de Equação Integral com Quadratura Gaussiana para otimizar os parâmetros do gráfico de controle multivariado de Somas Acumuladas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

BALDO, C. R. **A interação entre o controle de processos e a metrologia em Indústrias de manufatura**. Dissertação (Mestrado em Metrologia). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

BALESTRASSI, P. P. **Identificação de padrões em gráficos de controle estatístico de processos, em tempo real, utilizando séries temporais e redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2000.

BERNARD, S. A. **A multivariate EWMA approach to monitor process dispersion**. 2001. 125 f. Thesis (PhD) - Department of Decision and Information Technology of the University of Maryland, 2001.

BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Robustness of the EWMA control chart to non-normality. **Journal of Quality Technology**, 31(3), p. 309-316, 1999.

CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da Rotina do Trabalho do Dia-a-Dia**. 8^a ed., Minas Gerais: INDG Tecnologia e Serviços Ltda., 2004.

CATTEL, R. B. **The scree test for the number of factors**. In: ---. Multivariate behavior research. v.1, p. 245-276, 1966.

CORTIVO, Z. D. **Aplicação do controle estatístico de processo em seqüências curtas de produção e análise estatística de processo através do planejamento econômico**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

CROSBY, P. B. **Qualidade – falando sério**. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986.

_____. **Qualidade é investimento**. 7. ed. Rio de Janeiro: José Olympio, 1999.

CROWDER, S. V. **A Simple Method for Studying Run Length Distributions of exponentially Weighted Moving Average Charts**. *Technometrics*, 29, p. 393-407, 1987a.

_____. Computation of ARL for combined individual measurements and moving range charts. **Journal of Quality Technology**, 19, p. 98-102, 1987b.

_____. Design of Exponentially Weighted Moving Average Schemes. **Journal of Quality Technology**, 21, p. 155-162, 1989.

CROWDER, S. V.; HAMILTON, M. D. An EWMA for monitoring a process standard deviation. **Journal of Quality Technology**, 24(1), p. 12-21, 1992.

DEMING, W. E. **Qualidade: a revolução da administração**. Rio de Janeiro, Ed. Marques-Saraiva, 1990.

DIAS, L. C. **Sistemática para apoiar a redução de perdas e estabilização de processos**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

FALCÃO, A. S. G. **Diagnóstico de perdas e aplicação para controle da qualidade e melhoria do processo de produção de uma etapa construtiva de edificações habitacionais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

FEIGENBAUM, A. V. **Controle da qualidade total – gestão e sistemas**. São Paulo: Ed. Makron Books, 1994.

FIATES, G. G. S. **A utilização do QFD como suporte a implementação do TQC em empresas do setor de serviços**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

GARVIN, D. A. **Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2002.

_____. **Gerenciando a Qualidade**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 1992.

GODOY, L. P. **Qualidade e produtividade no PPGE: histórico do programa, análise dos serviços hospitalares, ensino superior e dos recursos humanos**. Santa Maria: UFSM, 2000.

GRANT, E.; Leavenworth, R. S. **Statistical Quality Control**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

GRIGORYAN, A.; HE, D. Multivariate double sampling **S** charts for controlling process variability. **International Journal of Production Research**, v. 43, p. 715-730, 2003.

GUARNIERI, J. P. **Eficiência dos gráficos de controle na detecção de outliers em processos autorregressivos e de médias móveis.** (Dissertação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

GUAZZI, D. M. **Utilização do QFD como uma ferramenta de melhoria contínua do grau de satisfação de clientes internos. Uma aplicação em cooperativas agropecuárias.** 1999. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

GUIMARÃES; M. A. P. G. **Aplicação de HACCP e técnicas estatísticas em uma fábrica de farelo de soja.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

HRADESKY, J. L. **Productivity & Quality Improvement – A Practical Guide to Implementing Statistical Process Control.** New York: McGraw-Hill, 1988.

HUNTER, J. S. **The exponentially weighted moving average.** Journal of Quality Technology, 18(4), p. 203–210, 1986.

JURAN, J. M. **Planejando para a qualidade.** Tradução de João Csillag, Cláudio Csillag. São Paulo: Pioneira, 1990.

_____. **Controle da qualidade handbook.** Vol VI. São Paulo: Makron Books, 1992.

_____. **Juran's quality handbook.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

_____. **A qualidade desde o projeto.** São Paulo: Pioneira, 2002.

JONHSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied Multivariate Statistical analysis.** Prentice Hall, 6th ed, 2002.

Kaiser, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, 20, 141-151, 1960.

KLUG, M.; MARSHALL, I.; Viterbo, E. **Gestão da qualidade.** São Paulo, 2003.

