

**AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO NO
CONTEXTO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM
UMA EMPRESA INDUSTRIAL**

Por

PEDRO LUIZ LÜDKE DE OLIVEIRA

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**Curso de Pós-Graduação em Metrologia
Científica e Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica
Labmetro – Laboratório de Metrologia e Automatização**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de
MESTRE EM METROLOGIA
Na UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA,

Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 09 de Setembro de 2003

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE MEDIÇÃO NO CONTEXTO DA METODOLOGIA SEIS SIGMA EM UMA EMPRESA INDUSTRIAL

PEDRO LUIZ LÜDKE DE OLIVEIRA

Essa dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM METROLOGIA

E aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr.-Ing.
Orientador

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Abelardo Alves de Queiroz, Ph.D.

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

Resumo

Em um mundo cada vez mais competitivo, a velocidade de reação no atendimento a requisitos técnicos e com custos cada vez mais baixos é fundamental para o sucesso das empresas. Neste cenário a metodologia Seis Sigma orientada na diminuição da variabilidade dos processos chaves, e conseqüente minimização das perdas associadas, tais como refugos, retrabalhos, horas improdutivas, etc., focada no retorno financeiro para a empresa, vem sendo adotada por uma quantidade crescente de indústrias em todo o planeta.

A metrologia tem um papel de grande relevância no desenvolvimento de projetos Seis Sigma, num primeiro momento na medição das perdas financeiras, que orientam a alta administração na determinação de objetivos, a serem alcançados pela organização, através de projetos Seis Sigma, e posteriormente na aplicação de cada uma das ferramentas da metodologia, culminando com a aplicação de um plano de controle, determinando quais os parâmetros devem ser medidos e quais ações devem ser tomadas para manter os resultados alcançados pelo projeto.

O objetivo principal da metrologia, dentro da metodologia Seis Sigma, é fornecer informações confiáveis, para o direcionamento de ações visando a minimização dos desperdícios e custos associados. Portanto, a avaliação dos processos de medição na implementação da metodologia Seis Sigma, é fundamental para o sucesso da mesma. Os processos de medição devem ser capazes de perceber a variabilidade dos processos de fabricação, de maneira que melhorias possam ser implementadas e mantidas gerando o retorno financeiro objetivado pela empresa. A macro análise do conjunto de avaliações dos processos de medição facilita a identificação de problemas comuns aos processos de medição, direcionando ações gerenciais para a minimização da variabilidade dos processos de medição atualmente utilizados, servindo como base para o desenvolvimento de processos de medição otimizados.

A aplicação desta metodologia certamente auxiliará no aumento da competitividade das indústrias nacionais.

Abstract

In a world each time more competitive the reaction's velocity on attending technical requirements with lower and lower costs is fundamental to the success of the companies. In this time, the Six Sigma methodology oriented to decrease key processes variability and consequently decrease associated losses, like scrap, rework, Down time, etc., focused on financial return to the company, has been used by a growing quantity of industries all over the planet.

The metrology has a great relevance in the development of Six Sigma projects, in a first time to measure the financial losses, which orient the top management in the determination of the objectives to be achieved by the organization, through Six Sigma projects, and subsequently in the application of each one of the methodology tools, culminating in the application of a control plan, establishing which parameters should be measured and which actions must be taken to keep the project results.

The main objective of metrology inside the Six Sigma Methodology is to supply reliable information to the direction of actions, to minimize waste and costs.

Therefore, the evaluation of measure process variability is fundamental to the Six Sigma success. The measure process must be able to realize the variability of manufacture process, so that improvements can be implemented and kept, generating the financial return to the company. The overview analysis of the evaluation of all measure processes help to identify common problems to the measure processes, orienting management actions to minimize the variability of the measure processes used nowadays, and also help to develop optimized measure processes. The application of this methodology certainly will help to increase the competitiveness of the national industries.

Agradecimentos

Nesta etapa ao olhar para o caminho percorrido é prazeroso notar que este não foi percorrido sozinho, pelo contrário foi percorrido lado a lado com pessoas que me impulsionaram para o desenvolvimento pessoal e profissional. Lembro de momentos de minha infância onde sem que eu notasse meu pai, Ary, estimulava a curiosidade de menino num simples tabuleiro de xadrez pelo melhor lance a ser dado e as conseqüências de acertar e errar e tentar de novo, ah quanto este ensinamento de perseverança e paciência foi importante, obrigado pai. Obrigado a minha mãe e professora, Stella, que forneceu a base para o aprofundamento dos conhecimentos curriculares e extra curriculares, que juntamente com meus seis irmãos abriram as portas para o convívio social.

Agradeço a minha esposa, Ana Paula, que teve uma carga extra de atividades durante o desenvolvimento do mestrado, na educação de nossos filhos Pedro e Gabriel, sabendo que aquelas quintas, sextas, sábados e domingos estavam sendo utilizadas na construção de um futuro melhor.

Obrigado ao meu colega de trabalho e de mestrado Eduardo Campos, que durante as dezenas de horas de vôos entre São Paulo e Florianópolis se manteve bem humorado e com uma visão otimista, sempre discutindo um passo a frente em nossa caminhada. Agradeço a toda turma 2000 do PósMCI, que compartilhou cada instante deste percurso sabendo administrar as dificuldades individuais com o espírito de equipe, em especial aos Paraenses Janaina e Fred com seus ensinamentos de informática e ao Max com seus ensinamentos de eletrônica. Agradeço também as demais turmas da PósMCI, que nos acolheram com harmonia e criaram uma única turma a da Pós.

Obrigado aos professores da PósMCI, ao Labmetro em especial ao professor Armando que nos auxiliou na negociação da viabilidade de realização das disciplinas sem nos desligarmos da ThyssenKrupp.

Agradeço a DELPHI, em especial ao sr. Gerardo Mendonza que viabilizou a realização do treinamento para minha formação como Black Belt juntamente com os srs. Walter de Castro

Medeiros e Hans Christian Friedrich Tinius da ThyssenKrupp.

Agradeço aos colegas da ThyssenKrupp em especial ao meu amigo Amylton Krügner e demais colaboradores do GQ/40, que auxiliaram na realização das avaliações dos processos de medição, que serviram como base para o desenvolvimento desta dissertação. Agradeço a equipe Seis Sigma da UV/43 que acreditou no potencial do trabalho, e aplicou os conceitos que aprendemos juntos durante o desenvolvimento do projeto.

Muito obrigado aos membros da banca que mesmo em vésperas de Natal, se prontificaram a ler, discutir e melhorar esta dissertação. Gostaria também de agradecer ao meu orientador Carlos Alberto Schneider, que sempre encontrou um horário para discutir e orientar o desenvolvimento do trabalho, o que muitas vezes acontecia nas noites de sábado ou nas manhãs e tardes de domingo.

Enfim agradeço a todos que em maior ou menor grau auxiliaram no desenvolvimento desta dissertação, principalmente a Deus por que se não fosse ele neste momento não estaria escrevendo esta dissertação.

Sumário

Aprovação	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Agradecimentos	iv
Sumário	vi

Capítulo 1

A METROLOGIA AUXILIANDO NA COMPETITIVIDADE DA INDÚSTRIA

ATRAVÉS DA METODOLOGIA SEIS SIGMA	1
1.1 O SEIS SIGMA E A DETERMINAÇÃO DE OBJETIVOS	2
1.2. A IMPORTÂNCIA DA METROLOGIA NO SEIS SIGMA	3
1.3. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO / PESQUISA	4

Capítulo 2

A METODOLOGIA SEIS SIGMA	6
2.1 APRESENTANDO O SEIS SIGMA	6
2.2. AS FERRAMENTAS DA METODOLOGIA SEIS SIGMA.....	10
2.2.1 TMAP – Mapeamento do Processo de Pensamento	10
2.2.2 SIPOC – Fornecedor, Entrada, Processo, Saída e Cliente	12
2.2.3 PMAP – Mapa do Processo.....	14
2.2.4 FMEA – Análise de Modo e Efeitos de Falha.....	15
2.2.5 NEM – Avaliação Numérica das Métricas.....	16
2.2.6 MSE - Avaliação do Sistema de Medição.....	18

2.2.7 DOE – Delineamento de Experimentos.....	19
2.2.8 Controle.....	21

Capítulo 3

MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO	24
3.1 SELECIONAR O PROCESSO DE MEDIÇÃO A SER AVALIADO.....	24
3.2 DESENVOLVER A ESTRATÉGIA DE AVALIAÇÃO.....	25
3.3 PREPARAÇÃO PARA A COLETA DE DADOS.....	26
3.4 COLETAR AMOSTRAS.....	27
3.5 EFETUAR AS MEDIÇÕES E REGISTRAR.....	27
3.6 ANÁLISE PRÁTICA DOS RESULTADOS DO ESTUDO.....	27
3.7 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS.....	28
3.7.1 Estabilidade a Curto Prazo.....	28
3.7.2 Discriminação.....	29
3.7.3 Erro Aleatório de Medição.....	31
3.7.4 Reprodutividade.....	33
3.7.5 Medições por Peça.....	34
3.7.6 Medições por Operador.....	35
3.7.7 Peça x Operador.....	35
3.8 ANÁLISE NUMÉRICA DOS RESULTADOS DO ESTUDO.....	36
3.8.1 Análise Numérica da Repetitividade.....	36
3.8.2 Análise Numérica da Reprodutibilidade.....	37
3.8.3 Repetitividade & Reprodutibilidade.....	38
3.8.4 Comparando R&R com a Tolerância, Variação do Processo de Fabricação e Variação Total.....	39
3.8.5 Critérios para Aprovação do R&R.....	41
3.8.6 ANOVA – Análise de Variância.....	41
3.9 ESTABELEECER E EXECUTAR AÇÕES PARA MINIMIZAR A VARIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	42
3.10 VERIFICAR A EFICÁCIA DAS AÇÕES.....	43
3.11 MACRO ANÁLISE DA AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO.....	43

Capítulo 4

O AMBIENTE INDUSTRIAL UTILIZADO PARA O

ESTUDO DE CASO

45

4.1 DADOS DA EMPRESA.....	45
4.2 CERTIFICAÇÕES E PRÊMIOS.....	45
4.3 O PRODUTO ESTUDADO.....	46
4.4 A LINHA DE PRODUÇÃO.....	46
4.5 SISTEMAS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS.....	49

Capítulo 5

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE

COMPRIMENTO

51

5.1 O PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO.....	51
5.2 ANÁLISE PRÁTICA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO.....	52
5.3 GRÁFICO DAS AMPLITUDES DAS MEDIÇÕES.....	55
5.4 GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS MEDIÇÕES.....	55
5.5 GRÁFICO DAS MEDIÇÕES POR PEÇA.....	56
5.6 GRÁFICO DAS MEDIÇÕES POR OPERADOR.....	56
5.7 GRÁFICO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES POR OPERADOR SOBREPOSTO.....	57
5.8 ANÁLISE DA R&R DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTOS.....	58
5.9 TABELA ANOVA.....	59
5.10 CONCLUINDO A AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO.....	59

Capítulo 6

MACRO ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS PROCESSOS DE

MEDIÇÃO UTILIZADOS EM UMA LINHA DE USINAGEM

62

6.1 MACRO ANÁLISE DISCRIMINAÇÃO.....	63
6.2 MACRO ANÁLISE ESTABILIDADE A CURTO PRAZO.....	63

6.3 COMPARANDO O R&R COM A TOLERÂNCIA E A VARIABILIDADE DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	65
6.4 FATOR DE MAIOR INFLUÊNCIA NO R&R.....	66
6.5 CONCLUSÕES.....	67
6.6 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA A OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO.....	67
6.7 AÇÕES RECOMENDADAS.....	70

Capítulo 7

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
--	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
-----------------------------------	-----------

Capítulo 1

A METROLOGIA AUXILIANDO NA COMPETITIVIDADE DA INDÚSTRIA ATRAVÉS DA METODOLOGIA SEIS SIGMA

A velocidade de mudanças em nosso planeta vem aumentando significativamente, requerendo uma habilidade de adaptação, em particular no setor produtivo. Um exemplo deste fato vem sendo as exigências dos principais mercados mundiais quanto a necessidade de demonstração formal da conformidade dos produtos e serviços com requisitos especificados, tanto nas especificações técnicas como em regulamentos técnicos. O não atendimento aos requisitos técnicos constitui-se cada vez mais em uma barreira não tarifária ao comércio entre países [1] [2] [3] [4] [5]. Discussões a respeito de qual padrão de qualidade é mais adequado e um esforço no sentido de padronizar e aceitar mutuamente o mesmo pode ser observado nos últimos anos como, por exemplo, na indústria automotiva com a edição da especificação técnica ISO/TS 16949 em substituição aos manuais QS 9000, VDA 6, etc. [8] [9] [10]. Outro fator de mudança vivenciado no mercado nacional por grande parte das indústrias brasileiras, em praticamente todos os segmentos, foi o aumento da competição, influenciado pela maior abertura do mercado nacional, tanto pela ampliação das relações de importação e exportação, quanto pela redução das restrições à aquisição de empresas nacionais por grupos internacionais. Neste cenário a manufatura vem sendo forçada a adotar mecanismos que a auxiliem na melhoria de seus produtos e processos frente a rápida necessidade de se tornar competitiva. O objetivo principal dessa busca é atender ao cliente em requisitos como qualidade elevada, custo baixo e demanda flexível. Em consequência as organizações têm investido em equipamentos automatizados e na redução da variabilidade de seus processos de maneira a minimizar as perdas, e conseqüentemente custo, geradas pelos mesmos.

A metodologia Seis Sigma é fundamentada na utilização de ferramentas de qualidade com base

estatística, visando a diminuição da variabilidade do processo e conseqüentemente do desperdício gerado pelo mesmo. Sendo adotada por um número crescente de empresas, esta metodologia vem se demonstrando bastante eficiente, alcançando economias significativas para as empresas que a adotam, como no caso do projeto analisado nesta dissertação onde a sua aplicação gerou uma economia anual de US \$ 325 mil.

1.1 O SEIS SIGMA E A DETERMINAÇÃO DE OBJETIVOS

Para que uma empresa alcance seus objetivos é necessário que todos os seus integrantes conheçam quais são eles (Figura 1.), e que eventuais mudanças nos mesmos sejam conhecidas rapidamente por toda a organização. Porém este conhecimento não é suficiente. Para assegurar o sucesso da empresa é necessário que estes objetivos estejam vinculados à obtenção de resultados financeiros e a satisfação do cliente, bem como, a realização de ações estruturadas capazes de levar ao resultado almejado. É neste ponto que o Seis Sigma se encaixa trazendo a tona uma metodologia estruturada com ferramentas estatísticas integradas para a resolução de problemas que afetam diretamente no resultado financeiro da empresa.

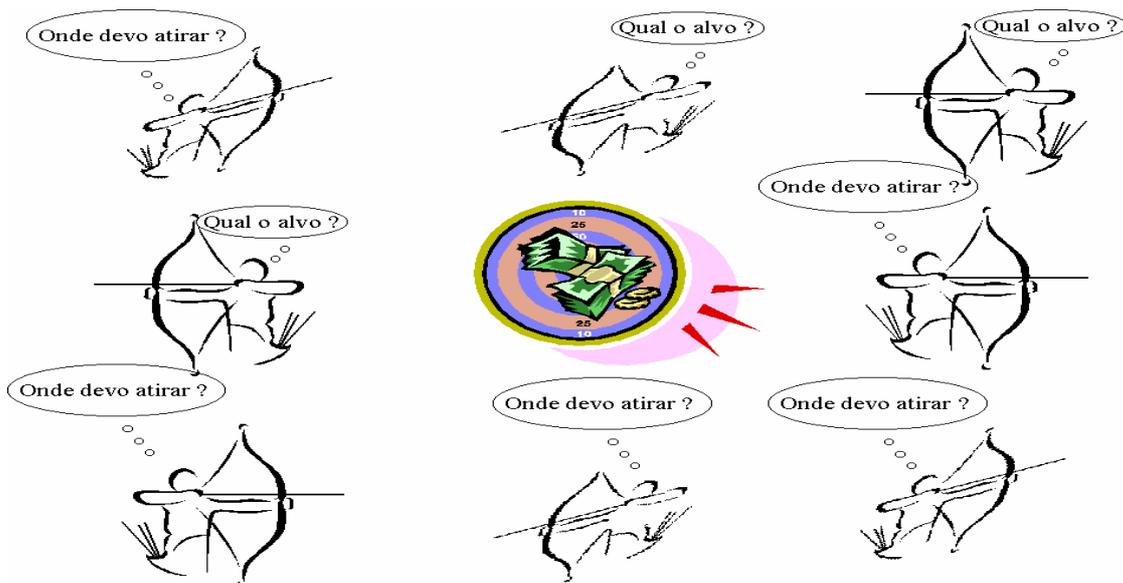


Figura 1.1 A falta de clareza e comunicação dos objetivos leva a organização a resultados aleatórios.

A seleção de projetos Seis Sigma deve ser realizada pela alta administração da empresa, através da análise dos principais custos da organização, preferencialmente, durante a elaboração do planejamento estratégico da empresa. Perguntas tais como, onde a aplicação das ferramentas do Seis Sigma poderá trazer resultados financeiros significativos em um período de até seis meses, auxiliam na determinação dos objetivos da empresa e de projetos Seis Sigma a serem desenvolvidos.

1.2 A IMPORTÂNCIA DA METROLOGIA NO SEIS SIGMA

Na metodologia Seis Sigma a metrologia é fundamental, pois sem ela não seria possível num primeiro momento identificar e priorizar problemas a serem resolvidos e tão pouco quantificar o impacto financeiro associado. Num segundo momento não seria possível saber qual a variabilidade do processo, quais os fatores que contribuem significativamente para ela, não permitindo identificar ações direcionadas para que se alcance a meta estabelecida Figura 1..

