

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROJETO DE
MELHORIAS EM UM PROCESSO DE REAÇÃO
QUÍMICA EM BATELADA UTILIZANDO O MÉTODO
DMAIC**

Jorge da Luz Matos

Porto Alegre, 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROJETO DE MELHORIAS EM UM
PROCESSO DE REAÇÃO QUÍMICA EM BATELADA UTILIZANDO O
MÉTODO DMAIC**

Jorge da Luz Matos

Orientadora: Prof^a. Carla Schwengber ten Caten, Dr^a.

Banca Examinadora:

**Dinara Westphalen Xavier Fernandez, Dr^a.
Prof^a. Depto. de Estatística / UFRGS**

**Fernando Gonçalves Amaral, Dr.
Prof. PPGEP / UFRGS**

**Nilson Romeu Marcílio, Dr.
Prof. Depto. de Engenharia Química / UFRGS**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção como requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Área de concentração: Qualidade e Gerência de Serviços

Porto Alegre, dezembro de 2003.

M433i

Matos, Jorge da Luz

Implementação de um projeto de melhorias em um processo de reação química em batelada utilizando o método DMAIC / Jorge da Luz Matos; orientadora, Carla Schwengber ten Caten .— Por_ to Alegre, 2003.

Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

1. Processos de produção. 2. Indústria petroquímica. 3. Sistema de produção – Otimização. I. Ten Caten, Carla Schwengber, orient. II. Título.

CDU 658.56

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pela orientadora e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Prof^a. Carla Schwengber ten Caten, Dr^a.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.

Coordenador do PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Dinara Westphalen Xavier Fernandez, Dr^a.

Prof^a. Depto. de Estatística / UFRGS

Fernando Gonçalves Amaral, Dr.

Prof. PPGEP / UFRGS

Nilson Romeu Marcílio, Dr.

Prof. Depto. de Engenharia Química / UFRGS

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora, professora Carla Schwengber ten Caten, pelo conhecimento transmitido, pelo apoio dispensado e pela paciência ao conduzir o trabalho.

Aos funcionários da empresa que integraram o projeto, pela oportunidade oferecida para a aplicação dos conhecimentos teóricos em um ambiente real. Pelo apoio, colaboração e companheirismo demonstrado durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores e funcionários do PPGEP, pela forma como sempre estiveram presentes e dispostos a me auxiliar, quando se fez necessário.

Aos professores componentes da banca examinadora, pelas significativas contribuições.

Aos meus pais, João e Maria, meus maiores exemplos de força, fé e amor à vida, que alicerçam constantemente a luta na conquista dos meus ideais.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Finalmente agradeço a minha amada esposa Fabiana, pelo incentivo e apoio dispensados nos momentos difíceis.

Dedico este trabalho aos meus pais João e Maria; minhas irmãs Iolanda e Elivete; meu irmão Rodrigo; meus filhos (as) Lisiane, Diego Christian, Jéssica, Jennifer e minha esposa Fabiana; que me inspiraram e sempre me incentivaram na busca de mais esta conquista.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT	11
INTRODUÇÃO	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 TEMA E OBJETIVOS	13
1.3 JUSTIFICATIVA.....	13
1.4 MÉTODO DE TRABALHO.....	15
1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	16
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 O SEIS SIGMA	18
2.1.1 A origem do Seis Sigma	18
2.1.2 Filosofia Seis Sigma	19
2.1.3 As métricas do Seis Sigma	20
2.1.4 Escala sigma	22
2.1.5 Seleção do projeto Seis Sigma.....	22
2.2 PROCESSOS EM BATELADA.....	23
2.2.1 Introdução	23
2.2.2 Definição de processos em batelada.....	23
2.2.3 Características dos processos em batelada	24
2.2.4 Fontes de variação em bateladas	25
2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO.....	26
2.3.1 Introdução	26
2.3.2 Definição do CEP	26
2.3.3 Implementação do CEP	27
2.3.4 Sub-grupos racionais	27
2.3.5 Cartas de controle para variáveis.....	28
2.3.6 Interpretação da estabilidade do processo	33
2.3.7 Estudo de capacidade do processo	34
2.4 ANÁLISE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	37

2.4.1	Introdução	37
2.4.2	Fontes de variação em sistemas de medição	37
2.4.3	Método da média e amplitude	40
2.4.4	Método da Análise de Variância	43
2.5	ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA (FMEA)	45
2.5.1	Introdução	45
2.5.2	Método de análise	45
2.5.3	Os índices utilizados no FMEA	46
2.6	DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE (QFD)	49
2.6.1	Introdução	49
2.6.2	O uso do QFD	50
2.6.3	As matrizes do QFD	51
2.6.4	Matriz dos processos	51
2.7	ANÁLISE DE REGRESSÃO	53
2.7.1	Introdução	53
2.7.2	Regressão linear simples	53
2.7.3	Regressão linear múltipla	58
3	METODOLOGIA.....	67
3.1	INTRODUÇÃO	67
3.2	O MÉTODO DMAIC	67
3.2.1	Definir	67
3.2.2	Medir	69
3.2.3	Analisar	70
3.2.4	Melhorar	71
3.2.5	Controlar	71
4	DESCRIÇÃO DO ESTUDO, RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1	INTRODUÇÃO	73
4.2	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	74
4.3	MÉTODO DMAIC	75
4.3.1	Etapa Definir	75
4.3.2	Etapa Medir	81
4.3.3	Etapa Analisar	95
4.3.4	Etapa Melhorar	103
4.3.5	Etapa Controlar	104
	CONCLUSÃO.....	105
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICE A	116
	ANEXO A.....	123
	ANEXO B.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de distribuição normal ilustrando a diferença entre processos 3σ e 6σ	20
Figura 2 - Carta de controle para médias.....	28
Figura 3 - Carta de controle para amplitudes.	29
Figura 4 - Curvas de distribuição normal para três processos, A, B e C com $C_{pk}=1$	36
Figura 5 - Fontes de variação observadas em sistemas de medição.....	38
Figura 6 - Representação gráfica da reprodutibilidade para três operadores.	41
Figura 7 - Fluxograma simplificado para a elaboração de um FMEA de processo.	48
Figura 8 - Fluxograma que ilustra a abordagem do QFD.....	50
Figura 9 - Gráfico de dispersão e a reta de regressão ajustada a um conjunto de dados.....	54
Figura 10 - Esquema simplificado do processo de polimerização de NBR especial em emulsão.....	75
Figura 11 - Intervalo de confiança de 95% para a variância da VM.....	78
Figura 12 - <i>Boxplots</i> relacionando a VM com a quantidade de MOD inc.	78
Figura 13 - <i>Boxplots</i> comparando os tempos de reação por reator.....	80
Figura 14 - Diagrama de causa e efeito das variáveis influentes no processo.....	82
Figura 15 - Mapa do processo de produção de NBR em batelada.	84
Figura 16 - Matriz de causa e efeito das variáveis do processo.	85
Figura 17 - Gráfico de Pareto do grau de importância das variáveis do processo.	86
Figura 18 - Carta de controle para os valores individuais do sistema de dosagem do OX ini.	88
Figura 19 - Carta de controle para os valores individuais do sistema de dosagem do OX inc.	89
Figura 20 - Carta de controle para os valores individuais do sistema de dosagem do MOD ini.	89
Figura 21 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do TM.....	89
Figura 22 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem da PC.	90
Figura 23 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do MOD inc.	90
Figura 24 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do MOD ini para $t=20$ min.....	92
Figura 25 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do MOD ini para $t=31$ min.....	92
Figura 26 - Histograma de resíduos para o modelo de regressão da VM.....	97
Figura 27 - Probabilidade normal para os resíduos do modelo de regressão da VM.....	98
Figura 28 - Gráfico dos resíduos contra os valores ajustados para a VM.	98
Figura 29 - Gráfico dos resíduos contra a ordem da coleta dos dados para a VM.....	99
Figura 30 - Histograma de resíduos para o modelo de regressão do tR.	100
Figura 31 - Probabilidade normal para os resíduos do modelo de regressão do tR.	101
Figura 32 - Gráfico dos resíduos contra os valores ajustados para o tR.....	101
Figura 33 - Gráfico dos resíduos contra a ordem da coleta dos dados para o tR.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custos da má qualidade em função do nível sigma do processo, com a média deslocada de $1,5\sigma$	14
Tabela 2 - Tabela simplificada do nível sigma em função número de defeitos produzidos.....	22
Tabela 3 – Tabela para a obtenção da constante d_2	40
Tabela 4 – Médias quadradas para os efeitos das fontes de variação.....	43
Tabela 5 – Critérios para a aceitação de um sistema de medição.....	44
Tabela 6 - ANOVA para o teste de significância da regressão linear simples.....	56
Tabela 7 - Disposição dos dados para utilização no modelo de regressão linear múltipla.....	60
Tabela 8 - ANOVA para o teste de significância da regressão linear múltipla.....	62
Tabela 9 - Estatística descritiva dos valores de VM utilizados para a determinação da situação atual.	77
Tabela 10 - Estatística descritiva dos tempos de reação para a avaliação da situação atual. ...	79
Tabela 11 - Estudo de R&R para a VM do látex NBR.....	95
Tabela 12 - ANOVA para a significância da regressão VM versus t 7 ini, t PC, t MOD inc, MOD inc e TM.	96
Tabela 13 - ANOVA para a regressão de VM versus t 7 ini, t PC, t MOD inc, MOD inc e TM.	97
Tabela 14 - ANOVA para a significância da regressão tR versus T OX ini, t 7 ini e t MOD inc.	100
Tabela 15 - ANOVA para a regressão de tR versus T OX ini, t 7 ini e t MOD inc.	100

RESUMO

Esta dissertação apresenta a implementação das etapas do método DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) no desenvolvimento de um projeto Seis Sigma em uma indústria petroquímica. O objetivo do projeto Seis Sigma foi reduzir a variabilidade de uma característica de qualidade crítica para o cliente e diminuir a dispersão dos tempos de reação entre as bateladas na produção de elastômeros. Neste trabalho são apresentadas as principais técnicas e ferramentas estatísticas utilizadas nas cinco etapas do método DMAIC, tais como *brainstorming*, mapeamento de processo, diagrama de causa e efeito, matriz da causa e efeito, gráfico de Pareto, FMEA e análise de regressão linear múltipla. A pesquisa desenvolvida de forma participativa, através da interação entre o pesquisador e os especialistas do processo, evidenciou a importância do conhecimento técnico do processo e um bom planejamento para a aquisição dos dados, como pontos importantes para a realização de um projeto de melhoria bem sucedido. O estudo apontou ainda, deficiências no sistema de controle de temperatura do reator, no sistema de medição para a característica de qualidade viscosidade *Mooney* e no sistema de dosagem dos insumos.

Palavras-chave:

Seis Sigma, DMAIC, indústria petroquímica, processos em batelada.

ABSTRACT

This work presents the implementation of DMAIC Method (Define, Measure, Analyze, Improve and Control) for a Six Sigma project development in a petrochemical process industry. The purpose of this project is to reduce the variability of a quality characteristic critical to the client and the reaction time variability of rubber production in batch reaction. This research presents the main methods and statistical tools used in the DMAIC method steps as brainstorming, mapping process, cause and effect diagram, cause and effect matrix, Pareto graphic, FMEA, and multiple linear regression analysis. The research was conducted considering the interaction between the researcher and the process practitioners, showing the importance of technical knowledge about the process and good data acquisition planning as important steps to the success of an improvement project. This work also indicated deficiencies in the reactor temperature control system, in the Mooney viscosity quality characteristic measurement system and at the inputs addition system.

Key-words:

Six Sigma, DMAIC, petrochemical industry, batch process.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O atual ambiente de negócios demanda um novo entendimento da qualidade e uma nova definição da alta direção, levando executivos e gerentes da qualidade a seguir um caminho que promova a satisfação do cliente, dos colaboradores, dos acionistas e de toda a organização ao mesmo tempo. Diante dessa realidade, torna-se necessário que as organizações adotem estratégias para melhorar continuamente a gestão de seus negócios e as relações com seus consumidores. Para enfrentar esse ambiente cada vez mais competitivo muitas empresas, na busca da redução da variabilidade das características críticas para a qualidade, estão adotando o Seis Sigma, que é um programa associado aos conceitos de qualidade, lucratividade e aumento da satisfação do cliente (HARRY, 2000a).

O programa Seis Sigma é uma estratégia de gerenciamento desenvolvida para melhorar negócios, que foi primeiramente utilizada pela Motorola nos anos oitenta e popularizada, quando a AlliedSignal e General Electric a adotaram, como método predominante no gerenciamento de seus negócios (ECKES, 2002). A abordagem da Motorola para a melhoria contínua foi baseada na comparação do desempenho do processo com a especificação do produto e um esforço direcionado para a redução de defeitos (FOLARON; MORGAN, 2003). De acordo com Bendell (2001), Seis Sigma é mais que uma técnica de qualidade, trata-se de uma estratégia sistematizada para projetos de programas de melhoria, com o objetivo de atingir um elevado nível de qualidade do produto. Em outras palavras, Seis Sigma é um esforço para otimizar os processos de produção, visando assegurar até doze desvios-padrão (seis para cada lado do valor nominal) dentro da especificação de

qualquer processo. O programa Seis Sigma envolve a identificação do nível de qualidade e a probabilidade de ocorrência de defeitos. A estratégia de negócios Seis Sigma se baseia nas ferramentas estatísticas e especificamente em processos e métodos para alcançar metas mensuráveis, aumentar a eficiência e a produtividade, reduzindo o desperdício e melhorando processos e produtos (CHALLENGER, 2001).

1.2 TEMA E OBJETIVOS

O tema desta dissertação versa sobre programas de melhoria Seis Sigma, o método DMAIC e processos de reação química em batelada na indústria petroquímica.

O objetivo principal deste trabalho é a implementação de um projeto de melhoria em um processo de reação química em batelada com a utilização do método DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) do programa Seis Sigma. Para tanto, será desenvolvido um projeto para diminuir a variabilidade de uma característica crítica para a qualidade do produto e a dispersão nos tempos de processamento das bateladas, seguindo as cinco etapas do método DMAIC.

Os objetivos específicos estão relacionados com:

- apresentar uma visão sobre o programa de qualidade Seis Sigma; o método DMAIC e as principais técnicas e ferramentas estatísticas utilizadas na sua implementação;
- apresentar e comentar técnicas e utilização prática do método DMAIC, apresentando as atividades desenvolvidas, as ferramentas utilizadas e os resultados obtidos em cada etapa do método.
- identificar e priorizar as variáveis do processo que estão mais relacionadas com a característica de qualidade viscosidade *Mooney* e com o tempo de reação das bateladas.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o aumento da concorrência entre as empresas, em função da abertura da economia para o mercado internacional, a partir de 1990 (até então era proibido importar produtos ou serviços com similar nacional), surgiu a necessidade de uma adequação dos meios de produção à nova realidade econômica mundial. As empresas que até então operavam com o protecionismo de mercado garantido pelo estado, não tinham uma preocupação com qualidade e preço e, com isto, ficaram ao longo dos anos, defasadas gerencialmente e tecnologicamente em relação às concorrentes internacionais. Durante a vigência do protecionismo do estado, segundo Campos (1999), os preços praticados pelas

empresas eram “negociados” com o CIP (Conselho Interministerial de Preços), a partir de um cálculo perverso utilizado para determinar o preço final dos produtos, onde o ônus da má qualidade era repassado ao cliente.

Este cenário político-econômico trouxe às empresas brasileiras uma grande ineficiência em seus processos produtivos, provocando um alto custo operacional e um baixo nível de qualidade dos produtos e serviços. Assim, para se adaptarem às novas regras de mercado, as empresas estão passando por um processo de reestruturação gerencial focado na otimização dos processos produtivos, visando a redução dos custos de produção e um atendimento compatível às exigências do cliente.

Nesse contexto, Seis Sigma é uma estratégia com uma série de técnicas e ferramentas estatísticas que pode auxiliar as organizações na tomada de decisão para a implementação de ações de melhoria de processos e produtos proporcionando satisfação aos clientes e lucratividade às organizações (HARRY, 1998). Ainda, segundo Harry (2000b), o Seis Sigma se preocupa com a percepção e o reconhecimento das reais necessidades do cliente e do produtor. O programa Seis Sigma, baseado na utilização organizada e estruturada das técnicas, métodos e ferramentas estatísticas pode proporcionar às organizações um salto de melhoria da qualidade em produtos e processos, bem como gerar nas organizações uma atuação voltada às necessidades dos clientes (ECKES, 2001).

Na tabela 1 apresenta-se uma escala onde Harry e Schroeder (1998) classificam as empresas, relacionando os níveis de qualidade, expressos na escala sigma, aos custos com a má qualidade em termos do percentual das vendas.

Tabela 1 - Custos da má qualidade em função do nível sigma do processo, com a média deslocada de $1,5\sigma$.

Nível sigma	Defeitos por milhão	Custo da má qualidade
2	308.537 (empresas não-competitivas)	Não se aplica
3	66.807	25 a 40% das vendas
4	6.210 (média da indústria)	15 a 25% das vendas
5	233	5 a 15% das vendas
6	3,4 (empresas "classe mundial")	< 1% das vendas

Fonte: Harry e Schroeder (1998).

1.4 MÉTODO DE TRABALHO

A metodologia utilizada neste trabalho é uma pesquisa básica aplicada, participante, com uma abordagem quantitativa e explicativa. O trabalho se desenvolve a partir da interação entre o pesquisador e especialistas do processo em estudo.

O método de pesquisa utilizado se enquadra na metodologia da pesquisa-ação utilizando-se alguns elementos da metodologia do estudo de caso. De acordo com Thiollent (1998), pesquisa-ação consiste em uma pesquisa social com base empírica implementada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de problemas coletivos. Neste método, os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Com relação aos procedimentos técnicos a pesquisa se caracterizará segundo o ponto de vista de Gil (1999), como:

- a) Pesquisa bibliográfica elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e materiais disponibilizados na Internet;
- b) Pesquisa participante, onde a pesquisa se desenvolve a partir da interação entre pesquisador e membros das situações investigadas.

O propósito da pesquisa é utilizar conceitos desenvolvidos por outros autores e aplicá-los no ambiente industrial, por meio da discussão com os especialistas do processo sobre os problemas a serem resolvidos. A investigação se baseará na observação da realidade, experiências dos atores da situação investigada e consulta à literatura existente sobre o assunto. O trabalho se desenvolverá a partir da revisão bibliográfica sobre o programa de qualidade Seis Sigma, o método DMAIC e sobre as técnicas e ferramentas estatísticas utilizadas. Ainda durante o desenvolvimento dos trabalhos haverá participação do pesquisador em treinamentos e sessões de *brainstorming* com os integrantes do grupo de estudo.

A metodologia de trabalho se constituirá na utilização organizada e estruturada das técnicas e ferramentas estatísticas para a implementação do método DMAIC na elaboração de projetos de melhoria em processos industriais. A verificação da aplicabilidade do método será efetuada através da realização de uma pesquisa-ação em um

processo de reação química em batelada de uma indústria petroquímica, conforme o método de trabalho descrito na seqüência.

Inicialmente, realizou-se uma reunião com a gerência e os engenheiros da empresa para discutir os problemas e os projetos de melhoria de interesse, a serem implementados com uma abordagem baseada no programa Seis Sigma. Após esse encontro, iniciou-se uma pesquisa bibliográfica preliminar sobre o Seis Sigma e a participação, juntamente com os engenheiros da empresa, na segunda sessão de um treinamento sobre o Seis Sigma. Na primeira sessão do treinamento Seis Sigma, que versava principalmente sobre as ferramentas básicas de estatística, houve a participação dos gerentes, engenheiros e técnicos da empresa.

Posteriormente, foi realizada uma reunião com os representantes da empresa para discutir os critérios para a seleção do projeto de melhoria. Nesta ocasião definiu-se o projeto com base nos seguintes critérios: aumento da satisfação do cliente; potencial de ganho financeiro para a empresa e principalmente na adequação do projeto para o aprendizado do Seis Sigma (projeto piloto).

Na seqüência foi realizado o planejamento e execução das etapas Definir e Medir. Simultaneamente ao desenvolvimento destas etapas, procedeu-se a pesquisa bibliográfica referente ao Seis Sigma, ao método DMAIC e as técnicas e ferramentas estatísticas da qualidade. Nesse período, participou-se também da terceira sessão do curso sobre Seis Sigma acompanhando os engenheiros da empresa.

Após a conclusão das etapas Definir e Medir desenvolveu-se as etapas Analisar, Melhorar e Controlar. Finalmente, foi realizada uma discussão dos resultados e complementação da pesquisa bibliográfica.

1.5 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os métodos e ferramentas serão estudados e aplicados em processos químicos em bateladas, sendo que o uso em outros processos, como produtos manufaturados, por exemplo, não será discutido neste trabalho. Também não são objetos deste estudo, aspectos relacionados à cultura da qualidade existente na organização e ao aprendizado organizacional, tão necessários para a implantação de um programa de qualidade.

O presente trabalho, se concentrará na determinação da situação atual do processo em estudo, determinação das variáveis e priorização das variáveis críticas do processo, análise do processo e proposição de ações de melhorias para o mesmo. Estas ações

visam a redução na variabilidade das características de qualidade do produto (mais críticas para o cliente) e da variabilidade nos tempos de processamento das bateladas. A implementação das etapas de melhoria e controle do processo, propostos pela equipe de estudo, dependerá de decisão gerencial da empresa.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro é introduzido o tema, justificando a importância da melhoria da qualidade de processos e produtos no cenário econômico atual. Aqui também são apresentados os objetivos, o método de trabalho utilizado, a estrutura e as limitações do estudo.

A revisão bibliográfica do programa Seis Sigma, dos processos químicos em batelada e das principais técnicas e ferramentas estatísticas que serão utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho é apresentada no segundo capítulo.

No terceiro capítulo são apresentados o método DMAIC e a descrição das etapas do método: Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar.

O desenvolvimento da pesquisa em uma indústria petroquímica, onde apresentam-se a implementação das etapas e o detalhamento das técnicas e ferramentas utilizadas, assim como os resultados obtidos em cada etapa do método DMAIC são descritos no quarto capítulo.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as considerações finais sobre o projeto de melhoria. Também serão propostas sugestões para trabalhos futuros, que possam dar continuidade ao trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica que possibilitou a elaboração desta dissertação. Serão abordados os conceitos da qualidade Seis Sigma, as técnicas e ferramentas estatísticas aplicadas na gestão e melhoria da qualidade.

2.1 O SEIS SIGMA

Seis Sigma é uma filosofia de qualidade baseada em um conjunto de objetivos de curto prazo, com um empenho para atingir metas de longo prazo. Se utiliza da medição e foco no cliente para orientar projetos de melhoria contínua em todos os níveis da empresa. As metas de longo prazo, desenvolvidas e implementadas nos processos tanto industriais quanto administrativos visam torná-los robustos, mantendo níveis de poucos defeitos por milhão de oportunidades (MARASH, 2000).

De acordo com Martens (2001), Seis Sigma é uma metodologia disciplinada com lógica, seqüência e estrutura para implementar projetos de melhoria. É uma filosofia para a excelência operacional provida de visão, foco e direção para a companhia.

Diferentemente de outras iniciativas da qualidade, Seis Sigma procura identificar a essência do processo para guiar os objetivos estratégicos da organização. Em organizações com fins financeiros, os objetivos estratégicos chave do negócio são: lucratividade; crescimento do negócio; satisfação do cliente; excelência na gestão organizacional e satisfação dos colaboradores (ECKES, 2002).

2.1.1 A origem do Seis Sigma

Segundo Harry e Schoroeder (2000), a metodologia Seis Sigma nasceu e se desenvolveu em meados de 1980 na Motorola, nos Estados Unidos. Porém, a raiz original do

Seis Sigma foi encontrada no livro *Quality is Free* escrito por Philip Crosby em 1979, onde uma das contribuições de Crosby para a gestão da qualidade foi o conceito do “zero defeito”, que é a filosofia seguida pelo Seis Sigma. Nesta época a empresa se sentia ameaçada pela concorrência da indústria eletrônica japonesa e necessitava fazer uma profunda melhoria em seu nível de qualidade. Com a ameaça da concorrência japonesa, a Motorola iniciou um novo modo de abordagem gerencial para a melhoria da qualidade, no qual a meta estabelecida para melhoria de todos os produtos, bem como serviços, foi melhorar a qualidade em dez vezes. A Motorola focou os recursos no Seis Sigma, incluindo esforço humano na redução da variação dos processos como, processos de manufatura, processos administrativo e todos os demais processos. O conjunto de ações de melhorias chamado de programa Seis Sigma foi lançado oficialmente pela Motorola em 1987.

A origem do nome “Sigma” vem da medida estatística de quantificação da variabilidade (desvio-padrão), utilizada para expressar a capacidade de um processo, isto é, a habilidade deste de produzir produtos não-defeituosos. Estatisticamente, sigma é o termo usado para representar a dispersão em torno da média do processo. Seis Sigma implica geralmente na ocorrência de uma taxa de defeitos abaixo de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (dpmo) para defeitos levantados (KLEFSJÖ; WIKLUND; EDGEMAN, 2001).

2.1.2 Filosofia Seis Sigma

Segundo Harry (1998), a filosofia do Seis Sigma reconhece que há uma correlação direta entre o número de produtos defeituosos, o desperdício com custos operacionais e o nível de satisfação do cliente. A estatística utilizada no Seis Sigma mede a capacidade do processo em executar trabalhos livres de defeitos. Na abordagem Seis Sigma, o índice de medida de defeito comumente usado é o dpu - defeitos por unidades produzidas. O valor do nível sigma indica a frequência provável para a ocorrência de defeitos. Um alto valor de sigma corresponde a uma baixa probabilidade do processo em produzir itens com defeitos. Conseqüentemente, um incremento no nível sigma, produz melhoria na confiabilidade, diminui a necessidade de testes e inspeções finais, reduz o tempo de ciclo e aumenta a satisfação do cliente.

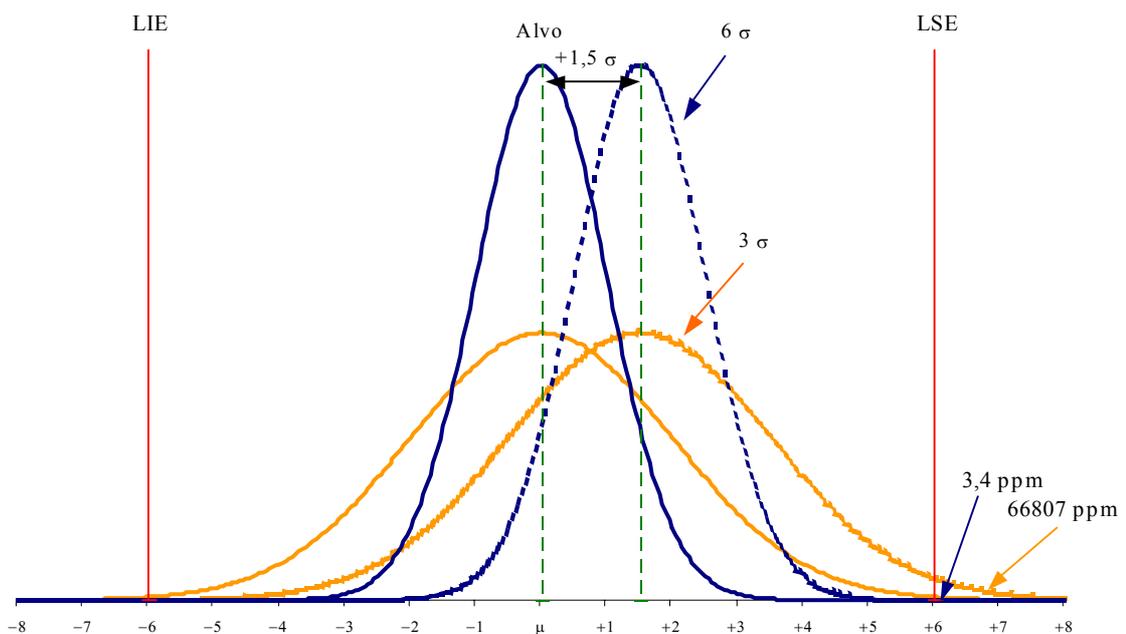
Seis Sigma tornou-se, então, uma abordagem conhecida em muitas organizações, utilizada para controlar a variabilidade e reduzir o desperdício nos processos, usando avançadas técnicas e ferramentas estatísticas. Em termos de negócio, Seis Sigma é definido como uma estratégia usada para melhorar a lucratividade, reduzir os custos com a má qualidade, melhorar a eficácia e eficiência de todas as operações, visando exceder as

necessidades e expectativas do cliente (CORONADO; ANTONY, 2002; SMITH; BLAKESLEE, 2002).

2.1.3 As métricas do Seis Sigma

Historicamente, a variabilidade natural dos processos foi considerada em termos estatísticos como sendo seis sigmas. Este nível de capacidade se refere a um processo no qual a variabilidade de uma característica de qualidade está compreendida entre mais ou menos três sigmas ($\mu \pm 3\sigma$), resultando em um percentual de 99,73% das unidades produzidas dentro dos limites de especificação. Conseqüentemente, um processo com esta capacidade terá aproximadamente 0,27% de defeitos. Se for assumido um deslocamento da média (*shift*) de até 1,5 sigmas e, considerando o lado da curva normal onde a média está mais próxima do limite de especificação, este processo apresentará 66807 defeitos em um milhão de oportunidades. Um processo 4 sigmas, por exemplo, produzirá 6210 defeitos em um milhão de oportunidades, enquanto que um processo 6 sigmas não gerará mais do que 3,4 defeitos em um milhão de oportunidades, correspondendo a um rendimento com 99,99966% dos itens produzidos livres de defeitos (MARASH, 2000).

Na figura 1 está representada a curva de distribuição normal, comparando o desempenho de processos três e seis sigmas com deslocamento da média (*shift*) de 1,5 sigmas.



Fonte: adaptado de Man (2002).

Figura 1 - Curva de distribuição normal ilustrando a diferença entre processos 3 σ e 6 σ .

Segundo Breyfogle e Meadows (2001), as organizações freqüentemente perdem tempo criando métricas que não são apropriadas para medir o rendimento das saídas dos processos. Algumas dessas podem requerer uma grande quantidade de valiosos esforços sem fornecer o resultado desejado. Métricas que revelam o fator oculto – tal como retrabalho no processo – podem trazer benefícios para muitos projetos de melhorias. A estratégia de negócio Seis Sigma propõe a criação da métrica certa para cada situação.

Para Wheeler (2002), as métricas utilizadas no Seis Sigma medem os defeitos mais eficientemente do que as usadas nos clássicos programas de qualidade. Estas métricas e termos definidos por Wheeler (2002) e Lucas (2002), são apresentados a seguir:

- características críticas para a qualidade (CTQ – *critical to quality*) – um atributo do produto ou processo que afeta a aceitação do cliente, ou seja, é aquele atributo especificado pelo cliente;

- defeitos por unidade (dpu): é uma medida que reflete o número médio de defeitos de todos os tipos, sobre o número total de unidades produzidas. O dpu pode ser calculado com a equação 1.

$$dpu = \frac{n \text{ defeitos}}{n \text{ unidades}} \quad (1)$$

- defeitos por oportunidades (dpo): o dpo expressa a proporção de defeitos levando em consideração o número total de oportunidades, durante o processo, para a ocorrência de defeitos. O dpo pode ser calculado com o auxílio da equação 2.

$$dpo = \frac{n \text{ defeitos}}{n \text{ de unidades} \times n \text{ de oportunidades}} = \frac{dpu}{n \text{ de oportunidades}} \quad (2)$$

- defeitos por milhão de oportunidades (dpmo): o dpmo indica o número provável de defeitos que podem ocorrer em um milhão de oportunidades possíveis para a ocorrência de defeitos. Em ambientes de fabricação o dpmo também pode ser entendido como partes por milhão (ppm). O dpmo e o ppm são calculados como apresentado nas equações 3 a e 3 b.

$$dpmo = \frac{n \text{ de defeitos}}{n \text{ de unidades} \times n \text{ de oportunidades}} \times 10^6 = dpo \times 10^6 \quad (3a)$$

$$ppm = \text{Probabilidade de defeitos} \times 10^6 = P \times 10^6 \quad (3b)$$

2.1.4 Escala sigma

De acordo com Lucas (2002), o nível sigma de um processo pode ser obtido a partir do número de defeitos por ele produzido (utilizando-se os valores de dpmo ou ppm) com o auxílio de uma tabela de conversão. A tabela de conversão para a escala sigma foi elaborada supondo-se um deslocamento da média do processo (*shift*) de $1,5\sigma$. Segundo Bothe (2002), esse deslocamento pode variar de $1,4\sigma$ a $1,6\sigma$, sendo recomendado para a maioria dos processos o valor de $1,5\sigma$. O valor do dpmo ou ppm é convertido em nível sigma, conforme ilustrado na tabela simplificada (tabela 2). A tabela completa do nível sigma é apresentada no anexo A.

Tabela 2 - Tabela simplificada do nível sigma em função número de defeitos produzidos.

Nível sigma	Defeitos por milhão de oportunidades (dpmo)
1	691462
2	308537
3	66807
4	6210
5	233
6	3,4

Fonte: adaptado de Lucier e Sechadri (2001).

2.1.5 Seleção do projeto Seis Sigma

A etapa mais importante em um projeto Seis Sigma é a escolha do projeto. A seleção de um projeto apropriado garante o alinhamento do projeto com a estratégia da organização e com as necessidades do cliente. Selecionar um bom projeto, significa identificar e melhorar o desempenho das métricas que melhorarão os resultados financeiros da organização (HARRY; SCHROEDER, 2000). Para Snee (2002), o escopo de um projeto pode incluir redução de perdas, aumento de capacidade, diminuição de tempo ocioso, uso mais eficiente ou melhoria do rendimento da matéria prima. Questões relacionadas com satisfação do cliente, tais como: entregas no prazo e redução de defeitos, também podem resultar num bom projeto.