KONRATH, A. C. **Decomposição da estatística do gráfico de controle multivariado T^2 de Hotelling por meio de um algoritmo computacional.** 2002. 90f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KUME, H. **Métodos estatísticos para melhoria da qualidade.** São Paulo: Editora Gente, 1993.

KURCREVSKI, C. **Estudo do controle estatístico de processo das indústrias cerâmicas da região centro sul do estado do Paraná, com base nos índices de capacidade.** Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

LOPES, L. F. D. **Análise de componentes principais aplicada à confiabilidade de sistemas complexos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

LUCAS, J.M.; SACCUCCI, M. S. **Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements**. *Technometrics*, 32, 1-29, 1990.

MACHADO, M. A. G. **Gráficos de Controle para o monitoramento de processos multivariados**, SP. 2009. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia) Universidade Estadual Paulista, 2009. Disponível em: < <http://www.bv.fapesp.br/pt/bolsas/111526/graficos-controle-monitoramento-processo-multivariados>>. Acesso em: 15 de jan. de 2011.

MALHOTRA, N.K. **Pesquisa de Marketing: uma orientação aplicada**. Porto Alegre: Bookman, 2001

MARSHALL, I.; CIERCO, A. A.; Rocha, A. V.; Mota, E. B. **Gestão da qualidade**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Aperfeiçoamento da qualidade e da produtividade** - guia prático para implementação do CEP. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

MASON, R. L., TRACY, N.D & YOUNG, J.C. Decomposition of T^2 for Multivariate Control Chart Interpretation. **Journal of Quality Technology**, v.27, nº 2, p.99-108, 1995.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. Canada: John Wiley e Sons, Inc, Third Edition, 1997.

_____. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

_____. RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

_____. **Introduction to statistical quality control**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 677p.

MOOD, A. M.; GRAYBILL, F. A.; BOES, D. C. **Introduction to the theory of statistics**. Ed. McGraw-Hill. 3ed, 1974.

MICHEL, R. **Cartas adaptativas de controle: desenvolvimento de metodologia para implementação em processos de manufatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

MICHEL, R. e FOGLIATTO, F. S. Projeto Econômico de Cartas Adaptativas para Monitoramento de Processos. Artigo submetido à **Revista Produto & Produção** para publicação, 2000.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte, Editora da UFMG, 2005.

MOROCO, J. **Análise Estatística. Com Utilização do SPSS**, Lisboa: Sílabo. 2003.

NARDI, J-B. **A história do fumo brasileiro**. Rio de Janeiro, ABIFUMO, 1985.

NETO, E. P. **Gestão da qualidade: princípios e métodos**. 2. ed. São Paulo: Ed. Pioneira, 1992.

PALADINI, E.P. **Gestão de Qualidade no Processo: A Qualidade na Produção de Bens e Serviços**. São Paulo: Atlas, 1995.

_____. **Gestão da Qualidade: Teoria e Prática**. São Paulo, Atlas, 2004.

PAN, X. Computer-aided SPC and cybernetic view on quality control. **International Journal of Quality & Reliability Management**. v. 23, n. 9, p. 1192-1203, 2006.

PAULA. I. C.; FOGLIATTO, F. S; ROSA. A. F. P. **Análise comparativa das cartas de controle de Hotelling e cartas baseadas em Componentes Principais no controle multivariado de processos industriais**. Artigo da ABEPRO 2001. Disponível em: < http://www.abepro.org.br/biblioteca/ ENEGEP2001_TR22_0108.pdf>. Visitado em 22 jan. 2011.

PEARSON, K. On lines and planes of closed fit to system of point in space. **Phil. Mag.**, v. 6, p. 559 – 572. 1901

PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos: estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais**. São Paulo: Edusp, 2001.

PHILLIPS-Donaldson, D. **100 Years Of Juran**. Quality Progress (Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality) 37 (5): 25–39, 2004.

PIRES, V. T. **Implantação do Controle Estatístico de Processos em uma empresa de manufatura de óleo de arroz**. (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

PITT, H. **SPC for the rest of us: a Personal path to Statistical Process Control**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1994.

PREVITALLI, F. S. Disponível em : < www.unicamp.br/cemarx/anais_v_coloquio_arquivos/arquivos/comunicacoes/gt4/sessao4/Fabiane_Previtalli.pdf+previtalli+2004+tabaco+cigarro&hl=pt-R&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEESiYPgMigJRuZALJpme74P8A4u2aQk7W1y6jg8vISFNluMm55rGNaf-HJPz8k0XwkJ9QX-mjo9gM_Y3DzcuTUegN3IVBb6PGJdEFfbnA4JzfDak-v6o0O03Wk4rdZiUf0nxcUK&sig=AHIEtbSnFwaRf12Y5TvGerKcvfzmHVUAHA>. Acesso em: 23 de jan. de 2011.