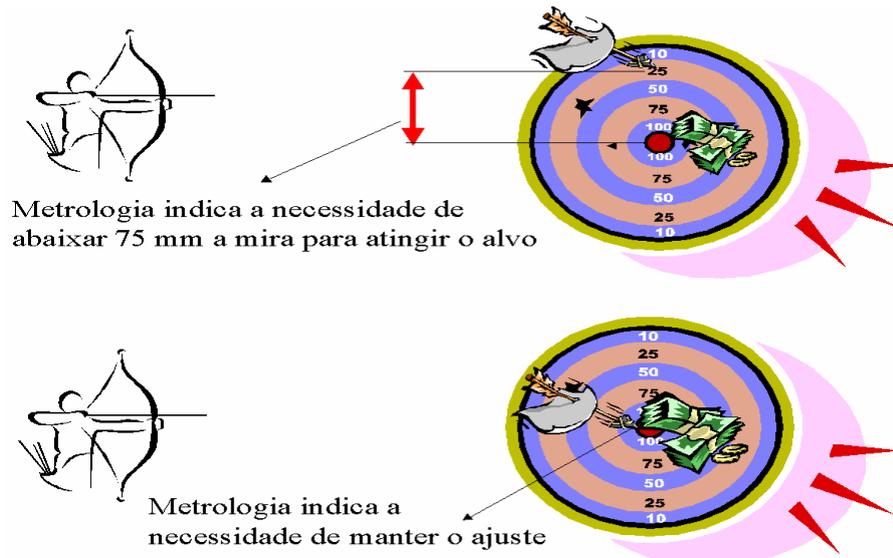


Figura 1.2 A metrologia auxiliando a alcançar e manter as metas estabelecidas.

Num mundo extremamente competitivo a indústria tem duas grandes opções para obter um bom resultado financeiro:

- Introduzir no mercado um produto inovador o suficiente, de modo a estimular o cliente a optar pela sua compra a um preço capaz de cobrir as despesas de desenvolvimento, fabricação e distribuição mantendo a margem de lucro desejada.
- Reduzir o desperdício em sua cadeia de fornecimento conseguindo desta forma abaixar os custos e preços mantendo a margem de lucro desejada e aumentando a penetração no mercado.

A redução do desperdício passa invariavelmente pela diminuição da variação dos processos, quer sejam administrativos ou produtivos. Para que se alcance esta diminuição necessita-se conhecê-la, neste momento destaca-se a importância da metrologia para um correto direcionamento de ações.

Na Figura 1.3 visualiza-se a variabilidade de um processo com boa capacidade potencial, porém com resultados aleatoriamente bons e ruins, onde a introdução de um monitoramento minimizaria a variabilidade do processo e a geração de desperdício (refugo e retrabalho) ao longo do tempo.

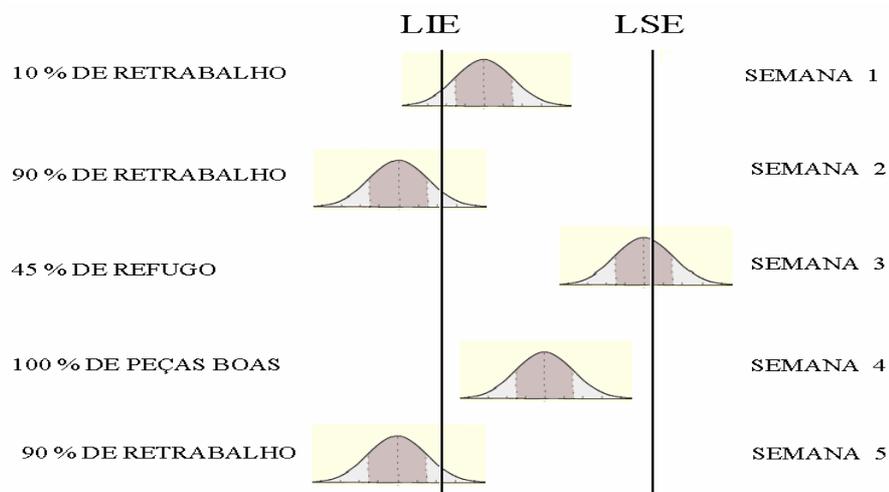


Figura 1.3 Processo potencialmente capaz, porém alternando resultados bons e ruins.

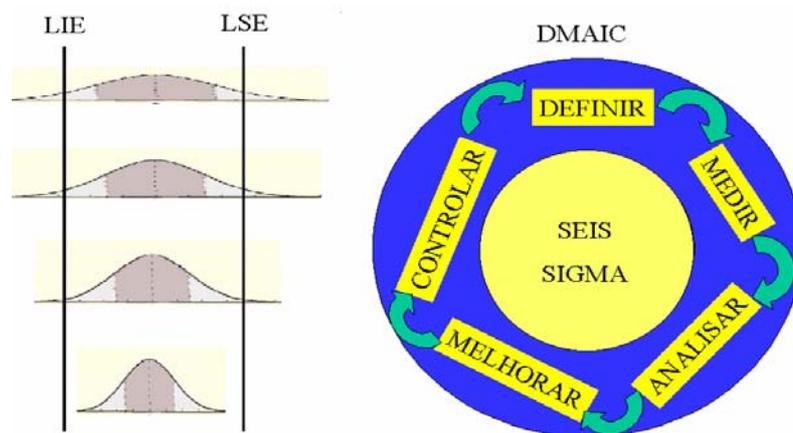


Figura 1.4 Diminuição da variabilidade do processo através do ciclo de melhoria DMAIC.

Outro tipo de variabilidade de um processo pode ser observado na Figura 1.4. Nesta figura nota-se originalmente uma variabilidade maior que a tolerância, onde aplicado o ciclo de melhoria DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve and Control) se obtém uma diminuição desta variabilidade e conseqüentemente uma redução dos desperdícios gerados.

1.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO/PESQUISA

O aumento da competição, que as indústrias brasileiras estão enfrentando, exige que seus processos produtivos sejam otimizados, minimizando as perdas decorrentes do mesmo. A aplicação de uma metodologia estruturada para conhecer as fontes de variação do processo de fabricação, através do uso apropriado da metrologia, e proporcionando a realização de ações no sentido de minimizar esta variabilidade, com conseqüente diminuição dos custos de fabricação

e aumento da competitividade das empresas serviram de motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Esta dissertação tem como objetivo avaliar a variabilidade dos processos de medição na implementação da metodologia Seis Sigma; gerar uma metodologia de avaliação dos processos de medição, abordando desde a seleção dos sistemas de medição a serem avaliados até a verificação de macro oportunidades de melhorias nestes processos de medição, assim como, propor uma alternativa para aumentar a competitividade das indústrias brasileiras.

O desenvolvimento do trabalho esteve inserido na implementação de um projeto seis sigma em uma empresa industrial, tendo sido planejado nas seguintes etapas:

- a) Aprovação da alta administração da empresa para a realização de um projeto 6 Sigma.
- b) Seleção de uma linha de produção a ser aplicado à metodologia.
- c) Aprovação e comprometimento da alta administração para a realização do projeto na linha de produção selecionada.
- d) Treinamento e pesquisa da metodologia seis sigma, culminando com a certificação de um Black Belt [17].
- e) Aplicação da metodologia seis sigma em uma linha de produção.
- f) Pesquisa bibliográfica de métodos de avaliação de processos de medição.
- g) Desenvolvimento de um método para avaliação da variabilidade dos processos de medição utilizados na empresa.
- h) Aplicação do método de avaliação dos processos de medição incluindo análises, prática, gráfica e analítica.
- i) Desenvolvimento de uma metodologia para a macro análise dos processos de medição, incluindo a verificação de causas comuns para a variabilidade de um grande número de processos de medição.
- j) Aplicação da macro análise para os processos de medição avaliados.
- k) Elaboração da dissertação.

Capítulo 2

A METODOLOGIA SEIS SIGMA

O Seis Sigma é uma metodologia poderosa para otimizar processos através da minimização de sua variabilidade. Atualmente o mercado está deixando claro sua demanda através da seguinte mensagem “a necessidade do mercado é de produtos de alta qualidade e com baixo preço” e um número crescente de empresas em todo o mundo está aceitando este desafio, utilizando-se da metodologia Seis Sigma com a finalidade de melhorar a performance do negócio [12][17][18]. O propósito deste capítulo é fornecer uma visão geral da metodologia Seis Sigma, apresentando as ferramentas utilizadas nos projetos Seis Sigma, destacando o papel da metrologia.

2.1 APRESENTANDO O SEIS SIGMA

Seis Sigma é uma maneira de gerenciar o negócio (prover produtos ou serviços) focada em resultado financeiro e na melhoria contínua dos processos. O Seis Sigma foca na prevenção através de ferramentas estatísticas e não na detecção de defeitos através de inspeções.

O termo **Sigma** refere-se a uma medida da dispersão em torno da média (desvio padrão) gerado por um determinado processo, e **Seis** indica o número de desvios padrões que um processo deve conter entre a sua média e os requisitos do cliente para ser considerado um processo Seis Sigma (Figura 2.1) [12] [17] [18].

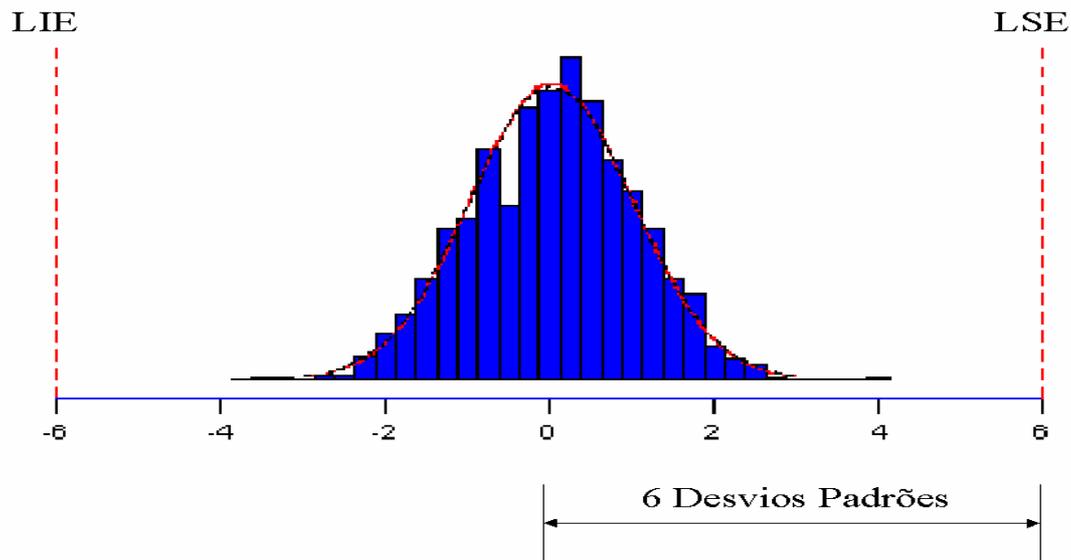


Figura 2.1 Um processo Seis Sigma deve ter no mínimo 6 desvios padrões entre a sua média e os limites de especificação, neste gráfico considerou-se que a média do processo permanece centrada em relação as especificações ($\mu = 0$).

O poder do Seis Sigma esta na combinação do poder das pessoas e do processo [17], através da utilização estruturada de ferramentas estatísticas com foco em resultados financeiros e na satisfação do cliente.

Seis Sigma pode também ser considerada uma meta a ser atingida através de um processo contínuo de melhoria onde o objetivo é ter um índice de defeitos menor ou igual a 3,4 defeitos por milhão.

Na tabela da Figura 2.2 pode se comparar a classificação de processos segundo o número de sigma, considerando que os mesmos possuem uma distribuição normal acrescida de 1,5 Sigma (σ - desvio padrão) de desvio, ver Figura 2.3, e sua respectiva taxa de defeitos [12].

Classificação de Processos em Número de Sigmas	Defeitos Por Milhão PPM
2	308537
3	66807
4	6210
5	233
6	3,4

Figura 2.2 Comparação do nível de defeitos gerados por processos classificados em diferentes níveis de sigma [12].

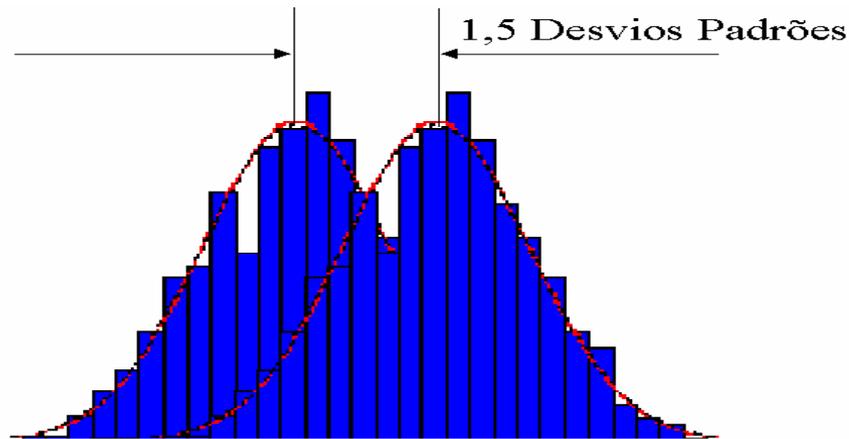
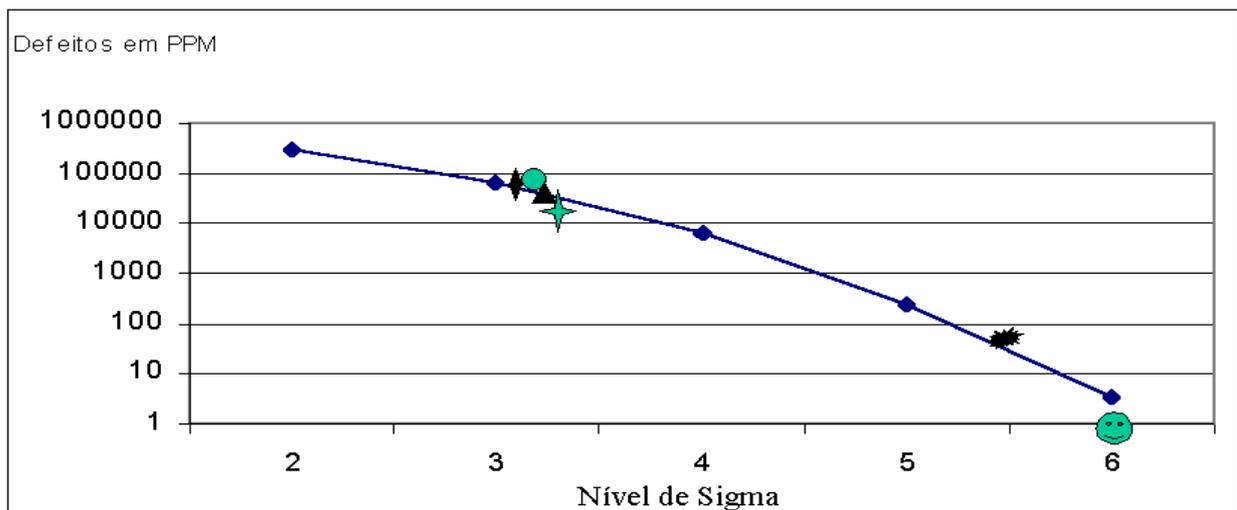


Figura 2.3 Acréscimo de 1,5 desvios padrões a variabilidade do processo devido ao desvio de sua média, que ocorre em diferentes turnos, dias, semanas, máquinas, condições climáticas, etc..



Conta de Restaurante	◆	Manuseio de Bagagem Aeria	✦
Prescrição de Medicamento	●	Processos Melhores da Classe	✱
Rejeição no Recebimento de Materiais	▲	Acidentes Aéreos Fatais	😊

Figura 2.4 Comparação da performance de qualidade de diferentes processos [12]

Na Figura 2.4 compara-se a performance de qualidade de diferentes processos, pelo índice de defeitos gerados, e sua respectiva classificação em nível de sigma. A filosofia do Seis Sigma consiste na continua redução de variação através de uma metodologia que segue as etapas Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (Define, Measure, Analyse, Improve and Control DMAIC) que são representadas na Figura 2.5. A metrologia é a essência da metodologia Seis

Sigma onde a atividade de medir certo é fundamental para o correto direcionamento de ações que possibilitem que se alcance as metas estabelecidas.

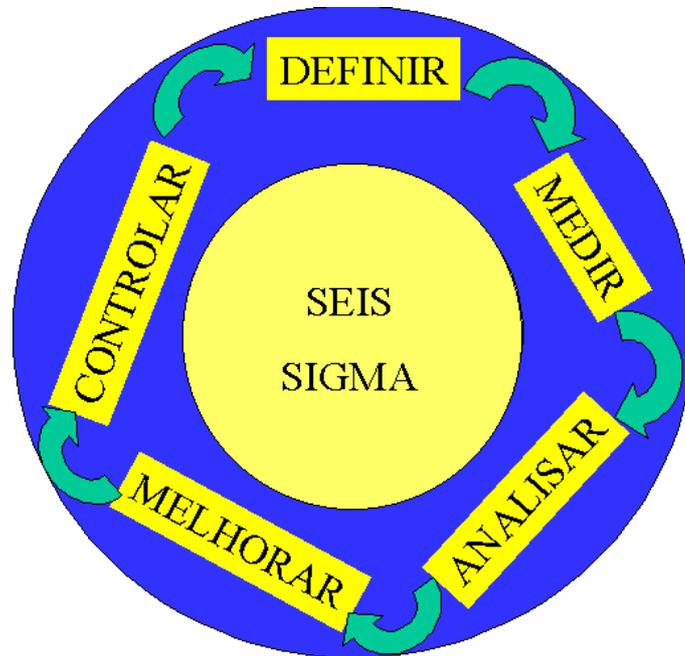


Figura 2.5 Metodologia DMAIC para resolução de problema utilizada no Seis Sigma.