Segundo Lynch e Cloutier (2003), o projeto Seis Sigma ideal é aquele que se concentra em uma área específica de interesse e tem uma dimensão compatível para ser concluído num prazo de três a seis meses. Grandes projetos focados em mais de uma área

devem ser divididos em outros que deverão ser completados mais tarde ou conduzidos em paralelo.

Para Werkema (2002), o sucesso e a consolidação da cultura Seis Sigma na organização, bem como a obtenção de resultados significativos em tempos adequados depende da escolha de um bom projeto. As principais características a serem consideradas para a seleção de um bom projeto são: (i) o alinhamento com as metas estratégicas da empresa; (ii) propiciar aumento da satisfação do cliente; (iii) apresentar uma boa chance de conclusão no prazo estabelecido; (iv) garantir uma melhoria no desempenho da organização, compatível com o porte e tipo de negócio da empresa; (v) quantificação precisa, por meio de métricas adequadas, da situação atual e dos resultados a serem alcançados com o projeto e (vi) comprometimento por parte da alta administração da empresa e dos demais gestores envolvidos.

2.2 PROCESSOS EM BATELADA

2.2.1 Introdução

Na maioria das operações de processamento é economicamente vantajoso manter o equipamento em operação contínua e permanente com um mínimo de perturbações ou paradas, principalmente nos processos de produção em larga escala. Esta estratégia de produção é conveniente em função da maior produtividade do equipamento que opera com uma maior taxa de ocupação e, conseqüentemente, com um menor preço unitário do produto. Um processo contínuo, onde as condições operacionais não variam com o tempo, é dito processo em regime permanente ou em estado estacionário. Em contraste, processos descontínuos (batelada ou semibatelada) são ditos processos em regime transiente ou não-estacionário. A análise das condições transientes é normalmente mais complicada do que as de regime permanente.

2.2.2 Definição de processos em batelada

Segundo Aziz e Mujtaba (2002), Boqué e Smilde (1999), Cho e Kim (2003), um processo de produção em batelada consiste basicamente no carregamento de equipamentos padronizados, com quantidades das matérias-primas pré-definidas usando uma seqüência específica. Se necessário, os equipamentos devem ser facilmente adaptados e configurados para a produção de uma gama de produtos diferentes. Em processos de reação química, a reação ocorre em um certo período de tempo, no qual as variáveis críticas são acompanhadas durante o andamento da batelada. Finalmente, o produto resultante é

descarregado e algumas características de qualidade são medidas. Esta estratégia de produção é particularmente adequada para produtos farmacêuticos, poliméricos, bioquímicos e outros produtos da química fina.

2.2.3 Características dos processos em batelada

Os processos em batelada são caracterizados por um alto grau de flexibilidade que, pode ser apropriadamente explorado para se obter a máxima produção com lucratividade. Em princípio, a receita utilizada para a produção deve apresentar um equilíbrio otimizado entre qualidade e custo por batelada do produto obtido (ROMERO et al., 2003).

Os processos de reação química em batelada são importantes na indústria da química fina, por apresentarem versatilidade e flexibilidade de produção. Em processos de reação química em batelada as variáveis do processo variam significativamente durante a produção da batelada. Logo, não há um estado estacionário e, conseqüentemente, não há um *set point* em torno do qual o processo pode ser regulado e mantido. Então, em operações do tipo batelada o objetivo não é a manutenção do sistema em um valor constante, mas sim a otimização de algum parâmetro que expresse o desempenho do sistema.

De acordo com Marsh e Tucker (1989), o processamento em batelada pode produzir uma grande variedade de produtos com baixo investimento, se comparado ao processamento contínuo. Entretanto, processos em batelada introduzem mais oportunidades para variação em processos e produtos do que o processo contínuo. Processos em batelada raramente são operados em estado estacionário. Em reator de batelada, a reação química é direcionada até um ponto final no qual o tempo da batelada se aproxima do estado estacionário.

Em processos contínuos a operação é quase sempre em estado estacionário e há um valor alvo e limites de controle constantes. Para processos em batelada, estes alvos e limites se aplicam somente próximo ao final do processo ou no final da batelada. A batelada é produzida a partir da execução de uma receita - um conjunto completo com dados e procedimentos que definem os requisitos a serem controlados para o tipo de produto desejado (SRINIVASAN et al., 2000).

Segundo Bonvin (1998), os processos em batelada também apresentam as seguintes características:

Comportamento irreversível: em processos nos quais as propriedades dependem da “história” do produto, tal como polimerização ou cristalização, uma vez que o material é produzido fora de especificação, quase sempre é impossível efetuar correções remediáveis.

Ação corretiva limitada: a capacidade para influenciar a reação tipicamente decresce com o tempo em reatores descontínuos. O tempo de duração da corrida, que é previamente definido, limita o impacto da ação de correção. Se a batelada apresenta um desvio em relação à qualidade do produto a carga tem que ser descartada.

Natureza repetitiva: processamento em batelada é caracterizado por uma freqüente repetição de corridas de bateladas. Isso possibilita o uso de resultados de bateladas anteriores para a melhoria de operações subseqüentes. Este aspecto tem grande relevância para a otimização do processo corrida-a-corrida.

Processo lento: a maioria das transformações químicas e bioquímicas são muito rápidas ou relativamente lentas. Em transformações rápidas pouco se pode fazer para controlar ou otimizar a operação. Nas transformações lentas, entretanto, o domínio da variável tempo é relativamente grande, possibilitando o ajuste ou otimização do processo em tempo real através da coleta e avaliação das informações do processo *on line*.

2.2.4 Fontes de variação em bateladas

Nas reações em batelada os parâmetros que normalmente se deseja manter sob controle são: a qualidade do produto batelada-a-batelada e a uniformidade dos tempos de processamento das bateladas, ou seja, a reprodutibilidade das características de qualidade do produto e dos tempos de processamento das bateladas (SRINIVASAN et al., 2000). De acordo com Marsh e Tucker (1989) as principais fontes de variação nos processos em batelada são:

- 1) Habilidade do operador: haja vista que muitos processos em batelada não são totalmente automatizados, os procedimentos da confecção das bateladas são de certa forma dependentes da habilidade do operador. Alguma ferramenta que possa auxiliar o operador é muito útil.
- 2) Matérias primas: a quantidade de matérias primas carregada é relativamente fácil de controlar, mas a composição é freqüentemente diferente. Obviamente, a composição da matéria prima pode provocar um grande efeito na reação química.
- 3) Utilidades: reatores em batelada normalmente necessitam utilidades comuns tais como fontes de aquecimento ou resfriamento. Competir com demandas para utilidades comuns

resulta na redução da capacidade e instabilidade no suprimento de utilidades para o reator. Para se obter um produto uniforme batelada-a-batelada a estratégia quase sempre seguida é verificar a constância (composição e quantidade) das matérias primas e garantir procedimentos idênticos para cada batelada processada (MARSH; TUCKER, 1989).

2.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

2.3.1 Introdução

Considerado em muitas organizações como um importante elemento para a gestão da qualidade total, o controle estatístico do processo (CEP) é conhecido mundialmente, não como uma simples coleção de técnicas, mas como um caminho para desenvolver o pensamento no qual a melhoria da qualidade nunca deve parar. Sem esta “melhoria contínua” não se pode esperar competitividade em um mercado globalizado (CAULCUTT, 1995).

Os fundamentos básicos do CEP e as cartas de controle foram propostas por Walter A. Shewhart entre os anos de 1920 e 1930 e, até meados de 1970, houve muitos avanços importantes. No entanto, poucos pesquisadores conduziram trabalhos na área, comparativamente com outras áreas da estatística aplicada. Com a revolução da qualidade causada pelo aumento progressivo da competitividade do mercado internacional, onde melhorias da qualidade foram requeridas para a sobrevivência de muitas indústrias no ambiente dos negócios, a atividade de pesquisa em CEP começou a ser incrementada a partir de 1980. (WOODALL; MONTGOMERY, 1999).

2.3.2 Definição do CEP

O CEP, baseado nas teorias desenvolvidas por Walter A. Shewhart, a partir dos anos 20, é considerado um sistema de inspeção por amostragem, operando ao longo do processo produtivo, com o objetivo de permitir a identificação das causas especiais e comuns de variabilidade, possibilitando uma atuação objetiva para a melhoria contínua no processo visando um aumento na qualidade do produto final. A implementação do CEP se dá a partir da coleta de dados amostrais da variável a ser controlada, elaboração das cartas de controle, análise das cartas de controle e, por fim, o estudo de capacidade do processo (RIBEIRO; CATEN, 2001a).

O CEP é uma técnica estatística usada para controlar processos e reduzir variação. A redução da variação é um aspecto chave da qualidade. Em um processo há duas causas principais de variação – causas especiais ou assinaláveis e causas comuns ou aleatórias. Causas especiais de variação são causas não inerentes ao processo e podem ser

facilmente identificadas. Elas têm uma magnitude relativamente grande e requerem algumas ações no sistema ou processo para eliminá-las. Desgaste de ferramentas, erros de medição, erros de cálculo, erros operacionais são exemplos de causas especiais. Causas comuns de variação afetam todos os produtos/serviços de um processo, elas são sempre inerentes ao processo. Exemplos de causas comuns podem incluir oscilações na umidade, temperatura ambiente, flutuações elétricas, deterioração do desempenho do equipamento e variações de composição das matérias-primas. O objetivo principal das cartas de controle usadas no CEP é distinguir entre causas comuns e especiais de variação (MASON; ANTONY, 2000).

2.3.3 Implementação do CEP

A implementação do CEP em um ambiente industrial pode melhorar a qualidade, aumentar a produtividade e reduzir os custos. O CEP, considerado uma sub-área do controle estatístico da qualidade, consiste na utilização de métodos para entender, monitorar e melhorar o desempenho de processos ao longo do tempo (WOODALL, 2000).

A coleção de dados ou amostras usadas nas cartas de controles, denominadas por Shewhart de sub-grupo racional, corresponde a maneira pela qual os sub-grupos ou amostras devem ser obtidas para detectarem a ocorrência de causas especiais no processo. Os sub-grupos ou amostras devem ser selecionados de modo a evidenciar uma possível existência de variabilidade das observações dentro de um sub-grupo, devendo incluir toda oportunidade de variabilidade natural e excluir a variabilidade devido às causas especiais de variação (MONTGOMERY; RUNGER, 1999).

2.3.4 Sub-grupos racionais

As clássicas cartas de Shewhart, para monitorar as médias e as amplitudes, empregam sub-grupos racionais com mesmo número de itens. Os tamanhos dos sub-grupos, preferencialmente usados na indústria, apresentam de quatro a oito itens ou amostras. O objetivo é coletar o menor número de itens possível que apresente a mínima possibilidade para a ocorrência de variação dentro do sub-grupo (economia no processo de amostragem). O tamanho mínimo de quatro itens para um sub-grupo é justificado pelo fundamento estatístico, teorema do limite central, onde é esperado que a distribuição das médias amostrais (\bar{X}) se aproxime da distribuição normal, quando as amostras são de tamanho igual ou maior a quatro, mesmo que estas tenham se originado de uma população não normal. Este fato é útil para garantir a distribuição normal das médias e ajudar na interpretação dos limites da carta de controle (GRANT e LEAVENWORTH, 1972).

De acordo com Juran (1951), para manter um processo considerado sob controle, freqüentemente sub-grupos de quatro ou cinco itens ou amostras, em geral, são suficientes. Em situações nas quais uma pequena mudança no processo pode causar um desvio dos limites de controle, especiais considerações sobre tamanho da amostra, princípios e aplicações das cartas de controle deverão ser observadas.

2.3.5 Cartas de controle para variáveis

As cartas de controle permitem que se faça uma estimativa da variabilidade do processo, fornecendo informações sobre o valor de importantes parâmetros do processo e sua estabilidade ao longo do tempo (MONTGOMERY; RUNGER, 1999).

Montgomery (1996) classifica as cartas de controle em dois grandes grupos – as cartas de controle para variáveis e as cartas de controle para atributos - a opção por uma ou outra carta, vai depender do tipo de variável a ser medida, das características do processo, do nível do operador e dos recursos disponíveis. Neste trabalho serão apresentados três tipos de cartas de controle para variáveis: (i) as cartas para as médias e amplitudes; (ii) as cartas para as médias e desvios-padrão e (iii) as cartas para os valores individuais e as amplitudes móveis. Nas figuras 2 e 3 apresentam-se exemplos de cartas de controle para variáveis: a carta para médias e a para as amplitudes, respectivamente.

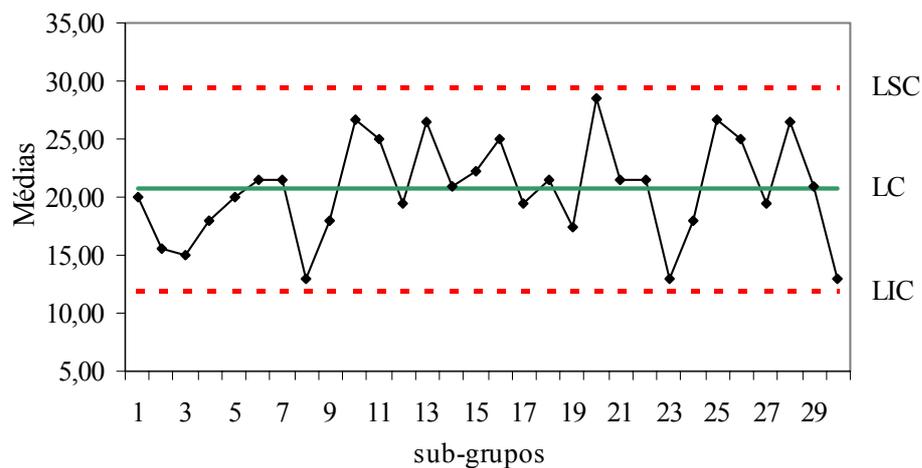


Figura 2 - Carta de controle para médias.

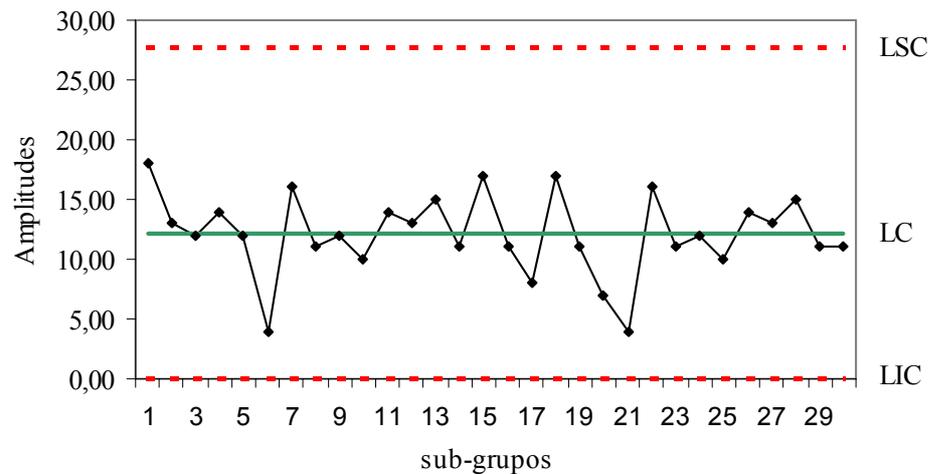


Figura 3 - Carta de controle para amplitudes.

Cartas de controle para variáveis são ferramentas que podem ser utilizadas quando as medições de um processo podem ser obtidas. O diâmetro de um eixo, o tempo para se revisar um processo de compra são exemplos de variáveis mensuráveis. As cartas para médias e amplitudes (\bar{X} e R) representam a aplicação típica do controle de processo através de cartas de controle (IQA, 1997b).

As cartas para variáveis podem explicar dados do processo em termos de dispersão (variabilidade peça-a-peça) e tendência central (média do processo). Por este motivo, as cartas de controle para variáveis devem sempre ser preparadas e analisadas aos pares – uma carta para tendência central e outra para a dispersão (RIBEIRO; CATEN, 2001a).

2.3.5.1 Carta para médias e amplitudes (\bar{X} e R)

Segundo Montgomery (1996), quando o tamanho do sub-grupo é relativamente pequeno (igual ou menor do que 10) pode-se usar a amplitude ao invés do desvio-padrão e construir a carta para \bar{X} e R . A amplitude da amostra é facilmente determinada pela diferença entre a maior e a menor observação ($R = X_{\max} - X_{\min}$). Esta substituição é possível, porque há uma relação estatística entre a média das amplitudes \bar{R} e o desvio-padrão σ (para dados de uma distribuição normal). Esta relação depende somente do tamanho da amostra n . A média das amplitudes \bar{R} é dada pela relação $d_2\sigma$, onde o valor de d_2 também é função de n . Então, \bar{R}/d_2 é um estimador para o desvio-padrão. A partir deste pode-se desenvolver a carta de \bar{X} e R .

Carta para médias

Esta carta é utilizada com o objetivo de controlar a média do processo. Os limites de controle para as médias do processo são calculados como descrito por Montgomery (1996).

Considerando-se, $R_1, R_2, R_3, \dots, R_k$ as amplitudes e $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3, \dots, \bar{X}_k$ as médias dos k sub-grupos, calculam-se a média das amplitudes com a equação 4, a média das médias com a equação 6 e uma estimativa para desvio-padrão pode ser calculado com a equação 5.

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_k}{k}, \text{ média das amplitudes dos sub-grupos;} \quad (4)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}, \text{ estimativa para o desvio-padrão;} \quad (5)$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \dots + \bar{X}_k}{k}, \text{ médias das médias dos sub-grupos.} \quad (6)$$

Assim, se $\bar{\bar{X}}$ for usado como estimador de μ e \bar{R}/d_2 , como estimador de σ , então os limites de controle para a carta \bar{X} são calculados pelas equações 7, 8 e 9;

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}}, \text{ limite inferior de controle;} \quad (7)$$

$$LC = \bar{\bar{X}}, \text{ linha central;} \quad (8)$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}}, \text{ limite superior de controle.} \quad (9)$$

como, $\frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$ pode ser substituído pela constante A_2 , os limites de controle da carta \bar{X} podem ser calculados pelas equações simplificadas 10, 11 e 12 usando a constante A_2 , que é tabelada e depende somente de n .

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (10)$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad (11)$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad (12)$$

Carta para amplitudes

De acordo com Montgomery (1996), esta carta controla a variabilidade do processo a partir dos valores das amplitudes em substituição ao desvio-padrão do processo. Para calcular os limites de controle precisa-se de uma estimativa adequada do desvio-padrão. Esta estimativa pode ser obtida através da distribuição $W = R/\sigma$ (assumindo que os dados seguem uma distribuição normal). Supondo d_3 como sendo o desvio-padrão de W , e que d_3 pode ser determinado em função do tamanho da amostra, n . A partir de $W = R/\sigma$ o desvio-padrão de R é $\sigma_R = d_3\sigma$, mas como o σ é desconhecido, o caminho para estimar σ_R é através da utilização da equação 13 e com as equações 14, 15 e 16 calculam-se os limites de controle para uma amplitude de $\pm 3\sigma$.

$$\hat{\sigma}_R = d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (13)$$

$$LIC = \bar{R} - 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (14)$$

$$LC = \bar{R} \quad (15)$$

$$LSC = \bar{R} + 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (16)$$

definindo as constantes tabeladas através das equações 17 e 18, resultam as equações simplificadas 19, 20 e 21 para o cálculo dos limites de controle da carta R.

$$D_3 = 1 - 3 \frac{d_3}{d_2} \quad (17)$$

$$D_4 = 1 + 3 \frac{d_3}{d_2} \quad (18)$$

Limites de controle para a carta das amplitudes:

$$LIC = D_3 \cdot \bar{R} \quad (19)$$

$$LC = \bar{R} \quad (20)$$

$$LSC = D_4 \cdot \bar{R} \quad (21)$$

2.3.5.2 Carta para médias e desvio-padrão (\bar{X} e S)

De acordo com IQA (1997b), Ribeiro e Caten (2001a), para a construção das cartas \bar{X} e S , inicialmente calculam-se os desvios-padrão de cada sub-grupo através da equação 22, a média dos desvios-padrão dos sub-grupos (\bar{S}) com a equação 23, as médias

dos sub-grupos (\bar{X}) com a equação 24 e a média das médias ($\bar{\bar{X}}$) com a equação 25, de um conjunto de 20 a 30 sub-grupos, para depois determinar os limites de controle. Os limites de controle para as médias calculam-se com as equações 26, 27 e 28 e para os desvios-padrão com as equações 29, 30 e 31. As constantes B_3 , B_4 e A_3 que aparecem nas equações do cálculo dos limites de controle são tabeladas e dependem do tamanho do sub-grupo n .

Cálculos preliminares:

$$S = \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}, \text{ desvio-padrão dos sub-grupos;} \quad (22)$$

$$\bar{S} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_k}{k}, \text{ média dos desvios-padrão dos sub-grupos;} \quad (23)$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}, \text{ média dos sub-grupos;} \quad (24)$$

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \dots + \bar{X}_k}{k}, \text{ média das médias dos } k \text{ sub-grupos;} \quad (25)$$

Limites de controle para as médias:

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_3 \cdot \bar{S} \quad (26)$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad (27)$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_3 \cdot \bar{S} \quad (28)$$

Limites de controle para o desvio-padrão:

$$LIC = B_3 \cdot \bar{S} \quad (29)$$

$$LC = \bar{S} \quad (30)$$

$$LSC = B_4 \cdot \bar{S} \quad (31)$$

2.3.5.3 Carta para valores individuais e amplitude móvel (X e MR)

Há muitas situações nas quais o tamanho da amostra possível de ser usada para monitorar o processo é $n = 1$, ou seja, amostras de unidades individuais. Alguns exemplos destas situações são: (i) uso de inspeção automatizada, onde toda unidade produzida é analisada; (ii) processos nos quais a taxa de produção é muito baixa e não é conveniente aguardar para que se acumulem amostras; (iii) em alguns processos químicos (por exemplo, reação em batelada) ou (iv) em situações onde as análises dependem de ensaios caros e/ou destrutivos (MONTGOMERY, 1996; RIBEIRO; CATEN, 2001a).

Para a determinação dos limites de controle inicia-se pelo cálculo da amplitude móvel entre os valores individuais (MR). Geralmente, registra-se a diferença entre cada par de leituras sucessivas (diferença entre a primeira e a segunda leitura, a segunda e a terceira, e assim sucessivamente). Em alguns casos, a amplitude móvel pode ser baseada em um grupo móvel maior (três ou quatro), ou em sub-grupo fixo (todas as leituras tomadas em um único turno). Para o cálculo da amplitude móvel utilizam-se as diferenças absolutas das sucessivas observações individuais, conforme a equação 32, onde X_{t-1} e X_t são as observações de X no tempo $t-1$ e no tempo t respectivamente. Para o cálculo da média das amplitudes móveis utiliza-se a equação 33 (ADKE; HONG, 1997; MONTGOMERY, 1996).

$$MR = |X_{t-1} - X_t|, t \geq 2 \quad (32)$$

$$\overline{MR} = \frac{MR_1 + MR_2 + MR_3 + \dots + MR_k}{k-1} \quad (33)$$

Na seqüência calculam-se os limites de controle para a carta das amplitudes com as equações 34, 35 e 36 e para os valores individuais com as equações 37, 38 e 39.

Limites de controle para as amplitudes:

$$LIC = D_3 \cdot \overline{MR} \quad (34)$$

$$LC = \overline{MR} \quad (35)$$

$$LSC = D_4 \cdot \overline{MR} \quad (36)$$

Limites de controle para os valores individuais:

$$LIC = \bar{X} - E_2 \cdot \overline{MR} \quad (37)$$

$$LC = \bar{X} \quad (38)$$

$$LSC = \bar{X} + E_2 \cdot \overline{MR} \quad (39)$$

onde: D_3 , D_4 e E_2 são constantes que dependem do tamanho da amostra. No anexo B é apresentada a tabela para a obtenção destas constantes.

2.3.6 Interpretação da estabilidade do processo

Segundo Kume (1993), é importante compreender com exatidão o estado em que se encontra o processo, interpretando os gráficos de controle e, imediatamente, implementando as ações apropriadas quando for observado algum comportamento anormal do processo. Um processo sob controle é estável, se sua média e dispersão não mudam. Os

seguintes critérios observados nas cartas de controle tradicionais podem caracterizar um processo fora de controle:

1) Pontos fora dos limites de controle;

2) Seqüência: uma seqüência com comprimento de sete pontos é considerada anormal nas seguintes situações:

- sete ou mais pontos em seqüência acima (ou abaixo) da linha central;

- sete ou mais pontos em seqüência ascendente (ou descendente);

- sete ou mais pontos consecutivos acima ou abaixo da linha central.

Mesmo que o comprimento da seqüência seja inferior a seis pontos, os seguintes casos são considerados anormais:

- pelo menos dez de onze pontos consecutivos incidir em um mesmo lado da linha central;

- pelo menos doze de catorze pontos consecutivos incidir num mesmo lado da linha central;

- pelo menos dezesseis de vinte pontos consecutivos incidir num mesmo lado da linha central.

3) Proximidade dos limites de controle: observando pontos próximos dos limites de controle 3-sigma, se dois em três pontos consecutivos incidem além das linhas 2-sigma, caracteriza uma situação anormal.

4) Proximidade da linha central: quando a maioria dos pontos estão situados entre as linhas de 1,5-sigma acima e abaixo da linha central, esta configuração não caracteriza um processo sob controle. Isto pode ser explicado por uma inadequação na formação dos sub-grupos, resultando em uma mistura de dados de diferentes populações em um mesmo sub-grupo, tornando o intervalo entre os limites de controle muito amplo.

5) Periodicidade: quando o traçado apresenta repetidamente uma tendência para cima e para baixo em intervalos quase sempre iguais, também caracteriza uma situação anormal.

2.3.7 Estudo de capacidade do processo

Segundo Stenberg e Deleryd (1999), o estudo da capacidade do processo é uma importante ferramenta para a melhoria da qualidade dentro das organizações. O CEP e o

estudo de capacidade são métodos que têm a finalidade de monitorar os processos dentro dos limites de controle e ajudar a encontrar causas de variação para sucessivamente eliminá-las.

O objetivo da análise de capacidade do processo é avaliar a habilidade do processo em atender a especificação das características de qualidade estabelecidas. Um outro aspecto importante da análise de capacidade é a determinação do desempenho do sistema de medição, normalmente referido como MSA (*Measurement System Analysis*) ou *gage R&R* (WOODALL; MONTGOMERY, 1999).

Para Stoumbos (2002), o estudo de capacidade do processo é a quantificação da situação atual e da expectativa futura com relação a atuação de causas comuns de variação. A quantificação da variabilidade do processo é essencial para avaliar a qualidade potencial dos produtos manufaturados. O uso dos índices de capacidade permitem associar a variação e a localização da média do processo com as especificações do cliente. Estes índices fornecem uma efetiva estimativa da capacidade do processo, permitindo a atuação para melhorar a capacidade e reduzir custos.

Índices de capacidade

Aparentemente, as fórmulas para o cálculo de C_{pk} e P_{pk} são idênticas. Ambas medem a variação do processo, comparando com a tolerância dos limites de especificação, a diferença entre C_{pk} e P_{pk} está na estimativa do desvio-padrão σ utilizado no cálculo. Para o C_{pk} , o desvio-padrão utilizado reflete a variação inerente ao processo, devido somente as causas comuns. Para o P_{pk} , o desvio-padrão incorpora a variação total do processo, devido às causas comuns e especiais. Para uma situação onde somente atuam causas comuns, então o P_{pk} será igual ao C_{pk} . Se causas especiais estiverem atuando o P_{pk} será menor do que o C_{pk} (UDLER; ZAKS, 1997).

Para o cálculo dos índices de capacidade C_p e C_{pk} são consideradas as variações dentro dos sub-grupos para a estimativa do desvio-padrão do processo, tipicamente estimado por \bar{R}/d_2 , onde \bar{R} é a média das amplitudes e d_2 é a constante tabelada usada para o cálculo dos limites de controle para a carta de amplitudes. A estimativa \bar{R}/d_2 é chamada de $\hat{\sigma}_{\bar{R}/d_2}$ ou $\hat{\sigma}_{st}$ para indicar que se trata de uma medida de variação dentro do sub-grupo ou variação de curto prazo. Quando os índices são calculados usando-se uma estimativa do desvio-padrão baseada nos valores individuais (equação 42) estes índices são denominados índices de desempenho do processo (P_p e P_{pk}) e são calculados com as equações 45 e 46

respectivamente (LU; RUDY, 2002). O desvio-padrão estimado $\hat{\sigma}_{st}$ usado para o cálculo do C_p e C_{pk} nas equações 43 e 44, pode ser determinado a partir da média das amplitudes (\bar{R}) com a equação 40 ou a partir da média dos desvios-padrão amostrais (\bar{S}) com a equação 41.

$$\hat{\sigma}_{st} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (40)$$

$$\hat{\sigma}_{st} = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (41)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} = \hat{\sigma}_{Lt} \quad (42)$$

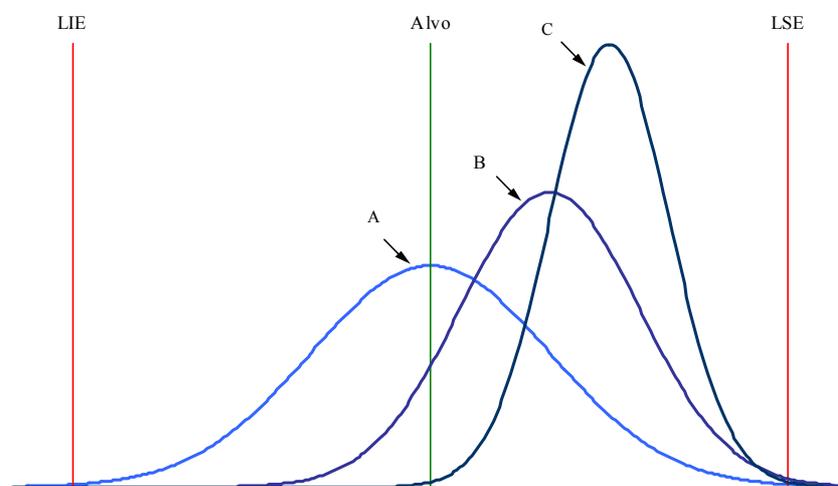
$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}_{st}} = \frac{\text{faixa de tolerância}}{\text{variação de curto prazo}} \quad (43)$$

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{LSE - \bar{X}}{3\hat{\sigma}_{st}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\hat{\sigma}_{st}} \right\} \quad (44)$$

$$P_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}_{Lt}} = \frac{\text{faixa de tolerância}}{\text{variação de longo prazo}} \quad (45)$$

$$P_{pk} = \min \left\{ \frac{LSE - \bar{X}}{3\hat{\sigma}_{Lt}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\hat{\sigma}_{Lt}} \right\} \quad (46)$$

Na figura 4 são apresentados três exemplos de curvas de distribuição normal referentes aos processos A, B e C, com diferentes localizações da média, diferentes dispersões e iguais índices de capacidade (C_{pk}).



Fonte: adaptado de Maleyeff (1997) e Bothe (2002).

Figura 4 - Curvas de distribuição normal para três processos, A, B e C com $C_{pk}=1$.

2.4 ANÁLISE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

2.4.1 Introdução

A satisfação do cliente é obtida com a alta qualidade de produtos e serviços e estas características de qualidade precisam ser medidas adequadamente. Frequentemente, são estas medições que expressam os requisitos de qualidade do cliente. Logo, o nível de qualidade de produtos ou serviços é também determinado pela medição de suas características de qualidade. Avaliações estatísticas de sistemas de medição são considerados elementos importantes para implementação de programas de qualidade. Se o sistema de medição não é suficientemente capaz, melhorias terão de ser implementadas. A avaliação estatística de sistemas de medição mais comum, originária da indústria automotiva, é a *gauge* R&R. Esta avaliação determina as fontes de variação “repetitividade” e “reprodutibilidade” (HEUVEL, 2000).

Segundo Burdick e Larsen (1997), o objetivo da análise de um sistema de medição é determinar se o procedimento ou instrumento de medição é adequado para o monitoramento do processo. Se o erro de medição é pequeno em relação à variação total do processo, então o procedimento de medição é considerado adequado. Visto que melhorias no processo resultam em redução da variação do processo, o estudo de R&R precisa ser progressivo. Com o decréscimo da variação do processo através da melhoria contínua, o sistema de medição para o monitoramento deste poderá deixar de ser adequado.