PYLRO, A. S. **Modelo Linear Dinâmico de Harrison & Stevens Aplicado ao Controle Estatístico de Processos Autocorrelacionados**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

RENCHER, A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. New York: John Wiley. 1995.

REYNOLDS M. R. J.; STOUMBOS Z. G. **Comparisons of Some Exponentially weighted Moving Average Control Charts for Monitoring the Process Mean and Variance**. *Technometrics*, 48(4). pp 550-567, 2006.

RIBEIRO, J.L.; CATEN, C.T. **Controle Estatístico do Processo**. Apostila do Curso de Pós – Graduação em Engenharia de Produção. Editora da UFRGS. Porto Alegre. 1998

ROBERTS S. W. **Control chart tests based on Geometric Moving Averages**. *Technometrics* 1, 1959.

ROBSON, P.B.; HO, T. Y. **Average run lengths of geometric moving average charts by numerical methods**. *Technometrics*, v.20, p.85-93, 1978.

ROSA, A. F. P. **Método para controle estatístico multivariado de processos em batelada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

ROSA. A. F. P.; FOGLIATTO, F. S. **Cartas de controle multivariadas baseadas em componentes principais**. Artigo da ABEPRO. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1999_A0139.PDF>. Visitado em: 5 fev. 2011.

ROSS, S. **A first course in probability**. 3.ed.New York, Mac Millian Collegy, 1994.

SANTOS. A. I. **Aplicação dos gráficos de controle para valores individuais na área de saúde**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2006.

SEBER, G. A. F. **Multivariate Observations**. New York: John Wiley. 1986.

SLACK, N. **Vantagem competitiva em manufatura – atingindo competitividade nas operações industriais**. São Paulo: Ed. Atlas, 2002.

SILVA, E. **O método de Avaliação por Fases no Asseguramento da Qualidade antes da Produção Seriada: Um modelo para Implementação na Gestão da Qualidade**. Tese de M.Sc., Latec, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 2008.

SKINNER, K. R. **Multivariate process control for discrete data**. 2002. 117f. Thesis (PhD) - Arizona State University, 2002.

SIQUEIRA, L. G. P. **Controle Estatístico de Processos**. Equipe Grifo. São Paulo: Pioneira, Série Qualidade Brasil. Livro nº 9, p. 12-13, 1997.

SOUZA CRUZ. Disponível em: < http://www.souzacruz.com.br/group/sites/SOU_7UVF24.nsf/vwPagesWebLive/DO7V9KPU?opendocument&SKN=1> Acesso em: 17 de janeiro de 2011.

SOUZA, A. M. **Monitoração e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados**. Tese (Doutorado Engenharia de Produção) – Universidade Federal Santa Catarina, 2000.

SOUZA, F. M. **Estudo do consumo e do número de consumidores de energia elétrica do RS por meio de componentes principais e modelos de previsão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011.

SOUZA, F. S. **Índices de Capacidade para Gráficos de Controle baseados em Modelos de Regressão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

SOUZA, G. R. **Implantação de controle estatístico de processos em uma empresa de bebidas**. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

STRANG, G. **Linear Algebra and Its Applications**. 3a Ed., Forth Worth: Saunders College Publishing, 1988.

TESTIK, M. C. **Univariate and multivariate statistical process control: a generalized likelihood ratio approach**. 2003. 135f. Tese (PhD) - Arizona State University, 2003.

THOMAS, J. B. **Interpretation of multivariate control chart signals**. 2002. 128f. Thesis (PhD in the Program of Applied Statistics) – Graduate School of The University of Alabama, Tuscaloosa, 2002.

TORMINATO, S. M. **Análise Da Utilização Da Ferramenta CEP: Um Estudo De Caso Na Manufatura De Autopeças**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

WADSWORTH, H. M., et al. **Modern methods for quality control and improvement**. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2001.

WHEELER, D. J. **Advanced Topics in Statistical Process Control**. SPC Press, 1995.

WOODALL, W. H., MARAGAH, H. D. **Control charts using exponential smoothing techniques**. Technometrics, 32, pp 1-29, 1990.

WORTHAM, A. W.; HEINRICK, G. F. **Control charts using exponential smoothing techniques**. ASQ Annual Technical Conference Preceedings. pp 451-458, 1972.

VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000.

ZAGO, V. A. **Avaliação da aplicação de gráficos de controle com memória em uma indústria de papel e embalagens**. (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

ZANINI, R. R. **Utilização dos gráficos de controle: uma aplicação na área de saúde**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2006.