Esta redução de variação é focada em processos onde possa trazer os maiores resultados financeiros para a empresa. A maioria dos programas de melhoria contínua não estão atrelados aos resultados financeiros das empresas, de maneira que a alta administração não possui subsídios para medir e avaliar o impacto destes ao resultado da empresa. A questão financeira tem um papel crucial na metodologia Seis Sigma, de maneira a normalmente estabelecer valores mínimos de retorno financeiro para dar início a um projeto Seis Sigma. Um valor de referência, adotado por empresas de grande porte, como a Delphi, é de US \$ 250 mil de retorno anual [12].

A filosofia Seis Sigma pode ser resumida como uma metodologia estruturada por um conjunto de ferramentas estatísticas focadas na contínua diminuição da variação dos processos gerando resultados financeiros para a empresa com respaldo e gerenciamento dos níveis mais altos da estrutura hierárquica da organização.

2.2 AS FERRAMENTAS DA METODOLOGIA SEIS SIGMA

Neste item serão apresentadas as ferramentas aplicadas em um projeto Seis Sigma desenvolvido em uma linha de usinagem [12][13][14][15][20][21]. As figuras apresentadas ilustram apenas uma parte do resultado produzido pelas respectivas ferramentas durante o desenvolvimento do projeto seis sigma aplicado em uma linha de produção para o desenvolvimento desta dissertação.

2.2.1 TMAP - Mapeamento do Processo de Pensamento

O TMAP (Thought Process Map) é uma ferramenta utilizada para estabelecer, de uma maneira lógica, quais são as etapas a serem seguidas para o desenvolvimento de um projeto, quais são as entradas, saídas e questões a serem respondidas em cada etapa [12][29]. Esta ferramenta, dentro da metodologia Seis Sigma, tem um papel importante na comunicação entre o coordenador do projeto e a alta administração possibilitando verificar em que etapa o projeto se encontra, e quando deverá ser concluído bem como quais os recursos serão necessários em cada etapa.

O TMAP (Figura 2.6) deve contemplar todas as etapas do projeto seguindo a metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) bem como identificar a etapa em que o projeto se encontra. A aplicação desta ferramenta não exige um conhecimento mais aprofundado de metrologia, porém certamente estará indicando a necessidade e planejando datas para atividades tais como coleta de dados, análise dos processos de medição entre outras em que a metrologia deve ser corretamente aplicada para o sucesso do projeto.

TMAP- Thought Process Mapping Reduzir Refugo de Virabrequim Usinado

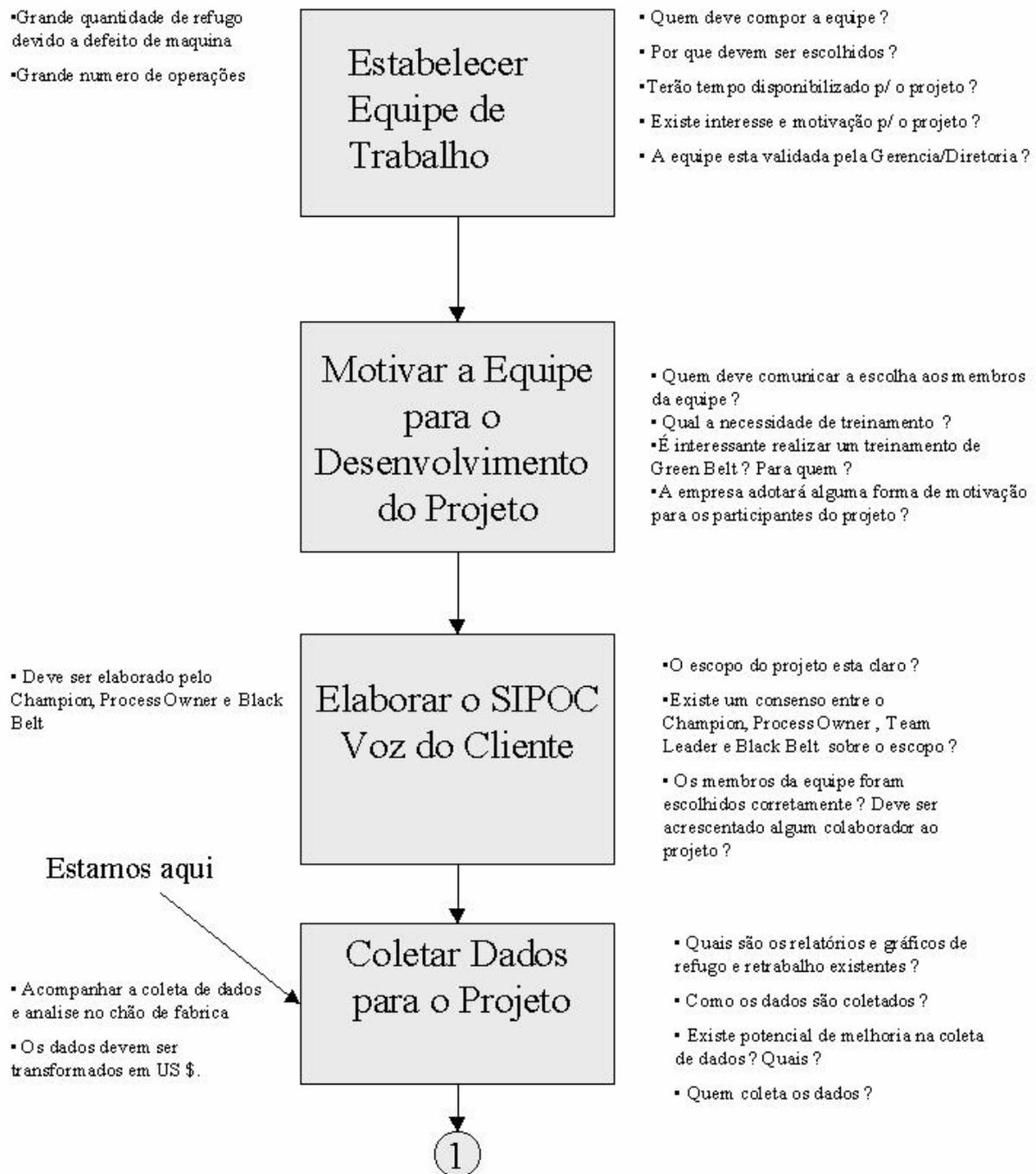


Figura 2.6 TMAP parcial ilustrando as primeiras etapas de um projeto Seis Sigma.

2.2.2 SIPOC – Fornecedor, Entrada, Processo, Saída e Cliente

O objetivo do SIPOC (Supplier Input Process Output Customer) é acessar a voz do cliente e assegurar que o escopo do projeto foi bem estabelecido, compreendido e acordado entre a alta administração da empresa, o coordenador e a equipe do projeto Seis Sigma [12][29]. Para a elaboração do SIPOC deverão estar disponíveis informações tais como:

- Metas financeiras da empresa e do projeto Seis Sigma em questão.
- Níveis de rejeição atual e metas para o projeto.
- Dados sobre o nível de satisfação do cliente sobre o processo (produtos) em análise.
- Comentários e observações quanto as expectativas atuais e futuras do cliente.

O SIPOC é uma ferramenta bastante simples onde são relacionadas as entradas e saídas do processo e suas respectivas especificações (Figura 2.7), para cada entrada deverá ser designado pelo menos um fornecedor da mesma maneira que para cada saída deverá ser designado pelo menos um cliente.

Ao final da elaboração do SIPOC o coordenador do projeto terá um maior conhecimento do processo a ser aprimorado com informações tais como:

- Fronteiras do projeto, onde inicia e onde termina o campo de atuação.
- Lista das entradas e saídas do processo e seus respectivos fornecedores e clientes. Esta informação é fundamental na definição da equipe de trabalho.
- Especificações atuais para as entradas e saídas do processo. Neste ponto normalmente são detectadas falhas ou falta de especificações.

Esta ferramenta exige conhecimento básico do processo de fabricação e processo de medição onde será aplicado o projeto Seis Sigma, de maneira a que possa documentar quais as especificações macro de cada entrada e saída do processo. A aplicação desta ferramenta incrementa o conhecimento do processo de fabricação, incluindo, entre outros, aspectos básicos da metrologia envolvida tais como especificações atuais para os equipamentos de medição.

Suppliers (Providers of the required resources)	Inputs (Resources required by the process)	Process (Top level description of the activity)	Outputs (Deliverables from the process)	Customers (Stakeholders who place the requirements on the outputs)
Fornajaria	Virabrequim forjado	<p>Requirements</p> <ul style="list-style-type: none"> Atender as especificações do desenho 	Virabrequim usinado	<p>Requirements</p> <ul style="list-style-type: none"> Atender as especificações do desenho Atender as quantidades solicitadas no prazo certo <p>EEA (KR 4412)</p> <ul style="list-style-type: none"> Cummins (KR 4545 e 4516) Yuchai (KR 4420) Caterpillar (KR 2057)
Departamento Suprimentos	Ferramentas de Usinagem (rebolo, broca, inserto, etc).	<p>Requirements</p> <ul style="list-style-type: none"> Atender a vida estabelecida Atender as especificações Atender a quantidade 		
Departamento Recursos Humanos	Operadores	Operadores treinados (qualificados)	Resíduos de ferramentas	Engenharia Industrial
<ul style="list-style-type: none"> Engenharia de Processo de Virabrequins Garantia da Qualidade 	Instruções de Trabalho / Folha de seqüência	Documentos atualizados, claros	Resíduos (cavaco, borra de retífica, etc)	Engenharia Industrial
<ul style="list-style-type: none"> Garantia da Qualidade Laboratório Eletrônico 	Equipamentos de medição	R&R menor que 10% da tolerância	Refugo	Engenharia Industrial

Figura 2.7 SIPOC parcial aplicado a um projeto Seis Sigma de redução de refugo

2.2.3 PMAP – Mapa do Processo

Após definido o escopo do projeto dentro da metodologia Seis Sigma é importante realizar um mapeamento do processo. Para o desenvolvimento desta ferramenta é fundamental andar pelo processo de maneira a verificar as diferenças entre:

- O que você pensa que o processo é
- Como o processo foi idealizado
- Como o processo realmente é

Durante o mapeamento do processo é importante verificar e registrar as entradas e saídas de cada etapa do processo bem como verificar a funcionalidade das respectivas especificações, a ferramenta SIPOC deve ser utilizada como um ponto de partida para a elaboração do PMAP [12] [29]. Toda a filosofia do seis sigma é simplificada numa equação.

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (2.1)$$

Ou seja a saída de um processo é função das suas entradas. Na etapa de mapeamento do processo a identificação das entradas do processo (Figura 2.8) é muito importante, pois através do uso de ferramentas tais como FMEA (Seção 2.2.4) e DOE (Seção 2.2.7) identifica-se quais entradas devem ser controladas de maneira a obter a saída almejada.

A classificação das entradas auxilia no desenvolvimento do FMEA e na preparação do DOE, sendo que a participação dos responsáveis pelo processo (por exemplo: operador de máquina, supervisor de produção, engenheiro do processo, engenheiro de manutenção, etc.) é fundamental para maior confiabilidade da informação.

Um PMAP deve permitir uma visualização dos seguintes itens:

- principais atividades do processo;
- variáveis de entrada;
- criticidade das entradas;
- restrições do processo (por exemplo gargalo);
- retrabalho e sub – processos;
- fornecedores;
- clientes;
- saídas do processo.

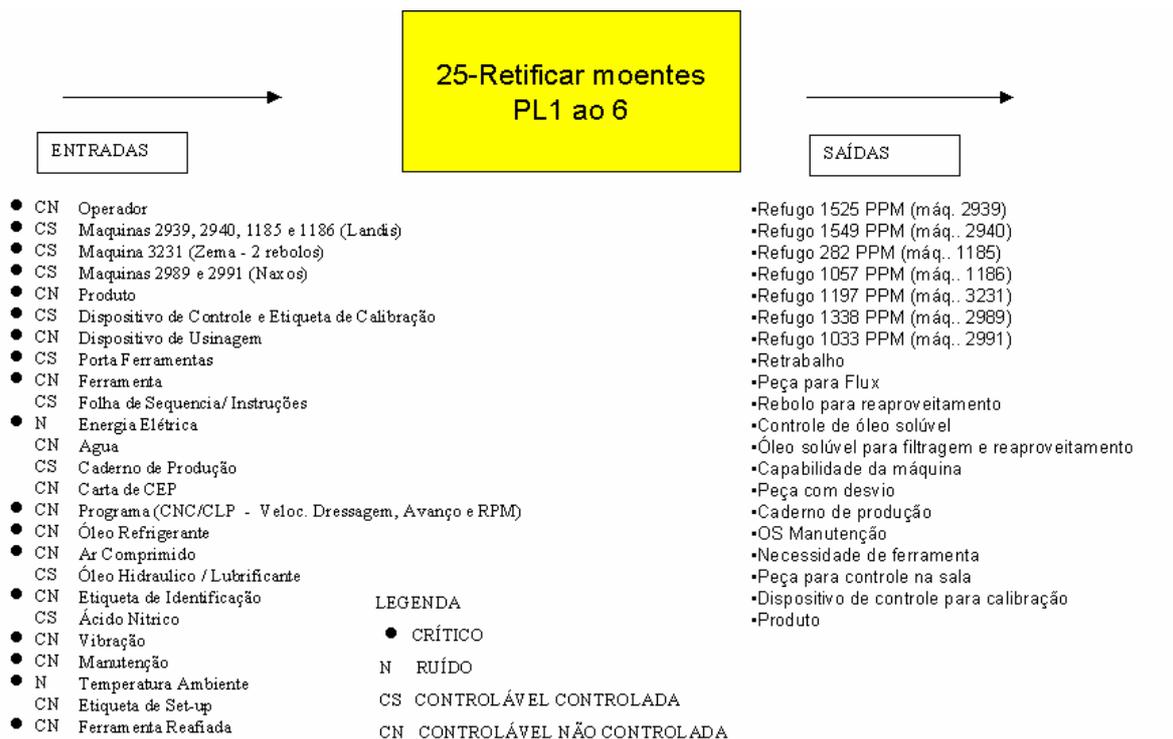


Figura 2.8 PMAP parcial da operação de retificar moentes identificando entradas e saídas. Observa-se a classificação das entradas.

A metrologia também está presente na aplicação desta ferramenta uma vez que neste ponto começam a ser quantificados os desperdícios do processo de fabricação, assim como iniciam a ser identificados quais processos de medição devem ser prioritariamente avaliados.

2.2.4 FMEA - Análise de Modo e Efeitos de Falha

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) é uma ferramenta que vem sendo utilizada desde meados dos anos 60 pela indústria aeroespacial (por exemplo no projeto Apollo), e desde o final dos anos 70 na indústria automobilística [12] [20] [21] [22] [23], sendo posteriormente, com a publicação da QS 9000, uma ferramenta de uso obrigatório na cadeia de fornecimento para montadoras. Esta obrigatoriedade, entretanto, desvirtuou o principal objetivo desta ferramenta sendo verificado, por vezes, empresas com a ferramenta implementada, para todos os processos e produtos fabricados na mesma, porém sem nenhuma ação gerada a partir do FMEA. Com essa abordagem a quantidade passou a ser mais importante do que a qualidade do FMEA e várias empresas passaram a agregar o custo de elaboração de um FMEA, porém não extraíram qualquer benefício desta ferramenta a não ser a certificação de seu sistema da qualidade e a continuidade de fornecimento as montadoras.

A metodologia Seis Sigma resgata o conceito original do FMEA: **Identificar as formas que**

os produtos e processos podem falhar , planejar e executar ações para evita-las.

Dentro da metodologia Seis Sigma o FMEA é realizado por uma equipe multidisciplinar com conhecimento do processo e do produto, motivada e capacitada para identificar e eliminar modos potenciais de falha. Na Figura 2.9 é realizada uma comparação entre o número de ações geradas e operações analisadas em um FMEA antes e após a aplicação de um projeto Seis Sigma em uma linha de usinagem.

O PMAP é uma ferramenta extremamente útil na elaboração do FMEA, pois ele auxilia na priorização da etapa do processo a ser analisada, e funciona como uma lista de verificação das possíveis causas de falha, através das variáveis de entrada do processo.

Na aplicação do FMEA é importante que os membros da equipe conheçam a metrologia envolvida para o controle das causas, dos modos potenciais de falha, possibilitando a atribuição correta de notas para a eficiência da detecção destas causas, uma vez que estas notas auxiliarão na priorização de ações a serem tomadas para prevenir a ocorrência de defeitos.

FMEA	Antes do Seis Sigma	Após o Seis Sigma
Operações Analisadas	50 operações	6 operações
Ações Geradas	Zero ações	227 ações

Figura 2.9 Comparação da utilização do FMEA antes e após a implementação do Seis Sigma em uma linha de usinagem.

2.2.5 NEM – Avaliação Numérica das Métricas

A aplicação do NEM (Numerical Evaluation of Metrics) também não é recente, tendo sido utilizada com o nome de Carta de Controle inicialmente na década de 20, quando Shewart foi acionado pela empresa Western Electric, em Chicago, para auxiliar na busca da uniformidade de seu processo de fabricação [12][19][30].