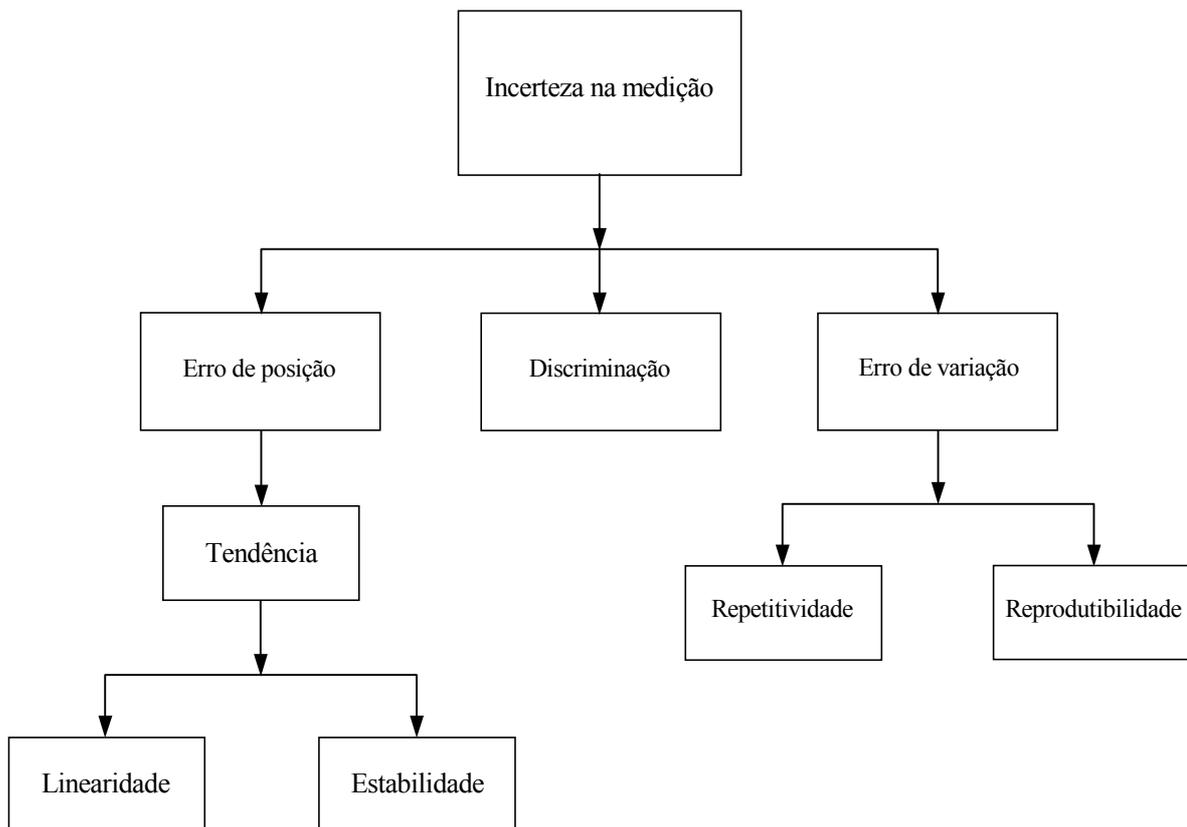
Para Ribeiro e Caten (2001a), a avaliação da capacidade dos sistemas de medição utilizados na produção é um importante estudo que deve ser parte integrante do gerenciamento de processos. Uma vez que a validade das análises relativas ao desempenho do processo depende da validade dos dados é essencial que o sistema de medição seja adequado.

2.4.2 Fontes de variação em sistemas de medição

Como o resultado da medição representa apenas uma estimativa do valor do medido, torna-se necessário um entendimento das fontes de variação inerentes ao processo de medição utilizado para monitorar a variabilidade do produto e processo. O estudo de repetitividade e reprodutibilidade, também chamado de *gage* R&R é usado para determinar a capacidade do procedimento de medição. As fontes de variabilidade associadas com o procedimento de medição podem ser comparadas usando-se o modelo da análise de variância (ANOVA). Um modelo comumente usado no estudo de R&R envolve dois fatores: amostras e

operadores. Os operadores escolhidos aleatoriamente fazem medidas repetidas em cada amostra de saída do processo (DOLENZAL, 1998).

Atkinson (2000) classificou os principais problemas que podem provocar incerteza em sistemas de medição, os quais são apresentados no fluxograma da figura 5.



Fonte: Atkinson (2000).

Figura 5 - Fontes de variação observadas em sistemas de medição.

2.4.2.1 Discriminação

Discriminação é a habilidade de um sistema de medição em detectar diferenças entre produtos, ou seja, a capacidade de detectar pequenas mudanças na característica do mensurando. Um equipamento com melhor discriminação pode detectar menores diferenças de uma variável medida. O nível de discriminação é função do tipo de sistema de medição adotado. Um micrômetro, por exemplo, tem melhor discriminação que uma escala para a maioria das aplicações (ATKINSON, 2000). Segundo Ribeiro e Caten (2001a), um sistema de medição, para fornecer estimativas precisas dos parâmetros e índices do processo, precisa ser capaz de discriminar acima de cinco categorias, dentro dos limites de controle de uma carta

para médias. Já para apenas estimativas grosseiras dos parâmetros e índices do processo uma discriminação de três categorias é suficiente.

2.4.2.2 Erro de posição

O afastamento entre o valor considerado correto (valor de referência) e a média das várias medições se caracteriza como um erro de posição. Esta diferença pode ocorrer por várias razões e deve ser conhecida para se estabelecer a incerteza do sistema de medição. De acordo com Atkinson (2000), esses erros são definidos como: tendência, linearidade e estabilidade.

Tendência: tendência ou vício é um erro sistemático determinado pela diferença entre a média dos valores medidos e o valor de referência. A tendência é o valor numérico utilizado para avaliar a exatidão (acurácia) do sistema de medição (IQA, 1997a).

Linearidade: linearidade é a diferença nos valores da tendência, observados ao longo da faixa de operação utilizada do instrumento de medição (ROTONDORO et al., 2000).

Estabilidade: a estabilidade de um sistema de medição refere-se à consistência das medidas ao longo do tempo. Em geral, a estabilidade não é quantificada, mas ela pode ser avaliada usando-se as cartas de controle. Neste caso, uma amostra padrão (sempre a mesma amostra) é medida ao longo de dias ou semanas e os resultados são marcados, por exemplo, em uma carta de controle para valores individuais (X). Índícios de problemas de medição serão caracterizados com o aparecimento de pontos fora dos limites de controle, revelando a falta de estabilidade no sistema de medição (RIBEIRO; CATEN, 2001a).

2.4.2.3 Erro de variação

A precisão do método de medição se refere à variabilidade observada, quando se usa o sistema de medição para fazer repetidas medições em condições cuidadosamente controladas (GRANT; LEAVENWORTH, 1972). O erro de variação pode ser atribuído tanto ao operador como ao dispositivo de medição e pode ser determinado pelo *gage R&R* (ATKINSON, 2000).

Gage R&R: os métodos de análise dos sistemas de medição mais amplamente utilizados para uma análise de R&R são: o método da média e amplitude e o método da Análise de Variância (ANOVA). O método da média e amplitude permite distinguir entre as duas fontes de variação (repetibilidade e reprodutibilidade) quantificando a contribuição de cada uma delas para a variabilidade total. Já o método da ANOVA permite extrair mais informações (efeito

devido ao operador, efeito devido a peça e a interação peça com operador) e uma estimativa mais precisa das variáveis. É importante investigar as causas da variabilidade, pois isso irá orientar a respeito das medidas a serem tomadas para a melhoria do sistema de medição (IQA, 1997a; HEUVEL, 2000; RIBEIRO; CATEN, 2001a).

2.4.3 Método da média e amplitude

O método da média e amplitude (\bar{X} e R) permite a determinação da repetitividade e reprodutibilidade de um sistema de medição, decompostas em dois componentes. O procedimento para o cálculo de cada um destes componentes (repetitividade e reprodutibilidade) é apresentado a seguir.

2.4.3.1 Repetitividade

A repetitividade ou variação do dispositivo de medição (VE) é observada quando um mesmo operador mede a mesma peça mais de uma vez nas mesmas condições. Para a determinação da repetitividade pode-se calcular o desvio-padrão do dispositivo de medição utilizando a equação 47 (IQA, 1997a).

$$\sigma_e = \bar{R} / d_2, \text{ desvio-padrão do dispositivo de medição.} \quad (47)$$

onde: \bar{R} é a amplitude média observada nas diversas medições efetuadas pelos operadores e d_2 é uma constante obtida da tabela 3 em função de m e g , sendo m = número de medições por peças e g = número de peças multiplicado pelo número de operadores.

A repetitividade ou VE é obtida com a equação 48. O intervalo de $5,15\sigma_e$ abrange 99% da variação esperada para uma distribuição normal.

$$VE = 5,15\sigma_e, \text{ variação do dispositivo de medição (repetitividade).} \quad (48)$$

Tabela 3 – Tabela para a obtenção da constante d_2

m	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
g										
1	1,410	1,910	2,240	2,480	2,670	2,830	2,960	3,080	3,180	3,550
5	1,190	1,740	2,100	2,360	2,560	2,730	2,870	2,990	3,100	3,490
10	1,160	1,720	2,080	2,340	2,550	2,720	2,860	2,980	3,090	3,480
15	1,150	1,710	2,070	2,340	2,540	2,710	2,850	2,980	3,080	3,480
30	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704	2,847	2,970	3,078	3,472

Fonte: Ribeiro e Caten (2001a).

2.4.3.2 Reprodutibilidade

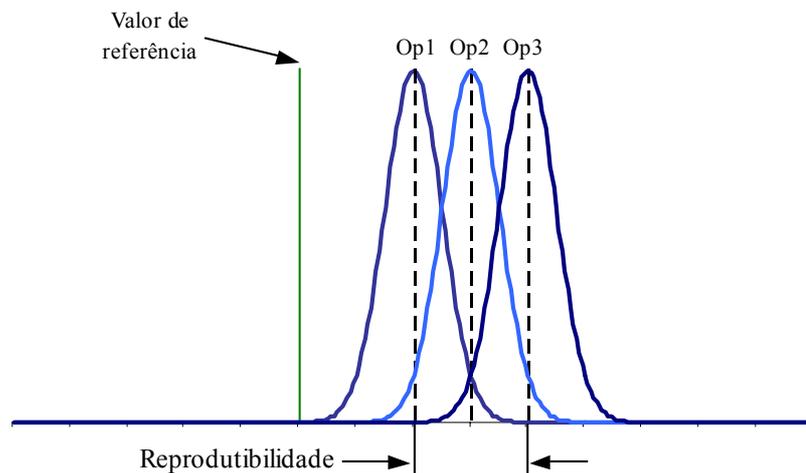
A reprodutibilidade refere-se a diferenças que podem existir entre as medidas de diferentes operadores, em geral provenientes de procedimentos específicos adotados por cada operador. Para a determinação da reprodutibilidade inicia-se calculando a amplitude entre as médias dos operadores (R_o), o desvio-padrão do operador (σ_o) e na seqüência a variação do operador (VO), utilizando-se as equações 49, 50 e 51 respectivamente. A constante d_2 que aparece na equação 50 é obtida da tabela 3, em função de m e g onde, m = número de operadores e $g = 1$ (IQA, 1997a).

$$R_o = \bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}, \text{ amplitude entre as médias dos operadores.} \quad (49)$$

$$\sigma_o = R_o / d_2, \text{ desvio-padrão do operador.} \quad (50)$$

$$VO = 5,15\sigma_o, \text{ variação do operador (reprodutibilidade).} \quad (51)$$

Na figura 6 é apresentada uma representação gráfica da reprodutibilidade quando três operadores são avaliados.



Fonte: Igram e Taylor (1998).

Figura 6 - Representação gráfica da reprodutibilidade para três operadores.

Como a estimativa da reprodutibilidade é contaminada por uma parcela da variação devido ao dispositivo de medição, ela deve ser ajustada subtraindo-se uma fração que corresponde à repetitividade através da equação 52, onde n = número de peças e r =

número de ciclos de medição. O desvio-padrão ajustado dos operadores é calculado pela equação 53 (IQA, 1997a).

$$VO = \sqrt{\left(5,15 \frac{R_0}{d_2}\right)^2 - \frac{(5,15\sigma_e)^2}{nr}}, \text{ variação do operador ajustada.} \quad (52)$$

$$\sigma_o = VO / 5,15, \text{ desvio-padrão ajustado do operador.} \quad (53)$$

Conhecidas as variabilidades devido a repetibilidade e a reprodutibilidade, a variabilidade total do sistema de medição (R&R) é calculada somando-se estas duas parcelas segundo a equação 54. A variação do operador mais o dispositivo de medição expressa em termos de desvio-padrão é calculada pela equação 55 (IQA, 1997a).

$$R \& R = \sqrt{VE^2 + VO^2}, \text{ variação do conjunto operador + dispositivo de medição.} \quad (54)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_o^2}, \text{ desvio-padrão do conjunto operador + dispositivo de medição.} \quad (55)$$

2.4.3.3 Determinação da variação peça-a-peça

O desvio-padrão das peças pode ser determinado através de um estudo independente de capacidade do processo, ou pode ser obtido a partir dos dados do estudo do sistema de medição. Usando-se os dados do estudo, inicia-se calculando a média das medições para cada peça e depois calcula-se a amplitude destas médias (R_p) segundo a equação 56, e o desvio-padrão das peças com a equação 57, onde d_2 é obtido da tabela 3, em função das constantes m e g considerando m = número de peças e $g = 1$ (IQA, 1997a).

$$R_p = \bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min}, \text{ amplitude entre as médias das peças.} \quad (56)$$

$$\sigma_p = R_p / d_2, \text{ desvio-padrão das peças.} \quad (57)$$

A variação total entre as peças é estimada usando-se a equação 58 (99% das peças devem estar nesse intervalo, supondo-se distribuição normal).

$$VP = 5,15\sigma_p, \text{ variação peça-a-peça.} \quad (58)$$

2.4.3.4 Variação total do processo

A variabilidade total do processo é calculada somando-se a variabilidade do sistema de medição com a variabilidade das peças, esta soma de variabilidades pode ser expressa pela equação 59 e em termos de desvio-padrão pela equação 60.

$$VT = \sqrt{(R \& R)^2 + VP^2}, \text{ variação total.} \quad (59)$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_p^2}, \text{ desvio-padrão total.} \quad (60)$$

2.4.3.5 Avaliação do sistema de medição em termos percentuais

A avaliação do sistema de medição é expressa em termos percentuais. O percentual da variabilidade total do processo, que é atribuído ao sistema de medição é determinado através da equação 61, onde VT significa a variação total do processo. Também é comum usar como base de comparação o intervalo das especificações do cliente. Neste caso, utiliza-se a equação 62 com a tolerância do cliente (RIBEIRO; CATEN, 2001a). O R&R% comparado com a tolerância nos informa que percentual da tolerância é consumida pelo sistema de medição.

$$R \& R\%_{PC} = \frac{R \& R}{VT} \cdot 100, \text{ onde: PC significa percentual de contribuição.} \quad (61)$$

$$R \& R\%_{PT} = \frac{R \& R}{Toler.} \cdot 100, \text{ onde: PT significa percentual de tolerância.} \quad (62)$$

2.4.4 Método da Análise de Variância

A ANOVA é uma técnica estatística que pode ser utilizada também para o estudo de variabilidade de um sistema de medição. Usando a ANOVA, a variabilidade pode ser decomposta em quatro fontes: peças, operadores, interação entre peças *versus* operadores e erro de replicação devido ao dispositivo de medição (HEUVEL, 2000). Na tabela 4 são apresentadas as fontes de variação e as equações para o cálculo das médias quadradas.

Tabela 4 – Médias quadradas para os efeitos das fontes de variação.

Fonte de variação	Fórmula para a média quadrada	Média quadrada esperada
Peça	$MQ_p = \frac{nr}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{\bar{y}})^2$	$nr\sigma_p^2 + r\sigma_{op}^2 + \sigma_e^2$
Operador	$MQ_o = \frac{nr}{n-1} \sum_{j=1}^m (\bar{y}_j - \bar{\bar{y}})^2$	$nr\sigma_o^2 + r\sigma_{op}^2 + \sigma_e^2$
Operador x peça	$MQ_{op} = \frac{r}{(n-1)(m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{\bar{y}})^2$	$r\sigma_{op}^2 + \sigma_e^2$
Repetitividade	$MQ_e = \frac{1}{nm(r-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2$	σ_e^2

Fonte: Heuevel (2000).

As médias, $\bar{y}_i, \bar{y}_j, \bar{y}_{ij}$ e $\bar{\bar{y}}$, usadas na tabela 4 são calculadas segundo as equações 63, 64, 65, e 66 respectivamente.

$$\bar{y}_i = \frac{1}{mr} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad (63)$$

$$\bar{y}_j = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad (64)$$

$$\bar{y}_{ij} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad (65)$$

$$\bar{\bar{y}} = \frac{1}{nmr} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r y_{ijk} \quad (66)$$

onde: n = número de peças, m = número de operadores e r = número de ciclos de medição.

σ_p^2 = variância entre as peças, σ_o^2 = variância do operador, σ_{op}^2 = variância da interação peça x operador e $\sigma_e^2 = \sigma_{Repetitividade}^2$ = variância devido ao equipamento de medição. A variância total é expressa pela equação 67 e a reprodutibilidade é calculada pela equação 68.

$$\sigma_m^2 = \sigma_o^2 + \sigma_{op}^2 + \sigma_e^2, \text{ variância total do sistema de medição.} \quad (67)$$

$$\sigma_{Reprodutibilidade}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_{op}^2, \text{ variância do operador e interação operador versus peça.} \quad (68)$$

Critérios de aceitação

De acordo com Heuvel (2000), em cada característica de qualidade um limite superior de especificação (LSE) e outro inferior de especificação (LIE) são definidos para garantir que o cliente obtenha produtos dentro dos limites de especificação. O valor $5,15\sigma_m$ é comparado com a tolerância a partir da equação 69.

$$R \& R\%_{PT} = \frac{5,15\sigma_m}{LSE - LIE} \cdot 100 \quad (69)$$

O R&R%, usado para avaliar a qualidade ou capacidade do sistema de medição, em geral, segue o critério apresentado na tabela 5, sugerido por Heuvel (2000).

Tabela 5 – Critérios para a aceitação de um sistema de medição.

$R\&R\% \leq 10\%$	excelente
$10\% < R\&R\% \leq 20\%$	bom
$20\% < R\&R\% \leq 30\%$	pode ser aceito (depende do caso)
$30\% < R\&R\%$	não aceitável

Fonte: Heuvel (2000).

2.5 ANÁLISE DO MODO E EFEITO DE FALHA (FMEA)

2.5.1 Introdução

Como metodologia formal, o FMEA se originou na indústria aeroespacial a partir dos anos sessenta e posteriormente foi adotado pela indústria automotiva. O FMEA tem demonstrado ser uma ferramenta útil para avaliar o potencial de falha, possibilitando prever sua ocorrência (VANDENBRANDE, 1998). Baseado em sessões sistemáticas de *brainstorming*, o FMEA tem como objetivo principal descobrir as falhas com possibilidades de ocorrência, em sistemas ou processos (CLIFTON, 1990; apud PUENTE et al., 2002).

O FMEA é uma técnica indutiva, estruturada e lógica com o objetivo de identificar as causas e efeitos de cada modo de falha de um sistema ou produto. A análise pode resultar em ações corretivas, priorizadas de acordo com a criticidade, para eliminar ou compensar os modos de falhas e seus efeitos (LAFRAIA, 2001).

Os conceitos do FMEA podem auxiliar um grupo de melhoria a direcionar a energia e os recursos alocados ao planejamento das ações, nos sistemas ou itens que produzirão os melhores resultados (PANDE; NEUMAN; CAVANANGH, 2002). Nos projetos Seis Sigma estes conceitos normalmente são usados na etapa de análise do DMAIC, com o objetivo de se priorizar as variáveis críticas do processo.

2.5.2 Método de análise

O FMEA é um método de análise de projetos (de produtos ou processos industriais, e/ou administrativos) utilizado com a finalidade de identificar todos os possíveis modos potenciais de falha e determinar o efeito destes sobre o desempenho do sistema, produto ou processo, mediante um raciocínio basicamente dedutivo (HELMAN; ANDERY, 1995). Segundo Sankar e Prabhu (2001), o FMEA representa um eficiente e documentado método para engenheiros apresentar de maneira estruturada e formalizada seu pensamento subjetivo e experiências sobre as seguintes questões: O que poderá sair errado? Qual a causa para isto dar errado? Quais os efeitos desses erros?

O objetivo de um estudo de FMEA é identificar falhas e propor ações corretivas necessárias para a prevenção de falhas que poderão atingir o cliente, assegurando qualidade, durabilidade e confiabilidade no produto ou serviço (STAMATIS, 1995). No FMEA procura-se determinar modos de falha dos sistemas mais simples, as suas causas e de que maneira eles afetam os níveis superiores do processo. As perguntas básicas que são feitas

em uma análise de FMEA são: (a) Que tipos de falhas são possíveis de ocorrer? (b) Que partes do processo podem ser afetadas? (c) Em ocorrendo a falha, quais são os efeitos desta sobre o processo? (d) Qual o nível de importância da falha? (e) O que fazer para preveni-la? (HELMAN; ANDERY, 1995).

Para Freitas e Colosimo (1997), as características gerais do FMEA podem ser resumidas como segue:

- o FMEA pode ser implementado tanto para o projeto de um produto (FMEA de produto) como de um processo (FMEA de processo);
- o ponto de partida é a definição precisa da função do componente (FMEA de produto) ou da etapa do processo (FMEA de processo);
- relacionam os tipos (modos) de falha com os seus efeitos, as causas do modo de falha e os mecanismos existentes para prevenção da ocorrência;
- na análise de cada modo de falha em potencial no tempo, considera-se que todas as demais características estão conforme o especificado no projeto;
- é conhecida como uma ferramenta *bottom line* (de baixo para cima) no produto ou processo, por iniciar a análise a partir dos componentes ou em cada etapa do processo respectivamente.

Sankar e Prabhu (2001) descrevem as etapas essenciais para a condução de um estudo de FMEA na ordem que segue: (1) descrever o nome, o número e a função do item; (2) listar os possíveis modos de falhas; (3) estimar a severidade da falha; (4) listar as causas potenciais da falha (5) estimar a frequência de ocorrência da falha (6) descrever o método de detecção da falha; (7) estimar a probabilidade de detecção da falha; (8) avaliar o NPR e (9) recomendar a ação corretiva.

2.5.3 Os índices utilizados no FMEA

Segundo Scipioni et al. (2002), as prioridades das falhas identificadas nos subsistemas ou componentes são avaliadas com a utilização de três índices, os quais são descritos a seguir:

- **Severidade:** este índice mede o grau do potencial da falha em termos de segurança e funcionalidade, pontuado de 1 a 10, onde 1 representa uma severidade muito baixa e 10 uma muito alta.

- **Ocorrência:** mede a probabilidade de ocorrência da falha, ou a chance que a falha apresenta de ocorrer, utilizando uma escala de 1 a 10, para 1 uma chance remota de ocorrência e 10 uma probabilidade muito alta de ocorrência;

- **Detecção:** representa a probabilidade de que o modo de falha seja detectado e/ou corrigido por controles existentes na linha de produção, também quantificada por uma escala de 1 a 10, onde 1 significa que os controles existentes possuem um altíssima probabilidade de detectar uma possível falha e 10 corresponde a uma probabilidade muito baixa da falha ser detectada.

Para quantificar o nível de risco do produto ou processo determina-se o número de prioridade de risco (NPR). O NPR é calculado a partir do produto dos três índices de avaliação relacionados com os efeitos potenciais de falha, as causas potenciais de falha e os controles disponíveis para detectar estas causas e falhas antes da entrega do produto ao cliente. O NPR é determinado matematicamente pelo produto dos índices de severidade, ocorrência e detecção como apresentado na equação 70 (CHANG; LIU; WEI, 1998).

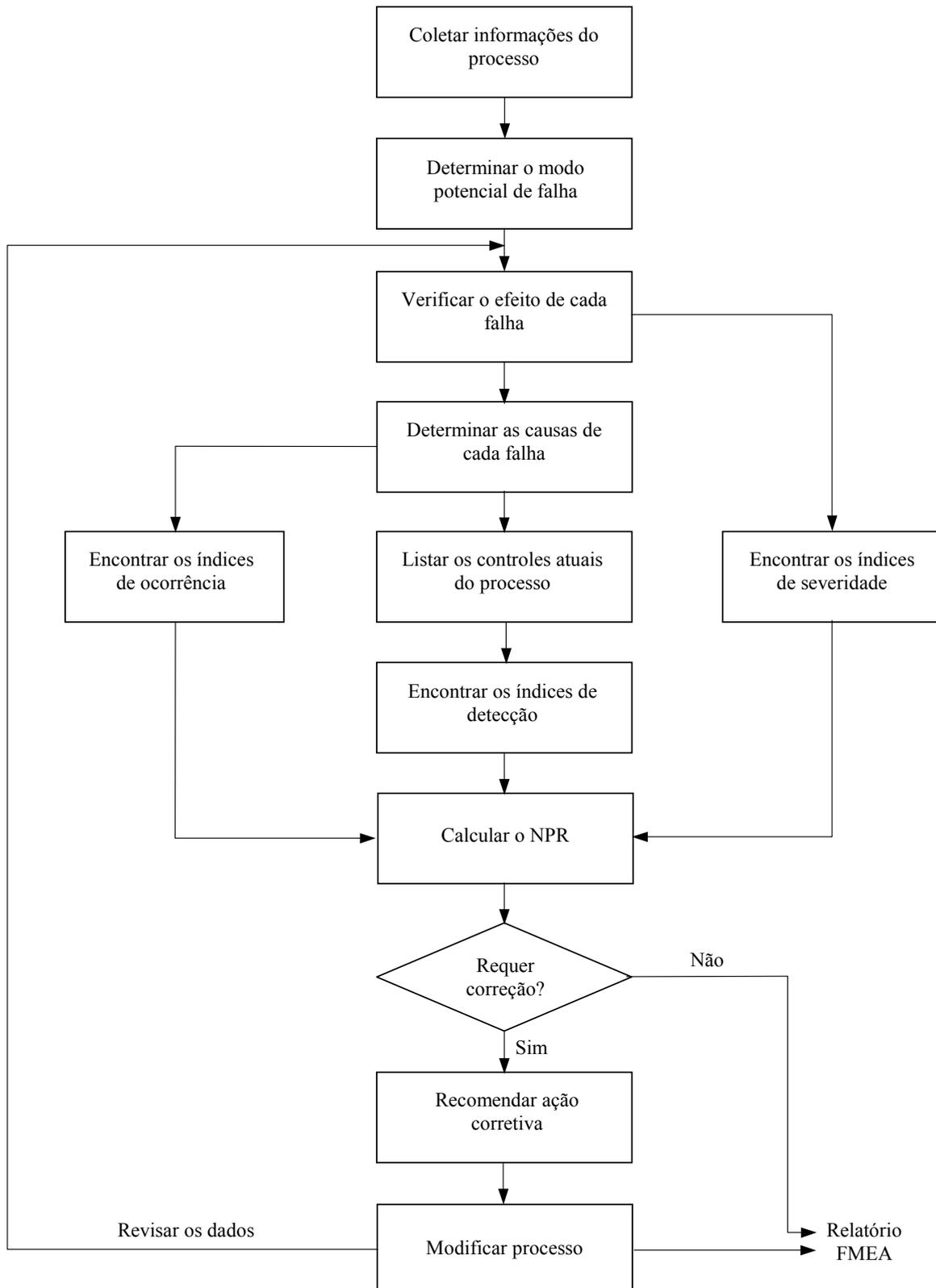
$$NPR = S.O.D \quad (70)$$

Ammerman (1998) citado por Puente et al. (2002), estabeleceu uma ordem de prioridade que pode ser seguida para se decidir sobre as ações corretivas após a conclusão de um estudo de FMEA em um produto ou processo descrita a seguir:

- 1) eliminar a causa da falha: por exemplo, alterando o projeto de partes que podem ser substituídas;
- 2) reduzir a frequência ou a probabilidade de ocorrência: não sendo possível eliminar a causa da falha, pode-se reforçar o sistema, tornando-o mais robusto;
- 3) reduzir a severidade da falha: isto pode ser garantido: projetando um sistema livre de falhas ou usando sistemas redundantes;
- 5) aumentar a probabilidade de detecção: aumentando ou melhorando os controles existentes.

Reduzir a frequência da falha ou aumentar a probabilidade de detecção são medidas limitadas, que devem ser aceitas como uma solução temporária até que se estabeleça uma medida definitiva que resolva o problema de uma vez por todas.

Na figura 7 é apresentado um fluxograma simplificado para a elaboração de um FMEA de processo.



Fonte: Pillay e Wang (2003); Teng e Ho (1996).

Figura 7 - Fluxograma simplificado para a elaboração de um FMEA de processo.

2. 6 DESDOBRAMENTO DA FUNÇÃO QUALIDADE (QFD)

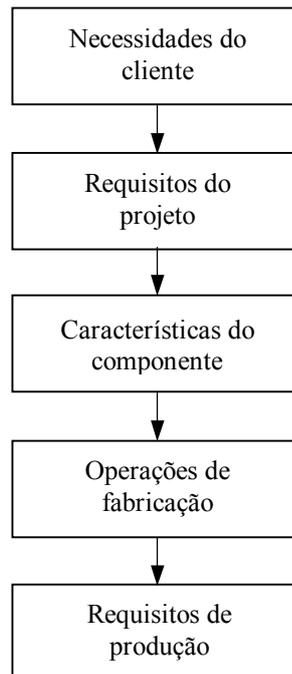
2.6.1 Introdução

O QFD foi concebido no Japão nos anos sessenta quando a indústria japonesa passava pelas dificuldades do pós-segunda guerra mundial. Nessa época a forma de desenvolvimento de produto era a imitação e a cópia, a partir daí passando para o desenvolvimento baseado na originalidade. Assim, o QFD nasceu como um método ou técnica para o desenvolvimento de novos produtos sob a filosofia do controle da qualidade total (AKAO; MAZUR, 2003).

Ao longo dos últimos trinta anos, o QFD tem beneficiado a indústria no empenho em garantir que os requisitos do cliente sejam atingidos. Nesse sentido, o desenvolvimento de produtos e esforços de melhorias para produtos e processos têm sido as aplicações predominantes desta técnica (WALDEN, 2003). Segundo Prazeres (1995), função qualidade é o conjunto de todas as atividades através das quais é possível obter produtos ou serviços que atendam às necessidades e as expectativas do cliente.

O QFD pode ser definido como a conversão da demanda dos clientes (requisitos) em características técnicas da qualidade. Desenvolvendo a qualidade desde o projeto até o produto final, para sistematicamente desdobrar as relações entre a demanda do cliente e as características de engenharia; iniciando com a qualidade de cada componente funcional e estendendo o desdobramento da qualidade em todas etapas do processo (AKAO, 1996).

Na abordagem do QFD o processo começa com os requisitos do cliente, que em geral são as características da qualidade importantes para o cliente. Como estas características são expressas na linguagem do cliente não são quantificadas e, portanto, são de difícil operacionalização na produção. Durante o desenvolvimento do produto, as necessidades do cliente são convertidas em requisitos internos da empresa, chamados de requisitos de projeto. A partir daí, os requisitos do projeto são traduzidos em características de componentes que permitem o desempenho das funções essenciais do produto. Estas características são desdobradas em operações de fabricação, que são traduzidas em requisitos para os responsáveis da produção fabricar os componentes com as características exigidas (EUREKA; RYAN, 1993). Na figura 8 é apresentado um fluxograma simplificado que ilustra a abordagem do QFD.



Fonte: Eureka e Ryan (1993).

Figura 8 - Fluxograma que ilustra a abordagem do QFD.

2.6.2 O uso do QFD

Considerado uma técnica de planejamento, o QFD vem sendo utilizado para a melhoria da qualidade. É uma abordagem para a qualidade orientada ao cliente, na qual as necessidades e expectativas do cliente são identificadas e desdobradas para determinar as especificações de projeto do produto ou serviço. A matriz multidimensional, chamada de Casa da Qualidade, porque tem esta forma, é usada como base para demonstrar o planejamento do procedimento. As principais etapas na análise do QFD compreendem: a identificação dos requisitos dos clientes; a avaliação das prioridades destes requisitos; a identificação das características técnicas; o desenvolvimento da matriz de relações e a seleção das características técnicas (OWLIA; ASPINWALL, 1998).

Segundo Myint (2003), o QFD é dirigido para satisfazer completamente as expectativas do cliente em relação ao produto ou serviço. É usado em muitas empresas para economizar no projeto e no tempo de desenvolvimento do produto, focar na satisfação do cliente e melhorar a comunicação entre os níveis da organização.

Kelly (2002) afirma que para o negócio ter sucesso os gerentes precisam ouvir a voz de cada tipo de cliente e priorizar a importância dos diferentes clientes. As diferentes áreas de negócios representadas por um corpo executivo, permitem escutar a correta voz entre

os clientes internos e externos. A voz do cliente, interno ou externo, orientará a seleção do projeto de melhoria e lhe proporcionará uma estabilidade suplementar. Com a voz do cliente externo é possível obter-se um *feedback* sobre as questões de garantia, prazo de entrega, qualidade intrínseca e especificação de componentes. Por outro lado, com a voz do cliente interno obtém-se o *feedback* sobre ordens incorretas, acuracidade de testes e a qualidade de produtos intermediários. A negatividade da voz é sinal de que os negócios não estão correndo tão eficientemente como o desejado e necessitará de uma ação para minimizar ou eliminar as reclamações dos clientes.

2.6.3 As matrizes do QFD

Segundo Sullivan (1986), há quatro documentos comumente usados para conduzir o QFD: (i) a matriz do planejamento, contendo todos requisitos do cliente; (ii) a matriz de desenvolvimento, com as características finais do produto; (iii) os planos de processos e as cartas de controle da qualidade e (iv) as instruções de operação. De acordo com Hauser e Clausing (1988), a casa da qualidade é a parte mais usada no QFD, é uma casa estilo matriz que identifica os atributos do cliente “o que” e os transforma em características técnicas “como”.

O QFD usa basicamente quatro matrizes, também chamadas “casas”, para integrar as informações necessárias. A aplicação do método tem início com a casa da qualidade, a qual é usada pelo grupo para entender os requisitos do cliente e transformar estes requisitos em características de engenharia. Posteriormente, as casas são desdobradas de requisitos para características de produção. A tradução dos requisitos do cliente significa: (1) um critério chave no gerenciamento da qualidade total, (2) aumento nas vendas e lucros satisfazendo os clientes e reduzindo o ciclo de tempo no desenvolvimento de novos produtos e (3) aquisição de novos clientes (TEMPONI; YEN; TIAO, 1999).

2.6.4 Matriz dos processos

Para Ribeiro, Echeveste e Danilevicz (2001), a matriz dos processos é usada para relacionar e priorizar as variáveis do processo (X 's) com os requisitos do cliente (Y 's). O objetivo desta matriz é evidenciar as variáveis do processo que estão associadas com as características de qualidade. Isto, para auxiliar na identificação das variáveis críticas para a qualidade do produto que devem ser monitoradas e/ou otimizadas.

Neste trabalho a matriz de processos é utilizada como matriz de causa e efeito, com o objetivo de identificar e priorizar as variáveis do processo de maior impacto nas

características de qualidade, através da quantificação do relacionamento das características de qualidade com as variáveis do processo.

O relacionamento das características da qualidade com as variáveis do processo consiste em avaliar o grau de relação existente entre as variáveis do processo (variáveis de entrada) e as características de qualidade (requisitos do cliente). Para esta avaliação pode ser utilizada uma escala como descrita a seguir: (i) 0 = não há relação entre a variável do processo e o requisito do cliente; (ii) 1 = a variável do processo afeta só remotamente o requisito do cliente; (iii) 4 = a variável de entrada tem um efeito moderado no requisito do cliente e (iv) 9 = a variável de entrada influencia fortemente no requisito do cliente.

A avaliação do relacionamento permite identificar quais as variáveis estão mais fortemente relacionadas ao atendimento das características de qualidade e, por conseguinte, ao atendimento às características críticas da qualidade para o cliente. Para se estabelecer as relações de causa e efeito entre as variáveis de processo e as características de qualidade deve-se responder a seguinte questão: “se a variável “x” for perfeitamente controlada, estará assegurado o atendimento das especificações para as características da qualidade?” Se a resposta for sim, então a relação é forte (9); se a resposta for parcialmente, então a relação é moderada ou média (4), etc. (RIBEIRO; ECHEVESTRE; DANILEVICZ, 2001).

Definição da importância das variáveis de processo

A definição da importância das variáveis do processo tem por objetivo fornecer uma medida concreta para avaliar o quanto cada variável está associada à obtenção das características de qualidade, possibilitando a visualização daquelas variáveis de maior importância para a qualidade. O grau de importância das variáveis é calculado considerando-se a intensidade dos relacionamentos entre uma determinada variável e as características de qualidade, ponderado pela importância definida para as características de qualidade. Com os valores de importância das variáveis, pode-se, por exemplo, elaborar um gráfico de Pareto; onde as variáveis do processo são apresentadas em ordem decrescente de importância. A fórmula de cálculo é apresentada na equação 71.

$$IV_i = \sum_{j=1}^n VQ_{ij} \cdot IQ_j, \text{ grau de importância da variável } i. \quad (71)$$

onde: VQ_{ij} = intensidade do relacionamento entre a variável i e a característica de qualidade j .

IQ_j = Índice de importância da característica de qualidade j .

2.7 ANÁLISE DE REGRESSÃO

2.7.1 Introdução

Para a resolução de muitos problemas de controle da qualidade se faz necessária uma estimativa das relações existentes entre duas ou mais variáveis. Na maioria dos casos, o interesse está centrado na obtenção de uma equação que relacione uma variável (normalmente uma característica de qualidade) a um conjunto de uma ou mais variáveis (normalmente variáveis do processo) (JURAN; GRINA, 1993).

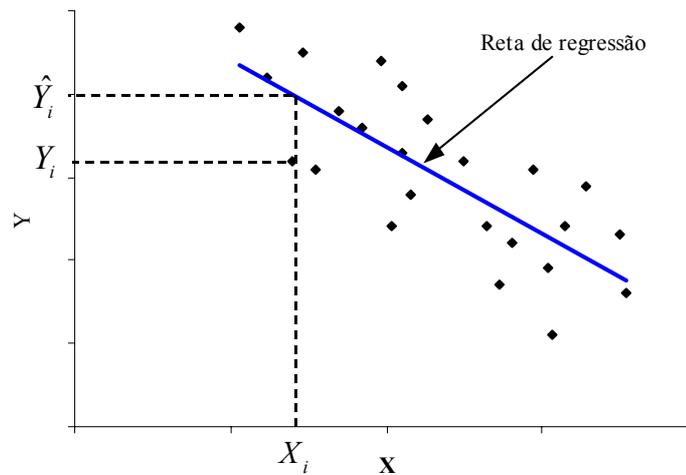
A análise de regressão linear é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas para investigar e modelar o relacionamento existente entre as variáveis de um processo. Esta técnica se baseia numa análise que visa a obtenção de um modelo matemático capaz de expressar o relacionamento entre as variáveis de interesse através de uma equação denominada “equação de regressão”. De maneira geral, a análise de regressão pode ser utilizada para descrever, prever, controlar e estimar os resultados de um fenômeno (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

2.7.2 Regressão linear simples

Em um estudo de análise de regressão, o caso mais simples, em que apenas duas variáveis estão envolvidas, corresponde à regressão linear simples. Na regressão linear simples procura-se a correlação entre uma variável preditora X e a variável dependente ou variável de resposta Y . Contudo, nos problemas práticos quase sempre existem outras variáveis preditoras, as quais são mantidas constantes durante a análise, ou seus efeitos considerados desprezíveis (JURAN; GRINA, 1993).

2.7.2.1 Critério dos mínimos quadrados

O critério normalmente usado para se obter uma equação de regressão, que melhor se ajusta a um determinado conjunto de dados, desenvolvido pelo matemático francês Adrian Legendre no início do século XIX, é o critério dos mínimos quadrados. A solução da equação dos mínimos quadrados define as estimativas $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$, para as quais a soma dos quadrados do resíduo é mínima. Esse método, exige que a reta ajustada aos dados seja tal que, a soma dos quadrados das distâncias verticais dos pontos à linha ajustada seja mínima (KLEINBAUM; KUPLER, 1978; FREUND; SIMON, 2001). Na figura 9 é apresentado um diagrama de dispersão mostrando os valores observados de X_i, Y_i e a reta de regressão que se ajusta aos dados observados.



Fonte: adaptado de Kleinbaum e Kupper (1978).

Figura 9 - Gráfico de dispersão e a reta de regressão ajustada a um conjunto de dados.

Em uma análise de regressão deseja-se encontrar as estimativas ($\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$) para os parâmetros (β_0 e β_1) desconhecidos e assim obter-se uma equação de previsão que, dado o valor de X (variável independente), a equação prevê o valor de Y (variável dependente) (JURAN; GRINA, 1993).

De acordo com Montgomery e Runger (1999), supondo-se que cada observação Y possa ser descrita pelo modelo da equação 72, o coeficiente β_0 é a interseção (valor de Y para $X = 0$) enquanto que β_1 é a inclinação da reta, que pode ser positiva, negativa ou nula e ε é o erro do modelo ajustado.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (72)$$

Se há n pares de dados $(Y_1, X_1), (Y_2, X_2), (Y_3, X_3), \dots, (Y_n, X_n)$ é possível estimar os parâmetros β_0 e β_1 , pelo método dos mínimos quadrados usando a equação 73 com os n pares de observações da amostra. A soma de quadrados dos desvios das observações em relação à reta de regressão é calculada pela equação 74 (MONTGOMERY; RUNGER, 1999).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (73)$$

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_i)^2 \quad (74)$$

onde: X_i = valores das variáveis independentes de índice i ;

Y_i = valores das variáveis dependentes de índice i ;

n = número de pares dos valores $X Y$ do conjunto de dados.

Para Montgomery e Peck (1982), a solução das equações normais resultantes da equação 74 fornece os estimadores de mínimos quadrados $\hat{\beta}_0$ e $\hat{\beta}_1$, a partir das equações 75, 76, 77, 78 e 79.

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \quad (75)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \quad (76)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right) \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right) \quad (77)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \text{ coeficiente angular;} \quad (78)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X}, \text{ coeficiente linear;} \quad \text{onde: } \bar{Y} = (1/n) \sum_{i=1}^n Y_i \text{ e } \bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i \quad (79)$$

A equação de regressão ou modelo ajustado é representado pela equação 80.

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X, \text{ equação de regressão.} \quad (80)$$

2.7.2.2 Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação r , calculado pela equação 81 é uma medida da intensidade da relação linear existente entre duas variáveis. (RIBEIRO; CATEN, 2001b).

$$r(X, Y) = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} S_{yy}}}, \text{ coeficiente de correlação.} \quad (81)$$

2.7.2.3 Teste de significância da regressão

O método da Análise de Variância pode ser usado para o teste de significância da regressão. O procedimento parte do desmembramento da variabilidade total da variável de resposta nos seus componentes básicos para o teste F . A Análise de Variância é identificada como mostrado na equação 82. A SQT tem $n-1$ graus de liberdade, a SQ_{Reg} 1 e a

SQR $n-2$ graus de liberdade respectivamente. A formulação da hipótese, para o teste de significância da regressão e a estatística do teste são apresentadas em 83.

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 + \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (82)$$

$$SQT = SQ_{\text{Reg}} + SQR$$

$$H_o : \beta_1 = 0$$

$$H_a : \beta_1 \neq 0$$

$$F_o = \frac{SQ_{\text{Reg}} / 1}{SQR / (n - 2)} = \frac{MQ_{\text{Reg}}}{MQR} \quad (83)$$

A hipótese $H_o : \beta_1 = 0$ deve ser rejeitada se $F_o > F_{\alpha, 1, n-2}$, indicando que a regressão é significativa. O procedimento é usualmente apresentado em uma tabela de análise de variância como aparece na tabela 6.

Tabela 6 - ANOVA para o teste de significância da regressão linear simples

Fontes de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	F_o
Regressão	$SQ_{\text{Reg}} = \hat{\beta}_1 S_{xy}$	1	MQ_{Reg}	$\frac{MQ_{\text{Reg}}}{MQR}$
Residual	$SQR = SQT - \hat{\beta}_1 S_{xy}$	$n-2$	MQR	$\frac{MQ_{\text{Reg}}}{MQR}$
Total	SQT	$n-1$		

Fonte: Montgomery e Runger (1999).

2.7.2.4 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação r^2 pode ser entendido como a fração da variabilidade observada na variável de resposta Y que pode ser explicada pela variável regressora X no modelo de regressão ajustado (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

2.7.2.5 Suposições associadas ao modelo de regressão linear simples

Segundo Montgomery e Peck (1982), levando-se em consideração que os parâmetros β_o e β_1 são desconhecidos, será necessário uma estimativa destes por meio do emprego de dados amostrais. Para que se obtenha boas estimativas para os parâmetros

β_0 e β_1 e também uma boa interpretação prática do fenômeno analisado, deve-se considerar algumas suposições ao modelo de regressão linear simples:

- 1) A relação entre Y e X é linear, ou pode ser bem aproximada por uma linha reta;
- 2) O termo do erro ε têm média zero
- 3) A variância do erro σ^2 é aproximadamente constante;
- 4) Os erros são não correlacionados, ou seja, o valor de um erro não depende de qualquer outro erro;
- 5) Os erros têm distribuição aproximadamente normal.

2.7.2.6 Adequação do ajuste

Quando um modelo de regressão é escolhido, deve-se verificar se o mesmo é adequado para os propósitos a que se destina. A adequação do ajuste e as suposições do modelo podem ser verificadas através de uma análise dos resíduos. Se o ajuste para o modelo linear for adequado, os gráfico de resíduos contra os valores ajustados apresentará um padrão aleatório. Caso contrário, alguma tendência curvilínea será observada (RIBEIRO; CATEN, 2001b).

De acordo com Montgomery (2001), um estimador para o resíduo ε_i é definido pela diferença entre o valor observado de Y e o valor ajustado pela equação de regressão ($e_i = Y_i - \hat{Y}_i$), onde: e_i é o estimador para o erro, Y_i é uma observação e \hat{Y}_i é o valor correspondente estimado pelo modelo de regressão. Muitos modelos de regressão preferem usar os resíduos padronizados a trabalhar com as médias quadradas dos resíduos. Os resíduos padronizados, por apresentarem a média zero e o desvio-padrão aproximadamente unitário, facilitam a identificação de possíveis valores atípicos 'outliers' no conjunto de dados. Segundo Montgomery e Runger (1999), para um desvio-padrão unitário, a maioria dos resíduos (aproximadamente 95%) devem estar situados no intervalo $-2 \leq d_i \leq 2$. Se alguma observação apresentar o valor do resíduo fora deste intervalo pode tratar-se de um provável dado atípico ou *outlier*. Os dados atípicos devem ser criteriosamente examinados, pois podem fornecer informações importantes sobre o processo que está sendo analisado. Se for constatado registro incorreto ou outras anormalidades sem possibilidades de correção, que justifiquem o descarte, estes dados devem ser eliminados do modelo.

No modelo de análise de regressão simples os resíduos padronizados são calculados com o uso das equações 84, 85 e 86 sugeridas por (MONTGOMERY; RUNGER, 1999).

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} = \frac{Y_i - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i)}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \text{ resíduo padronizado;} \quad (84)$$

$$SQR = S_{yy} - \hat{\beta}_1 S_{xy}, \text{ soma de quadrados dos resíduos;} \quad (85)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SQR}{n-2}, \text{ estimativa da variância dos resíduos.} \quad (86)$$

Homogeneidade da variância: a suposição de homogeneidade da variância S^2 ao longo de todo o intervalo de X pode ser verificada analisando-se o gráfico de resíduos contra os valores ajustados (MONTGOMERY; PECK, 1982).

Os erros são não correlacionados: a validade desta suposição pode ser verificada por meio de um gráfico de resíduos contra o tempo ou ordem de coleta das observações, que deverá apresentar uma distribuição aproximadamente homogênea dos pontos sobre o gráfico. Configurações especiais podem indicar que os erros são correlacionados (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Normalidade dos resíduos: a validade da suposição de normalidade pode ser verificada com o teste de normalidade, através do gráfico de probabilidade normal para os resíduos. A suposição de normalidade será válida se os pontos do gráfico estiverem distribuídos aproximadamente ao longo de uma linha reta sendo que os valores centrais do gráfico devem merecer uma maior atenção (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Dados atípicos “outliers”: um *outlier* é uma observação extrema, que não é típica do restante da massa de dados. Os dados atípicos podem ser provenientes do efeito de algum fator externo ao estudo, ou podem simplesmente ser um erro de leitura e registro. Uma observação extrema poderá ser identificada através do gráfico de resíduos contra os valores ajustados (RIBEIRO; CATEN, 2001b).

2.7.3 Regressão linear múltipla

Regressão linear múltipla é uma técnica usada para medir quantitativamente o efeito de várias variáveis, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ sobre uma variável de resposta Y , através do critério dos mínimos quadrados. A estimativa do grau de ajuste da relação é tipicamente

medida por R^2 que pode estar compreendido entre os valores zero e um (CHATTERJEE; SORENESEN, 1998).

De modo análogo à regressão linear simples as suposições associadas ao modelo de regressão linear múltipla também devem ter sua validade verificada para que o modelo tenha validade para o seu uso (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Segundo Montgomery (2001), a minimização do erro quadrado médio envolve a resolução das conhecidas equações normais. A solução das equações normais fornecerá os estimadores dos coeficientes de regressão $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$. Em notação matricial o modelo de regressão linear é dado pela equação 87. A expressão do modelo linear geral de regressão é dada pela equação 88.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (87)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (88)$$

onde: k é o número de variáveis regressoras desconhecidas, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são os coeficientes de regressão e ε é o erro aleatório dado pela diferença entre o valor observado Y e o valor obtido pela equação de regressão.

Como os parâmetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são desconhecidos será necessário estimá-los por meio da utilização de dados amostrais. Para estimar $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ supõe-se que $n > k$ observações estejam disponíveis, sendo X_{ij} a i -ésima observação da variável X_i . O modelo de regressão linear escrito a partir das observações amostrais é dado pela equação 89.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (89)$$

Para encontrar os estimadores de mínimos quadrados de $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$, deve-se minimizar o resultado da equação 90 em relação a estes coeficientes. Estas p equações com $p = k + 1$ são as equações normais que devem ser resolvidas.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j X_{ij})^2 \quad (90)$$

O modelo de regressão linear múltipla da equação 87, expresso em termos das observações amostrais e escrito sob a forma matricial, é apresentado em 91. A disposição dos

dados amostrais para a resolução do modelo é apresentada na tabela 7 (MONTGOMERY; RUNGER, 1999).

Tabela 7 - Disposição dos dados para utilização no modelo de regressão linear múltipla.

Y_i	X_{i1}	X_{i2}	...	X_{ik}
Y_1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1k}
Y_2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2k}
...
Y_n	X_{n1}	X_{n2}	...	X_{nk}

Fonte: Montgomery (2001)

$$Y = X\beta + \varepsilon, \text{ onde: } Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdot & \cdot & X_{1k} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdot & \cdot & X_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdot & \cdot & X_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ e } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (91)$$

sendo: Y o vetor das observações da variável de resposta Y ($n \times 1$), X a matriz das variáveis regressoras X ($n \times p$), β o vetor dos coeficientes de regressão ($p \times 1$) e ε o vetor dos erros aleatórios ($n \times 1$).

Para encontrar o vetor dos estimadores dos mínimos quadrados $\hat{\beta}$, deve-se minimizar a função escrita sob a forma matricial na equação 92¹:

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (Y - X\beta)' (Y - X\beta) \quad (92)$$

O estimador de mínimos quadrados $\hat{\beta}$ é a solução para β na equação 93.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \quad (93)$$

Resolvendo a derivada da equação 93 obtém-se equação 94.

$$X' X \hat{\beta} = X' Y \quad (94)$$

¹ O sinal “apóstrofo” que aparece a partir da equação 92 é um símbolo que representa a transposta da matriz.

Para resolver a equação normal na forma matricial, multiplica-se ambos os lados da equação 94 pela inversa de $X'X$, obtendo-se a equação 95 para a estimativa de β .

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (95)$$

A equação matricial 95 representa o sistema de equações normais para o modelo de regressão linear múltipla. Os estimadores de mínimos quadrados são obtidos através da resolução da equação 95 e os valores ajustados pelo modelo são dados pela equação matricial 96.

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} \quad (96)$$

2.7.3.1 Teste de significância da regressão

Segundo Montgomery (2001), o teste de significância para a regressão serve para determinar se há uma relação linear entre a variável de resposta Y e as variáveis regressoras $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$. O teste de hipótese apropriado é apresentado na equação 97.

$$H_o : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (97)$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0, \text{ para pelo menos um } j$$

A rejeição de H_o na equação 97 significa que, pelo menos uma das variáveis regressoras, $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ contribui significativamente para o modelo. O procedimento do teste de hipótese envolve uma Análise de Variância (ANOVA) partindo da soma de quadrados totais (SQT), decomposta em soma de quadrados, devido ao modelo de regressão (SQ_{Reg}) e a soma de quadrados dos resíduos ou erro (SQR), de acordo com a equação 98.

$$SQT = SQ_{Reg} + SQR \quad (98)$$

onde: a SQT é calculada com a equação 99, a SQ_{Reg} com a equação 100 e a SQR com a equação 101.

$$SQT = Y'Y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n}, \text{ soma de quadrados totais.} \quad (99)$$

$$SQ_{Reg} = \hat{\beta}'X'Y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n}, \text{ soma de quadrados da regressão.} \quad (100)$$

$$SQR = Y'Y - \hat{\beta}'X'Y, \text{ soma de quadrados dos resíduos.} \quad (101)$$

O procedimento do teste de hipótese para $H_o : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ é realizado através do teste F apresentado na equação 102.

$$F_o = \frac{SQ_{Reg} / k}{SQR / (n - p)} = \frac{MQ_{Reg}}{MQR} \quad (102)$$

Rejeita-se H_o em um teste com um nível de significância α se $F_o > F_{\alpha, k, n-p}$, ou se o valor-p para a estatística F_o for menor do que α . Este procedimento pode ser sumarizado em uma tabela ANOVA, conforme é apresentada na tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA para o teste de significância da regressão linear múltipla.

Fontes de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	F_o
Regressão	SQ_{Reg}	k	MQ_{Reg}	$\frac{MQ_{Reg}}{MQR}$
Residual	SQR	$n-p$	MQR	$\frac{MQ_{Reg}}{MQR}$
Total	SQT	$n-1$		

Fonte: Montgomery (2001).

2.7.3.2 Análise dos resíduos

O resíduo padronizado para o modelo de análise de regressão múltipla pode ser obtido através das equações 103 e 104. Para tanto, utiliza-se como estimativa para o desvio-padrão, a MQR calculada com a equação 105 ou a MQR obtida através da tabela ANOVA apresentada na tabela 7.

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \text{ resíduo;} \quad (103)$$

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{\hat{\sigma}^2}} = \frac{e_i}{\sqrt{MQR}}, \text{ resíduo padronizado;} \quad (104)$$

$$\hat{\sigma}^2 = MQR = \frac{SQR}{n-p} = \frac{Y'Y - \hat{\beta}'X'Y}{n-p}, \text{ estimativa da variância.} \quad (105)$$

2.7.3.3 Teste individual dos coeficientes de regressão

O teste de hipótese individual dos coeficientes de regressão é útil para se determinar o nível de contribuição de cada variável explicativa para modelo de regressão. Um modelo poderá ser melhorado com a inclusão de variáveis adicionais, ou talvez com a retirada

de uma ou mais variáveis que já tenham sido incorporadas ao modelo de regressão (MONTGOMERY, 2001).

A adição de variáveis ao modelo de regressão sempre provoca um aumento da soma de quadrados da regressão (SQR_{eg}) e uma diminuição da soma de quadrados do erro (SQR). Precisa-se avaliar, se um aumento na SQR_{eg} é suficiente para justificar o uso de uma variável adicional ao modelo. Entretanto, se for adicionada ao modelo, uma variável com pouca contribuição, a MQR poderá aumentar e não melhorar o modelo ajustado. (MONTGOMERY, 2001).

O teste de hipótese para a significância de um coeficiente individual de regressão, indicado por Montgomery e Runger (1999) é apresentado na equação 106,

$$\begin{aligned} H_o : \beta_j &= 0 \\ H_1 : \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \tag{106}$$

Se $H_o : \beta_j = 0$ não é rejeitado, então é um indicativo de que X_j pode ser eliminada do modelo. O teste estatístico para esta hipótese é apresentado na equação 109, onde: C_{jj} é o elemento da diagonal da matriz $(X'X)^{-1}$ correspondente a $\hat{\beta}_j$ e $\hat{\sigma}^2$ é estimado pela variância do erro obtido com a equação 105. O denominador da equação 109 é o erro padrão da estimativa para coeficiente de regressão $\hat{\beta}_j$ representado por $S_e(\hat{\beta}_j)$ é apresentado na equação 108. A variância dos coeficientes B 's são expressas em termos dos elementos da matriz de covariância $Cov(\hat{\beta})$, apresentada na equação 107. A diagonal da matriz $\sigma^2(X'X)^{-1}$ são as variâncias de $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k$.

$$Cov(\hat{\beta}) = \sigma^2(X'X)^{-1} \tag{107}$$

$$S_e(\hat{\beta}_j) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \tag{108}$$

$$t_o = \frac{\hat{\beta}_j}{S_e(\hat{\beta}_j)} = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} \tag{109}$$

A hipótese nula $H_o : \beta_j = 0$ é rejeitada se $|t_o| > t_{\alpha/2, n-p}$. Esse teste é chamado de teste parcial ou teste marginal, porque o coeficiente de regressão $\hat{\beta}_j$ depende de todas as outras variáveis regressoras que estão no modelo.

2.7.3.4 Modelos para seleção de variáveis

Para Montgomery e Runger (1999), um dos problemas, em muitas aplicações da análise de regressão múltipla é o que envolve a seleção do grupo de variáveis regressoras usadas no modelo para encontrar a melhor equação de regressão. A seguir apresentam-se os modelos que podem ser utilizados para este fim.

Coefficiente de determinação múltipla: o coeficiente de determinação R^2 representa uma medida da fração da variabilidade de Y que pode ser atribuída às variáveis explicativas X_1, X_2, \dots, X_n , presentes no modelo de regressão. Entretanto, um alto valor para R^2 não significa, necessariamente, que o modelo de regressão esteja adequadamente ajustado. É possível aumentar o R^2 por meio da adição de novas variáveis ao modelo, mas isto não quer dizer que o modelo com um maior número de variáveis seja melhor, apesar de apresentar um maior R^2 . Para contornar esse problema, pode-se utilizar o coeficiente de determinação múltipla ajustado R_{aj}^2 , que leva em consideração o número de variáveis regressoras incluídas no modelo. Se R^2 e R_{aj}^2 forem muito diferentes, é um bom indicativo de que foram incluídas variáveis explicativas ao modelo ajustado sem, no entanto, apresentarem uma contribuição significativa (WERKEMA; AGUIAR, 1996). O coeficiente de determinação múltipla, definido por Montgomery (2001) é calculado pela equação 110 e o coeficiente de determinação múltipla ajustado, pela equação 111.

$$R^2 = \frac{SQ_{Reg}}{SQT} = 1 - \frac{SQR}{SQT} \quad (110)$$

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{SQR/(n-p)}{SQT/(n-1)} = 1 - \frac{n-1}{n-p}(1-R^2) \quad (111)$$

Estatística C-p: além dos critérios R^2 e R_{aj}^2 , já citados, usados para a obtenção do melhor modelo de regressão pode-se utilizar a estatística C-p, a qual fornece uma medida da média quadrada total do erro para o modelo de regressão. Nessa estatística usa-se a média quadrada do erro do modelo completo com $K+1$ termos ($\hat{\sigma}^2 = MQR(k+1)$), como uma estimativa da variância σ^2 . Então, um estimador para a média quadrada total do erro é:

$$C_{-p} = \frac{SQR(p)}{\hat{\sigma}^2} - n + 2p \quad (112)$$

Se o modelo de tamanho p resultar em um valor de C-p com um desvio negligenciável em relação ao valor de p , então, isto pode ser interpretado como demonstrado na equação 113.

$$E(C_{-p} \setminus \text{desvio zero}) = p \quad (113)$$

Portanto, o valor de C-p para cada modelo de regressão sob consideração deve ser avaliado em relação a p . Logo, aqueles modelos com desvio significativo de um suposto melhor modelo, terão um valor de C-p significativamente maior do que p . A decisão para a escolha da melhor equação de regressão se baseará no modelo com o valor do C-p o mais próximo possível do valor de p (MONTGOMERY; PECK, 1982).

Método *stepwise*: é uma técnica usada para a seleção de variáveis. O procedimento iterativamente constrói uma seqüência de modelos de regressão, adicionando ou removendo variáveis em cada passo. O critério para adicionar ou remover uma variável em cada passo é normalmente baseado no teste F parcial. O F_e é o valor de F fixado para adicionar uma variável e o F_s é o valor de F para remover uma variável do modelo. Pode-se fixar $F_e < F_s$ ou como é normalmente usado $F_e = F_s$. O método *stepwise* inicia com uma variável regressora X_1 que apresenta a mais alta correlação com a variável de resposta Y , ou seja, a variável regressora que produz o maior valor da estatística F . Exemplificando o processo, no primeiro passo a variável X_1 é selecionada, no segundo, as restantes $k-1$ variáveis candidatas são avaliadas, e a variável para a qual a estatística F parcial for máxima é adicionada à equação, desde que $F_2 > F_e$. Na equação 114, $MQR(X_j, X_1)$ significa a média quadrada do erro para o modelo contendo ambas as variáveis X_j, X_1 . Supondo que este procedimento esteja indicando que X_2 deve ser adicionada ao modelo, agora o algoritmo do método *stepwise* determina se a variável X_1 adicionada no primeiro passo permanecerá ou deverá ser removida do modelo. Se o valor calculado de F_1 resultar $F_1 < F_s$ a variável X_1 é removida, caso contrário será mantida e o passo seguinte é testar uma nova candidata a ingressar no modelo contendo as variáveis X_1 e X_2 . Em cada passo, o conjunto de candidatas regressoras é avaliado e a variável regressora com maior F parcial, que satisfaz a condição $F_j > F_e$, é adicionada ao modelo. Na seqüência, a estatística F parcial é aplicada para cada regressora atualmente no modelo e a regressora com o menor valor de F é eliminada se $F_j < F_s$. O procedimento continua até outra regressora ser adicionada ou removida do modelo. Esta técnica é quase sempre desempenhada usando-se programa computacional (MONTGOMERY; RUNGER, 1999). Os algoritmos utilizados para decidir sobre a adição ou remoção de variáveis regressoras do modelo são apresentados nas equações 114 e 115 respectivamente.

$$F_j = \frac{SQ_{\text{Reg}}(\hat{\beta}_j / \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_0)}{MQR(X_j, X_1)} \quad (114)$$

$$F_1 = \frac{SQ_{Reg}(\hat{\beta}_1 / \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_o)}{MQR(X_1, X_2)} \quad (115)$$

Seleção *forward*: o procedimento da seleção *forward* é uma variação do método *stepwise*. É baseado no princípio de que uma variável regressora de cada vez deve ser adicionada ao modelo, até não mais restar candidatas regressoras que produzam um incremento significativo na SQ_{Reg} . Isto é, as variáveis são adicionadas uma de cada vez, até o F parcial se tornar inferior ao F_e , omitindo o teste F para a exclusão de variáveis (MONTGOMERY; PECK, 1982).

Eliminação *backward*: este algoritmo inicia com todas as k variáveis candidatas incluídas no modelo. No início do processo, a regressora com o menor F parcial é excluída se a estatística F é insignificante, ou seja, se $F_j < F_s$. O modelo de regressão obtido com as $k-1$ regressoras é ajustado, e a próxima regressora com potencial de eliminação é encontrada. O algoritmo termina quando todas as k regressoras forem submetidas ao teste F parcial e não mais houver regressora para ser eliminada (MONTGOMERY; PECK, 1982).

Segundo Montgomery e Runger (1999), na seleção de um modelo de regressão, se o número de candidatas a variáveis regressoras não for tão grande, é recomendado utilizar todos os métodos possíveis. Mas usualmente é recomendado o uso do mínimo MQR e a avaliação do $C-p$ em conjunto com o método *stepwise*².

Neste capítulo foram abordados os conceitos fundamentais de algumas técnicas e ferramentas estatísticas, que podem ser utilizadas na implementação de projetos de melhoria com uma abordagem baseada no programa Seis Sigma.

No próximo capítulo será apresentado o modelo de implementação de um projeto de melhoria através do método DMAIC do programa Seis Sigma.

² Para maiores detalhes sobre a regressão linear múltipla consultar Montgomery e Peck (1982), Montgomery e Runger (1999), Werkema e Aguiar (1996).

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGIA

3.1 INTRODUÇÃO

Metodologia é uma maneira ordenada, lógica e sistemática de se realizar alguma coisa. Consiste em um conjunto de ferramentas, técnicas, princípios e regras, organizadas de forma clara, lógica e sistemática, usadas como guia para alcançar um objetivo. A padronização do uso de métodos estatísticos e a metodologia para alcançar o Seis Sigma propiciam a todos uma linguagem comum, um entendimento e, conseqüentemente, um comprometimento com os objetivos e metas da organização (PEREZ-WILSON, 1999). Segundo Antony e Banuelas (2002), a chave para o sucesso do programa de qualidade Seis Sigma é a abordagem passo-a-passo do método DMAIC, a definição das etapas, a caracterização do problema e o entendimento das características críticas para o cliente.

3.2 O MÉTODO DMAIC

O programa de qualidade Seis Sigma abordado nesta dissertação será implementado através do método DMAIC sugerido por Eckes (2001), Hoerl (1998), Lucier e Seshadri (2001), Nave (2002), Pande, Neuman e Cavanagh (2001) e Werkema (2002). Este método consiste basicamente em uma seqüência estruturada de cinco etapas que serão descritas a seguir:

3.2.1 Definir

A etapa Definir deve iniciar com o entendimento da relação existente entre os fornecedores e os clientes do processo, reunindo e analisando dados suficientes para identificar as questões importantes para a satisfação do cliente, conhecidas como

características críticas para a qualidade (CTQ – *critical to quality*). (RASIS; GITLOW; POPOVICH, 2002).

A carta do projeto, utilizada nesta etapa, é o documento formal que permite encaminhar um estudo racional para a realização do projeto, sendo constituída basicamente dos seguintes itens: (i) título do projeto; (ii) descrição do problema; (iii) definição da meta; (iv) avaliação do histórico do problema; (v) escolha da equipe de trabalho e (vi) cronograma preliminar de trabalho (WERKEMA, 2002).

Esta primeira etapa do DMAIC consiste em selecionar os projetos Seis Sigma que apresentam potencial para melhoria de desempenho. Nessa fase serão determinadas as métricas, selecionadas e treinadas pessoas para desenvolver os projetos que apresentarem o melhor retorno financeiro para a empresa. A identificação de projetos Seis Sigma permitirá à organização reconhecer como os seus processos afetam a lucratividade. Possibilitará ainda definir quais desses processos são críticos para o negócio da empresa e para a satisfação do cliente. A preparação desta fase deve incluir o treinamento e orientação dos empregado para o uso das técnicas e ferramentas que poderão ser utilizadas pelo grupo que irá conduzir o projeto. Werkema (2002) propõe que nesta etapa sejam respondidas as seguintes questões:

- Qual é o problema – um resultado indesejável ou uma oportunidade de melhoria detectada – a ser abordado no projeto?
- Qual é a meta que se deseja atingir?
- Quais são os clientes e consumidores afetados pelo problema?
- Qual é o processo responsável pelo problema?
- Quais os custos e benefícios financeiros que poderão resultar do projeto de melhoria?