Shewart notou dois tipos de variação no Processo:

- Variações de causas aleatórias;
- Variações de causas especiais.

Shewart notou dois tipos de erros:

- Atribuir a um resultado uma causa de variação especial, quando na verdade provem de uma causa de variação comum.
- Atribuir a um resultado uma causa de variação comum, quando na verdade provem de uma causa de variação especial.

Os gráficos de controle foram então desenvolvidos no final da década de 20 por Shewart, que definiu controle da seguinte forma "Um fenômeno pode ser considerado controlado quando, através do uso de experiência anterior, pode-se prever, pelo menos dentro de certos limites,

como é esperado que o fenômeno varie no futuro” [19] Deming difundiu o trabalho de Shewart quando se juntou ao departamento de guerra dos Estados Unidos da América e posteriormente quando ensinou fundamentos da qualidade no Japão [12].

Atualmente esta ferramenta é amplamente utilizada nas indústrias com nome de Controle Estatístico do Processo (CEP), porém por muitas vezes sendo tratada como uma ferramenta de uso obrigatório, sem o conhecimento do potencial da ferramenta na busca de uma melhor compreensão das causas de variação do processo.

O nome Numerical Evaluation of Metrics dado a esta ferramenta no Seis Sigma é bastante interessante, pois ele dá início a uma forma diferente de analisar a variação do processo, auxiliando a quebrar os paradigmas como o da obrigatoriedade de implementar cartas de CEP em todos os processos de fabricação, criado durante as décadas de 80 e 90 nas implementações do Controle Estatístico do Processo nas indústrias. O NEM tem como objetivo analisar quais são as fontes de variação do processo, quer sejam causas especiais ou aleatórias, com enfoque em minimizar a variação do processo aplicado a saídas e entradas do processo identificadas como críticas no PMAP ou no FMEA, e não a implementação de cartas de CEP. Dentro deste conceito são realizadas avaliações, a princípio em caráter transitório, no processo, onde é analisada a influência das entradas (por exemplo máquinas, turnos, operadores, matéria prima) do processo no comportamento da saída do mesmo. Após esta análise ações devem ser implementadas para minimizar a variação do processo.

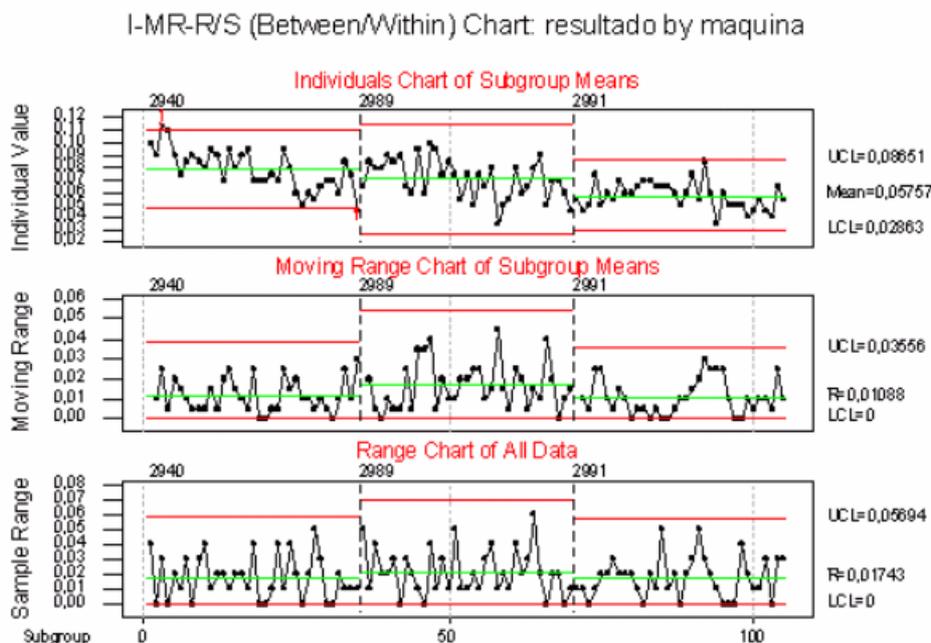


Figura 2.10 NEM aplicado para verificar diferença de variabilidade em 3 retificadoras com relação a característica empenamento.

Na Figura 2.10 observa-se a aplicação da ferramenta NEM em uma operação de usinagem, onde está sendo avaliado a diferença de comportamento de 3 máquinas distintas com relação a característica empenamento.

A confiabilidade metrológica na aplicação do NEM é fundamental, pois através desta ferramenta busca-se analisar a diferença de variabilidade de determinadas fontes de variação do processo tais como máquinas, turnos, etc. e uma excessiva variabilidade do processo de medição pode levar a conclusões completamente equivocadas. Na metodologia 6 Sigma antes da aplicação do NEM é necessário a realização de uma avaliação da variabilidade do processo de medição que será abordado na Seção 2.2.6.

2.2.6 MSE – Avaliação do Sistema de Medição

Antes do início da coleta de dados, para as avaliações do NEM, é fundamental conhecer e minimizar a variação proveniente do processo de medição, através da realização de uma avaliação cuidadosa envolvendo equipamento, operadores, turnos, etc. [12] [13] [28] [30]. O objetivo de um estudo MSE (Measure System Evaluation) é prover uma visão geral sobre os erros de medição. Um estudo MSE identifica e quantifica as diferentes fontes de variação que afetam o processo de medição possibilitando uma ação direta nesta fonte para minimizar esta variação.

A variação do resultado da medição possui duas fontes de variação:

- Variação do processo de fabricação (σ Processo);
- Variação da medição (σ Medição).

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Processo}^2 + \sigma_{Medição}^2 \quad (2.2)$$

Ao realizar um MSE compara-se a magnitude da variação do processo de medição com a magnitude da variação do processo de fabricação, e busca se conhecer as fontes de variação do processo de medição.

Dentro da metodologia Seis Sigma (6σ) busca-se realizar o MSE através de uma seqüência de análises prática, gráfica e analítica.

Nesta dissertação foi adicionada à avaliação do processo de medição, apresentada pela metodologia Seis Sigma, uma macro análise dos mesmos, de maneira a possibilitar uma visão geral da eficácia dos processos de medição existentes, permitindo aperfeiçoar o sistema de gerenciamento, e até mesmo proporcionar que novos processos de medição, a serem adquiridos pela empresa, sejam mais robustos as falhas dos processos atualmente em uso. No capítulo 3 será apresentado uma metodologia para avaliação do processo de medição.

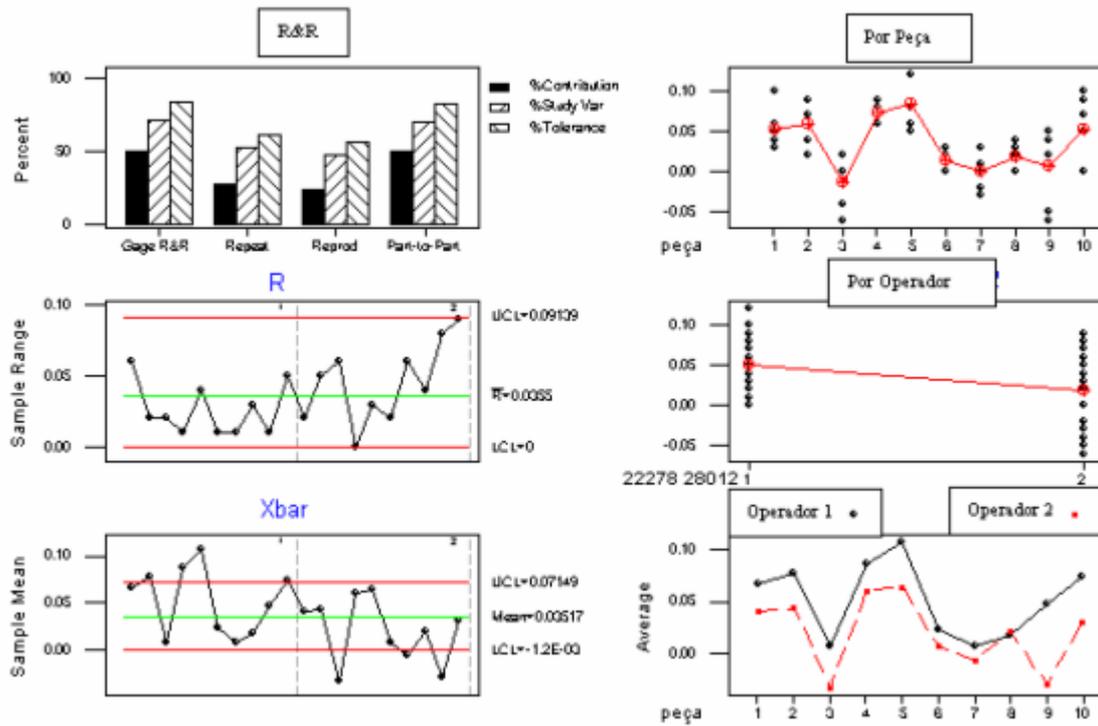


Figura 2.11 Aplicação de MSE em processo de medição de diâmetro em uma operação de fresamento.

2.2.7 DOE – Delineamento de Experimentos

A ferramenta DOE é extremamente poderosa para verificar quais as principais fontes de variação de um processo de manufatura e auxilia na determinação do melhor ajuste do processo, porém a utilização da mesma deve ser cuidadosamente preparada, através da utilização das ferramentas FMEA, PMAP e NEM, que devem ser aplicadas por uma equipe com experiência no processo a ser analisado, pois desta maneira o número de experimentos necessários diminui, já que as experiências, vivenciadas pela equipe, podem direcionar e acelerar os experimentos, diminuindo consequentemente o custo da aplicação dos mesmos [13][14][15][30][49]. Com a finalidade de aumentar a confiabilidade nos resultados obtidos de um DOE, recomenda-se que os processos de medição envolvidos sejam cuidadosamente avaliados, e tenham sua variabilidade minimizada antes da realização do mesmo. A metrologia aqui se destaca, pois se os processos de medição não possuírem uma incerteza de medição adequada à variabilidade do processo de fabricação, para cada condição testada (experimento), então todo o experimento poderá ser inútil para minimizar a variabilidade do processo de fabricação, gerando apenas custos adicionais.

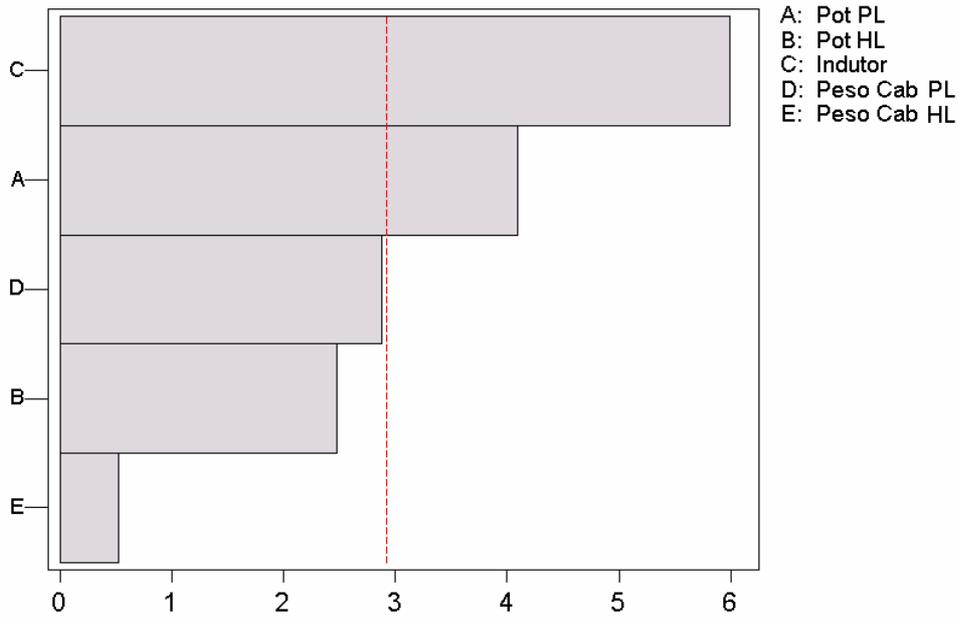


Figura 2.12 Principais fatores de influência no empenamento de um virabrequim durante o tratamento térmico ($\alpha = 0,10$).

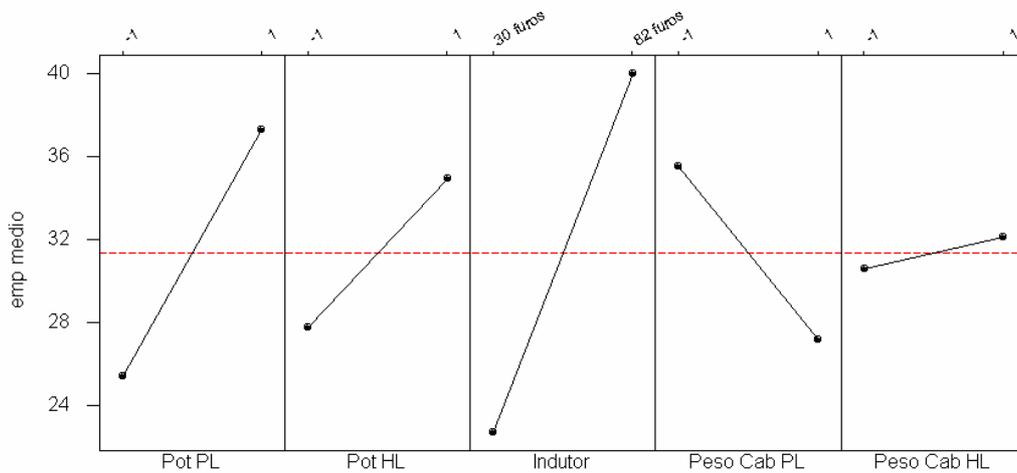


Figura 2.13 Indicação gráfica do melhor ajuste do processo para minimizar o empenamento de um virabrequim.

O gráfico da Figura 2.12 demonstra que os fatores Número de Furos do Indutor e Potência do PL, potência de aquecimento do moente, tem influência significativa no empenamento de um virabrequim, na operação de tratamento térmico.

Na Figura 2.13 observa-se que os menores valores de empenamento foram obtidos com os fatores Indutor, Pot PL, Pot HL, Peso Cab HL no nível baixo (-1) e o Peso Cab PL no nível alto (+1), indicando este como sendo o melhor ajuste da operação de tratamento térmico, para minimizar o empenamento do virabrequim, considerando-se o fato de nenhuma interação analisada ter um impacto significativo no experimento.

Ressalta-se neste ponto mais uma vez a importância da metrologia na análise dos resultados do experimento, que, por exemplo, ao verificar a pequena diferença dos resultados obtidos para o empenamento do virabrequim no nível alto (+1) e no nível baixo (-1), associado a variabilidade do processo de medição indica que este parâmetro do processo de fabricação não necessita ser controlado. Por outro lado o impacto do ajuste da potência de aquecimento no empenamento do virabrequim, indica a necessidade de manter o processo de medição deste parâmetro sob controle e com baixa variabilidade. É importante perceber, que todo erro de medição passa automaticamente a formar parte das especificações do processo (ou do produto) quando se usa o DOE, especialmente os erros sistemáticos não conhecidos e corrigidos.

O Seis Sigma traz para a indústria uma quebra de paradigmas quanto a complexidade e aplicabilidade desta ferramenta, através da formação de Black Belts, que recebem um extenso treinamento sobre esta ferramenta, e também através da utilização de um software que simplifica o planejamento do DOE e principalmente a análise do mesmo.

2.2.8 Controle

O controle é uma ferramenta para assegurar que os resultados obtidos, nos projetos Seis Sigma, sejam mantidos ao longo do tempo [16] [49]. Esta é uma das diferenças da metodologia Seis Sigma e outras metodologias de melhoria contínua, na metodologia Seis Sigma é "obrigatório" o desenvolvimento de um Plano de Controle que deve ser aplicado não necessariamente para controlar o produto ou o processo e sim para verificar se as ações que foram implementadas e levaram o processo a atingir os objetivos estabelecidos continuam sendo utilizadas de maneira eficaz (Figura). A manutenção dos resultados alcançados pela aplicação da metodologia Seis Sigma depende do comprometimento do dono do processo em executar o Plano de Controle.

A fase final do processo de Seis Sigma é a fase de Controle.

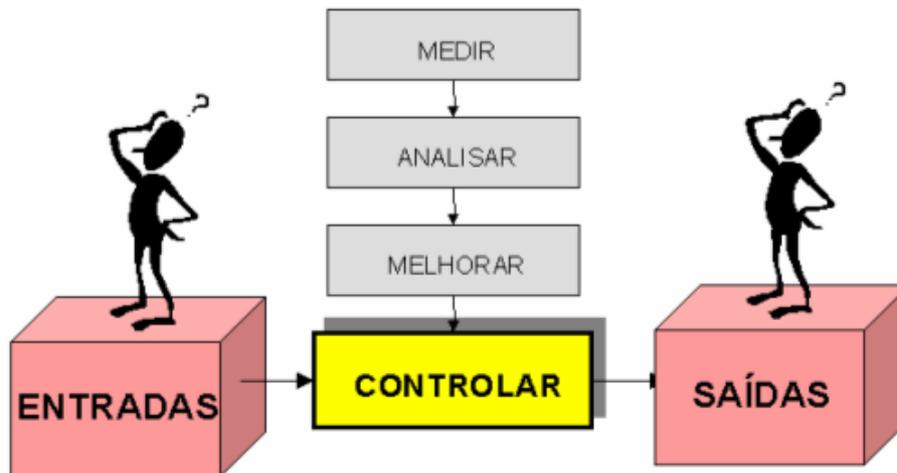


Figura 2.14 Após a implementação de melhorias deve ser implementado controles para mantê-las [16].

O desenvolvimento do Plano de Controle, para manter os resultados do projeto, deve ser realizado pela equipe do projeto e aprovado pelo dono do processo. Recomenda-se que a responsabilidade de implementação do Plano de Controle seja do dono do processo. A Figura 2.15 traz um Plano de Controle parcial, elaborado para monitorar o resultado de um projeto Seis Sigma em uma linha de usinagem.

A metrologia é a base para a aplicação da ferramenta Controle, pois através da metrologia serão monitoradas as ações implementadas. Uma das principais atividades desta etapa é manter a disciplina quer seja dos operadores, quer seja dos supervisores, ou qualquer outra pessoa que tenha responsabilidade em manter a eficácia das ações implementadas. A ação mais elementar nesta etapa é diminuir o tempo de resposta a um aviso de aumento de variabilidade ou desvio do processo, como por exemplo, o estabelecimento de cartas de controle estatístico para as entradas ou saídas críticas do processo. Outro ponto importante é que o dono do processo passe a efetuar o gerenciamento dos resultados em intervalos de tempo menores, no caso do projeto Seis Sigma implementado durante o desenvolvimento desta dissertação, este prazo passou de 1 mês para 1 dia, acompanhado por uma apresentação mensal dos resultados do projeto, realizada pelo dono do processo, para a alta administração da empresa.

PLANO DE CONTROLE DO PROCESSO & TRANSIÇÃO		Data: 28/02/02
PROCESSO	USINAGEM DE VIRABREQUIM	
ETAPA DO PROCESSO	FRESAR E RETIFICAR MOENTES	
MELHORIA ESPECÍFICA	DISTRIBUIÇÃO DE SOBREMETAL NAS FRESADORAS DE MOENTES DE MODO A GERAR UM MENOR ESFORÇO (REGIÃO DESFAVORÁVEL AO EMPENAMENTO) NA RETIFICA DE MOENTES	
SAÍDA	MEIO CURSO RETIFICA	
PARÂMETRO DE CONTROLE	MEIO CURSO FRESADORA	
PERFORMANCE	Cpk > = 2	
CONTROLES REQUERIDOS	MEDIR MEIO CURSO COM DISPOSITIVO	
RESPONSÁVEL	ENCARREGADO	OPERADOR
FREQUENCIA	2 PEÇAS POR TURNO	3 PEÇAS A CADA 10 PEÇAS PRODUZIDAS
REGISTRO	CARTA DE CEP COM IDENTIFICAÇÃO DO ENCARREGADO NO DIÁRIO DE BORDO	CARTA DE CEP
PLANO DE REAÇÃO	TREINAMENTO DOS OPERADORES EM CEP	VERIFICAR VARIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO, AJUSTES DO PROCESSO E ESTADO DE MANUTENÇÃO DA FRESADORA
OBSERVAÇÕES	RESPONSÁVEL EM ALTERAR INSTRUÇÕES DE CONTROLE ABREU, RESPONSÁVEL EM ALTERAR FOLHE DE SEQUÊNCIA DO PROCESSO SANDRO	RESPONSÁVEL EM IMPLEMENTAR E MANTER CARTA DE CEP E FORNECER PERFORMANCE DO MÊS FERNANDO
PRAZO PARA IMPLEMENTAÇÃO	15/02/02	15/02/02

Figura 2.15 Plano de Controle parcial aplicado a um de um projeto Seis Sigma.

Capítulo 3

MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

A variabilidade do processo de medição tipicamente consiste de diferentes componentes, tais como sistema de medição, operador, método, etc. Neste capítulo, apresenta-se uma metodologia para avaliação dos processos de medição, existentes em uma empresa industrial. Esta metodologia abrange desde a seleção do processo de medição a ser analisado até a recomendação e verificação de ações para a otimização do mesmo. A seqüência de passos a serem seguidos obedece a ordem dos itens deste capítulo.

3.1 SELECIONAR O PROCESSO DE MEDIÇÃO A SER AVALIADO

De maneira ideal deve-se avaliar todos os processos de medição de uma empresa, porém na prática para as indústrias isto é inviável devido a elevada quantidade dos mesmos e conseqüente alto custo desta avaliação. Dentro da filosofia Seis Sigma com foco em resolver problemas através da diminuição da variação em processos ou produtos gerando uma melhora nos resultados financeiros da empresa, a seleção do processo de medição a ser avaliado prioritariamente é realizada através da análise da criticidade das variáveis de entrada ou das características de saída do processo (ou produto) identificadas no PMAP ou no FMEA onde foi recomendado um estudo NEM ou um Delineamento de Experimento (DOE) para avaliar a influência das diversas fontes de variação no indicador chave do projeto Seis Sigma (esta dissertação foi desenvolvida no contexto de um projeto Seis Sigma com meta de diminuição do refugo em uma linha de usinagem). Desta forma obtém-se mais facilmente o compromisso da administração da empresa quanto ao fornecimento dos recursos que se fizerem necessários, visto tratar se de um processo crítico para a empresa.

3.2 DESENVOLVER A ESTRATÉGIA DE AVALIAÇÃO

A estratégia a ser utilizada na avaliação do processo de medição é de fundamental importância no estudo, uma vez que dependendo da mesma será ou não possível analisar a influência dos fatores que podem afetar o processo de medição.

Imagine a seguinte situação :

Um processo de medição do diâmetro de $50,01 \pm 0,01$ mm foi identificado como crítico para o resultado do processo de fabricação do produto X. O supervisor da produção preocupado com o índice de rejeição ocorrido no último lote solicita ao departamento de Qualidade uma avaliação da variabilidade deste processo de medição.

O departamento de Qualidade se prontifica a realizar a avaliação. Verificando que o processo de medição deste diâmetro é utilizado por um operador por turno e que o processo de fabricação do produto X trabalha em regime de três turnos o técnico da Qualidade conclui que João, Pedro e Gabriel que revezam turnos nesta operação e deveriam participar da avaliação.

Qualidade então procura o supervisor da produção e comenta que faria a avaliação do processo de medição em uma semana, pois deveria realizá-la com os operadores Pedro, João e Gabriel. O técnico da Qualidade complementa dizendo que iniciará esta avaliação somente no dia 20 do próximo mês, para que possa coletar amostras representativas da variabilidade do processo atual de fabricação do produto X, já que o próximo lote do mesmo será produzido do dia 15 a 25 do próximo mês.

O supervisor da produção fica irritado e solicita que a avaliação fique pronta até amanhã no final da tarde e que pode ser feita com 5 peças que foram produzidas em seqüência nesta operação no final do último lote as quais foram classificadas como refugo, porém ainda não foram fisicamente sucateadas e que as medições podem ser realizadas por ele mesmo e mais dois inspetores da sala de metrologia.

Qualidade então responde que iniciará agora mesmo esta avaliação e que o resultado estará pronto antes do final da tarde de hoje.

Esta história é fictícia, porém algo similar pode ocorrer no dia a dia de uma empresa. Com a estratégia definida para o estudo descrita nesta história, a conclusão do estudo muito provavelmente não refletirá as variações normais do processo, tanto em relação ao processo de medição quanto em relação ao processo de fabricação. Conseqüentemente poderá acarretar em uma falha no estabelecimento de eventuais ações corretivas, gerando custos desnecessários ou não resolvendo o problema em questão.

O planejamento da avaliação do processo de medição deve incluir as seguintes considerações:

- Horário de utilização do sistema de medição (exemplo: 2 turnos ou 3 turnos).
- Número de usuários (ex: 2 operadores).
- Número de peças a serem medidas.
- Número de medições em cada peça.
- Quem são os usuários do sistema de medição (nome ou número de identificação).
- Tipo de amostragem a ser utilizada, por exemplo:
 - 5 peças produzidas em seqüência na mesma máquina.
 - 10 peças produzidas em dias consecutivos de trabalho numa mesma máquina.
- Quem irá coordenar a coleta de dados.
- Como as peças serão identificadas.
- Onde, quando e por quem será realizada a coleta de dados.

3.3 PREPARAÇÃO PARA A COLETA DE DADOS

O formulário de coleta de dados deve conter campos de forma ordenada de maneira a facilitar o registro dos dados referentes às medições a serem realizadas. Este requisito normalmente é atendido, porém deve ser ressaltado que não é só o valor das medições que precisa ser registrado, mas também informações tais como:

- Nome, registro e função dos avaliadores;
- Número da peça (número do desenho);
- Número de série das peças a serem avaliadas;
- Número e nome dos sistemas de medição;
- Nome e especificação da característica a ser medida;
- Data do estudo;
- Nome do coordenador do estudo;
- Origem das peças (exemplo: 5 peças produzidas em seqüência pela máquina 2989);
- Ocorrências não previstas;
- Observações realizadas pelo coordenador do estudo durante as medições;
- Observações e comentários do usuário.

Pois estas informações é que permitirão rastrear qual estratégia foi utilizada para a realização da avaliação do processo de medição, permitindo uma análise mais precisa e conseqüentemente mais assertiva no direcionamento de ações corretivas.

Nesta etapa também devem ser verificados e registrados se os sistemas de medição atendem as condições básicas estabelecidas pela empresa para a realização do controle do processo, como, por exemplo, estar calibrado, possuir resolução menor ou igual a 10% da tolerância e histórico das avaliações anteriores.

3.4 COLETAR AMOSTRAS

Ao segregar as amostras é importante saber o histórico da mesma de maneira a verificar a possibilidade desta representar uma variação especial do processo.

As peças deverão ser identificadas e segregadas para posterior medição. Esta segregação tem por objetivo minimizar eventuais efeitos de variação de temperatura ou outro fator de variação do resultado da medição, que venha a “mascarar” o resultado da avaliação, antes de iniciar as medições para a realização do estudo.

É importante ressaltar que o objetivo deste procedimento é buscar uma condição que reflita a real variabilidade do processo de fabricação/medição, de forma ideal o produto a ser medido deveria estar na condição em que normalmente é medido de maneira a possibilitar a verificação da variabilidade do processo de medição na condição em que este é utilizado na prática. Porém, muitas vezes isto não é possível (ou inviável), como por exemplo, ao se medir o diâmetro de uma peça de aço que tenha acabado de ser retificada cuja temperatura normalmente é superior à temperatura ambiente chegando a atingir temperaturas de 40 °C ao serem medidas logo após a sua fabricação.

3.5 EFETUAR AS MEDIÇÕES E REGISTRAR

Antes de realizar as medições é importante explicar para os operadores a finalidade do estudo de maneira a evitar a introdução de causas especiais de variação do processo de medição.

As peças a serem medidas devem ser ordenadas de uma maneira aleatória e não permitir que o operador consiga identificar qual a peça que está medindo. É recomendado que o coordenador do estudo disponibilize as peças para o operador de forma unitária, ou seja, uma peça por vez, e não permita que o operador leia os registros dos dados antes que todas as medições tiverem sido realizadas.

Após ter sido efetuado o primeiro ciclo de medições, todas as peças tiverem sido medidas uma vez, o coordenador deverá disponibilizar as peças também de forma aleatória, porém em uma outra ordem, diferente da realizada anteriormente, repetindo este ciclo quantas repetições e para quantos operadores tiver sido planejado.

É importante ressaltar que o coordenador do estudo deverá registrar além dos resultados das medições realizadas qualquer ocorrência ou observação que o mesmo acreditar que poderá influenciar no estudo.

3.6 ANÁLISE PRÁTICA DOS RESULTADOS DO ESTUDO

Devem ser realizadas três tipos de análise do resultado do estudo, preferencialmente na seguinte ordem: Prática , Gráfica e Analítica [12][30].

Na análise prática devem ser avaliadas todas as observações e comentários realizados pelos

operadores e pelo coordenador do estudo, devendo este último estar presente para explicar e discutir eventuais dúvidas sobre as anotações realizadas.

Recomenda-se que durante a análise prática se visite novamente o local de utilização do sistema de medição e se registre, se possível através de fotos, eventuais problemas identificados no processo de medição.

Tipicamente nesta análise se verifica problemas relacionados com a ergonomia do processo de medição, estado de manutenção do sistema de medição, identificação dos sistemas de medição e treinamento dos operadores.

3.7 ANÁLISE GRÁFICA DOS RESULTADOS

A análise gráfica permite uma fácil e rápida interpretação dos dados para a verificação da estabilidade, discriminação, comparação de variabilidade do processo de medição com a variabilidade e tolerância do processo de fabricação, assim como a análise da diferença do resultado da medição dos operadores e peças. Recomenda se a utilização de um software estatístico para a realização desta análise. No desenvolvimento desta dissertação utilizou se o software Minitab Versão 13.1 [35].

3.7.1 Estabilidade a Curto Prazo

Para iniciar a análise gráfica gera-se o gráfico das Amplitudes, onde se verifica a estabilidade do processo de medição [11][12][27][28][30]. Os dados da Figura 3.1 são de uma avaliação do processo de medição de virabrequins e estão registrados em milésimos de milímetros.

Peças		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	Medição 1	443,015	442,971	442,995	442,977	442,984	443,020	443,022	442,972	443,006	442,998
	Medição 2	443,011	442,971	442,993	442,978	442,983	443,025	443,024	442,973	443,007	442,999
	Medição 3	443,016	442,975	442,994	442,977	442,980	443,020	443,022	442,974	443,008	442,999
	R	0,005	0,004	0,002	0,001	0,004	0,005	0,002	0,002	0,002	0,001
	Média	443,014	442,972	442,994	442,977	442,982	443,022	443,023	442,973	443,007	442,999
Operador B	Medição 1	443,012	442,972	442,995	442,976	442,980	443,024	443,022	442,972	443,008	443,000
	Medição 2	443,013	442,972	442,992	442,976	442,980	443,020	443,026	442,972	443,008	442,999
	Medição 3	443,013	442,973	442,992	442,979	442,984	443,024	443,026	442,973	443,008	443,000
	R	0,001	0,001	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,001	0,000	0,001
	Média	443,013	442,972	442,993	442,977	442,981	443,023	443,025	442,972	443,008	443,000

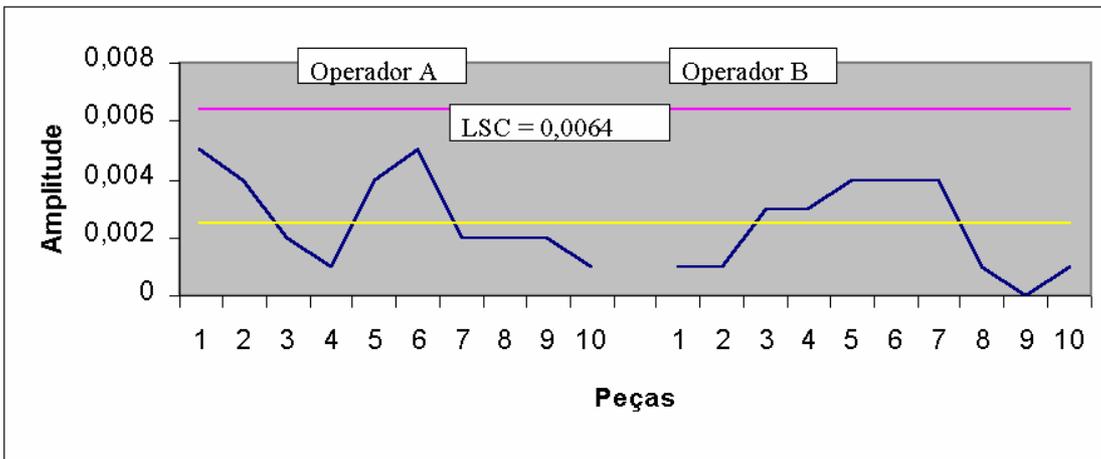


Figura 3.1 Avaliação da estabilidade do processo de medição de comprimentos

O gráfico das amplitudes mostrado na Figura 3.1 mostra que o processo de medição de comprimentos esta sob controle, ou seja não apresenta sinais de instabilidade, como por exemplo pontos fora dos limites de controle (LSC), indicando portanto que o processo de medição é estável. Nota-se que esta análise não permite avaliar a estabilidade da tendência, a qual pode ser analisada através de um gráfico de controle da medição de um padrão ao longo do tempo.

A aptidão de um processo de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo [27] é a definição de estabilidade adotada nesta dissertação.

3.7.2 Discriminação

Através da análise do gráfico das amplitudes pode se analisar, também, a capacidade do processo de medição em detectar a variabilidade do próprio processo de medição.

Esta capacidade possui uma relação direta com a resolução do sistema de medição. Uma discriminação baixa poderá levar o avaliador a concluir que o processo de medição não é estável quando em realidade ele é.

Os dados da Figura 3.2 foram extraídos da Figura 3.1 arredondando cada valor para o valor correspondente mais próximo em centésimos de milímetros. Valores terminados em 5 foram arredondados para o valor maior em centésimos de milímetro mais próximo.

Peças		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Operador A	Medição 1	443,02	442,97	443,00	442,98	442,98	443,02	443,02	442,97	443,01	443,00
	Medição 2	443,01	442,97	442,99	442,98	442,98	443,03	443,02	442,97	443,01	443,00
	Medição 3	443,02	442,98	442,99	442,98	442,98	443,02	443,02	442,97	443,01	443,00
	R	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Média	443,02	442,97	442,99	442,98	442,98	443,02	443,02	442,97	443,01	443,00
Operador B	Medição 1	443,01	442,97	443,00	442,98	442,98	443,02	443,02	442,97	443,01	443,00
	Medição 2	443,01	442,97	442,99	442,98	442,98	443,02	443,03	442,97	443,01	443,00
	Medição 3	443,01	442,97	442,99	442,98	442,98	443,02	443,03	442,97	443,01	443,00
	R	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	Média	443,01	442,97	442,99	442,98	442,98	443,02	443,03	442,97	443,01	443,00

Figura 3.2 Tabela de dados do processo de medição de comprimentos com valores arredondados.