Para Coronado e Antony (2002), o projeto selecionado deverá ajudar a empresa a reduzir o tempo de ciclo do produto e aumentar o rendimento do processo melhorando, assim, a vantagem competitiva e a lucratividade do negócio. Conforme Harry e Schroeder (2000), o projeto pode ser sugerido pela área de produção (*top down*) ou definido pela alta administração (*bottom up*) e proposto segundo os seguintes critérios: redução de custos, nível de dpmo/ppm do processo, custo da má qualidade, capacidade do processo, tempo de ciclo do produto, satisfação do cliente e desempenho interno.

De acordo com Lynch e Cloutier (2003), os propósitos da etapa Definir são:

- ter um claro entendimento para discussão do problema;

- identificar as variáveis de entrada e saída do processo;
- verificar responsabilidades, etapas do processo e estabelecer objetivos;
- organizar o grupo de trabalho;
- obter um entendimento do mérito do projeto;
- definir bem o enunciado do problema, entender o que será melhorado e como será medido;
- listar os processos e produtos;
- levantar dados históricos do processo;
- mapear o processo e delimitar o escopo do projeto de melhoria;
- confeccionar a carta do projeto;
- fazer um cronograma para o projeto.

3.2.2 Medir

A etapa Medir envolve o estudo e entendimento das características críticas para a qualidade (CTQ's), requerendo definições operacionais para cada característica. Iniciando por um estudo de R&R com a finalidade de determinar se o sistema de medição é apropriado para as necessidades do estudo. Estabelecendo a capacidade da situação atual para cada característica CTQ e variáveis de entrada influentes no processo. Adicionalmente, a etapa Medir envolve a coleta de dados para a determinação do desempenho das variáveis-chave de entrada do processo (RASIS; GITLOW; POPOVICH, 2002).

Para Lynch e Cloutier (2003), esta etapa abrange ações relacionadas à mensuração do desempenho dos processos e a determinação da variabilidade dos mesmos, sendo necessário cumprir os seguintes propósitos e objetivos:

- documentar o processo existente, por exemplo, através do mapeamento do processo;
- estabelecer as técnicas para coleta de dados, o que coletar, onde e como coletar;
- coletar os dados necessários para a análise;
- verificar se o sistema de medição é adequado;
- estabelecer a situação atual das características de qualidade e das variáveis do processo.
- fazer estudo de capacidade e determinar o nível sigma do processo;
- apresentar os dados graficamente.

Através de consenso entre os integrantes da equipe Seis Sigma da empresa, são identificadas as variáveis-chave de entrada e de saída do processo. Nessa fase, são utilizadas ferramentas básicas de probabilidade e estatística, *softwares* de análise estatística e análise do sistema de medição (MSA). A etapa Medir pode ser desenvolvida através do levantamento dos dados históricos, realização de testes de normalidade, análise do sistema de medição das variáveis de saída, estudo de capacidade dos sistemas de dosagem de insumos e cálculo do nível sigma atual do processo.

3.2.3 Analisar

A etapa Analisar envolve a identificação das variáveis do processo, que influem significativamente em cada característica CTQ, identificando também as possíveis variáveis de ruído. Análise de correlação/regressão e projetos de experimentos podem ajudar a determinar as variáveis-chave que influenciam nas características CTQ (RASIS; GITLOW; POPOVICH, 2002).

Para Henderson e Evans (2000), Pande, Neuman e Cavanagh (2002), esta é a fase mais importante do DMAIC. Aqui são analisados os dados relativos aos processos em estudo, com o objetivo principal de se conhecer as relações causais, as fontes de variabilidade e de desempenho insatisfatório do processo. Nessa fase, as ferramentas utilizadas para a identificação das variáveis que mais influenciam na variação do processo incluem: teste de normalidade, análise de correlação e regressão, análise de regressão multivariada e análise de variância (ANOVA). Com o auxílio destas ferramentas são desenvolvidos e listados os fatores que influenciam o resultado desejado.

Lynch e Cloutier (2003) descrevem os propósitos e objetivos que devem ser alcançados nesta etapa:

- estreitar o foco do projeto para reunir informações da situação atual;
- descobrir as fontes potenciais de variação, através do entendimento da relação existente entre as variáveis X e Y ;
- reduzir o número de variáveis de processo que serão aprimoradas na etapa de melhoria;
- identificar e controlar o risco das variáveis de entrada;
- realizar análises estatísticas e testes de significância nas variáveis X e Y , utilizando estatística descritiva, ANOVA e análise de regressão.

3.2.4 Melhorar

Segundo Werkema (2002), nessa etapa devem ser geradas idéias sobre soluções potenciais para eliminação das causas fundamentais dos problemas priorizados na etapa de análise. O grupo confirma as variáveis-chave, quantifica os seus efeitos nas características de qualidade e define a melhor solução para reduzir significativamente o nível de defeitos.

De acordo com Eckes (2001), as soluções geradas e implementadas devem procurar a eliminação da causa do problema neutralizar ou minimizar seus efeitos. Depois do processo modificado e testado são determinados prazos para a revisão dos procedimentos de produção visando atender as expectativas do cliente.

As ferramentas estatísticas relevantes utilizadas nesta fase são: o *brainstorming*, o 5W2H, a matriz de priorização, FMEA, operação evolutiva (EVOP), que permitem identificar e implementar melhorias ou ajustes para as soluções selecionadas. As principais atividades desenvolvidas são: gerar idéias de soluções potenciais para a eliminação das causas fundamentais dos problemas; priorizar as soluções; avaliar os riscos destas soluções e se possível realizar testes das soluções em pequena escala; identificar e implementar melhorias ou ajustes nas soluções implantadas e elaborar e executar um plano de ação para a implementação das soluções em larga escala (WERKEMA, 2002).

3.2.5 Controlar

Uma vez que a melhoria desejada tenha sido implementada, algum tipo de sistema tem de ser usado para manter a melhoria alcançada dentro do intervalo de tolerância aceitável. Nesta etapa são implementados os mecanismos necessários para monitorar continuamente o desempenho de cada processo, com o objetivo de garantir a sustentação das melhorias ao longo do tempo. Entre as técnicas adotadas, destacam-se as seguintes: o controle estatístico de processo, a padronização dos procedimentos que obtiveram êxito, os planos de controle, os testes de confiabilidade e os processos à prova de erros (ECKES, 2001; HARRY, 1998).

Segundo Lynch e Cloutier (2003), nessa etapa também são adotadas medidas de prevenção de erros, para detectar rapidamente um estado fora de controle e determinar as causas associadas, visando a tomada de ações antes que produtos defeituosos sejam produzidos. As principais atividades da etapa Controlar podem ser sumarizadas como segue:

- confirmação da melhoria implantada;

- confirmação de que o problema foi resolvido;
- validação dos benefícios auferidos pela melhoria;
- alterações necessárias nos procedimentos e instruções de trabalho;
- implementação de ferramentas de controle onde necessário, tais como dispositivos à prova de erro, CEP, etc.;
- auditoria do processo, monitoramento do desempenho e das métricas.

No próximo capítulo será apresentado um estudo, onde serão desenvolvidas as etapas do método e discutidas as técnicas e ferramentas estatísticas adequadas para o uso em cada fase da realização de um projeto de melhoria.

CAPÍTULO 4

4 DESCRIÇÃO DO ESTUDO, RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a implementação da metodologia Seis Sigma em um projeto de melhoria onde será utilizado o método DMAIC, conforme descrito no capítulo 3. Apresenta também a utilização das técnicas e ferramentas estatísticas em cada etapa do DMAIC.

O estudo foi desenvolvido em uma indústria petroquímica, que produz borrachas sintéticas SBR (*Styrene Butadiene Rubber*) e NBR (*Acrylonitrile Butadiene Rubber*) obtidas por processo de polimerização em emulsão à frio. Neste estudo apresenta-se a realização de um projeto de melhoria com uma abordagem Seis Sigma, na linha “C” de reação, onde o objetivo do projeto de melhoria é a redução da variabilidade na característica de qualidade viscosidade *Mooney* (VM) do látex produzido e a variabilidade dos tempos de processamento das bateladas, ou tempo de reação (tR).

A opção pelo uso do programa Seis Sigma na empresa foi uma decisão estratégica da alta administração da organização, com o objetivo de resolver problemas crônicos que não vinham tendo solução com os programas de qualidade praticados até então na empresa. A partir desta decisão, que se estendeu para os três parques fabris da empresa, a diretoria implementou um programa de treinamento onde os técnicos e engenheiros foram submetidos a uma sessão inicial com uma carga horária de quarenta horas de treinamento que contemplava o entendimento e utilização das ferramentas básicas de estatística. Para os engenheiros candidatos a líderes dos projetos Seis Sigma, o treinamento foi complementado com mais duas sessões de quarenta horas. Nesse treinamento foi desenvolvido um programa mais complexo, que contemplou ferramentas e métodos estatísticos mais avançados, tais

como, testes de hipóteses, análise de variância, análise multivariada, projetos de experimentos e a utilização do *software* estatístico Minitab.

4.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A linha “C” de reação é um processo de reação química em batelada, para a produção de látices NBR’s especiais, que em uma etapa posterior são transformados em nove tipos de elastômeros com diferentes teores de acrilonitrila combinada (28%, 39% e 45%) e diferentes níveis de VM (45, 60 e 80). A reação de polimerização para a obtenção do látex a partir dos monômeros butadieno e acrilonitrila é uma reação exotérmica que se processa em regime transiente, caracterizada por uma alta taxa de conversão inicial. O reator de polimerização é mantido isotermicamente por meio de uma serpentina, que utiliza amônia líquida (NH₃) como fluido frigorígeno, para manter a temperatura da massa reacional a 7 °C. A reação é conduzida até o ponto em que aproximadamente 85% dos monômeros são convertidos em polímero. O processo é totalmente automatizado no que se refere à injeção dos insumos no reator, controle de temperatura e pressão do reator. As atividades do operador se limitam ao condicionamento do reator para o início da produção, seleção do programa (receita) na estação de controle, acompanhamento analítico para a determinação do ponto final da batelada “morte do reator” e o direcionamento do látex para o tanque apropriado na área de coagulação.

O nível de conversão da reação é monitorado indiretamente pelo percentual de sólidos totais (ST) presentes na carga do reator, o qual deve apresentar um valor de aproximadamente 28,4%. Outro parâmetro de controle é a viscosidade *Mooney* (VM), que é uma característica relacionada com o peso molecular médio do elastômero. Fisicamente, a VM representa a resistência ao cisalhamento, resultante do movimento relativo entre um corpo de prova do elastômero e um rotor circular rotativo ou oscilante.

A VM da NBR é determinada em um equipamento, chamado viscosímetro, pelo teste (ML 1+4 @100 °C) descrito pela ASTM D 1646, onde ML significa *Mooney large*. A viscosidade é obtida pela rotação de um rotor embutido no corpo de prova do elastômero que fica dentro de uma câmara com cavidade e condições especificadas. O teste é conduzido a uma temperatura de 100 °C, com 1 minuto de pré-aquecimento da amostra em câmara fechada sem rotação e depois 4 minutos com o rotor em movimento a uma velocidade de 2,0 rpm. O valor da viscosidade é indicado por um número que representa o torque requerido para movimentar o rotor embutido no corpo de prova do elastômero (ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, 1998; SOMMER, 1996).

O esquema simplificado do processo de reação de polimerização para a produção do látex NBR especial em emulsão é apresentado na figura 10.

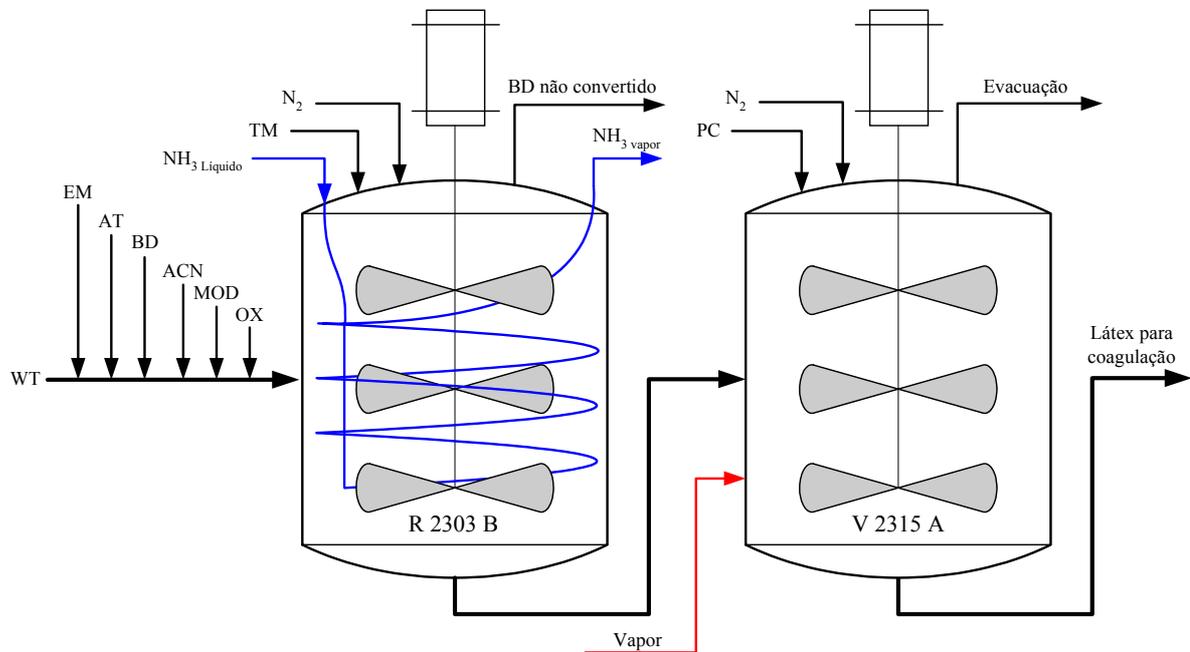


Figura 10 - Esquema simplificado do processo de polimerização de NBR especial em emulsão.

4.3 MÉTODO DMAIC

As etapas do método DMAIC, bem como as técnicas e ferramentas utilizadas em cada etapa da realização do projeto de melhoria, são descritas a seguir:

4.3.1 Etapa Definir

A definição do projeto Seis Sigma resultou de uma seleção dos processos mais importantes e que apresentavam algum problema, tanto do ponto de vista estratégico da organização como do ponto de vista da satisfação do cliente. Outro critério considerado na escolha do projeto foi a adequação do projeto à condição deste servir como projeto piloto para a introdução e aprendizado dos conceitos do Seis Sigma na organização. Depois de discussões com os gerentes da produção/processo/qualidade, optou-se pelo projeto de melhoria da linha “C” de reação, que apresentava grande variabilidade na viscosidade *Mooney* e nos tempos de processamento das bateladas provocando, como conseqüências, eventuais atrasos na entrega do produto para o cliente interno e geração retrabalho. Esse processo faz parte de uma planta de reação que produz uma variedade de látices SBR’s e NBR’s, e que em uma etapa posterior (coagulação e acabamento) serão transformados em diferentes tipos de elastômeros.

Com base nos dados históricos de desempenho das características críticas para a qualidade viscosidade *Mooney* e tempos de reação – a empresa mantém um acompanhamento sistemático da satisfação do cliente, através de visitas periódicas com o objetivo de ouvir a voz do cliente - o projeto de melhoria foi definido pelos gerentes da empresa. Com a definição do problema a ser resolvido (redução da variabilidade da viscosidade *Mooney* e dos tempos de reação das bateladas), a fase seguinte desta etapa iniciou-se com elaboração da carta do projeto (declaração do problema; enumeração das conseqüências destes problemas para o cliente e para a organização; delimitações do projeto; definição da equipe de trabalho; situação atual do processo e definição da meta a ser alcançada). A elaboração da carta do projeto (*Project Charter*) apresentada na seqüência segue o padrão sugerido por Werkema (2002).

Título do projeto: Reduzir a variabilidade dos resultados e melhorar a estabilidade do processo de reação.

Descrição do problema: A linha de reação (processo em bateladas), na qual são produzidos látices para a obtenção de elastômeros dos tipos NBR's especiais apresenta os seguintes problemas:

- uma grande variação na característica de qualidade VM entre as bateladas;
- uma grande variação no tempo de reação das bateladas, ou seja, para cada batelada processada o tempo de reação é significativamente diferente;
- perdas de bateladas em função do grande distanciamento do alvo da característica de qualidade VM, inviabilizando a correção das mesmas.

Conseqüência destes problemas para os resultados da empresa:

- a) A necessidade do aproveitamento dos látices fora de especificação em outros *grades* tendo como conseqüência riscos de contaminação e horas extras de trabalho;
- b) Atraso no cumprimento e eventualmente não cumprimento da programação de produção;
- c) Aumento do número de bateladas a serem produzidas, devido a necessidade de se produzir bateladas extras para efetuar correções em bateladas defeituosas, trazendo como conseqüência um estoque desnecessário de látices;

d) Aumento do número de trocas do tipo de elastômeros (*setups*) na área de coagulação/acabamento tendo como conseqüências: (i) perdas de produção; (ii) horas extras de limpeza; (iii) riscos de contaminação e (iv) consumo extra de utilidades;

e) Estabelecimento do número mínimo de bateladas por corridas de produção e por tipo de elastômero, gerando estoque desnecessário.

Nível sigma para a VM e o tR: considerando os dados de cento e sessenta bateladas (período de 21 de outubro de 2001 a 03 de abril de 2002) determinou-se o nível sigma atual do processo como descrito na seqüência.

- viscosidade *Mooney* (VM): 2,11 sigmas

- tempo de reação (tR): 2,41 sigmas

Definição da meta

Para definir uma meta a ser alcançada para a VM e para os tempos de reação, avaliou-se a situação atual da variação na VM e dos tempos de reação. Com base no desempenho destas características, consideradas críticas, projetou-se uma meta possível de ser alcançada, a qual será apresentada, após a determinação do desempenho da situação atual.

Determinação do desempenho atual da VM

A característica de qualidade VM é uma variável que depende da quantidade de modificador (MOD) dosado à reação. Estas quantidades dosadas podem variar a cada batelada processada, conforme o nível de VM a ser produzido (são produzidos vários níveis de VM de acordo com o cliente). Para o estudo da variabilidade, selecionou-se aqueles grupos com maior número de dados disponíveis para a mesma quantidade de MOD dosado. Os grupos utilizados para a determinação do desempenho da VM, foram os de dosagem de 3,00kg e 5,00kg de MOD, os quais apresentaram um desvio-padrão para VM de 9,85 e 8,43 respectivamente, resultando num desvio-padrão combinado de 9,04. A estatística descritiva para os dados de VM é apresentada na tabela 9 e o intervalo de confiança de 95% para as variâncias da VM é apresentado na figura 12.

Tabela 9 - Estatística descritiva dos valores de VM utilizados para a determinação da situação atual.

Estatística descritiva: VM MOD-3,00/MOD-5,00					
Variável	N	Média	Mediana	Desv. Pad.	CV
VM MOD-3	10	59,20	60,00	9,85	16,6%
VM MOD-5	14	47,93	46,00	8,43	17,6%

Como as variâncias não podem ser consideradas diferentes, a um nível de significância de 5 %, valor-p = 0,592, pode-se determinar a variância comum pela equação 116 proposta por Montgomery (1997).

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}, \text{ variância comum.} \quad (116)$$

$$S_p = \sqrt{\frac{(10 - 1) \cdot 9,85^2 + (14 - 1) \cdot 8,43^2}{10 + 14 - 2}} = 9,04; \text{ desvio-padrão comum estimado.}$$

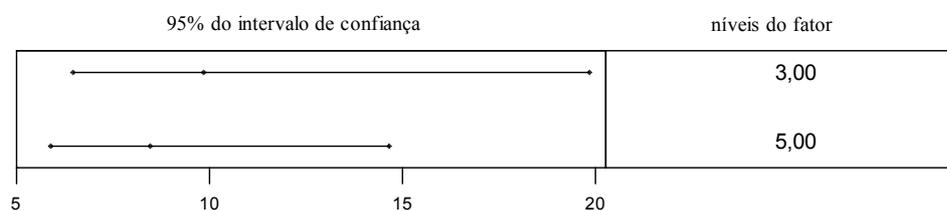


Figura 11 - Intervalo de confiança de 95% para a variância da VM

Nos *boxplots* da figura 12 é possível verificar a similaridade das variâncias da VM para as dosagens de 3,00 kg e 5,00 kg de MOD incremental.

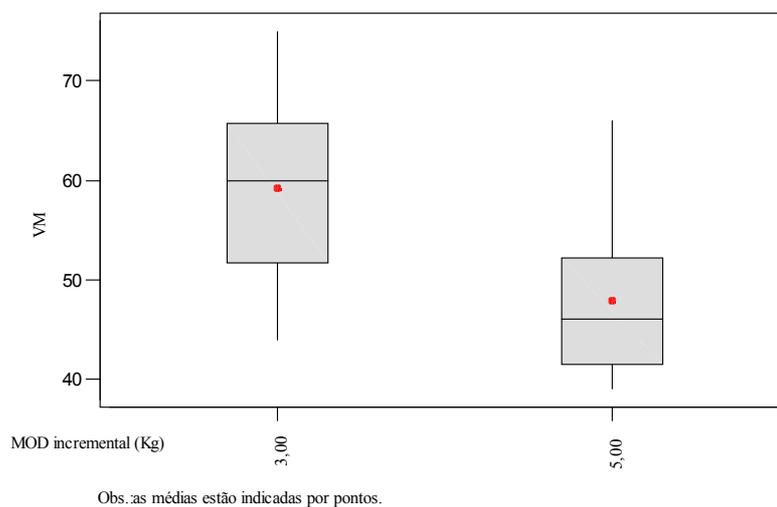


Figura 12 - *Boxplots* relacionando a VM com a quantidade de MOD inc.

Cálculo do nível sigma para a VM: para a determinação do nível sigma iniciou-se com o cálculo do Z de longo prazo (as amostras para a determinação da VM foram coletadas em um

período considerado de longo prazo e os valores apresentaram uma distribuição que pode ser considerada normal). Neste caso, determinou-se a variável reduzida Z considerando o processo centrado e uma tolerância de 20 unidades para variação na VM. Para o cálculo utilizou-se a equação 117.

$$Z = \frac{LSE - \bar{X}}{S} \text{ ou } \frac{\bar{X} - LIE}{S} = \frac{tol / 2}{S} \quad (117)$$

$$Z = \frac{20/2}{9,04} = 1,1062, \text{ como o processo foi considerado estando centrado, tem-se para } Z \text{ os}$$

valores de $-1,1062$ e $+1,1062$. Na seqüência, calculou-se a probabilidade de ocorrência de valores fora dos limites de especificação de Z com o uso da equação 118.

$$P_t = P(Z > Z_{LSE}) + P(Z < Z_{LIE}) \quad (118)$$

onde: P_t = probabilidade total, Z_{LSE} = Z do limite superior e Z_{LIE} = Z do limite inferior

$$P_t = P(Z > 1,1062) + P(Z < -1,1062) = 0,134321 + 0,134321 = 0,268642$$

Depois de calculada a probabilidade para as duas caudas da curva normal determinou-se as prováveis ocorrências fora dos limites de especificação, em ppm, utilizando a equação 3a do capítulo 2, e o nível sigma utilizando a tabela de conversão do anexo A.

$$ppm = \text{Probabilidade de defeitos} \times 10^6 = P \times 10^6$$

$$ppm = 0,268642 \times 10^6 = 268642 \rightarrow \text{tabela sigma} \rightarrow \text{nível sigma} = 2,11$$

Determinação do desempenho atual do tempo de reação (tR)

A situação atual do processo, com relação à variabilidade dos tempos de reação entre as bateladas, foi avaliada com base nos dados históricos de cento e sessenta e duas bateladas produzidas nos R2303B e R2304B no período de 28 de outubro de 2001 a 03 de abril de 2002. A estatística descritiva dos tempos de reação é apresentada na tabela 10 e os *boxplots* dos tempos de reação por reatores são mostrados na figura 13.

Tabela 10 - Estatística descritiva dos tempos de reação para a avaliação da situação atual.

Estatística descritiva: tR_R 2303 B; tR_R 2304 B; tR_R 2303 B/04 B					
Variável	N	Média	Mediana	Desv. Pad	CV
tR_R2303	84	9,54	9,33	1,07	11,2%
tR_R2304	78	9,38	9,20	1,17	12,5%
tR_R2303B/04B	162	9,47	9,30	1,12	12,0%

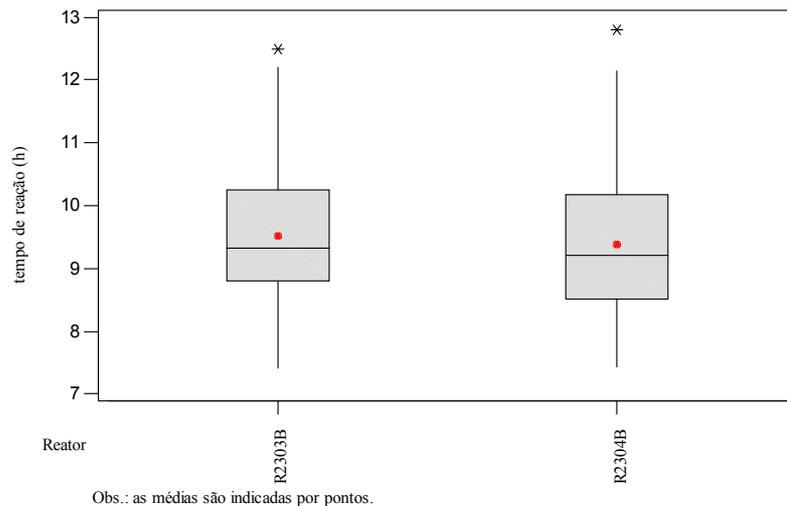


Figura 13 - Boxplots comparando os tempos de reação por reator.

Cálculo do nível sigma do tR: para a determinação do nível sigma, precisou-se obter o Z de longo prazo (amostras coletadas em um período considerado de longo prazo e valores distribuídos normalmente). Inicialmente determinou-se a variável reduzida Z, considerando o processo centrado e uma tolerância de 3h no tR, para o cálculo, utilizou – se a equação 117.

$$Z = \frac{3/2}{1,12} = 1,3393, \text{ como o processo foi considerado estando centrado, tem-se para } Z \text{ os}$$

valores de $-1,3393$ e $+1,3393$. Na seqüência calculou-se a probabilidade de ocorrência de valores fora dos limites de Z com o uso da equação 118.

$$P_t = P(Z > 1,3393) + P(Z < -1,3393) = 0,090239 + 0,090239 = 0,180478$$

Uma vez calculada a probabilidade para as duas caudas da curva normal, de forma similar ao que foi feito para a VM, determinou-se o valor em ppm e depois o nível sigma para o tR.

$$ppm = 0,180478 \times 10^6 = 180478 \rightarrow \text{tabela sigma} \rightarrow \text{nível sigma} = 2,41$$

As metas definidas para serem alcançadas em um período de seis meses são as seguintes: (a) reduzir a variabilidade natural da VM em todas as bateladas produzidas para uma amplitude máxima de 20 unidades do teste ML (1+4) @100 °C (± 10 unidades em torno do valor alvo); (b) reduzir a variação dos tempos de reação das bateladas para uma amplitude máxima de 3 horas ($\pm 1,5$ h em torno do tempo esperado).

Ganhos esperados (base Agosto de 2002)

- 1) Estoque de borracha fora de especificação (BFE): perda estimada de R\$ 60.000,00/ano em função dos custos com estoque desnecessário, movimentação e venda do produto como refugo;
- 2) Trocas de tipo de elastômeros, horas extras de limpeza e consumo extra de utilidades: R\$ 54.000,00/ano;
- 3) Riscos de contaminação com o aproveitamento de bateladas refugadas em outros *grades* de produtos: intangível;
- 4) Atraso ou não cumprimento da programação de produção: intangível.

Equipe de trabalho: A equipe de trabalho para atuar no projeto foi assim constituída:

Coordenadores: Gerente de Produção / Gerente de Fábrica

Líderes do projeto: Engenheiro de Produção e Pesquisador

Especialistas do Processo: Engenheiro de Processo, Engenheiro de PCP, Supervisor de Produção (cliente do processo), Técnicos e Supervisores do Processo.

Com o projeto definido e a equipe de trabalho escolhida, passou-se para a etapa Medir.

4.2.2 Etapa Medir

Como já era esperada a existência de um grande número de variáveis influentes no processo, esta etapa teve como objetivo principal selecionar aquelas mais influentes, visando o planejamento otimizado da coleta dos dados necessários para a avaliação do desempenho atual do processo. A estratégia adotada para a determinação das variáveis a serem investigadas foi: (i) elaboração de um *brainstorming* onde seriam levantadas todas as variáveis influentes no processo; (ii) disposição das variáveis em um diagrama de causa e efeito; (iii) uma priorização inicial através de uma matriz de causa e efeito e (iv) priorização final com o auxílio de um FMEA.

Esta etapa iniciou com a elaboração do fluxograma do processo, mapeamento do processo e um *brainstorming* com a participação da equipe Seis Sigma, especialistas e técnicos responsáveis pela operação da linha “C” de reação. O mapeamento do processo foi elaborado com base no fluxograma do processo e do sistema de automação; nas instruções de

trabalho e da engenharia de processo; entrevistas com os técnicos e análise do processo de produção *in loco*.

Na abertura do *brainstorming* discutiram-se os princípios do programa Seis Sigma e a importância da participação dos técnicos no processo de levantamento e identificação das variáveis críticas do processo, visando o comprometimento destes com o projeto. O objetivo deste primeiro *brainstorming*, além de apresentar o projeto Seis Sigma aos envolvidos com o processo, foi listar as variáveis do processo que interferem nas características de qualidade críticas para o cliente e, a partir do conhecimento destas variáveis, elaborar um diagrama de causa e efeito. Nesta etapa não houve uma preocupação da equipe em quantificar a intensidade da relação entre as entradas e saídas do processo, já que isto seria contemplado em uma fase posterior. O diagrama de causa e efeito resultante do *brainstorming* é apresentado na figura 14 e o mapa de processo é apresentado na figura 15.

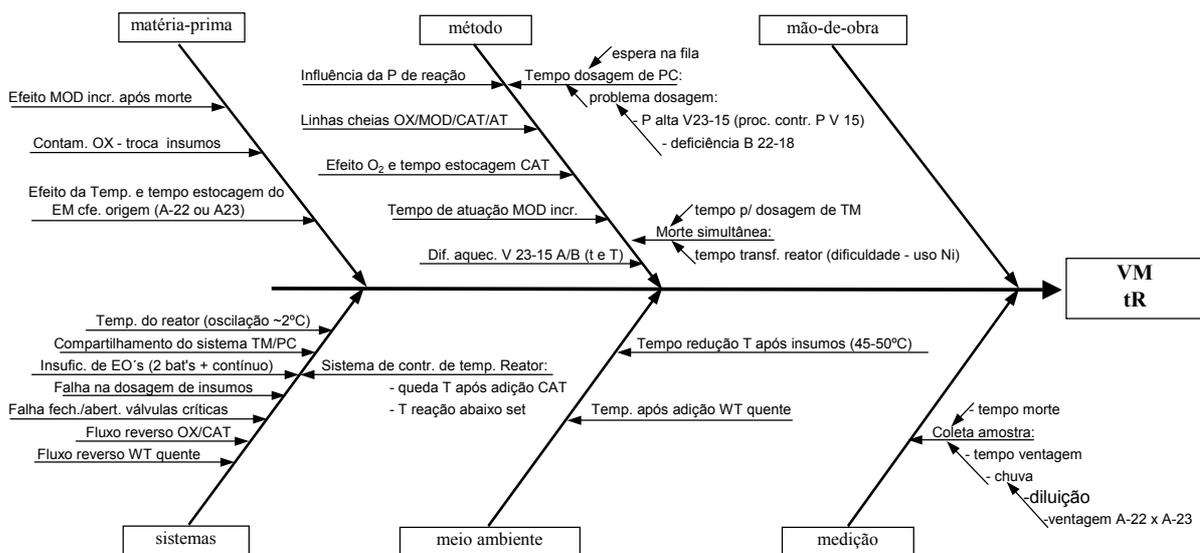


Figura 14 - Diagrama de causa e efeito das variáveis influentes no processo.

Uma vez definido o conjunto de todas as variáveis consideradas influentes no processo, resultantes do *brainstorming*, construiu-se uma matriz de causa e efeito e um mapa detalhado do processo, incluindo neste último todas as etapas, as variáveis controláveis e os ruídos do processo. Durante a construção do mapa do processo, que é apresentado na figura 15, identificou-se mais oito possíveis fontes de problemas que foram incorporados à matriz de causa e efeito. A matriz utilizada para definir as variáveis críticas do processo originou-se de

uma matriz de processos de QFD, onde as variáveis do processo são dispostas nas linhas da matriz e as características de qualidade ficam nas colunas.

De acordo com Ribeiro, Echeveste e Danilevicz (2001), a definição da importância das variáveis do processo tem por objetivo fornecer uma medida concreta para avaliar o quanto cada variável está associada à obtenção das características de qualidade, possibilitando a visualização daquelas variáveis de maior importância. O grau de importância das variáveis é calculado considerando-se: (i) a intensidade dos relacionamentos entre uma determinada variável e (ii) as características de qualidade ponderadas pela importância definida para cada característica de qualidade.

Para a construção da matriz de causa e efeito participaram os integrantes da equipe Seis Sigma e especialistas do processo. Inicialmente, determinaram-se os pesos de importância para o cliente das características de qualidade viscosidade *Mooney* e tempo de reação usando uma escala de 1 a 10. Posteriormente, avaliou-se o grau de importância de cada variável para a obtenção das características de qualidade viscosidade *Mooney* e tempo de reação, também utilizando uma escala de 1 a 10. Finalmente, através de uma soma de quadrados, calculou-se o grau de importância de cada variável para a obtenção das características de qualidade.