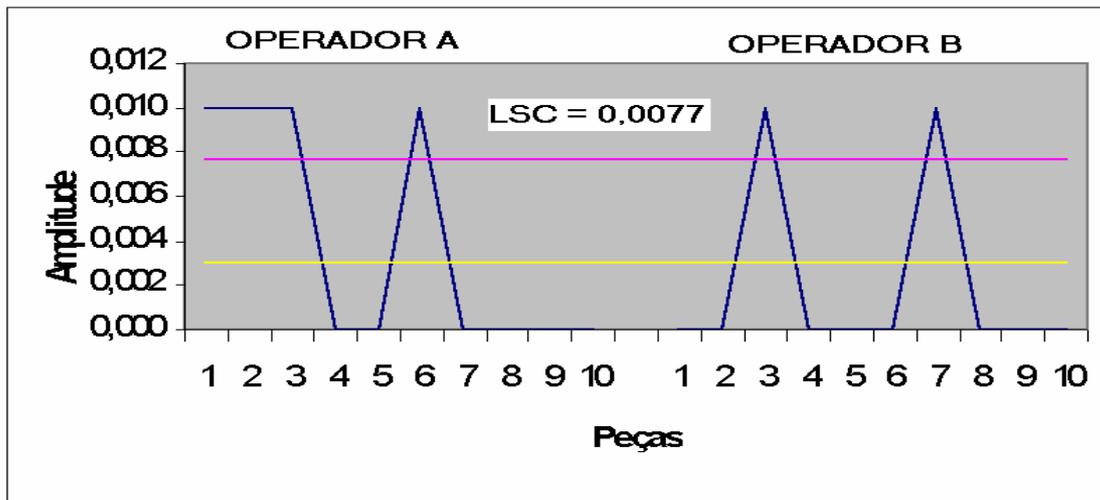


Figura 3.3 Avaliação da estabilidade do processo de medição de comprimentos com dados arredondados

Os pontos fora de controle da carta de amplitude da Figura 3.3 pode induzir o avaliador a concluir que o processo de medição não é estável. Porém, eles foram “criados” por um excessivo arredondamento dos dados, que acarretou numa diminuição da capacidade do processo de medição em detectar a variabilidade do próprio processo de medição. Nesta dissertação esta capacidade será denominada Discriminação.

A verificação da adequação da discriminação de um processo de medição consiste da comparação do número de pontos possíveis entre os limites de controle na carta das amplitudes [11][12][30], cuja a condição limítrofe é mostrada na tabela da Figura 3.4. O cálculo dos limites de controle, nesta condição limítrofe, é realizado adotando-se o desvio padrão igual a resolução do processo de medição.

Tamanho do subgrupo (n)	Limite Inferior de Controle (LIC)	Limite Superior de Controle (LSC)	Valores possíveis para a amplitude dentro dos limites de controle	Número de pontos possíveis para a amplitude dentro dos limites de controle
2	-	3,69	0,1,2,3	4
3	-	4,36	0,1,2,3,4	5
4	-	4,70	0,1,2,3,4	5
5	-	4,92	0,1,2,3,4	5
6	-	5,08	0,1,2,3,4,5	6
7	0,21	5,20	1,2,3,4,5	5
8	0,39	5,31	1,2,3,4,5	5
9	0,55	5,39	1,2,3,4,5	5
10	0,69	5,47	1,2,3,4,5	5

Figura 3.4 Tabela para análise da adequação da discriminação do processo de medição [11].

A seguinte regra é utilizada para a verificação da adequação da discriminação do processo de medição:

- Quando o gráfico de amplitude apresenta mais que 5 (4 para $n=2$) pontos possíveis entre os limites de controle então o processo de medição possui discriminação adequada.
- Quando o gráfico de amplitude apresenta menos que 5 (4 para $n=2$) pontos possíveis entre os limites de controle então o processo de medição não possui discriminação adequada.
- Quando o gráfico de amplitude apresenta 5 (4 para $n=2$) pontos possíveis entre os limites de controle indica que o processo de medição está em uma situação limítrofe quanto a adequação de sua discriminação.

Aplicando esta regra para analisar o processo de medição da Figura 3.1 nota-se que o mesmo possui uma discriminação adequada, visto que apresenta 7 pontos possíveis entre os limites de controle (0,1,2,3,4,5 e 6 μm).

Efetuando-se a mesma análise para o processo de medição da Figura 3.3, verifica-se que o processo de medição não possui uma discriminação adequada, pois apresenta apenas 1 ponto possível (0) entre os limites de controle uma vez que os dados são apresentados em centésimos de milímetros.

Outra consideração deve ser realizada, quando comparados os gráficos com dados em milésimos (Figura 3.1) e em centésimos (Figura 3.3) de milímetros, é que um processo de medição estável pode ser erroneamente classificado como instável devido ao mesmo possuir uma discriminação inadequada.

Tipicamente existem duas causas para que um processo de medição não apresente boa discriminação:

- Sistema de medição possui baixa resolução
- Os dados coletados são truncados para evitar reportar “ruídos”.

3.7.3 Erro Aleatório de Medição

A análise gráfica do erro aleatório de medição consiste na comparação da distância entre os limites de controle do gráfico das médias das medições (erro aleatório de medição) com a distância entre a maior e a menor média do mesmo gráfico (variação do processo de fabricação), como ilustrado na Figura 3.5.

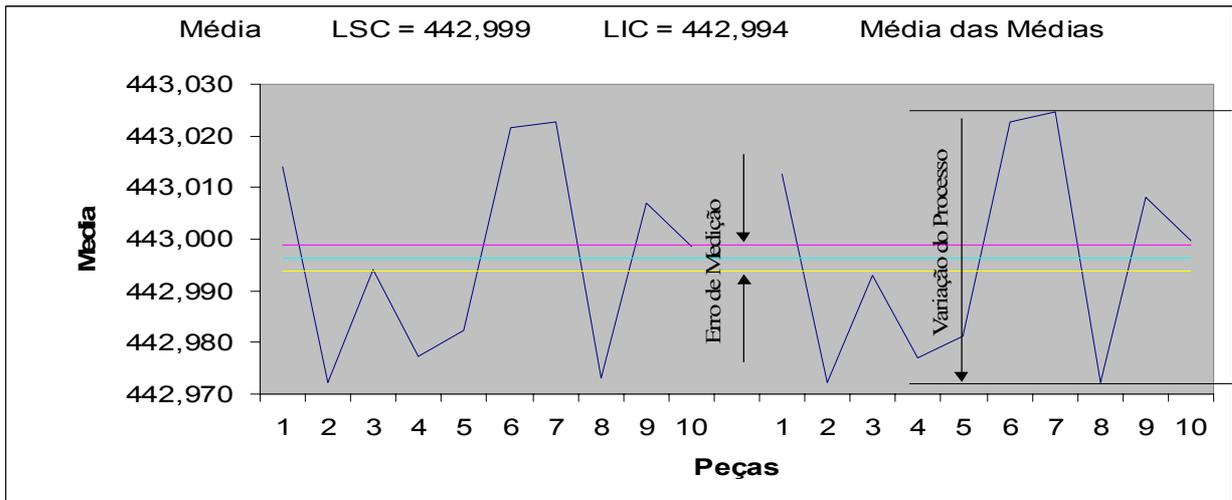


Figura 3.5 Comparação do erro de medição de comprimentos com a variação do processo de fabricação

Uma vez que os limites de controle neste gráfico são calculados pelas fórmulas:

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R} \tag{3.1}$$

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R} \tag{3.2}$$

E R é a amplitude das medições, a distância entre os limites de controle é uma boa estimativa para o erro de medição.

Uma regra para efetuar a avaliação gráfica do erro de medição utilizando o gráfico das médias [12], apresentado na Figura 3.5, é descrita a seguir:

- Se todos os pontos do gráfico das médias caírem dentro dos limites de controle, então o erro de medição é maior que a variação do processo de fabricação. Portanto o processo de medição é inadequado para analisar a variabilidade do processo de fabricação.
- Se menos da metade dos pontos do gráfico das médias caírem dentro dos limites de controle, então o processo de medição pode ser inadequado para detectar a variabilidade do processo de fabricação.
- Se menos de um quarto dos pontos do gráfico das médias caírem dentro dos limites de controle, então o erro de medição é adequado para analisar a variabilidade do processo de fabricação.

Aplicando-se esta regra para analisar o gráfico da Figura 3.5 verifica-se que menos de um quarto dos pontos encontram-se dentro dos limites de controle, indicando que o processo de medição de comprimentos é adequado para detectar a variabilidade do processo de fabricação.

3.7.4 Reprodutibilidade

O gráfico das médias das medições de comprimento de virabrequins realizadas por cada operador, é apresentado na Figura 3.6 . Os dados utilizados para a construção deste gráfico foram extraídos da tabela apresentada na Figura 3.1.

Pode se notar através do gráfico da Figura 3.6 que a média das 3 medições realizadas por cada operador para cada peça são similares, proporcionando que o gráfico das médias do operador A praticamente se repita para o operador B, indicando que o processo de medição apresenta boa reprodutibilidade para os operadores A e B.

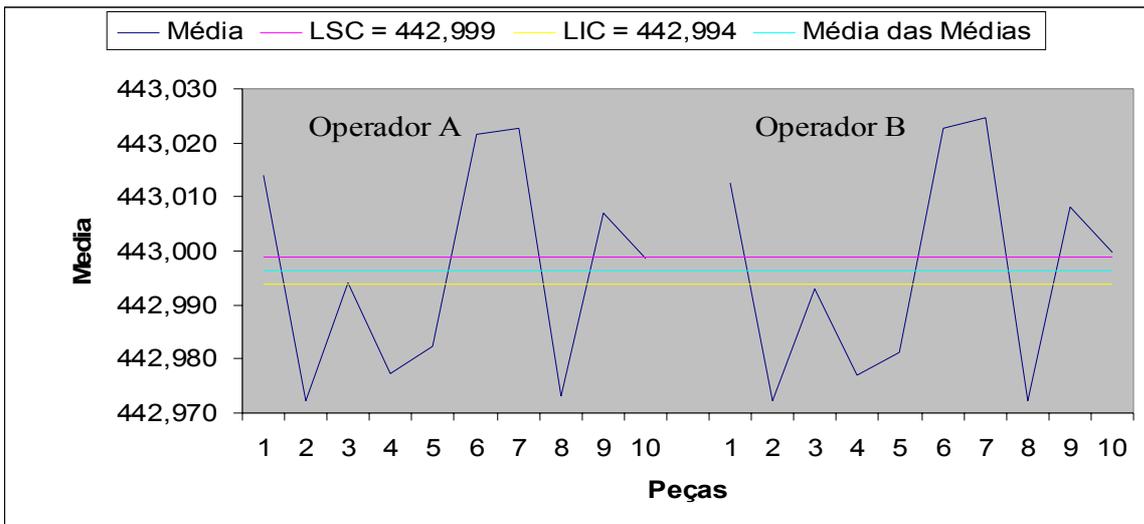


Figura 3.6 Avaliação da Reprodutibilidade do processo de medição de comprimentos.

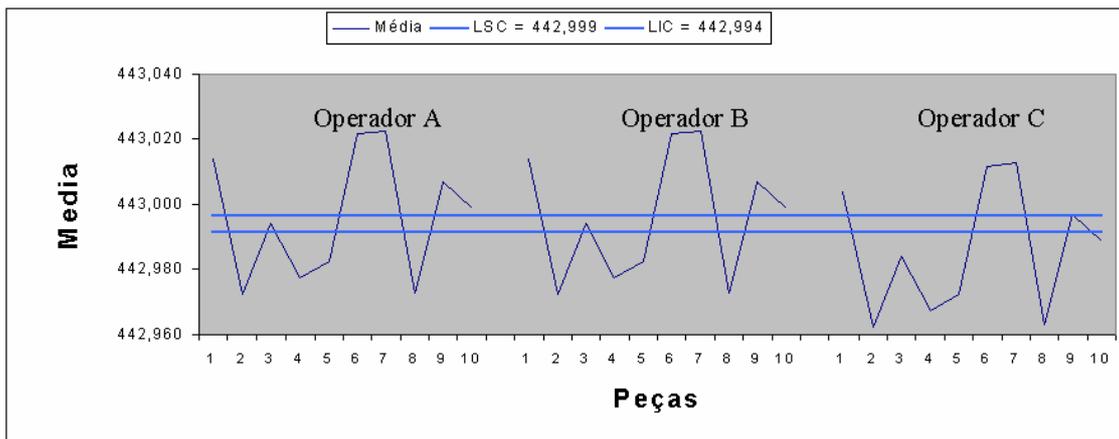


Figura 3.7 Baixa reprodutibilidade, mesmo padrão de gráfico porém em níveis diferentes

Na Figura 3.7 é mostrado um exemplo fictício de processo de medição apresentando baixa reprodutibilidade devido ao desvio dos resultados das medições realizadas pelo operador C em relação aos resultados obtidos pelos operadores A e B, apesar dos três operadores apresentarem o mesmo padrão de gráfico.

Outro tipo de processo de medição com baixa reprodutibilidade é apresentado na Figura 3.8 ,

onde, apesar dos três operadores apresentarem médias globais similares, o padrão do gráfico das médias para cada operador é diferente. Pode se observar, por exemplo, que as médias obtidas para a peça 5 pelos operadores A e C são “similares” porém bastante diferentes da média obtida pelo operador B.

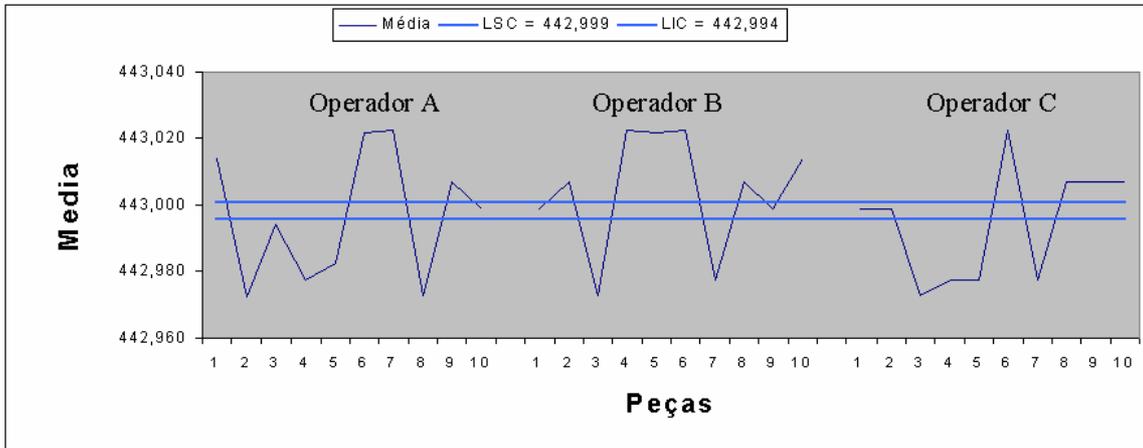


Figura 3.8 Baixa reprodutibilidade notada por diferentes padrões de gráfico

Nesta dissertação será adotada a seguinte definição para reprodutibilidade: Reprodutibilidade é a variação na média das medições realizada por diferentes operadores utilizando o mesmo instrumento de medição para medir característica idêntica nas mesmas peças [27].

3.7.5 Medições por Peça

Uma análise da dispersão das medições para cada peça pode ser realizada através do gráfico da Figura 3.

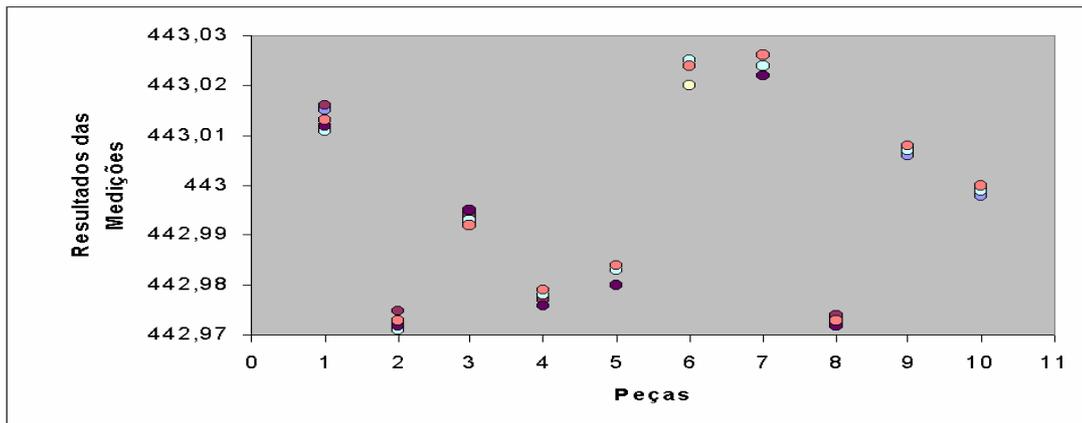


Figura 3.9 Medições por peça realizadas para avaliar o processo de medição de comprimento de virabrequins.

Neste tipo de gráfico pode-se verificar se a dispersão das medições realizadas se mantém similares para cada peça. Quando se observa uma variação acentuada nesta dispersão pode ser

um sinal da presença de interação entre peça e operador. Uma análise mais precisa sobre a presença ou não de interação pode ser obtida através do método ANOVA.

Analisando se o gráfico da Figura 3 observa-se que não há uma diferença acentuada na dispersão das medições de cada peça, não indicando portanto a presença de interações entre operador e peça.

3.7.6 Medições por Operador

A média e a dispersão das medições de todas as peças realizadas por cada operador podem ser analisadas através do gráfico das medições por operador apresentado na Figura 3.10.

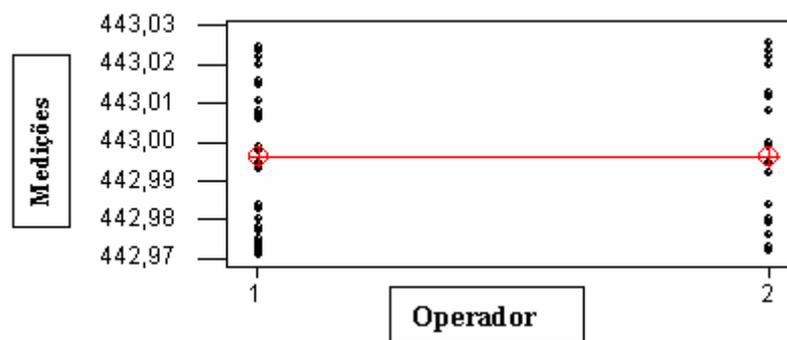


Figura 3.10 Avaliação das medições por operador no processo de medição de comprimentos de virabrequins.

Analisando-se o gráfico das medições por operador pode ser verificado a presença de desvios entre as médias dos operadores o que indicaria a presença de tendências diferentes para os resultados das medições realizadas por diferentes operadores. Outro dado a ser analisado neste gráfico é a diferença ou similaridade da dispersão dos resultados das medições que pode ser avaliado comparando-se a amplitude das medições para cada operador. O gráfico da Figura 3.10 indica que não há diferenças significativas entre as medições realizadas pelos dois operadores.

3.7.7 Peça x Operador

Os gráficos das médias das medições de cada operador quando sobrepostos (ver Figura 3.11) auxilia na percepção da presença de interações entre peças e operadores.

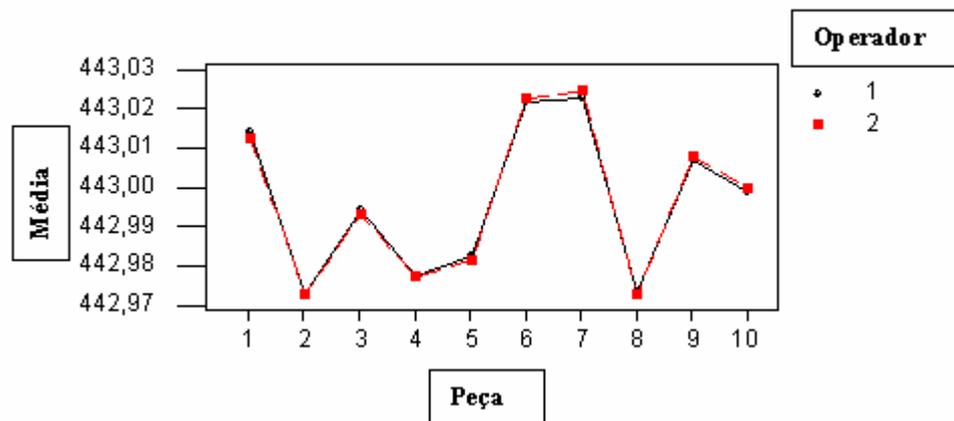


Figura 3.11 Comparação da média das medições para cada operador e peça.

Quanto menor o paralelismo entre as linhas dos gráficos de cada operador maior é a indicação de que pode haver uma interação entre peça e operador [13]. Este gráfico pode ser utilizado como um indicador da necessidade de investigação mais detalhada da presença de interação entre peça e operador, que pode ser realizado pelo método ANOVA. Na prática quando se percebe uma diferença muito acentuada na média das medições realizadas por diferentes operadores, concentrada em poucas peças, recomenda-se que um novo ciclo de medições seja realizado pelos mesmos operadores nas mesmas peças para que sejam investigadas as causas destas diferenças. A análise do gráfico da Figura 3.11, indica que não há sinal da presença de interações entre os operadores e peças avaliados.

3.8 ANÁLISE NUMÉRICA DOS RESULTADOS DO ESTUDO

A análise numérica (analítica) complementa as análises prática e gráfica permitindo quantificar as variabilidades bem como verificar estatisticamente quais os principais fatores que contribuem para a variabilidade do processo de medição.

3.8.1 Análise Numérica da Repetitividade

Repetitividade é a variação nas medidas obtidas com o dispositivo de medição quando usado varias vezes por um operador para medir a mesma característica na mesma peça [27][28]. Antes de se iniciar os cálculos para a análise da repetitividade é importante verificar se o processo de medição é estável como discutido na Seção 3.7.1. Causas especiais de variação deverão ser identificadas, pontos fora dos limites de controle no gráfico das amplitudes, e corrigidas.

A estimativa de desvio padrão para o cálculo da Repetitividade é extraída da amplitude média das medições divididas por d_2 .

Número de medições por operador por peça	d_2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534
7	2,704
8	2,847
9	2,970
10	3,173

Figura 3.12 Valores de d_2 , para $g > 15$, onde g é a multiplicação do número de peças pelo número de operadores [28].

O cálculo da Repetitividade (*Repe*) é realizado multiplicando-se a estimativa do desvio padrão por 5,15, que representa 99% da distribuição em uma curva normal. Portanto tem-se:

$$Re\ pe = 5,15 \cdot \bar{R} \div d_2 \quad (3.3)$$

Para o processo de medição de comprimentos (ver Figura 3.1), onde a amplitude média é 0,0025 e d_2 é 1,693 (3 medições por operador por peça) obtêm-se os seguintes resultados:

$$Re\ pe = 5,15 \cdot 0,0025 \div 1,693 = 0,0076 \text{ mm} \quad (3.4)$$

A Repetitividade também é conhecida como Variação do Equipamento (VE). Duas fontes comuns de erro de Repetitividade são as variações devido ao próprio dispositivo de medição e a variação devido ao posicionamento da peça no mesmo.

3.8.2 Análise Numérica da Reprodutibilidade

A análise gráfica da reprodutibilidade discutida na Seção 3.7.4 é complementada a seguir através de uma análise analítica, que proporcionará um valor que para esta variabilidade, o qual poderá ser comparado com a Repetitividade, a Tolerância e a Variação do processo de fabricação.

O cálculo da Reprodutibilidade (*Repro*) é realizado através da determinação da média das medições de cada operador e posteriormente da amplitude (R_o) entre estas médias. A estimativa do desvio padrão para o cálculo da Reprodutibilidade é obtida multiplicando-se R_o por K_2 .

Número de Operadores	K_2
2	3,65
3	2,70

Figura 3.13 Valores de K_2 [28].

Calcula-se uma estimativa para a Reprodutibilidade multiplicando o desvio padrão por 5,15, constante que representa 99% de uma distribuição normal. Portanto tem-se:

$$Re\ pro = 5,15 \cdot Ro \cdot K_2 \quad (3.5)$$

Porém esta estimativa da Reprodutibilidade está contaminada pela variação devido ao dispositivo de medição e deve ser ajustada subtraindo-se uma fração da Repetitividade [28]. A fórmula ajustada para o cálculo da Reprodutibilidade é:

$$Re\ pro = \sqrt{(5,15 \cdot Ro \cdot K_2)^2 - ((Re\ pe)^2 \div n \cdot r)} \quad (3.6)$$

Onde: n = número de peças.

r = número de medições por operador por peça.

Convenciona-se que se for obtido um valor negativo sob o sinal da raiz quadrada, a Reprodutibilidade é tomada como zero [28].

Para o processo de medição de comprimentos de virabrequins (ver Figura 3.1), obtêm-se os seguintes resultados:

$$Re\ pro = \sqrt{(8,59329E - 07) - (1,92533E - 06)} \Rightarrow Re\ pro = 0 \quad (3.7)$$

A Reprodutibilidade também é conhecida como Variação entre Operadores (VO). Tipicamente obtêm-se uma diminuição do valor de Reprodutibilidade através de treinamento e padronização do procedimento de medição.

3.8.3 Repetitividade & Reprodutibilidade

A variação total do processo de medição é conhecida como R&R Repetitividade e Reprodutibilidade e é calculada através da média quadrática da Variação do Equipamento (VE = Repe) e da Variação do Operador (VO = Repe), conforme segue:

$$R \& R = \sqrt{VE^2 + VO^2} \quad (3.8)$$

Para o processo de medição de comprimentos de virabrequins (ver Figura 3.1), obtêm-se os seguintes resultados:

$$R \& R = \sqrt{0,0076^2 + 0^2} = 0,0076 \text{ mm} \quad (3.9)$$

3.8.4 Comparando R&R com a Tolerância, Variação do Processo de Fabricação e Variação Total.

Uma primeira avaliação da variabilidade do processo de medição pode ser realizada comparando-se *Repe*, *Repro* e R&R com a Tolerância (Tol) da característica em análise, através do cálculo dos respectivos percentuais descritos a seguir:

$$\%Re\ pro_{Tol} = 100 \bullet (Re\ pro \div Tol) \quad (3.10)$$

$$\%Re\ pe_{Tol} = 100 \bullet (Re\ pe \div Tol) \quad (3.11)$$

$$\%R\ \&\ R_{Tol} = 100 \bullet (R\ \&\ R \div Tol) \quad (3.12)$$

Este indicador fornece o percentual de variabilidade do resultado da medição em relação as especificações do processo de fabricação ou especificações do produto. Porém, não traz informação alguma em relação a variabilidade do processo de fabricação.

A variação do processo de medição comparada com a Variação do Processo de Fabricação (VP) é um indicador bastante interessante, pois permite que se verifique a eficiência do processo de medição em detectar melhorias no processo de fabricação. Por exemplo, se um determinado processo de medição apresenta uma $\%R\ \&\ R_{VP}=100$, uma diminuição na variabilidade do processo de fabricação não seria detectada através deste processo de medição. As seguintes fórmulas são usadas para comparar *Repe*, *Repro* e R&R com a variação do processo de fabricação:

$$\%Re\ pro_{VP} = 100 \bullet (Re\ pro \div VP) \quad (3.13)$$

$$\%Re\ pe_{VP} = 100 \bullet (Re\ pe \div VP) \quad (3.14)$$

$$\%R\ \&\ R_{VP} = 100 \bullet (R\ \&\ R \div VP) \quad (3.15)$$

Onde a Variação do Processo de Fabricação (VP) é determinada pela multiplicação da amplitude das médias das medições das peças (*Rp*) pela constante K_3 [28].

Peças	K ₃
2	3,65
3	2,70
4	2,30
5	2,08
6	1,93
7	1,82
8	1,74
9	1,67
10	1,62

Figura 3.14 Valores de K3 para cálculo da Variação do Processo de Fabricação.

Peças	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Média das Medições	443,013	442,972	442,994	442,977	442,982	443,022	443,024	442,973	443,008	442,999
		Mínimo					Máximo			

Para o processo de medição de comprimentos de virabrequins (ver Figura 3.1), obtêm-se os seguintes resultados:

$$VP = Rp \cdot K_3 = (443,024 - 442,972) \cdot 1,62 = 0,083 \text{ mm} \quad (3.16)$$

Figura 3.15 Média das medições de comprimento, destacando os valores máximo e mínimo para cálculo da amplitude.

Caso a variação do processo esteja disponível, por exemplo, através de uma carta de controle estatístico do processo, recomenda-se que esta informação seja utilizada para a determinação de VP, uma vez que deverá trazer uma estimativa mais precisa, devido a um maior número de dados disponíveis para calculá-la.

A comparação da variação do processo de medição com a Variação Total (VT) é outra forma de avaliar a influência da variação do processo de medição. O indicador %R&R_{VT} também se demonstra interessante uma vez que permite uma comparação do percentual de contribuição da variação do processo de medição na Variação Total que inclui a Variação do Processo de Fabricação.

O cálculo de VT é realizado conforme segue:

$$VT = \sqrt{(R \& R)^2 + (VP)^2} \quad (3.17)$$

As fórmulas usadas para comparar Re_{pe}, Re_{pro} e R&R com a Variação Total são similares as anteriores e estão listadas a seguir:

$$\% Re \text{ pro} = 100 \cdot (Re \text{ pro} \div VT) \quad (3.18)$$

$$\% Re \text{ pe} = 100 \cdot (Re \text{ pe} \div VT) \quad (3.19)$$

$$\% R \& R = 100 \cdot (R \& R \div VT) \quad (3.20)$$

3.8.5 Critérios para Aprovação do R&R

Os critérios para a aprovação dos processos de medição através dos índices $\%R\&R_{VT}$ e $\%R\&R_{Tol}$, adotado pela grande maioria das empresas de auto peças é listado a seguir [28] :

$\%R\&R$	Laudo
Abaixo de 10%	Processo de medição aceitável
10% a 30%	Processo de medição pode ser aceitável, dependendo do custo do aprimoramento do processo de medição
Acima de 30%	Processo de medição não é aceitável

Figura 3.16 Critérios para aprovação do R&R.

Dentro da filosofia Seis Sigma recomenda-se utilizar os indicadores $\%R\&R_{VT}$ ou $\%R\&R_{VP}$, pois os mesmos poderão fornecer uma comparação com a variação do processo de fabricação de maneira a determinar se a prioridade é atuar no processo de medição ou no processo de fabricação, num processo de melhoria continua com objetivo de um alcançar um índice de rejeição das peças produzidas de 3,4 PPM ou menor.

3.8.6 ANOVA – Análise de Variância

O objetivo desta sessão é fornecer ao leitor uma visão simplificada da interpretação da tabela de Análise de Variância, um detalhamento do cálculo dos valores apresentados nesta tabela pode ser encontrado no Manual MSA da QS 9000 [28][35][14][15].

A Análise de Variância complementa as análises anteriormente apresentadas uma vez que a variação pode ser decomposta em quatro categorias: peças, operadores, interação entre peças e operadores e erro devido ao sistema de medição (Repetitividade).

Tabela ANOVA						
Fonte	DF	SS	MS	F	P	
Peça	9	0,0213477	0,0023720	1260,69	0,00000	
Operador	1	0,0000001	0,0000001	0,04	0,85487	
Operador*peça	9	0,0000169	0,0000019	0,71	0,70012	
Repetitividade	40	0,0001067	0,0000027			
Total	59	0,0214713				

Figura 3.17 Análise de Variância do processo de medição de comprimento de virabrequins.

As colunas DF, SS, MS trazem o Grau de Liberdade, a Soma dos Quadrados e a Média Quadrática da respectiva fonte de variação [13][28]. A Soma dos Quadrados traz um indicador da variância do fator antes de normalizar e a Média Quadrática traz um indicador normalizado desta variância o qual pode ser utilizado para comparar as diferentes influências na variância total do estudo.

O fator F é calculado dividindo-se a Média Quadrática do Fator ou Interação pelo erro ou Repetitividade do estudo mostrando quantas vezes a Média Quadrática do Fator é maior que a Média Quadrática da Repetitividade.

A coluna P fornece a probabilidade de errar ao afirmar que o fator ou interação tem impacto significativo na variância do estudo [13].

Analisando a tabela ANOVA para o processo de medição de comprimentos nota-se que:

- O fator Peça, variação do processo de fabricação, teve impacto significativo na variância do estudo.
- O fator Operador não teve impacto significativo na variância do estudo, confirmando o resultado das análises anteriores onde o valor da Reprodutibilidade foi zero.
- A interação entre peça e operador não tem impacto significativo na variância do estudo.

A principal vantagem do método ANOVA, além de estimar as variâncias com maior precisão, é que permite verificar separadamente e com maior precisão o efeito da interação entre peça e operador.

3.9 ESTABELEECER E EXECUTAR AÇÕES PARA MINIMIZAR A VARIÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Após realizado as análises prática, gráfica e analítica as informações geradas devem ser analisadas como um conjunto único e a partir deste conjunto um plano de ações deve ser gerado para a eliminação ou minimização dos problemas levantados. Para que este plano de ação funcione bem é fundamental que o mesmo seja realizado em equipe na qual o dono do processo (exemplo: chefe da linha) de fabricação e de medição deve participar e aprovar, pois

a partir deste ponto a melhora do processo de medição e os benefícios associados dependerão das ações realizadas pelo mesmo.

Caso os operadores, que participaram da avaliação do processo de medição, não fizerem parte da equipe que estabeleceu o Plano de Ações, é fundamental comunicá-los de maneira a criar confiabilidade para o desenvolvimento de novas avaliações.

3.10 VERIFICAR A EFICÁCIA DAS AÇÕES

O estabelecimento de reuniões de verificação da realização das ações, como em qualquer projeto, deve ser agendado com a devida antecedência com a concordância do dono do projeto. É recomendável que antes destas reuniões o responsável pela avaliação do processo de medição faça uma verificação em loco sobre o andamento das ações e solicite ao dono do processo que convoque os operadores envolvidos para a reunião, isto trará uma maior motivação aos operadores que poderão se manifestar se as ações foram ou não realizadas e se resolveram os problemas apontados sem criarem novos.

Após a realização das ações propostas uma nova avaliação do processo de medição deve ser realizada para confirmar a eficácia das mesmas.

3.11 MACRO ANÁLISE DA AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

A realização de vários estudos em uma mesma área de fabricação possibilita a extração de mais informações sobre a mesma. Recomenda-se que após avaliar uma quantidade significativa de processos de medição, de uma mesma área de fabricação, seja realizado uma macro análise utilizando-se o conjunto de informações geradas.