Após o preenchimento da matriz de causa e efeito e o cálculo dos valores de importância das variáveis, elaborou-se um gráfico de Pareto onde as variáveis do processo são apresentadas em ordem decrescente de importância. Para o cálculo do grau de importância das variáveis foi utilizada a equação 71 apresentada no item 2.6.4 do capítulo 2. Depois de uma análise das variáveis e uma discussão criteriosa, baseada no conhecimento dos técnicos e especialistas do processo, foi definida uma linha de corte a partir da qual as variáveis seriam desprezadas. As variáveis que ficaram posicionadas no entorno da linha de corte, definida em 90 pontos, foram reavaliadas e as com pontuação igual ou superior a este valor, totalizando 18 variáveis, foram remetidas para um estudo de FMEA.

Na matriz de causa e efeito e no gráfico de Pareto apresentados nas figuras 16 e 17, respectivamente, é possível visualizar, em ordem decrescente, o grau de importância das variáveis do processo e a linha de corte (assinalada no gráfico de Pareto) para a priorização das mesmas.

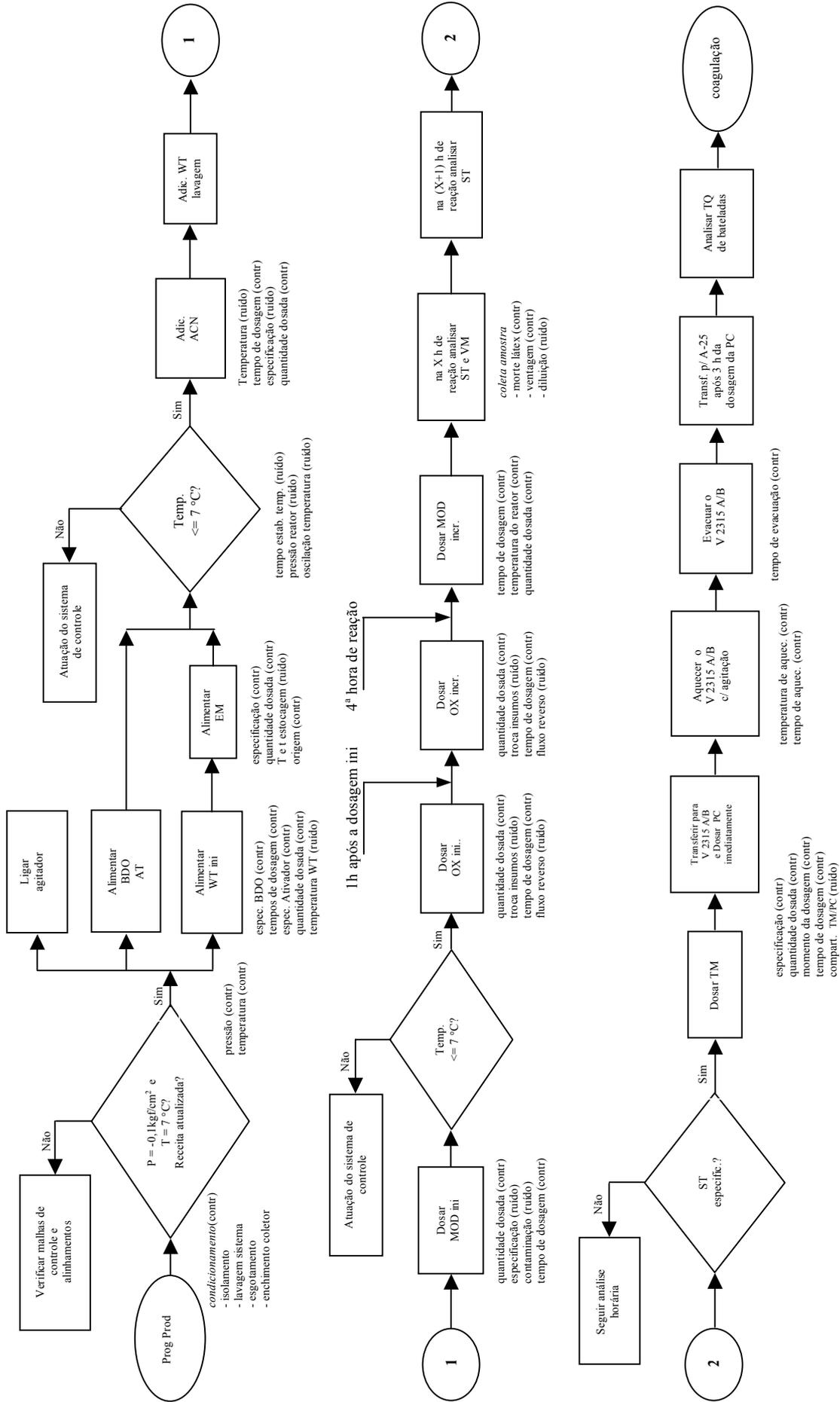


Figura 15 - Mapa do processo de produção de NBR em batelada.

Matriz de causa e efeito						
Avaliação da importância para o cliente			10	7	Importância das variáveis	Levantamento de dados
Saídas do processo			Viscosidade <i>Mooney</i>	Tempo de reação		
Entradas do processo						
N	item	descrição				
1	21.2	Falha na dosag. de insumos - OX	9	9	153	quant. dosada
2	13.1	Fluxo reverso - OX	9	9	153	não
3	3.1	Sist. contr. de temp. do reator - T reação abaixo alvo	9	9	153	temp. e tempo
4	7.1	Linha parcialmente cheia - OX	9	9	153	não
5	15	Falha fech./abert. válvulas críticas	9	4	118	não
6	8.1	Morte simultânea - tempo p/ dosag. de TM	9	4	118	implantar
7	17	Contaminação OX - trocas insumo	4	9	103	não
8	26	Temperatura ACN	9	1	97	implantar
9	9	Compartilhamento do sistema TM/PC	9	0	90	não
10	6.2.2	Tempo dosag. PC (B 22-18)	9	0	90	tempo
11	21.6	Falha na dosag. de insumos - TM	9	0	90	quant. dosada
12	6.1	Tempo de dosag. de PC	9	0	90	= 6.2.2
13	6.2.1	Tempo dosag. de PC (P alta V 15) - (= 8.2)	9	0	90	= 6.2.2
14	8.2	Morte simultânea - tempo transf. reator	9	0	90	= 6.2.2
15	7.2	Linha parcialmente cheia - MOD	9	0	90	não
16	18	Tempo de atuação MOD incremental	9	0	90	morte - MOD inc.
17	21.4	Falha na dosag. de insumos - MOD	9	0	90	quant. dosada
18	21.7	Falha na dosag. de insumos PC	9	0	90	quant. dosada
19	7.3	Linha parcialmente cheia - CAT/AT	4	4	68	xxx
20	10	Temp. e tempo estocagem do EM (A-22 ou A-23)	4	4	68	xxx
21	21.3	Falha na dosag. de insumos - AT/CAT	4	4	68	xxx
22	23	Especificação de insumos	4	1	47	xxx
23	24	Tempo de duração da dosag. de insumos	4	1	47	xxx
24	21.1	Falha na dosag. de insumos - monômeros	4	1	47	xxx
25	28	Momento da dosag. de OX	4	1	47	xxx
26	19	Tempo redução de temp. após insumos (45-50°C)	4	0	40	xxx
27	12	Dif. aquec. V 23-15 A/B (t e T)	4	0	40	xxx
28	16	Efeito MOD incr. após morte	4	0	40	xxx
29	27	Contaminação MOD	4	0	40	xxx
30	4.1	Coleta amostra - tempo morte	0	4	28	xxx
31	4.2	Coleta amostra - tempo ventagem	0	4	28	xxx
32	1	Temperatura do reator (oscilação ~2°C)	1	1	17	xxx
33	21.5	Falha na dosag. de insumos - EM	1	1	17	xxx
34	25	Temperatura WT	1	1	17	xxx
35	20	Temperatura após adição WT quente	0	1	7	xxx
36	4.3.1	Coleta amostra - chuva - diluição	0	1	7	xxx
37	5	Insuficiência de EO's (2 bat's + contínuo)	0	1	7	xxx
38	13.2	Fluxo reverso - CAT	0	1	7	xxx
39	3.2	Sist. contr. de temp. do reator	0	1	7	xxx
40	4.3.2	Coleta amostra - chuva - ventagem A-22 x A-23	0	1	7	xxx
41	14	Fluxo reverso WT quente	0	0	0	xxx
42	29	Tempo de duração da evacuação	0	0	0	xxx
43	2	Efeito da pressão do reator	0	0	0	xxx
44	11	Efeito O ₂ e tempo estocagem CAT	0	0	0	xxx
45	22	Condicionamento de sistemas	0	0	0	xxx

Figura 16 - Matriz de causa e efeito das variáveis do processo.

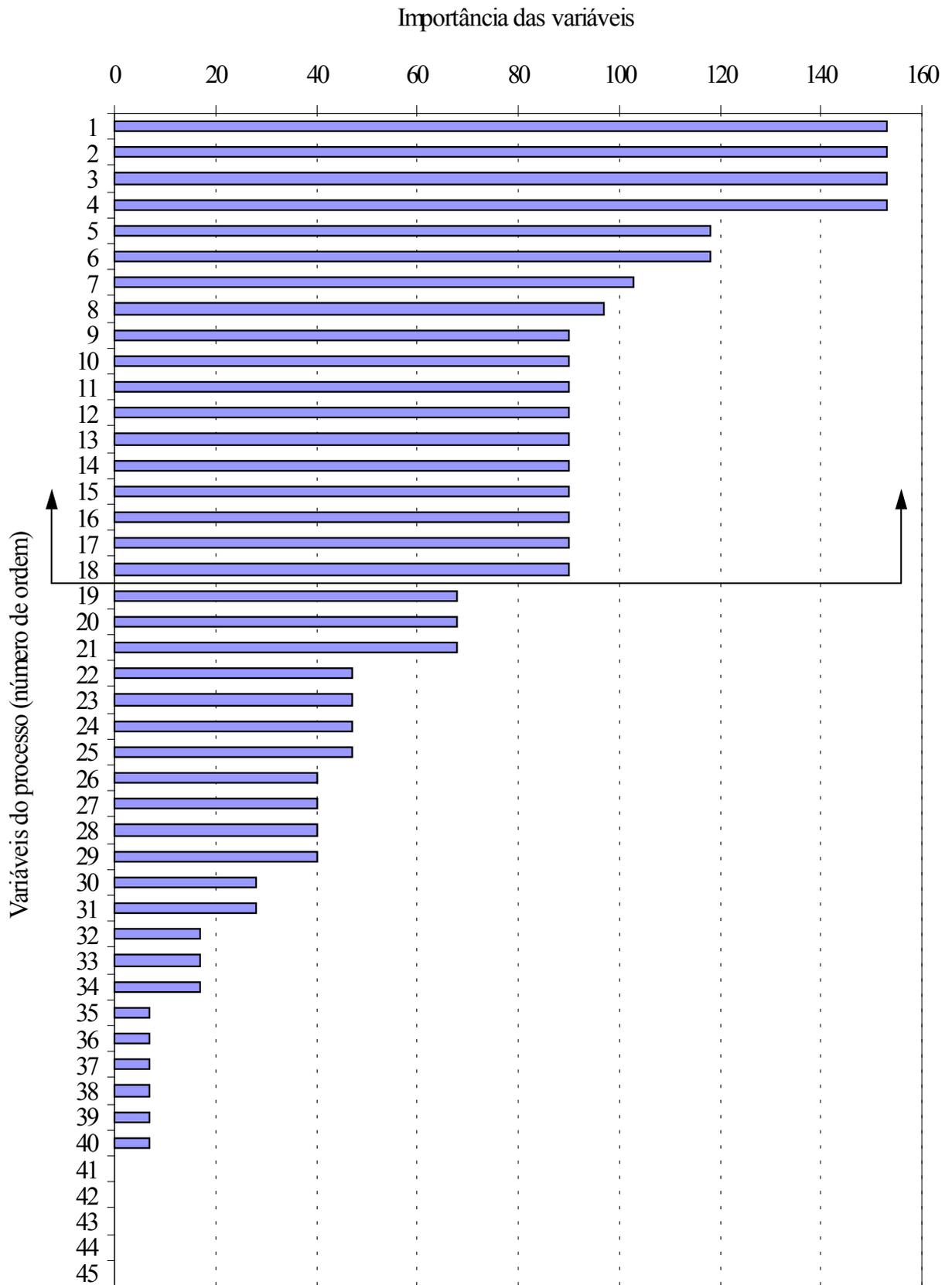


Figura 17 - Gráfico de Pareto do grau de importância das variáveis do processo.

As variáveis priorizadas com o auxílio da matriz de causa e efeito foram transferidas para um formulário do FMEA, dando seqüência ao estudo para a identificação das variáveis mais influentes no processo. Este estudo, utilizando um formulário de FMEA na forma sugerida por Cotnareanu (1999), contou com a participação da equipe Seis Sigma, especialistas do processo um representante da área de automação. Com base nos valores dos NPR's calculados e, após discussões sobre as variáveis que ficaram na fronteira do valor do NPR de corte, pôde-se selecionar aquelas que realmente são importantes para serem estudadas e melhoradas. As variáveis priorizadas através do FMEA são as que provavelmente trarão resultados significativos, se melhoradas, tanto para o cliente como para o negócio da organização. Para a próxima fase da etapa Medir foram selecionados as variáveis com NPR igual ou superior a 280. As variáveis resultantes desta priorização convergiram para três grupos principais (i) sistema de dosagem dos insumos: oxidante (OX), modificador (MOD), terminador (TM), acrilonitrila (ACN) e potassa cáustica (PC); (ii) controle de temperatura do reator e temperatura da acrilonitrila (ACN) adicionada ao reator; (iii) atraso na dosagem da potassa cáustica (PC). No apêndice A é apresentado o formulário completo do FMEA de processo.

Após a seleção das variáveis mais influentes no processo, iniciada com uma análise da matriz de causa e efeito e, posteriormente, priorizadas pelo estudo de FMEA, foi possível determinar o conjunto de dados necessários para os estudos subseqüentes. Foram coletados os dados históricos das bateladas de NBR 2860, 3960 e 4560, a partir de janeiro de 2002, pois os dados são mantidos no sistema de automação por seis meses (atualmente alterado para 8 meses), possibilitando uma análise mais completa de janeiro de 2002 em diante.

Utilizando as variáveis priorizadas, iniciou-se a análise dos dados históricos de dosagem dos insumos. O objetivo desse estudo foi avaliar o desempenho dos sistemas de dosagens, para verificar se, a vazão média de cada insumo adicionado ao reator é a recomendada pela receita da batelada, e se a variabilidade dos valores dosados está de acordo com a tolerância admitida pela engenharia de processo.

4.2.2.1 Análise do sistema de dosagem dos insumos

Procedeu-se a coleta dos dados de dosagem na estação de controle onde os dados ficam armazenados por um período de seis meses e, na seqüência, iniciou-se um tratamento estatístico dos dados de dosagem dos insumos.

De posse dos dados das quantidades mássicas dosadas de cada insumo (oxidante inicial - OX ini, oxidante incremental - OX inc., modificador inicial - MOD ini, modificador incremental - MOD inc, terminador - TM e potassa cáustica - PC), iniciou-se o estudo para avaliar o desempenho dos sistemas de dosagem, com base no percentual de tolerância de mais ou menos 0,5% na vazão dosada (tolerância recomendada pela área tecnológica). Em um estudo preliminar, através da avaliação das cartas de controle e dos índices de capacidade, foi possível concluir que o sistema de dosagem da PC apresentava um excelente desempenho de longo prazo ($P_p = 2,08$). No entanto, os sistemas de dosagem do TM ($P_p = 0,72$) e MOD inc ($P_p = 0,22$) estavam com um desempenho insatisfatório. Com relação aos insumos OX ini, OX inc e MOD ini, constatou-se, através das cartas de controle para valores individuais, que estes processos de dosagem estavam fora de controle estatístico, apresentando vários pontos fora dos limites de controle e com a média deslocada em relação ao valor nominal esperado.

Nas figuras 18, 19 e 20 são apresentadas as cartas de controle dos valores individuais das dosagens de OX ini (valor especificado 0,9000kg), OX inc (valor especificado 0,5000kg) e MOD ini (valor especificado 12,4000kg) respectivamente, onde é possível verificar as defasagens dos valores observados em relação aos valores especificados pela receita.

O desempenho dos sistemas de dosagem do TM, da PC e do MOD pode ser ilustrado através dos estudos de capacidade apresentados nas figuras 21, 22 e 23.

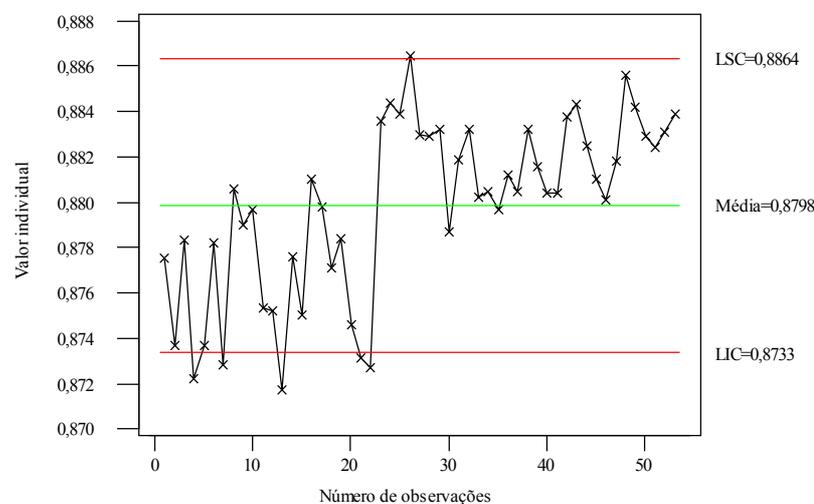


Figura 18 - Carta de controle para os valores individuais do sistema de dosagem do OX ini.

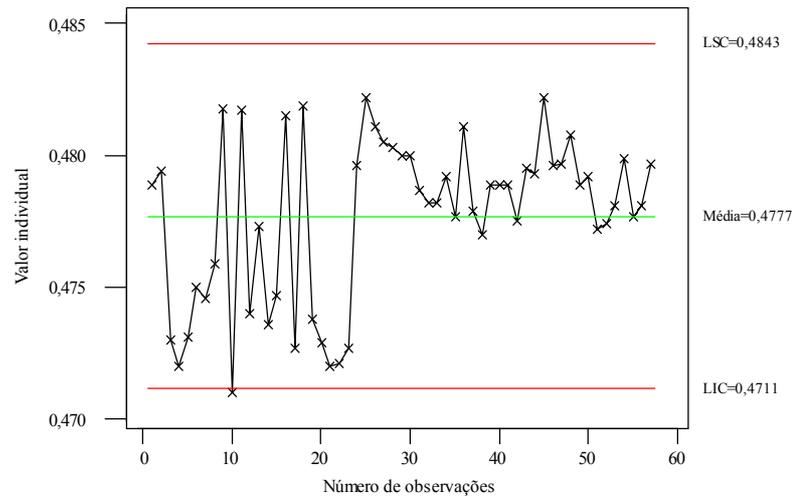


Figura 19 - Carta de controle para os valores individuais do sistema de dosagem do OX inc.

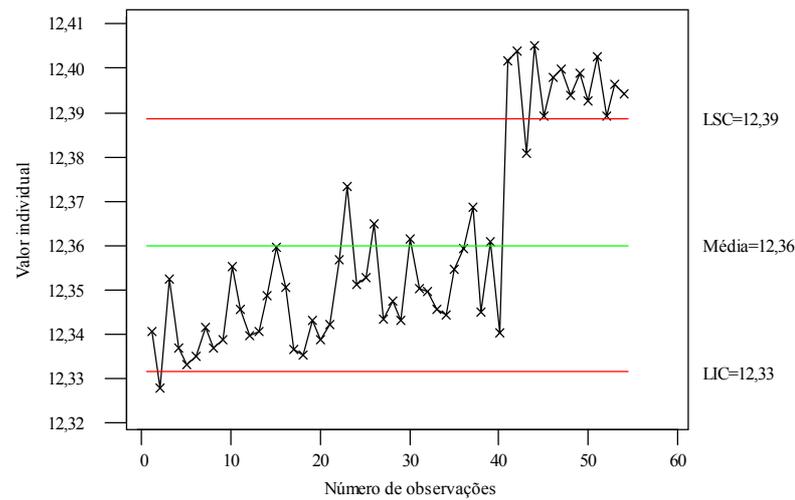


Figura 20 - Carta de controle para os valores individuais do sistema de dosagem do MOD ini.

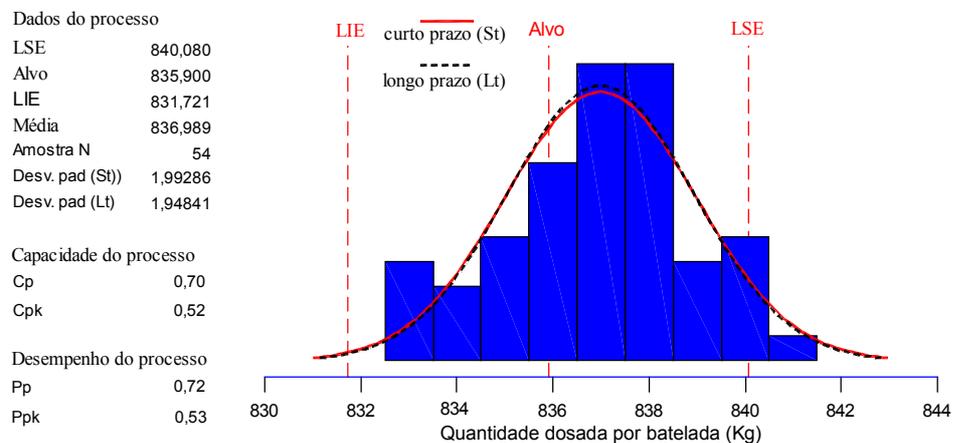


Figura 21 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do TM.

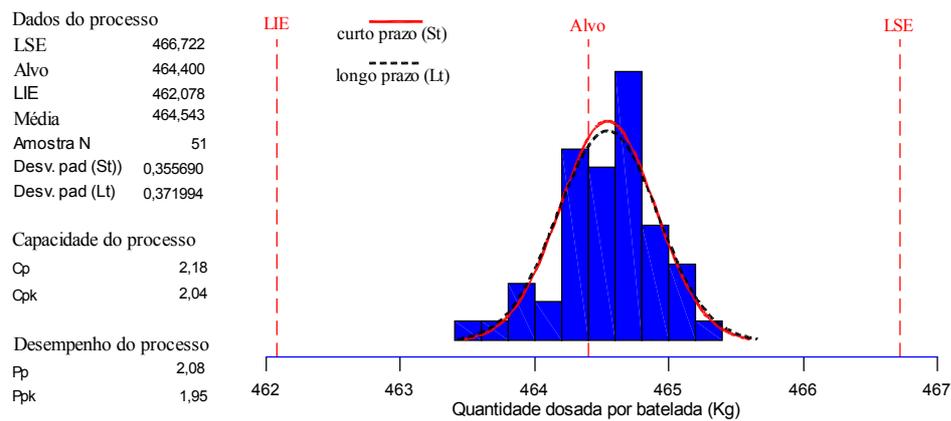


Figura 22 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem da PC.

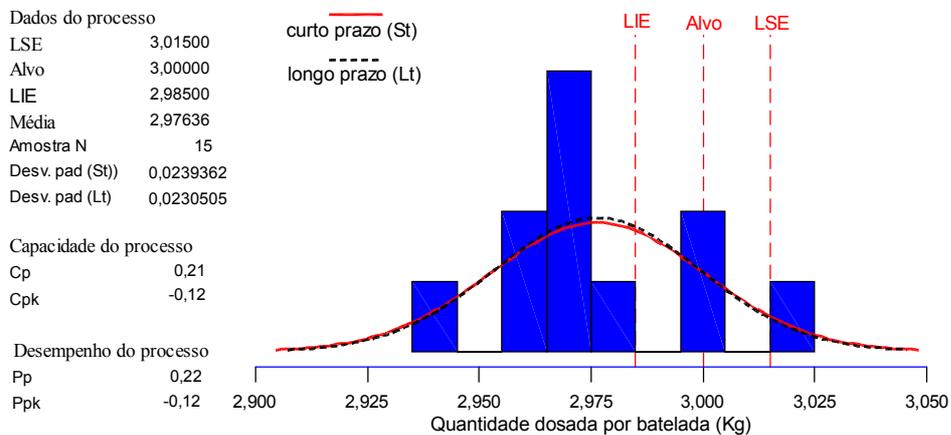


Figura 23 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do MOD inc.

Após uma análise dos relatórios, promoveu-se uma reunião com a participação dos engenheiros de automação e da produção, para discutir os resultados de desempenho dos sistemas de dosagens. Nesta ocasião foram descritas, pelo engenheiro de automação, as funções e os parâmetros de ajustes utilizados na programação dos controladores, tais como, tempo de subida, tempo de descida, *dead band* (amplitude de variação do sinal de controle que não resulta em alteração na válvula de controle) e *filter time* (ajuste da velocidade da ação de controle).

Segundo o engenheiro de automação, os sistemas de dosagem de TM e PC utilizam os mesmos instrumentos e programas de controle, o que não justificaria a diferença observada na capacidade de dosagem desses insumos (ver figuras 21 e 22). A partir desta lógica, analisou-se o gráfico de dosagem da estação operacional referente à PC, que foi

comparado com o de TM, onde foram observadas diferenças de estabilidade nas rampas de subida (início da dosagem, com aumento gradativo da quantidade dosada), na faixa de dosagem constante e na rampa de descida (redução gradativa da quantidade até a conclusão da dosagem). Como apenas as válvulas de controle desses dois insumos são diferentes, concluiu-se que o problema é de fácil solução, podendo ser resolvido com uma sintonia no controlador de dosagem do TM.

No sistema de OX foi observado um problema devido à concepção do programa de automação utilizado, na qual este inadequadamente executa uma função (tempo de descida). Este problema será solucionado simplesmente com ajustes nos parâmetros do controlador, e a alteração deverá ser estendida aos demais instrumentos.

Nos sistemas de MOD ini e MOD inc não foi observada nenhuma anormalidade no gráfico de dosagem que justificasse o baixo desempenho destes sistemas. Concluindo-se então que, provavelmente houve erro no processo de obtenção dos dados. Após a confirmação dessa hipótese (preliminarmente foram refeitas algumas leituras de dados) decidiu-se por um novo levantamento de dados, estabelecendo-se critérios mais rigorosos para a obtenção destes. Nessa reunião também foram discutidas ações de melhorias para o sistema de controle. Independentemente do resultado da análise de capacidade, estas melhorias deverão ser implementadas, já que não necessitam de investimentos em equipamentos ou materiais, necessitando somente de mão-de-obra do pessoal interno. Estas ações são listadas a seguir:

- (i) sintonizar as malhas de TM para as linhas A, B e C para corrigir a dispersão dos valores dosados;
- (ii) introduzir no programa de dosagem do MOD e OX um intervalo entre dosagens com um mínimo de 5 minutos para impedir a interferência entre as dosagens;
- (iii) modificar o programa de controle do OX de forma que o tempo de descida se torne mais estável, possibilitando uma maior precisão da quantidade dosada;
- (iv) alterar as tolerância ou tolerância versus filtro, de forma a centralizar os processos;
- (v) alterar o *dead band* das variáveis críticas (MOD e OX) para zero, visando melhorar a precisão da dosagem.

Com a coleta de novos dados para o MOD ini e MOD inc repetiu-se o estudo e após a estratificação dos dados foi possível realizar o estudo de capacidade para o MOD ini..

Analisando o histograma do MOD inc observou-se uma alteração significativa na capacidade potencial do processo para a dosagem de 3,00kg, mas ainda abaixo do desejado (o P_p passou de 0,22 para 0,85). Para a dosagem de 5,00kg verificou-se uma redução de capacidade (o P_p passou de 0,57 para 0,48) e o surgimento de duas populações de dados.

Durante a coleta dos novos dados, foi observado na dosagem do MOD ini (avaliando a forma da curva de dosagem) um grupo de dados com um tempo de dosagem de 20 minutos e outro com 31 minutos, e que estas diferenças implicavam em variações na quantidade dosada. Também foi possível observar a diferença de desempenho com os diferentes tempos de dosagem, principalmente em relação a centralização da média dos valores de dosagem. Um teste de hipótese confirmou uma diferença significativa entre as duas populações provenientes de dosagens com tempos diferenciados. Os estudos de capacidade para o MOD ini com diferentes tempos de dosagem são apresentados nas figuras 24 e 25.

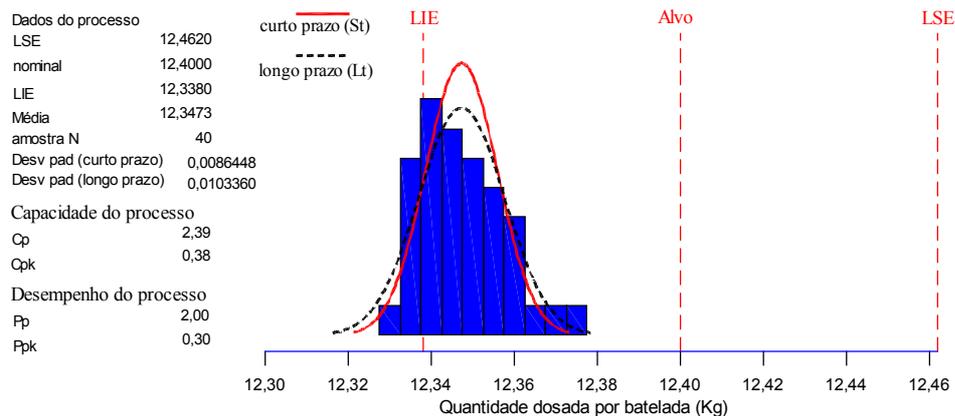


Figura 24 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do MOD ini para $t=20$ min.

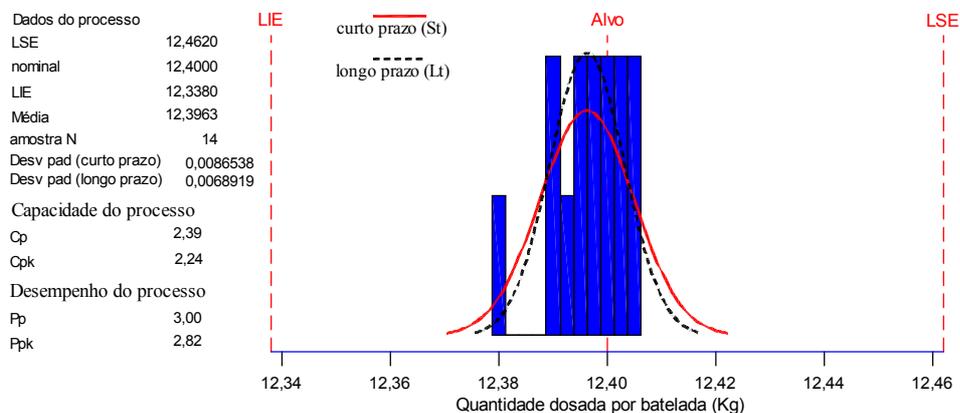


Figura 25 - Estudo de capacidade do sistema de dosagem do MOD ini para $t=31$ min.

Refazendo a coleta dos dados do OX ini e OX inc, para o cálculo da capacidade do sistema de dosagem chegou-se aos seguintes resultados:

A dosagem do OX ini, que com base nos dados anteriores apresentava uma capacidade potencial de longo prazo ($P_p=0,14$), passou para uma capacidade $P_p=0,28$ e afastado do valor alvo. Nesta análise também foi observada a presença de populações distintas no grupo de dados, o que motivou o teste de capacidade para os tempos de dosagens diferentes, confirmando mais uma vez a influência nos tempos de dosagens na precisão das mesmas. Para o tempo de dosagem de 13 minutos a capacidade potencial apresentou um incremento de 0,14 para 0,46 e para um tempo de 8 minutos a capacidade potencial aumentou para 0,80. Mesmo separando por diferentes tempos de dosagem, os histogramas dos conjuntos de dados seguiram apresentando um aspecto característico de mistura de populações, e o passo seguinte foi o de separar os dados por reator. Pela análise da ANOVA com dois fatores (tempo e tipo de reator) concluiu-se que o tipo de reator que está recebendo a dosagem não tem interferência na precisão da mesma a um nível de significância de 5%.

Na dosagem do OX inc também foi observada uma melhora na precisão da dosagem, o P_p passou de 0,17 para 0,27 evidenciando os mesmos problemas já detectados no OX ini, o que já era esperado, pois o mesmo sistema é utilizado para as duas funções (dosagem do OX ini e do OX inc). Cabe ressaltar também a descentralização do processo de dosagem em relação ao valor desejado.

Ao longo do período de coleta de dados, principalmente na segunda etapa, percebeu-se uma significativa falta de exatidão na coleta de dados de quantidades dosadas de insumos. Esta experiência foi valiosa, pois, através de uma reavaliação dos gráficos da estação de controle identificou-se uma série de pequenas oportunidades de melhoria, que só foi possível devido às circunstâncias do estudo.

Com base no estudo de capacidade dos sistemas de dosagem foram discutidas e deliberadas as seguintes ações:

a) sistema de medição de vazão: encaminhou-se solicitação de melhoria para alteração do leiaute das linhas de MOD, OX e AT (ativador incluído por abrangência); visto que, com o alinhamento existente, poderiam ocorrer erros durante a dosagem e que não seriam detectados através do valor registrado nas estações de operação, cuja conclusão ocorreu em julho de 2002 com custo de cerca de R\$ 7.400,00. Revisou-se também o sistema

de fixação dos medidores mássicos, não se encontrando qualquer irregularidade que possibilitasse alterações na medição por problemas de vibração.

b) sistema de dosagem: avaliou-se a eficiência das dosagens utilizando-se os dados históricos levantados, conforme o estudo mostrado. Comprovou-se que as dosagens de MOD e PC são excelentes, o que não ocorre com TM, por deficiências no sistema de dosagem e cuja correção efetuou-se em janeiro de 2003.

4.2.2.2 Análise do sistema de medição da VM

Dentre as características de qualidade controladas nas NBR's (VM, ACN combinada, teor de matéria volátil, etc.) a VM é a mais crítica em termos de variação e por isso seu processo de medição merece uma maior atenção. A análise do sistema de medição do látex NBR, com o objetivo de se verificar a adequação da análise da VM às exigências do processo e do cliente, foi realizada utilizando-se amostras de dois níveis de VM de látex NBR dos pontos extremos da especificação do processo.

Por questões técnicas e econômicas não foi avaliada a variação do processo neste estudo – em cada “corrida” de NBR são atendidos clientes de níveis diferentes de VM (45 a 80), não sendo possível determinar a variabilidade do processo em torno de um valor alvo. A estratégia proposta para o MSA utilizou três operadores analisando três vezes uma amostra do nível baixo e outra do nível alto da VM (3x3x2), totalizando seis análises para cada operador. As amostras foram distribuídas aleatoriamente aos operadores durante as suas rotinas de trabalho. Para a determinação do %R&R utilizou-se uma tolerância de 20 pontos na VM e um desvio-padrão histórico do processo igual a 9,04. Os dados para o R&R foram comparados com a tolerância estabelecida pela engenharia de processo e com o desvio-padrão histórico do processo, porque as amostras foram obtidas em níveis alto e baixo do processo, não representando a variação real do processo.

O resultado do estudo mostrou que o sistema de medição não pode ser aceito quando comparado com a tolerância do cliente, pois 34,00% da tolerância é consumida pelo sistema de medição (o limite máximo é 20%). Os resultados do estudo de R&R obtidos do *software* Minitab 13.0, utilizando o método da ANOVA, são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Estudo de R&R para a VM do látex NBR.

Fontes de variação	Desv Pad (DP)	Estudo Var (5,15*DP)	%Estudo Var (%DP)	%Tolerância (DP/Toler)	%Processo (DP/Proc)
R&R Total	1,3202	6,799	3,49	34,00	14,60
Repetibilidade	1,3202	6,799	3,49	34,00	14,60
Reprodutibilidade	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00
Operador	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00
amostra-a-amostra	37,7648	194,489	99,94	972,44	417,75
Variação Total	37,7879	194,608	100,00	973,04	418,01

Avaliando os resultados de saída do Minitab apresentados na tabela 10, observa-se que embora o R&R% comparado com a variação atual do processo seja aceitável ($R\&R\%_{PC} = 14,60\%$), para fins de atendimento à tolerância do cliente ($R\&R\%_{PT} = 34,00\%$) ele não pode ser aceito. Como o método de análise é utilizado internacionalmente e está em andamento um projeto para a melhoria deste sistema de medição, aguarda-se a evolução deste projeto para uma reavaliação do sistema de medição.

4.3.3 Etapa Analisar

O objetivo desta etapa foi identificar, dentro do grupo das variáveis selecionadas na etapa Medir, as variáveis do processo que realmente são críticas. A análise consistiu na identificação das variáveis explicativas e na quantificação dos efeitos das variáveis mais relacionadas com as variáveis de resposta VM e tR. O estudo se baseou no conhecimento dos técnicos do processo e no uso das técnicas e ferramentas estatísticas apropriadas. Iniciou-se o estudo com uma análise de regressão linear múltipla para verificar as relações existentes entre as variáveis do processo consideradas críticas e as características de qualidade (VM e tR). No estudo foram utilizados dados históricos das quantidades dos insumos adicionadas às bateladas, dos tempos de adição e das temperaturas nas quais estes insumos foram adicionados, bem como outras ocorrências operacionais consideradas importantes para a estabilidade do processo durante a produção das bateladas. Nas simulações da análise de regressão linear múltipla considerou-se também o conhecimento técnico dos especialistas do processo. Para a determinação das variáveis explicativas, os seguintes dados históricos foram utilizados:

- tempo em que o MOD inc ficou atuando na massa reacional (t MOD inc) usado para avaliar a influência do tempo de atuação do MOD inc na variação da VM e no tR;
- quantidade de MOD ini e MOD inc adicionados à batelada para avaliar a influência na variação da VM e no tR;

- temperatura máxima do reator (T_{max}) e tempo em que a temperatura fica fora do valor alvo no início da reação ($t_{7\ ini}$), para avaliar a influência da variação da temperatura na variação da VM e tR;

- temperatura que se encontrava o reator no momento da adição do OX ini ($T_{OX\ ini}$) para avaliar se a variação da temperatura no início da reação tem influência na variação da VM e do tR

- espaço de tempo entre a dosagem do TM e da PC (t_{PC}) para verificar se o tempo de espera para a dosagem da PC influi na VM;

- quantidade de terminador adicionado à batelada (TM) para avaliar se o erro existente na quantidade dosada deste insumo afeta significativamente a VM.

Após as simulações, com o auxílio da função de regressão do *software* Minitab 13.0 e discussões com os integrantes da equipe Seis Sigma e os técnicos do processo obtiveram-se os seguintes resultados:

As variáveis explicativas mais relacionadas com a variável de resposta VM, a um nível de significância menor do que 5% são: temperatura do reator, MOD incremental (quantidade e tempo de atuação) e quantidade de TM adicionado.

As variáveis explicativas mais relacionadas com a variável de resposta tR, a um nível de significância menor do que 5% são: temperatura do reator no início da reação, tempo para estabilizar a temperatura do reator e tempo de atuação do MOD incremental.

Os resultados das simulações e discussões para identificar as variáveis do processo que explicam as variações nos valores da característica de qualidade VM são apresentados nas tabelas 12 e 13 e o modelo ajustado para a VM é apresentado na equação 119.

Tabela 12 - ANOVA para a significância da regressão VM versus $t_{7\ ini}$, t_{PC} , $t_{MOD\ inc}$, $MOD\ inc$ e TM.

Fonte	GL	SQ	MQ	F	valor-p
Regressão	5	8309,8	1662,0	48,92	0,000
Erro residual	45	1528,8	34,0		
Total	50	9838,6			

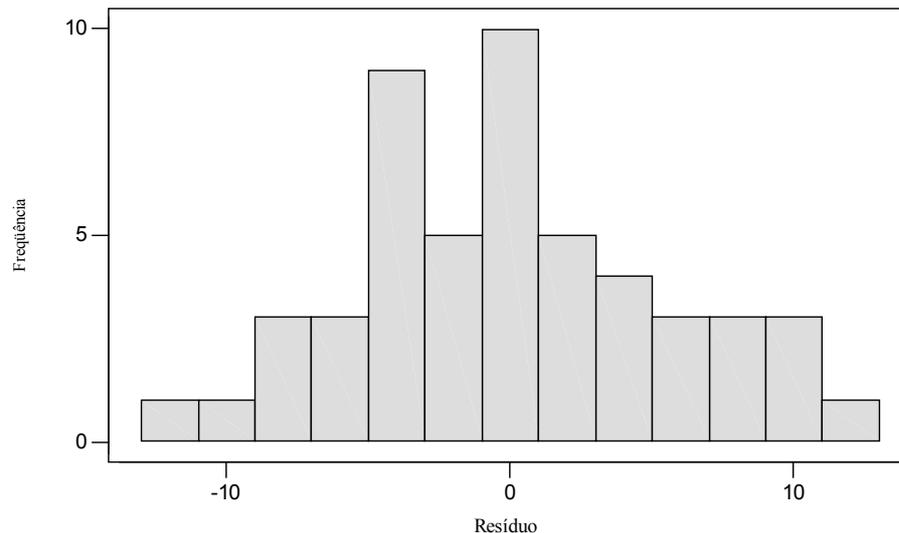
Tabela 13 - ANOVA para a regressão de VM versus t 7 ini, t PC, t MOD inc, MOD inc e TM.

Var explicativas	Coef	Erro padrão	teste t	valor-p
Constante	-970,9	380,9	-2,55	0,014
t 7 ini	-186,46	37,36	-4,99	0,000
MOD inc	-7,0114	0,5602	-12,52	0,000
t PC	0,20038	0,06972	2,87	0,006
TM	1,2568	0,4540	2,77	0,008
t MOD inc	47,93	22,76	2,11	0,041

Número de observações: 51
 $R^2 = 84,5\%$ R^2 ajustado = 82,7%

$$VM = - 971 - 186 t 7 ini - 7,01 MOD inc + 0,200 t PC + 1,26 TM + 47,9 t MOD inc \quad (119)$$

Os gráficos que comprovam a adequação ao modelo de regressão linear múltipla para a VM são apresentados nas figuras 26, 27, 28 e 29 como descrito: (i) histograma de resíduos - verificar se a distribuição do erro é normal e se a média é zero; (ii) gráfico de probabilidade normal para os resíduos - verificar a validade da suposição de normalidade dos dados; (iii) gráfico de resíduos contra valores ajustados – verificar a linearidade, a constância da variância e presença de observações extremas; (iv) gráfico de resíduos contra o tempo – verificar a validade da suposição de que os erros são não correlacionados.

**Figura 26** - Histograma de resíduos para o modelo de regressão da VM.

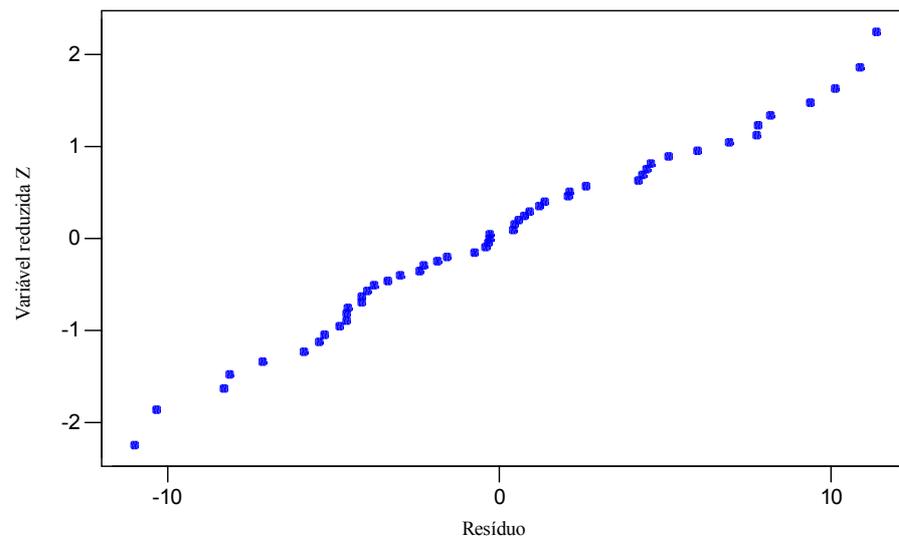


Figura 27 - Probabilidade normal para os resíduos do modelo de regressão da VM.

Analisando o histograma de resíduos da figura 26 e o gráfico de probabilidade normal da figura 27 verifica-se que a distribuição do erro é aproximadamente normal e a média é aproximadamente zero, comprovando que os dados estão adequados ao modelo de regressão com relação à normalidade e média zero dos resíduos.

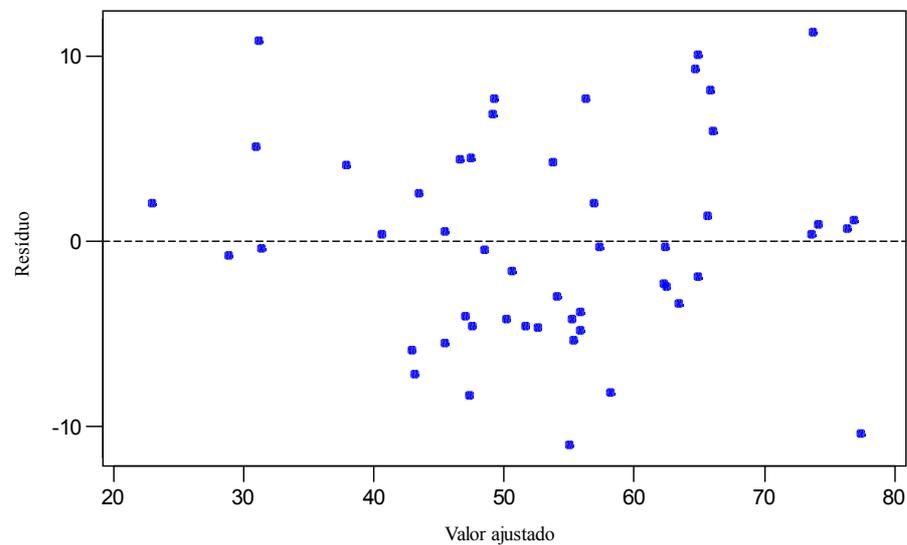


Figura 28 - Gráfico dos resíduos contra os valores ajustados para a VM.

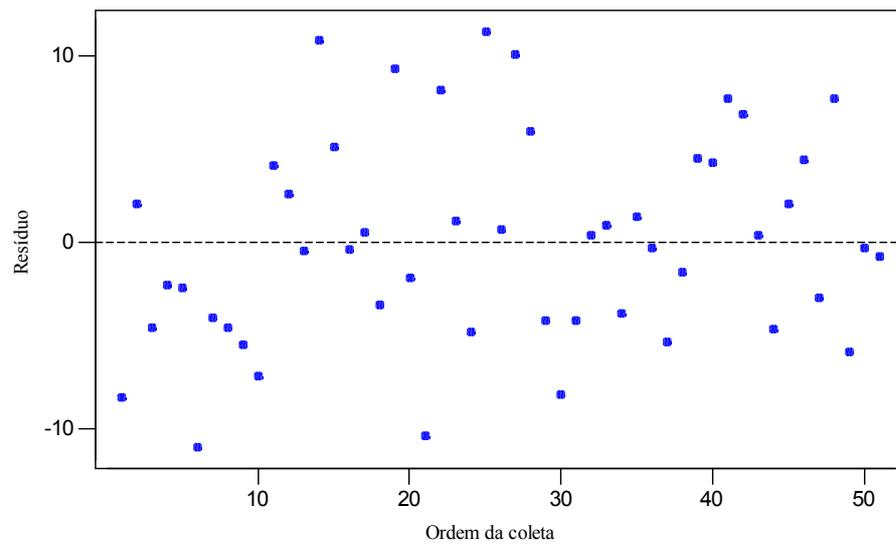


Figura 29 - Gráfico dos resíduos contra a ordem da coleta dos dados para a VM.

Pela observação do gráfico da figura 28, nota-se que os pontos estão distribuídos de forma aleatória, aproximadamente em uma faixa horizontal centrada em zero, satisfazendo as suposições de linearidade, constância da variância e inexistência de observações extremas. Pela análise do gráfico da figura 29 é possível verificar a validade da suposição de que os erros são não correlacionados, pela inexistência de configurações especiais neste gráfico.

Com base na análise do coeficiente de determinação (R^2) apresentado na tabela 12 pode-se concluir que o tempo para a estabilização da temperatura do reator em 7 °C, o tempo de atuação do modificador incremental, o tempo de espera para a dosagem da potassa cáustica, a quantidade de modificador incremental e a quantidade de terminador adicionados ao reator explicam 84,5% das variações ocorridas na viscosidade *Mooney*. Estas cinco variáveis explicativas obtidas através de observações de dados históricos de 51 bateladas produzidas são influentes a um nível de significância menor do que 5%.

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos através das simulações da análise de regressão e discussões técnicas para se identificar as variáveis do processo que melhor explicam as variações nos tempos de reação das bateladas (tR). Na tabela 14 é apresentado o teste de significância da regressão e na tabela 15 são apresentados os resultados da análise de regressão. O modelo ajustado para o tR é apresentado na equação 120.

Tabela 14 - ANOVA para a significância da regressão tR versus T OX ini, t 7 ini e t MOD inc.

Fonte	GL	SQ	MQ	F	valor-p
Regressão	3	41,933	13,978	53145,54	0,000
Erro residual	46	0,012	0,000		
Total	49	41,945			

Tabela 15 - ANOVA para a regressão de tR versus T OX ini, t 7 ini e t MOD inc.

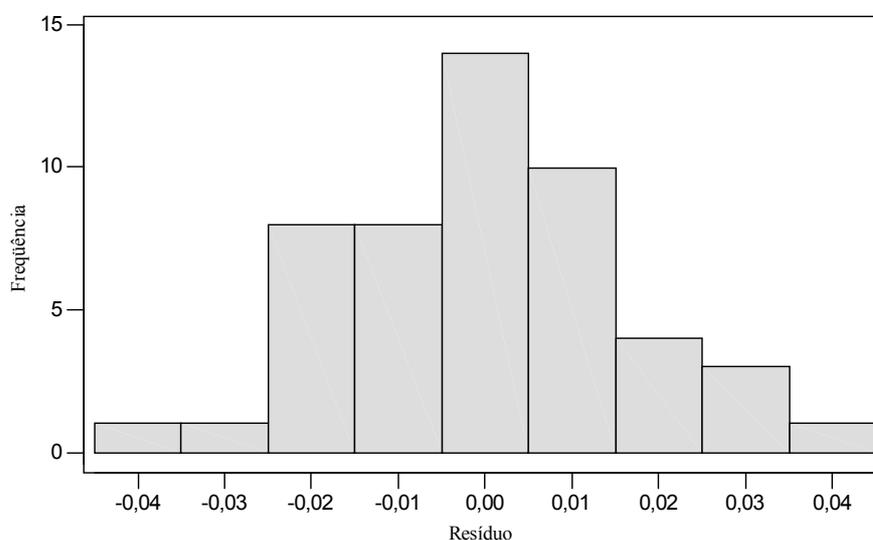
Var explicativas	Coef	Erro padrão	teste t	valor-p
Constante	4,05649	0,02528	160,45	0,000
T OX ini	-0,010380	0,003602	-2,88	0,006
t 7 ini	-0,2589	0,1251	-2,07	0,044
t MOD inc	24,0790	0,0692	348,06	0,000

Número de observações: 50
 $R^2 = 100,0\%$ R^2 (ajust.) = 100,0%

$$tR = 4,06 - 0,0104 T OX ini - 0,259 t 7 ini + 24,1 t MOD inc \quad (120)$$

Avaliando-se os resultados apresentados nas tabelas 13 e 14, observa-se que a temperatura de início da reação (T OX ini), o tempo que o reator leva para atingir a temperatura nominal (t 7 ini) e o tempo de atuação do MOD inc explicam 100,0% das variações dos tempos de reação. Estas três variáveis explicativas obtidas de observações dos dados históricos de 50 bateladas produzidas são influentes a um nível de significância menor do que 5%.

Nas figuras 30 e 31 são apresentados o histograma dos resíduos e o gráfico de probabilidade normal, que comprovam a adequação ao modelo de regressão linear múltipla para o tR com referência a média zero e normalidade dos resíduos.

**Figura 30** - Histograma de resíduos para o modelo de regressão do tR.

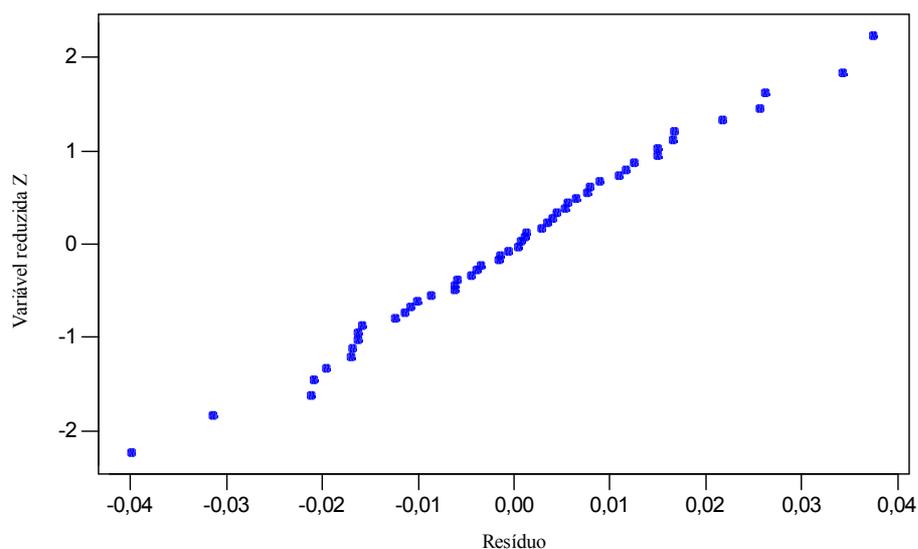


Figura 31 - Probabilidade normal para os resíduos do modelo de regressão do tR.

Analisando o histograma de resíduos da figura 30 observa-se que os resíduos apresentam uma média aproximadamente zero e pela visualização do gráfico de probabilidade normal da figura 31 percebe-se que os pontos centrais estão localizados, aproximadamente ao longo de uma reta, comprovando que os resíduos seguem a distribuição normal.

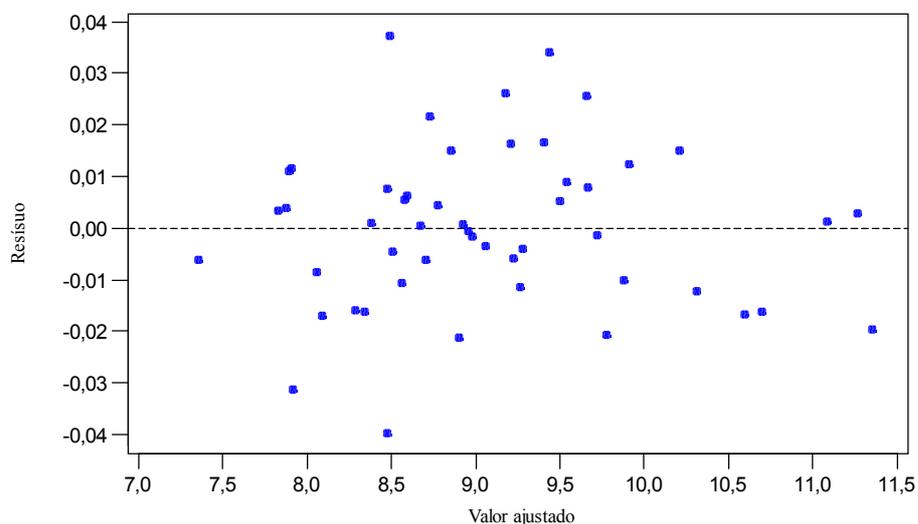


Figura 32 - Gráfico dos resíduos contra os valores ajustados para o tR.

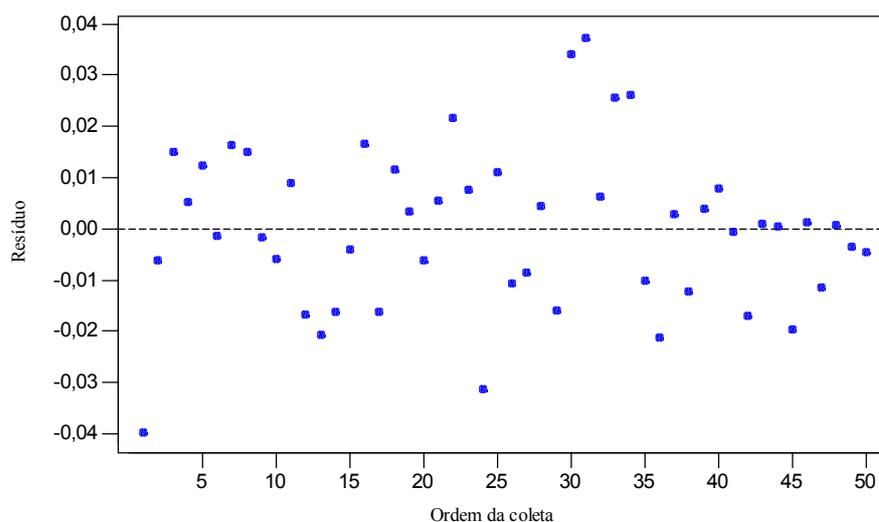


Figura 33 - Gráfico dos resíduos contra a ordem da coleta dos dados para o tR.

O gráfico dos resíduos contra os valores ajustados e o gráfico dos resíduos contra o tempo de coleta, apresentados nas figuras 32 e 33 respectivamente, comprovam a validade da suposição de linearidade, constância da variância, inexistência de dados extremos e de dados correlacionados, indicando quaisquer inadequações do modelo de regressão.

Com o estudo da análise de regressão pôde-se determinar as variáveis que realmente são críticas para o processo, tanto do ponto de vista da análise estatística como do ponto de vista do conhecimento técnico dos especialistas do processo. As variáveis mais influentes que deverão ser contempladas com ações de melhorias, visando redução da variabilidade da VM e dos tempos de reação, são sumarizadas abaixo:

- o intervalo de tempo entre a adição do TM e a adição da PC é uma variável influente na variação da VM;
- a instabilidade da temperatura do reator e a temperatura do reator, na qual os insumos são adicionados, principalmente o OX, tem influência na variação da VM e no tempo de reação;
- a quantidade de MOD incremental adicionado na quarta hora de reação tem influência significativa na variação da VM e do tempo de reação;
- o tempo de atuação do MOD incremental tem influência tanto na variação da VM como no tempo de reação;
- a variação da vazão mássica de TM influi significativamente na variação da VM;

- a influência da temperatura da ACN ainda não foi possível avaliar por falta de dados.

Corroborando com o estudo de análise de regressão, foi possível verificar através dos gráficos de registros das estações de controle, que oscilações na temperatura do reator com uma amplitude acima de 1 °C de afastamento do valor alvo, por um longo período (acima de 30 minutos), são suficientes para provocar alterações no resultado final da batelada.

No caso do tempo para adição de PC, também considerada crítica para a VM, estabeleceu-se, através da observação dos dados coletados (visto que testes em relação a esta variável poderiam levar a perda da batelada, com as devidas conseqüências na qualidade e custo), que o prazo limite para adição de PC, sem comprometimento do resultado final, deve situar-se em torno de uma hora (implantado através de instrução operacional).

4.3.4 Etapa Melhorar

As ações de melhorias propostas, com base no estudo de análise de regressão, já implementadas ou em fase de estudo são apresentadas a seguir:

- modificação nas tubulações do OX, visando impedir a presença de bolhas de ar no instrumento de medição (*Micromotion*) e alteração na forma de dosagem (automação) visando melhor controle da dosagem deste insumo (investimento em alterações do leiaute);

- individualização dos sistemas de dosagem de TM e PC, que provocavam atrasos nas dosagens da PC, resolvendo os problemas de atraso e possíveis contaminações (investimento);

- alteração no sistema de controle de temperatura do reator, para uma outra concepção de controle, através da variação da superfície molhada dos feixes de amônia (investimento), sendo esperada uma oscilação de no máximo +/-0,5 °C. Está em fase conclusão o projeto de produção de borrachas acrílicas, onde foi utilizada esta nova concepção de controle de temperatura para o reator. Nesse reator o controle de temperatura é feito com base na variação da superfície molhada dos feixes de amônia (nível), cuja performance de controle se mostrou superior a atualmente utilizada. Esta melhoria será implementada nos reatores R2303B e 04B, e está em fase de orçamento.

- implantação de uma rotina de limpeza periódica dos reatores, para prevenir eventos de descontrole de temperatura por deficiência de troca térmica (procedimento);

- estudo para a instalação de um permutador de calor para o controle de temperatura da ACN adicionada ao reator (falta confirmar a influência desta variável).

- estabelecimento de uma faixa de temperatura fixa do reator (7 + ou - 0,5 °C) para

dosagem de ACN e OX (procedimento operacional);

- ajuste do tempo de espaçamento entre as dosagens de OX, MOD, TM e PC, para evitar interferências entre as dosagens, permitindo uma maior exatidão da dosagem destes insumos (automação);

- estabeleceu-se, através da análise dos dados coletados (visto que testes em relação a esta variável poderiam levar a perda da batelada, com as devidas conseqüências na qualidade e custo), que o prazo limite para adição de PC, sem comprometimento do resultado final, deve situar-se em torno de uma hora (já implantado através de instrução operacional).

- está em andamento um projeto de melhoria para o sistema de medição da VM do látex.

4.3.5 Etapa Controlar

Para prevenir a ocorrência de imprecisões nas quantidades dosadas, implantou-se a partir de janeiro de 2003 uma rotina para que ao final de cada corrida de NBR sejam avaliadas as capacidades dos sistemas de dosagem dos insumos considerados críticos (OX, MOD, TM e PC).

Quanto ao controle de temperatura do reator, aguarda-se a implantação das melhorias previstas para se definir a melhor forma de controle da capacidade desta variável (provavelmente pelo acompanhamento, batelada-a-batelada, dos gráficos das estações de controle).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal utilizar o método DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) do programa Seis Sigma, na implementação de um projeto de melhoria. Inicialmente, foram apresentados o programa Seis Sigma e as principais técnicas e ferramentas estatísticas sugeridas, pelos autores consultados, em cada etapa do método DMAIC.

Na seqüência foi desenvolvido um projeto de melhoria para um processo de produção de látex em reação química em batelada, com a finalidade de diminuir a variabilidade da característica crítica para a qualidade do produto, viscosidade *Mooney* e a variabilidade nos tempos de processamento das bateladas, seguindo as cinco etapas do método DMAIC.

O modelo de priorização das variáveis do processo utilizado na etapa Definir mostrou-se consistente na obtenção das informações necessárias para dar prosseguimento às etapas subseqüentes do método. O diagrama de causa e efeito que se originou do *brainstorming*, realizado com a equipe Seis Sigma e especialistas do processo, e o mapeamento de processo que foi baseado na engenharia de processo, possibilitou o levantamento criterioso das variáveis críticas do processo. A seqüência do estudo, com a utilização da matriz de causa e efeito e do FMEA, viabilizou o agrupamento de algumas variáveis afins, facilitando o estudo e enfatizando a criticidade de determinadas variáveis. Na fase de coleta de dados da etapa Medir evidenciou-se a necessidade de um bom planejamento para a aquisição dos dados.

Durante a análise dos dados, confirmou-se a importância do conhecimento técnico para a condução do estudo e interpretação dos resultados provenientes dos tratamentos estatísticos. Com relação às etapas Melhorar e Controlar constatou-se que algumas ações de melhorias referentes a estas etapas podiam ser implementadas durante o andamento do projeto em função do baixo investimento e facilidade na implementação.

Com relação aos resultados do projeto, concluiu-se que os sistemas de dosagem dos insumos oxidante, modificador, terminador, acrilonitrila e potassa cáustica; o sistema de controle de temperatura do reator; o controle de temperatura do monômero acrilonitrila e os problemas de atraso na adição da potassa cáustica ao látex de NBR são as variáveis de processo priorizadas para serem melhor investigadas na etapa de análise. A análise de capacidade dos sistemas de dosagens dos insumos e a análise do sistema de medição da VM forneceram informações para concluir que o sistema de dosagem do oxidante e o método de análise da viscosidade *Mooney* do látex NBR precisam ser melhorados.

Com referência às quantidades dosadas na batelada foi possível verificar que apesar do sistema de dosagem dos insumos considerados críticos (oxidante e terminador) não atingirem a precisão recomendada pela área tecnológica, conclui-se que os níveis alcançados atualmente estão de acordo com as exigências da engenharia de processo.

Quanto ao controle da temperatura de reação, variável crítica para a VM, foi possível verificar, através dos gráficos de registros das estações de controle, que oscilações maiores que 1 °C, quando mantidas abaixo ou acima por um longo período (>30 min), são suficientes para provocar alterações no resultado final da batelada. Espera-se que com a implantação do mesmo sistema de controle do R 2302 B nos R 2303 B e 04 B e um trabalho de sintonia da malha de controle, deverá se atingir a meta estabelecida de 7 °C + / - 0,5 °C.

As ações de melhorias propostas, com base no estudo de análise de regressão, já implementadas ou em fase de estudo são apresentadas a seguir:

- modificação nas tubulações do oxidante, visando impedir a presença de bolhas de ar no instrumento de medição (*Micromotion*) e alteração nos parâmetros de controle visando melhor controle da dosagem deste insumo (investimento em alterações do leiaute);

- individualização dos sistemas de dosagem de terminador e potassa cáustica, que provocavam atrasos nas dosagens da potassa cáustica, resolvendo os problemas de atraso e possíveis contaminações (investimento);

- alteração no sistema de controle de temperatura do reator, para uma outra concepção de controle (investimento), sendo esperada uma oscilação de no máximo $\pm 0,5$ °C. Está em fase conclusão o projeto de produção de borrachas acrílicas, onde foi utilizada uma nova concepção de controle de temperatura para o reator. Nesse novo reator o controle de temperatura é feito com base na variação da superfície molhada dos feixes de amônia (nível), cujo desempenho do controle de temperatura se mostrou superior ao utilizado atualmente. Esta melhoria será implementada nos reatores R2303B e 04B, e está em fase de orçamento.

- implantação de uma rotina de limpeza periódica dos reatores, para prevenir eventos de descontrole de temperatura por deficiência de troca térmica (procedimento);

- estabelecimento de uma faixa de temperatura fixa do reator ($7 +$ ou $- 0,5$ °C) para dosagem da acrilonitrila e o oxidante (procedimento);

- ajuste do tempo de espaçamento entre as dosagens de oxidante, modificador, terminador e potassa cáustica, para evitar interferências entre as dosagens, permitindo uma maior exatidão da dosagem destes insumos (automação);

- estabeleceu-se, através da análise dos dados coletados (visto que testes em relação a esta variável poderiam levar a perda da batelada, com as devidas conseqüências na qualidade e custo), que o prazo limite para adição de potassa cáustica, sem comprometimento do resultado final, deve situar-se em torno de uma hora (já implantado através de instrução operacional).

- está em estudo a instalação de um permutador de calor para o controle de temperatura da ACN adicionada ao reator (falta confirmar a influência desta variável);

- está em andamento um projeto de melhoria para o sistema de medição da VM do látex.

Em função de algumas melhorias ainda estarem em fase de estudo ou pendente de implantação, tais como, alteração no controle de temperatura do reator e individualização dos sistemas de terminador e potassa cáustica e do número insuficientes de bateladas produzidas até o momento, ainda não foi possível avaliar se os objetivos do projeto de melhoria foram atingidos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho foi desenvolvido no processo produtivo de uma empresa de grande porte que apresenta um perfil maduro com relação ao conhecimento e a prática dos conceitos da qualidade, sugere-se novas pesquisas em empresas de pequeno porte e que ainda não apresentam um bom perfil com relação aos conceitos da qualidade.

Sugere-se também que o método DMAIC seja testado em empresas ou em áreas de serviços, para se avaliar a necessidade de adequação, substituição ou a inclusão de outras ferramentas estatísticas no desenvolvimento das etapas do método.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADKE, S. R.; HONG, X. A Supplementary Test Based on The Control Chart for Individuals. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 29, n. 1, p. 32-37, Jan. 1997.
- AKAO, Y. **Introdução ao desdobramento da qualidade – volume I**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.
- AKAO, Y.; MAZUR, G. H. The leading edge in QFD: past, present and future. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Bradford: v. 20, n. 1, p. 20-35, 2003.
- ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. **ASTM D 1646-96a**: Rubber, Natural and Synthetic-General Test Methods; Carbon Black; v. 09.01, p. 314-323. Easton: 1998.
- ANTONY, J.; BANUELAS, R. Key Ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. **Measuring Business Excellence**, [S. l.]: v. 6, n. 4, p. 20-27, 2002.
- ATKINSON, R. Measurement systems for continuous or batch processes. **Quality Congress. ASQ's 54th Annual Quality Congress Proceedings**, Milwaukee: p. 591-593, 2000.
- AZIZ, N.; MUJTABA, I. M. Optimal operation policies in batch reactors. **Chemical Engineering Journal**, [S. l.]: v. 85, p. 313-325, Apr. 2002.
- BENDELL, T. Six Sigma. Horton Kirby: **Works Management**, Horton Kirby: v.54, p. 40-42, Aug. 2001.
- BONVIN, D. Optimal operation of batch reactors a personal view. **Journal of Process Control**, [S. l.]: v. 8, n. 5-6, p. 355-368, 1998.
- BOQUÉ, R.; SMILDE, A. K. Monitoring and diagnosing batch processes with multiway covariates regression models. **AIChE Journal**, [S. l.]: v. 45, n. 7, p. 1504-1520, July 1999.
- BOTHE, D. R. Process capability indices – a review, 1992-2000, discussion. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 34, n. 1, p. 32-37, Jan. 2002.
- BOTHE, D. R. Statistical Reason for the 1,5 σ Shift. **Quality Engineering**, v. 14, n. 3, p. 479-487, Mar. 2002.

BREYFOGLE, F. W.; MEADOWS, B. Bottom-line success with Six Sigma. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 34, n. 5, p. 101-104, May 2001.

BURDIK, R. K.; LARSEN, G. A. Confidence Intervals on Measures of Variability in R&R Studies. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 29, n. 3, p. 261-273, July 1997.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 8. ed. Belo Horizonte: EDG, 1999.

CAULCUTT, R. The rights and wrongs of control charts. **Applied Statistics**, [S. l.]: v. 44, n. 3, p. 279-288, 1995.

CHALLENGER, C. Six Sigma: Can the GE model work in the chemical industry. **Chemical Market Reporter**, New York: v. 260, p. 6-10, July 2001.

CHANG, C. L.; LIU, P. H.; WEI, C. C. Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. **Integrated Manufacturing Systems**, Bradford: v. 12, n. 3, p. 211-217, Dec. 2001.

CHATTERJEE, S.; SORENESEN, E. A Pareto-like effect in regression? **Total Quality Management**, [S. l.]: v. 9, n. 8, p. 681-687, Dec. 1998.

CHO, H.; KIM, K. A method for predicting future observations in the monitoring of a batch process. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 35, n. 1, p. 59-69, Jan. 2003.

CORONADO, R. B.; ANTONY, J. Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organizations. **The TQM Magazine Journal**, [S. l.]: v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.

COTNAREANU, T. Old Tools – New Uses: Equipment FMEA. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 32, n. 12, p. 48-52, Dec. 1999.

DOLENZAL, K. K.; BURDICK, R. K.; BIRCH, J. N. Analysis of a two-factor R & R study with fixed operators. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 30, n. 2, p. 163-170, Apr. 1998.

ECKES, G. **A revolução Seis Sigma**. 2. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

ECKES, G. Making Six Sigma Last. **Ivey Business Journal**, [S. l.]: v. 66, n. 3, p. 77-81, 2002.

EUREKA, W. E.; RYAN, N. E. **QFD Perspectivas Gerenciais do Desdobramento da Função Qualidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1993.

FOLARON, J. MORGAN, J. P. The Evolution of Six Sigma. **ASQ Six Sigma Forum Magazine**, Milwaukee: v. 2, n. 4, p.38-44, Aug. 2003.

FREITAS, M. F.; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de vida Acelerados**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1997.

FREUND, E. J.; SIMON, G. **A Estatística Aplicada**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2000.

- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GRANT, E. I.; LEAVENWORTH, R. S. **Statistical Quality Control**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 1972.
- HARRY, M. J. A New Definition Aims to Connect Quality With Financial Performance. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 33, n. 1, p. 64-66, Jan. 2000a.
- HARRY, M. J. Six sigma: A breakthrough strategy for profitability. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 31, n. 5, p. 60-64, May 1998.
- HARRY, M. J. The Quality Twilight Zone. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 33, n. 2, p. 68-71, Feb. 2000b.
- HARRY, M. J.; SCHROEDER, R. **Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations**. New York: Doubleday, 2000.
- HAUSER, J. R. CLAUSIG, D. P. The House of Quality. **Harvard Business Review**, [S. l.]: v. 66, n. 3, p. 63-73, May-June 1988.
- HELMAN, H.; ANDERY, P. R. P. **Análise de falhas (aplicação dos métodos de FMEA – FTA)**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.
- HENDERSON, K. M.; EVANS, J. R. Successful implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company. **Benchmarking An International Journal**, [S. l.]: v. 7, n. 9, p. 260-281, 2000.
- HEUVEL, E. R. Gage R&R studies for nonstandard situations. **Quality Congress. ASQ's 54th Annual Quality Congress Proceedings**, Milwaukee: p. 317-328, 2000.
- HOERL, W. R. Six Sigma and the Future of the Quality Profession. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 31, n. 6, p.35-42, June 1998.
- INGRAN, D. J.; TAYLOR, W. A. Measurement systems analysis. **Quality Congress. ASQ's 52nd Annual Quality Congress Proceedings**, Milwaukee: p. 931-941, 1998.
- IQA - Instituto da Qualidade Automotiva. **Análise dos Sistemas de Medição (MSA)**. São Paulo: 1997a.
- IQA - Instituto da Qualidade Automotiva. **Fundamentos do Controle Estatístico do Processo**. São Paulo: 1997b.
- JURAN, J. M.; GRINA, F. M. **Controle da Qualidade – Métodos estatísticos clássicos aplicados à qualidade**. São Paulo: Makron Books, 1993.
- JURAN, J.M. **Quality-Control Handbook**. New York: MacGraw-Hill, 1951.
- KELLY, W. M. Three steps to project selection. **ASQ Six Sigma Forum Magazine**, Milwaukee: v. 2, n. 1, p. 29-32, Nov. 2002.
- KLEFSJÖ, B.; WIKLUND, H.; EDGEMAN, R. L. Six Sigma seen as a methodology for total quality management. **Measuring Business Excellence**, [S. l.]: v. 5, n. 1, p. 31-35, 2001.

KLEINBAUM, D. G.; KUPLER, L. L. **Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods**. North Scituate: John Duxbury, 1978.

KUME, H. **Métodos Estatísticos para a Melhoria da Qualidade**. 3. ed. São Paulo: Gente, 1993.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LU, M.; RUDY, R. J. Process Capability Indices – A Review, 1992 - 2000. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 34, n. 1, p. 38-39, Jan. 2002.

LUCAS, J. M. The Essential Six Sigma. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 35, n. 1, p. 27-31, Jan. 2002.

LUCIER, G. T; SESHADRI, S. GE Takes Six Sigma Beyond the Bottom Line. **Strategic Finance**, Montvale: v. 82, n. 11, p. 40-46, May 2001.

LYNCH, D. P.; CLOUTIER, E. T. 5 steps to success. **ASQ Six Sigma Forum Magazine**, Milwaukee: v. 2, n. 2, p. 27-33, Feb. 2003.

MALEYEFF, J. Proper use of capability indices. **Machine Design**, Cleveland: v. 69, n. 6, p. 73-78, Mar. 1997.

MAN, J. Six Sigma and lifelong learning. **Work Study**, [S. l.]: v. 51, n. 4, p. 197-201, 2002.

MARASH, S. A. Six Sigma: Business Results Through Innovation. **Quality Congress. ASQ's 54th Annual Quality Congress Proceedings**, Milwaukee: p. 627-630, 2000.

MARSC, C. E.; TUCKER, T.W. Application of SPC techniques to batch units. **ISA Transactions**, [S. l.]: v. 28, n. 3, p. 41-46, 1989.

MARTENS, S. L. Operationally Deploying Six Sigma. **Director, Six Sigma Quality & Performance Measurement – American Express Financial Advisors**, Minneapolis, 2001. Disponível em: http://www.qsp.org.br/restrito/comunidade/biblioteca_arq.shtml . Acesso em: 15 mar. 2002.

MASON, J.; ANTONY, J. Statistical process control: an essential ingredient for improving service and manufacturing quality. **Managing Service Quality**, Bradford: v. 10, n. 4, p. 233-238, 2000.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5. ed. New York: John Wiley and Sons, 2001.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to Linear Regression Analysis**. New York: John Wiley and Sons, 1982.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1999.

- MYINT, S. A framework of an intelligent quality function deployment (IQFD) for discrete assembly environment. **Computers & Industrial Engineering**, [S. l.]: v. 45, n. 2, p. 269-283, Aug. 2003.
- NAVE, D. How to Compare Six Sigma, Lean and the Theory of Constraints. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 35, n. 3, p.73-78, Mar. 2002.
- OWLIA, M. S.; ASPINWALL, E. M. Application of quality function deployment for the... **European Journal of Engineering Education**, [S. l.]: v. 23, n. 1, p.105-115, Mar. 1998.
- PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **Estratégia Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- PEREZ-WILSON, M. **Seis Sigma: compreendendo o conceito, as implicações e os desafios**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.
- PILLAY, A.; WANG, J. Modified Failure Mode and Effect Analysis approximate reasoning. **Engineering Reliability and System safety**, v. 79, n. 1, p. 69-85, Jan. 2003.
- PRAZERES, P. M. **Dicionário de Termos da Qualidade**. São Paulo: Atlas, 1996.
- PUENTE, J.; PINO, R.; PRIORE, P.; FUENTE, D. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **The International Journal of Quality & Reliability Management**, Bradford: v. 19, n. 2, p. 137-150, 2002.
- RASIS, D.; GITLOW, H. S.; POPOVICH, E. Paper Organizers International: A Fictitious Six Sigma Green Belt Case Study. I. **Quality Engineering**, [S. l.]: v. 15, n. 1, p. 127-145, Sept. 2002.
- RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. **Estatística Industrial**. Porto Alegre: FEENG – UFRGS, 2001a.
- RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C. S. **Controle Estatístico do Processo**. Série Monográfica Qualidade. Porto Alegre: FEENG - UFRGS, 2001b.
- RIBEIRO, J. L. D.; ECHEVESTE, M. E.; DANILEVICZ, A. M. F. **A Utilização do QFD na otimização de produtos, processos e serviços**. Porto Alegre: FEENG - UFRGS, 2001.
- ROMERO, J.; ESPUNA, A.; FRIEDLER, F.; PUIGJANER, L. A new framework for batch process optimization using the flexible recipe. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S. l.]: v. 42, n. 2, p. 370-379, 2003.
- ROTONDORO, R. G. **Seis Sigma – Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços**. São Paulo: Atlas, 2002.
- SANKAR, N. R.; PRABHU, B. S. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Bradford: v. 18, n. 3, p. 324-335, Apr. 2001.
- SCIPIONI, A.; SACCAROLA, G.; CENTAZZO, A.; ARENA, F. FMEA Methodology design, implementation and integration with HCCP system in a food company. **Food Control**, [S. l.]: v. 13, p. 495-501, Feb. 2002.

SMITH, D.; BLAKESLEE, J. The new strategic Six Sigma. **TD**, Alexandria: v. 56, n. 9, p. 45-52, Sept. 2002.

SNEE, R. D. The project selection process. Milwaukee: **Quality Progress**, Milwaukee: v. 35, n. 9, p. 78-80, Sept. 2002.

SOMMER, J. G. Physical properties and their meaning. **Rubber World**, Alexandria: v. 214, n. 3, p. 16-19, June 1996.

SRINIVASAN, B. et al. **A tutorial on the optimization of batch process: II. Handling uncertainty using measurements**. Institute d'automatique École Polytechnique Fédérale de Lausanne- Florida State University, Tallahassee, June 2000.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis – FMEA from Theory to Execution**, Milwaukee: ASQC Quality Press, 1995.

STENBERG, A. B.; DELERYD, M. Implementation of statistical process control and process capability studies: requirements or free will? **Total Quality Management**, Oxford Shire: v.10, n. 4, p. 439-446, 1999.

STOUMBOS, G. Z. Process capability indices: overview and extensions. **Nonlinear Analysis: Real World Applications**, v. 3, n. 2, p. 191-210, June 2002.

SULLIVAN, L. P. Quality Function Deployment. **Quality Progress**, Milwaukee: p. 39-50, June 1986.

TEMPONI, C.; YEN, J.; TIAO, W. A. House of quality: A fuzzy logic-based requirements analysis. **European Journal of Operational Research**, [S. l.]: v. 117, n. 2, p. 340-354, Sept.1999.

TENG, S.; HO, S. Failure mode and effects analysis: An integrated approach for product design and process control. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Bradford: v. 13, n. 5, p. 8-26, 1996.

THIOLLENT, M. **Metodologia da Pesquisa-ação**. 8. ed. São Paulo: Cortez, 1998.

UDLER, D. M.; ZAKS, A. L. Use P_{pk} and C_{pk} to Reduce Customer Conflicts. **Manufacturing Engineering**, Milwaukee: v. 118, n. 3, p. 20, Mar. 1997.

VANDENBRANDE, W. W. How to use FMEA to reduce the size of your quality toolbox. **Quality Progress**, Milwaukee: v. 31, n. 11, p. 97-100, Nov. 1998.

WALDEN, J. Performance excellence: a QFD approach. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Bradford: v. 20, n. 1, p. 123-133, 2003.

WERKEMA, M. C. C. **Criando a cultura Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Análise de Regressão: como entender o relacionamento entre as variáveis de um processo**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1996.

WHEELER, J. M. Getting Started: Six Sigma Control of Chemical Operations. **CEP**, [S. 1.]: v. 98, n. 6, p. 76-81, June 2002.

WOODALL, W. H. Controversies and contradictions in statistical process control. Milwaukee: **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 32, n. 4, p. 341-350, Oct. 2000.

WOODALL, W. H.; MONTGOMERY, D. C. Research issues and ideas in statistical process control. **Journal of Quality Technology**, Milwaukee: v. 31, n. 4, p. 376-387, Oct. 1999.

APÊNDICE A

Neste apêndice é apresentado o formulário completo do FMEA de processo, que foi utilizado na etapa Medir, para a identificação das variáveis mais influentes no processo.

Projeto Seis Sigma										ABC Ind. e Com. S.A				FMEA de Processo			
Item: Sistema de reação - Linha C. Equipe: Produção/Processo/Automação/Pesquisador										Data da revisão: 30/04/2002				Número: 0001/2002			
Entradas do processo	Item	Modo potencial	Efeito de falha	Severidade	Causa potencial de falha	Ocorrência	Controles atuais	Deteção	NPR	Ação recomendada	Responsável data	Ação efetuada	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR	
dosagem OX	7.1	linha parcialmente cheia	VM	10	fluxo reverso	x	ver item abaixo	x	xx								
			t reação		10	condicionamento	1	proc. operacional	10	100							
	15	contaminação	VM	4	condicionamento	1	proc. operacional	10	70	analisar pureza							
			t reação		7	sistema comum HPC/HPPM	1	proc. operacional	10	70	analisar pureza						
	17.2	variação na quantidade dosada	VM	4	sistema de dosagem	10	registro da quant. dosada	10	700	avaliação dos dados hist. de dosagem.	Henrique / 07 de 2002	conforme avaliação mostrou-se capaz					
			t reação		7	medição de vazão	x	ver item específico	x	xx							
	medição de vazão	1	erro set-point	1	automação e IO's	4	28										
		7	fluxo bifásico (sólido/gás)	7	alarme fluxo reverso e atuação auto matisimo (bomba > válv.) (12)	10	490	modificação no layout das linhas	Henrique / 07 de 2002	modificado o layout das linhas							
			4	vibração	4	280	modificação no layout das linhas	Henrique / 07 de 2002	modificado o layout das linhas								

continua...

continuação

Projeto Seis Sigma				ABC Ind. e Com. S.A				FMEA de Processo								
Item: Sistema de reação - Linha C. Equipe: Produção/Processo/Automação/Pesquisador				Data da revisão: 30/04/2002				Número: 0001/2002								
Entradas do processo	Item	Modo potencial	Efeito de falha	Severidade	Causa potencial de falha	Ocorrência	Controles atuais	NPR	Ação recomendada	Responsável data	Ação efetuada	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR	
dosagem OX	17.2	medição de vazão	VM t reação	4	linha parc. cheia (após FT)	7	xxx	490	modificação no layout das linhas	Henrique / 07 de 2002	modificado o layout das linhas					
				7	vazão fora escala (>100%)	1	xxx	70								
					defeito no instrumento	1	xxx	70								
dosagem PC	9	contaminacao TM/PC	VM	7	compartilhamento dos sistemas	10	xxx	700	separação das linhas de dosagem de PC/TM	Henrique / 12 de 2002	separadas as linhas de dosagem					
				7	deficiência B 22-18 A/B	1	xxx	70								
	6.1	atraso na dosagem	t reação	4	espera na fila	4	xxx	280	separação das linhas de dosagem	Henrique / 07 de 2002	separadas as linhas de dosagem					
					pressão alta V 23-15 A/B	4	contr. pressão V 23-15 A/B	112								
					batejada c/ conc. baixa	1	automação e análise A22	7								
	17.7	quantidade dosada a menor	VM	7	sistema de dosagem	10	registro da quant. dosada	700	separação das linhas de dosagem	Henrique / 07 de 2002	separadas as linhas de dosagem					

continua...

continuação

Projeto Seis Sigma				ABC Ind. e Com. S.A				FMEA de Processo												
Item: Sistema de reação - Linha C. Equipe: Produção/Processo/Automação/Pesquisador				Data da revisão: 30/04/2002				Número: 0001/2002												
Entradas do processo	Item	Modo potencial	Efeito de falha	Severidade	Causa potencial de falha	Ocorrência	Controles atuais	Deteção	NPR	Ação recomendada	Responsável data	Ação efetuada	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR				
dosagem PC	17.7	quantidade dosada a menor	VM	7	medição de vazão	x	ver item específico	x	xx											
					erro set-point	1	automação e IO's	4	28											
		medição de vazão			fluxo bifásico (sólido/gás)	1	alarme fluxo reverso e atuação	10	70	ver OBS. 2										
					vibração	1	automatismo (bomba > válv.)	10	70											
					linha parc. cheia (após FT)	1	xxx	10	70	ver OBS. 2										
		dosagem MOD			7.2	linha parcialmente cheia	VM	10	vazão fora escala (>100%)	1	xxx	10	70							
									defeito no instrumento	1	xxx	10	70							
					fluxo reverso	x	ver item abaixo	x	xx											
					condicionamento	1	proc. operacional	10	100											

continua...

continuação

Projeto Seis Sigma				ABC Ind. e Com. S.A				FMEA de Processo							
Item: Sistema de reação - Linha C. Equipe: Produção/Processo/Automação/Pesquisador				Data da revisão: 30/04/2002				Número: 0001/2002							
Entradas do processo	Item	Modo potencial	Efeito de falha	Severidade	Causa potencial de falha	Ocorrência	Controles atuais	NPR	Ação recomendada	Responsável data	Ação efetuada	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR
dosagem MOD	16	variação no tempo de atuação	VM	7	variação tempo de reação	7	xxx	10	490	depende de melhoria no cont. de Temp.	pendente				
	17.4	variação na quantidade dosada	VM	10	contaminação c/ água A-22/23	1	proc. operacional	10	100	Verificar?					
					sistema de dosagem	10	registro da quant. dosada	10	1000	avaliação dos dados hist. de dosagem.	conforme avaliação mostrou-se capaz				
					medição de vazão	x	ver item específico	x	xx						
					erro set-point	1	automação e IO's	4	40						
					fluxo bifásico (sólido/gás)	4	alarme fluxo reverso e atuação	10	400	modificação no layout das linhas	modificado layout das linhas				
					vibração	4	automatismo (bomba > válv.)	10	400						
					linha parc. cheia (após FT)	4	xxx	10	400	modificação no layout das linhas	modificado layout das linhas				
					vazão fora escala (>100%)	1	xxx	10	100						

continua...

continuação

Projeto Seis Sigma				ABC Ind. e Com. S.A				FMEA de Processo										
Item: Sistema de reação - Linha C. Equipe: Produção/Processo/Automação/Pesquisador				Data da revisão: 30/04/2002				Número: 0001/2002										
Entradas do processo	Item	Modo potencial	Efeito de falha	Severidade	Causa potencial de falha	Ocorrência	Controles atuais	NPR	Ação recomendada	Responsável data	Ação efetuada	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR			
dosagem MOD	17.4	medição de vazão	VM		defeito no instrumento	1	xxx	10										
	dosagem TM	atraso na dosagem	VM	10	espera fila	4	xxx	10	separação d as linhas de dosagem de PC/TM	Henrique / 07 de 2002	Separadas as linhas de dosagem de TM/PC							
treação			4															
dosagem MOD	17.6	quantidade dosada a menor	VM	7	erro batelada	1	proc. operacional	10										
				10	sistema de dosagem	10	registro da quant. dosada	10	avaliação dos dados hist. de dosagem.	Henrique / 07 de 2002	conforme avaliação mostrou-se capaz							
				x	medição de vazão		ver item específico			xx								
				7	erro set-point	1	automação e IO's	4		28								
				1	fluxo bifásico (sólido/gás)	1	alarme fluxo reverso e atuação automatismo (bomba > válv.)	10		70	ver OBS. 2							
			1	vibração	10		70											

continua...

continuação

Projeto Seis Sigma				ABC Ind. e Com. S.A				FMEA de Processo									
Item: Sistema de reação - Linha C. Equipe: Produção/Processo/Automação/Pesquisador				Data da revisão: 30/04/2002				Número: 0001/2002									
Entradas do processo	Item	Modo potencial	Efeito de falha	Severidade	Causa potencial de falha	Ocorrência	Controles atuais	NPR	Ação recomendada	Responsável data	Ação efetuada	Severidade	Ocorrência	Deteção	NPR		
dosagem TM	17.6	medição de vazão	VM	7	linha parc. cheia (após FT)	1	xxx	10	70	ver OBS. 2							
					vazão fora escala (>100%)	1	xxx	10	70								
					defeito no instrumento	1	xxx	10	70								
dosagem de ACN	22	variação na temperatura da ACN	VM	7	inexistência de sist. de controle	7	xxx	10	490	avaliação da influência da variação da temperatura da ACN na variável de saída	Henrique / 07 de 2002	conforme avaliação estatística não se mostrou significativamente influente					
			t reação	1	(variação temp. ambiente)	1											
sistema de controle de temperatura do reator	3	temperatura abaixo ou acima do set-point	VM	7	deficiência no controle de temperatura	10	xxx	10	700	melhoria no sist. de controle de temp.	Henrique / 04 de 2003	pendente					
			t reação	7													

1) A ocorrência deste item é desconhecida e a quantidade de causas prováveis é grande, porém é possível avaliar, através dos dados coletados, todo sistema de dosagem. Caso seja verificado um desempenho ruim deste sistema, será realizado um FMEA específico para este item. Válido para OX, MOD, TM e PC.

2) Causas prováveis: falha no acionamento e falta de estanqueidade das XV's (item 13), vazamento, deficiência do sistema (pontos altos sem possibilidade de ventagem) e necessidade de sopragem da linha (OX).

ANEXO A

Este anexo apresenta a tabela para a determinação do nível sigma de um processo, a partir dos valores de dpmo ou ppm provenientes de dados de longo prazo.

Tabela de conversão para o nível sigma

Entrada: dpmm / ppm de longo prazo

Nível Sigma	Valores de dpmm ou ppm em função do Nível Sigma									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	933193	931888	930563	929219	927855	926471	925066	923641	922196	920730
0,1	919243	917736	916207	914656	913085	911492	909877	908241	906582	904902
0,2	903199	901475	899727	897958	896165	894350	892512	890651	888767	886860
0,3	884930	882977	881000	878999	876976	874928	872857	870762	868643	866500
0,4	864334	862143	859929	857690	855428	853141	850830	848495	846136	843752
0,5	841345	838913	836457	833977	831472	828944	826391	823814	821214	818589
0,6	815940	813267	810570	807850	805106	802338	799546	796731	793892	791030
0,7	788145	785236	782305	779350	776373	773373	770350	767305	764238	761148
0,8	758036	754903	751748	748571	745373	742154	738914	735653	732371	729069
0,9	725747	722405	719043	715661	712260	708840	705402	701944	698468	694974
1,0	691462	687933	684386	680822	677242	673645	670031	666402	662757	659097
1,1	655422	651732	648027	644309	640576	636831	633072	629300	625516	621719
1,2	617911	614092	610261	606420	602568	598706	594835	590954	587064	583166
1,3	579260	575345	571424	567495	563559	559618	555673	551717	547758	543795
1,4	539828	535856	531881	527903	523922	519939	515953	511967	507978	503989
1,5	500000	496011	492022	488033	484047	480061	476078	472097	468119	464144
1,6	460172	456205	452242	448283	444330	440382	436441	432505	428576	424655
1,7	420740	416834	412936	409046	405165	401294	397432	393580	389739	385908
1,8	382089	378281	374484	370700	366928	363169	359424	355691	351973	348268
1,9	344578	340903	337243	333598	329969	326355	322758	319178	315614	312067
2,0	308538	305026	301532	298056	294598	291160	287740	284339	280957	277595
2,1	274253	270931	267629	264347	261086	257846	254627	251429	248252	245097
2,2	241964	238852	235762	232695	229650	226627	223627	220650	217695	214764
2,3	211855	208970	206108	203269	200454	197662	194894	192150	189430	186733
2,4	184060	181411	178786	176186	173609	171056	168528	166023	163543	161087
2,5	158655	156248	153864	151505	149170	146859	144572	142310	140071	137857
2,6	135666	133500	131357	129238	127143	125072	123024	121001	119000	117023
2,7	115070	113140	111233	109349	107488	105650	103835	102042	100273	98525
2,8	96801	95098	93418	91759	90123	88508	86915	85344	83793	82264
2,9	80757	79270	77804	76359	74934	73529	72145	70781	69437	68112
3,0	66807	65522	64256	63008	61780	60571	59380	58208	57053	55917
3,1	54799	53699	52616	51551	50503	49471	48457	47460	46479	45514
3,2	44565	43633	42716	41815	40929	40059	39204	38364	37538	36727
3,3	35930	35148	34379	33625	32884	32157	31443	30742	30054	29379
3,4	28716	28067	27429	26803	26190	25588	24998	24419	23852	23295
3,5	22750	22216	21692	21178	20675	20182	19699	19226	18763	18309
3,6	17864	17429	17003	16586	16177	15778	15386	15003	14629	14262
3,7	13903	13553	13209	12874	12545	12224	11911	11604	11304	11011
3,8	10724	10444	10170	9903	9642	9387	9137	8894	8656	8424
3,9	8198	7976	7760	7549	7344	7143	6947	6756	6569	6387
4,0	6210	6037	5868	5703	5543	5386	5234	5085	4940	4799
4,1	4661	4527	4397	4269	4145	4025	3907	3793	3681	3573
4,2	3467	3364	3264	3167	3072	2980	2890	2803	2718	2635
4,3	2555	2477	2401	2327	2256	2186	2118	2052	1988	1926
4,4	1866	1807	1750	1695	1641	1589	1538	1489	1441	1395
4,5	1350	1306	1264	1223	1183	1144	1107	1070	1035	1001
4,6	968	936	904	874	845	816	789	762	736	711
4,7	687	664	641	619	598	577	557	538	519	501
4,8	483	467	450	434	419	404	390	376	362	350
4,9	337	325	313	302	291	280	270	260	251	242
5,0	233	224	216	208	200	193	185	179	172	165
5,1	159	153	147	142	136	131	126	121	117	112
5,2	108	104	100	95,8	92,0	88,4	85,0	81,6	78,4	75,3
5,3	72,4	69,5	66,7	64,1	61,5	59,1	56,7	54,4	52,2	50,1
5,4	48,1	46,2	44,3	42,5	40,8	39,1	37,5	36,0	34,5	33,1
5,5	31,7	30,4	29,1	27,9	26,7	25,6	24,5	23,5	22,5	21,6
5,6	20,7	19,8	19,0	18,1	17,4	16,6	15,9	15,2	14,6	14,0
5,7	13,4	12,8	12,2	11,7	11,2	10,7	10,2	9,8	9,35	8,94
5,8	8,55	8,17	7,81	7,46	7,13	6,81	6,51	6,22	5,94	5,67
5,9	5,42	5,17	4,94	4,72	4,50	4,30	4,10	3,91	3,74	3,56
6,0	3,40	3,24	3,09	2,95	2,82	2,68	2,56	2,44	2,33	2,22
6,1	2,11	2,02	1,92	1,83	1,74	1,66	1,58	1,51	1,44	1,37
6,2	1,30	1,24	1,18	1,12	1,07	1,02	0,97	0,92	0,88	0,83
6,3	0,79	0,76	0,72	0,68	0,65	0,62	0,59	0,56	0,53	0,50
6,4	0,48	0,46	0,43	0,41	0,39	0,37	0,35	0,34	0,32	0,30
6,5	0,29	0,27	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18
6,6	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
6,7	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06
6,8	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
6,9	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
7,0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Fonte: adaptado de Harry e Schroeder (2000)

ANEXO B

Este anexo apresenta a tabela de constantes para a construção dos gráficos de controle.

Tabela de constantes para as cartas de controle

tamanho do sub-grupo n	A_2	A_3	B_3	B_4	D_3	D_4	E_2	\bar{A}_2	d_2	c_4
2	1.880	2.659	0.000	3.267	0.000	3.267	2.660	1.880	1.128	0.7979
3	1.023	1.954	0.000	2.568	0.000	2.574	1.772	1.187	1.693	0.8862
4	0.729	1.628	0.000	2.266	0.000	2.282	1.457	0.796	2.059	0.9213
5	0.577	1.427	0.000	2.089	0.000	2.114	1.290	0.691	2.326	0.9400
6	0.483	1.287	0.030	1.970	0.000	2.004	1.184	0.548	2.534	0.9515
7	0.419	1.182	0.118	1.882	0.076	1.924	1.109	0.508	2.704	0.9594
8	0.373	1.099	0.185	1.815	0.136	1.864	1.054	0.433	2.847	0.9650
9	0.337	1.032	0.239	1.761	0.184	1.816	1.010	0.412	2.970	0.9693
10	0.308	0.975	0.284	1.716	0.223	1.777	0.975	0.362	3.078	0.9727
11	0.285	0.927	0.321	1.679	0.256	1.744			3.173	0.9754
12	0.266	0.886	0.354	1.646	0.283	1.717			3.258	0.9776
13	0.249	0.850	0.382	1.618	0.307	1.693			3.336	0.9794
14	0.235	0.817	0.406	1.594	0.328	1.672			3.407	0.9810
15	0.223	0.789	0.428	1.572	0.347	1.653			3.472	0.9823
16	0.212	0.763	0.448	1.552	0.363	1.637			3.532	0.9835
17	0.203	0.739	0.466	1.534	0.378	1.622			3.588	0.9845
18	0.194	0.718	0.482	1.518	0.391	1.608			3.640	0.9854
19	0.187	0.698	0.497	1.503	0.403	1.597			3.689	0.9862
20	0.180	0.680	0.510	1.490	0.415	1.585			3.735	0.9869
21	0.173	0.663	0.523	1.477	0.425	1.575			3.778	0.9876
22	0.167	0.647	0.534	1.466	0.434	1.566			3.819	0.9882
23	0.162	0.633	0.545	1.455	0.443	1.557			3.858	0.9887
24	0.157	0.619	0.555	1.445	0.451	1.548			3.895	0.9892
25	0.153	0.606	0.565	1.435	0.459	1.541			3.931	0.9886

Fonte: adaptado de IQA (1997).