Esta avaliação visa verificar a existência de causas comuns para a variabilidade do processo de medição para uma posterior avaliação de macro oportunidades de melhorias. Informações que auxiliam esta análise são percentual de processos de medição com problemas de discriminação, estabilidade, percentual de processos de medição com R&R maior que 10% da tolerância e maior que 10% da variabilidade do processo bem como a comparação em percentual do fator de maior influência no R&R. Esta análise deve ser realizada em duas etapas a primeira envolvendo todos os estudos realizados e a segunda estratificando esta análise por tipo de processo de medição.

A avaliação de macro oportunidades de melhoria nos processos de medição deve ser realizada por uma equipe onde a participação do dono do processo, engenheiro do processo e metrologista são fundamentais para que os seguintes objetivos sejam atingidos:

- Verificar a necessidade de implementar macro ações para manter e melhorar os processos de medição atualmente utilizados.
- Indicar alternativas para a realização das atividades a que se destinam os processos de medição de maneira a otimizar tais processos. Este segundo objetivo visa preparar a

empresa para a produção de novos produtos, e em geral necessita um maior investimento e tempo para implementação.

Nesta avaliação todos os problemas apontados nas análises prática, gráfica e analítica devem ser considerados, recomenda-se a utilização de tabelas, tais como característica a ser controlada por local de utilização (operação) e característica a controlar por tipo de problema do processo de medição.

CAPÍTULO 4

O AMBIENTE INDUSTRIAL UTILIZADO PARA O ESTUDO DE CASO

Este capítulo tem por objetivo apresentar o ambiente industrial utilizado para o desenvolvimento desta dissertação, fornecendo alguns dados como porte da empresa, ramo da indústria, tipo de processo e produto fabricado, certificações do sistema da qualidade e tipos de sistemas de medição utilizados.

4.1 DADOS DA EMPRESA

A empresa em que foi realizado o estudo de caso pertence ao setor automotivo de um grupo multinacional com atividades na Ásia, Oceania, Europa, África e América. Considerando apenas o setor automotivo são mais de 40 mil funcionários atuando em 30 países e 60 empresas com um faturamento anual de US \$ 6 bilhões.

Localizada no estado de São Paulo com 2600 funcionários e 200.000 m² de área construída a empresa em que foi realizado o estudo de caso possui um faturamento da ordem de US \$ 200 milhões por ano.

4.2 CERTIFICAÇÕES E PRÊMIOS

Tendo recebido a certificação ISO 9002 em 1993, ISO 9001 em 1994, QS 9000 em 1997 e ISO/TS_16949 em 2002 a empresa mantém um elevado nível de qualidade tendo recebido prêmios e certificados de reconhecimento da qualidade de seus produtos e serviços associados prestados da grande maioria de seus clientes presentes no Brasil e também em outros países como EUA, Inglaterra, Japão, Alemanha, Itália, Argentina, China, Tailândia, etc.

Alguns dos programas de qualidade e produtividade utilizados pela empresa são 6 Sigma, Kaizen, Lean Manufacture, Custo da Qualidade, PPR – Programa de Participação nos Resultados, Gestão Participativa, ISO/TS_16949 e TPM.

4.3 O PRODUTO ESTUDADO

O produto escolhido para o desenvolvimento do trabalho foi um Virabrequim 6 cilindros (ver Figura 4.1) para aplicação em motores diesel. Na realidade 5 modelos de virabrequins distintos foram analisados, os quais são exportados para a Inglaterra, Itália, EUA e China além de serem utilizados no mercado nacional.

O virabrequim também conhecido como árvore de manivelas é uma peça complexa requerendo um controle de mais de 150 características para garantir sua qualidade. Como referencia são listadas a seguir alguns exemplos de características a serem controladas e suas especificações:

- Diâmetro especificação $70,25 \pm 0,10$ mm
- Meio curso especificação $60,00 \pm 0,07$ mm
- Comprimento especificação $502,28 \pm 0,10$ mm
- Empenamento especificação 0,05 mm
- Posição Angular especificação 0,406 mm



Figura 4.1 Virabrequim 6 cilindros forjado.

4.4 A LINHA DE PRODUÇÃO

A linha de produção utilizada para o desenvolvimento do estudo de caso usina 5 tipos de virabrequins através de mais de 50 operações distintas.

Na Figura 4.2 observa-se um virabrequim posicionado no torno após completar a operação de torner diâmetro dos mancais (munhões) em desbaste.

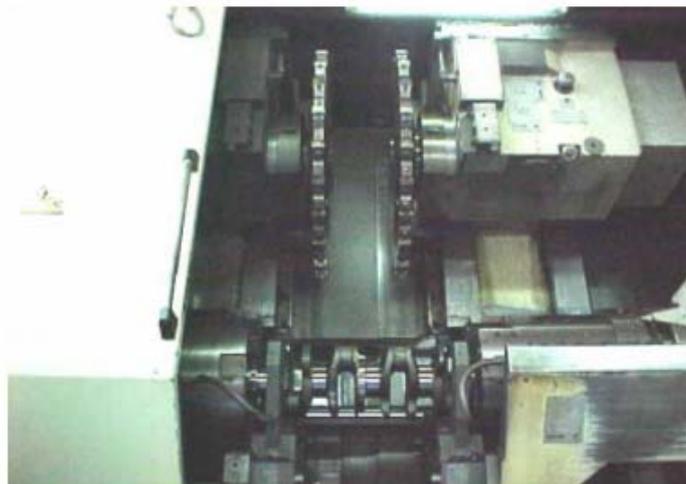


Figura 4.2 Operação de torneiar munhões

Na Figura 4.3 observa-se um virabrequim posicionado na fresadora após completar a operação de fresar diâmetro dos moentes em desbaste.

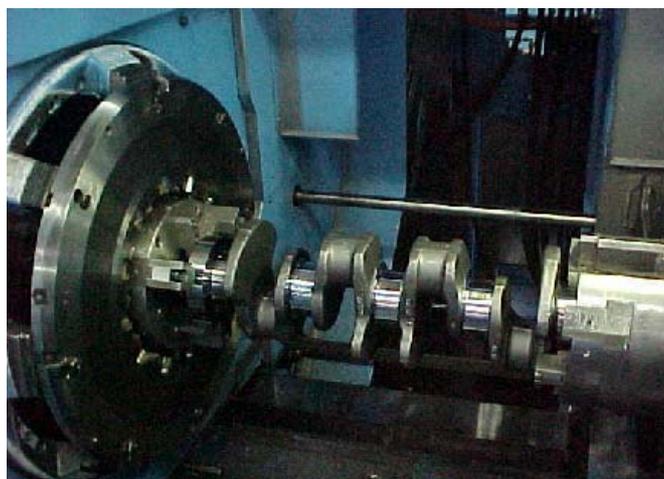


Figura 4.3 Operação de Fresar moentes em desbaste.



Figura 4.4 Operação de temperar por indução

Na Figura 4.4 observa-se a máquina de tempera por indução durante o aquecimento de um virabrequim, as mangueiras evidenciadas nesta foto são para conduzir líquido a base de água para resfriar a peça completando a operação de tempera do virabrequim.

Na Figura 4.5 é mostrado um virabrequim posicionado na retífica após completar a operação de retificar munhões em acabamento.

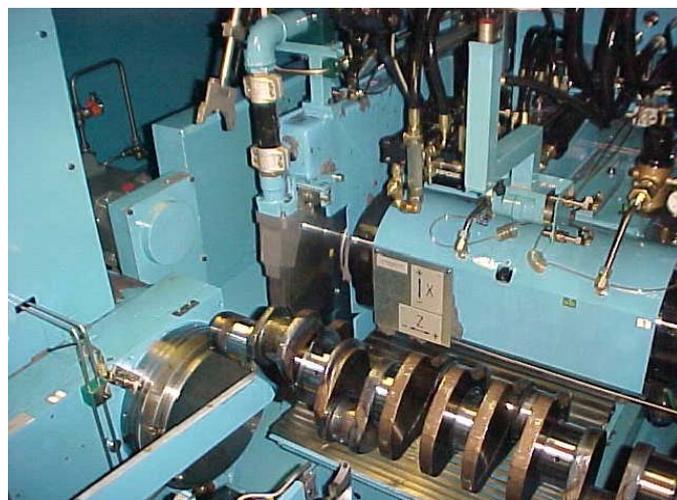


Figura 4.5 Operação de retificar munhões



Figura 4.6 Operação de retificar moentes

A Figura 4.6 mostra um virabrequim durante a operação de retificar moentes em acabamento, nota-se o fagulhamento provocado pelo atrito entre o rebolo e a peça, assim como o intenso fluxo de óleo refrigerante utilizado na operação.

4.5 SISTEMAS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS

Na linha de usinagem utilizada para o estudo de caso são utilizados 470 sistemas de medição distintos para a fabricação de 5 tipos diferentes de peças. Este número seria ainda maior se fosse considerado sistemas auxiliares de medição tais como relógios comparadores e padrões para ajuste.

A quantidade de sistemas de medição utilizados que fornecem o resultado de medição de forma atributiva é um pouco superior aos que fornecem o resultado da medição de forma numérica como pode ser observado na Figura 4.7

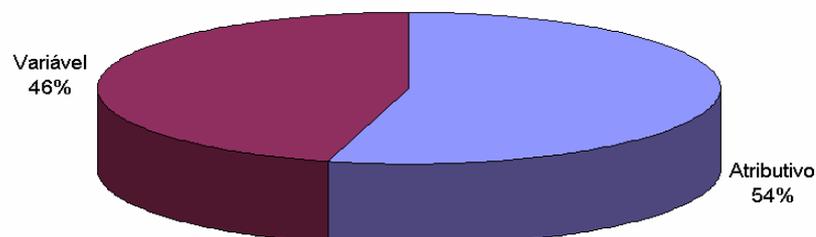


Figura 4.7 Sistemas de Medição por variável e por atributo utilizados na linha de usinagem de virabrequins.

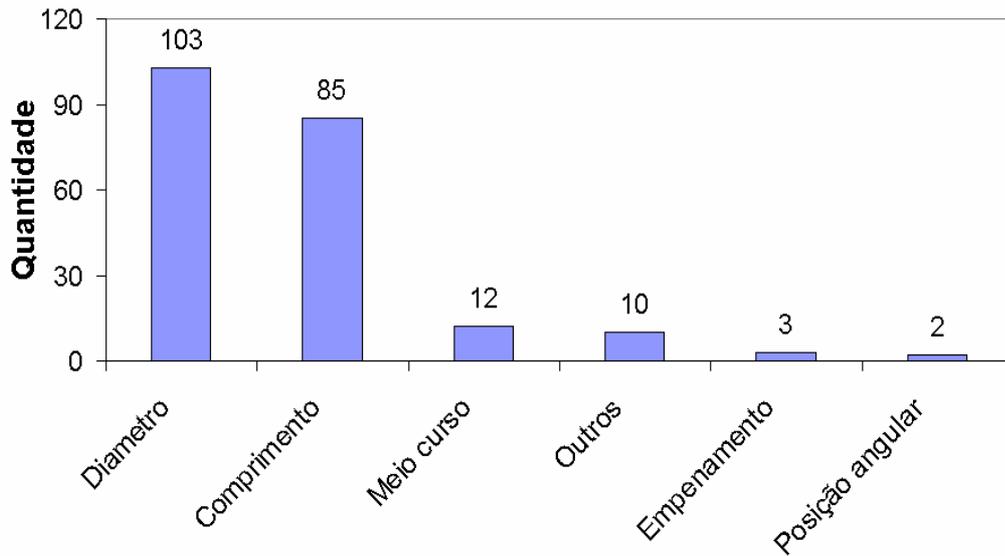


Figura 4.8 Quantidade de sistemas de medição por característica a controlar.

A Figura 4.8 mostra como está distribuído quantitativamente os sistemas de medição por variável considerando-se o tipo de característica controlada.

Os sistemas de medição de produtos utilizados no ambiente de produção são verificados em frequências que variam de 2 a 180 dias de utilização. Estas verificações são realizadas em um laboratório de metrologia interno da empresa, que compara os padrões "secundários", utilizados no chão de fábrica, com os padrões "primários", utilizados pelo laboratório de metrologia. Estes padrões "primários" são calibrados externamente em laboratórios credenciados a Rede Brasileira de Calibração em frequências que variam de 365 a 999 dias, dependendo do tipo de padrão e seu grau de utilização. Toda a sistemática envolvida no gerenciamento dos sistemas de medição está documentada no Manual da Garantia da Qualidade [48] e em procedimentos internos da empresa.

Capítulo 5

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO

Neste capítulo serão apresentadas as análises prática, gráfica e analítica, no contexto da metodologia discutida no Capítulo 3, realizadas para avaliar a variabilidade do processo de medição de comprimentos de virabrequins utilizado para o controle do processo de fabricação.

5.1 O PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO

O processo de medição de comprimento de virabrequins (Figura 5.1) possui as seguintes características:

- O sistema de medição é dedicado para o controle de um único tipo de peça constituído de dispositivo mecânico de aço e indicador diferencial analógico (relógio comparador).
- Controla 5 comprimentos simultaneamente
- O processo de medição de comprimentos é utilizado nas operações de torneiar, fresar, temperar e retificar. Neste capítulo será abordada a operação de torneiar.
- Especificação do comprimento 443,09 +/- 0,10 mm.
- Resolução 0,001 mm (em função do relógio comparador)
- É ajustado antes do uso através de um padrão de aço
- Peso 8700 gramas
- Frequência de controle 1 peça a cada 10 peças produzidas.
- Frequência de calibração 180 dias.
- É utilizado em dois turnos (um operador por turno).



Figura 5.1 Sistema de medição de comprimentos de virabrequim.

5.2 ANÁLISE PRÁTICA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO

Neste item são apresentadas as observações realizadas a partir da análise prática, as ações decorrentes serão abordadas no item Seção 5.10. Durante a análise prática do sistema de medição de comprimento, (observação da utilização do sistema de medição no local de trabalho) notou-se que:

- a) Padrão utilizado como referencia do dispositivo encontrava se 0,10 mm menor que a medida nominal (ou seja, 442,99 mm). Através da observação da sistemática de controle utilizada na operação notou-se que a especificação real utilizada na operação de torneamento em desbaste era 442,99 +/- 0,10, ou seja, na prática 0,10 mm menor do que a determinada pela engenharia de processo.
- b) Operador queixava-se do peso elevado do sistema de medição (8700 gramas) e a movimentação do dispositivo de medição realizada pelo operador ao efetuar a medição ergonomicamente não recomendável ver Figura 5.2 e Figura 5.3.



Figura 5.2 Posição inicial da movimentação do Sistema de Medição de Comprimentos, operador deverá erguer o dispositivo e posiciona-lo sobre a peça.



Figura 5.3 Posição de medição do produto, vista lateral. Observar a distância entre o padrão de referência (posição inicial do sistema de medição) e a posição em que o sistema de medição é efetivamente utilizado

- c) Possibilidade de realizar as medições em locais diferentes na bancada de medição ou sobre a linha de transferência do produto entre operações (ver Figura 5.4 e Figura 5.5). A medição realizada sobre a linha de transferência evita a movimentações do virabrequim até a bancada de medição, porém aumenta a distância de deslocamento do sistema de medição.

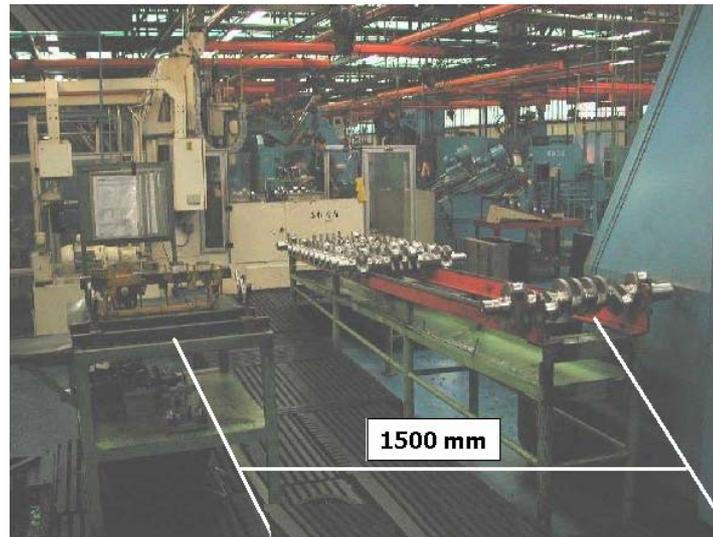


Figura 5.4 Distância entre a bancada de medição e a linha de transferência da peça entre operações



Figura 5.5 Medição realizada sobre a linha de transferência da peça entre operações.

- d) Uma diferença de temperatura de até 5°C entre a peça, ao término da usinagem, e o padrão de comprimento, utilizado para "zerar" o sistema de medição antes do uso. O padrão e a peça são do mesmo material aço. O efeito desta componente de variação, temperatura, foi praticamente eliminado durante as avaliações apresentadas nesta dissertação, através da identificação e segregação das peças para homogeneizar a temperatura das mesmas, conforme discutido na Seção 3.4, porém este efeito deve ser considerado na análise da incerteza de medição [43] [44] [46].
- e) O histórico do sistema de medição indicava que o mesmo apresentava-se em boas condições de uso e que o vencimento da data de sua calibração ocorreria em 120 dias após a data da análise prática.

5.3 GRÁFICO DAS AMPLITUDES DAS MEDIÇÕES

A análise gráfica da variabilidade do sistema de medição de comprimento demonstra que o processo de medição apresenta-se estável, uma vez que o gráfico das amplitudes (ver Figura 5.6) não apresenta sinais de instabilidade.

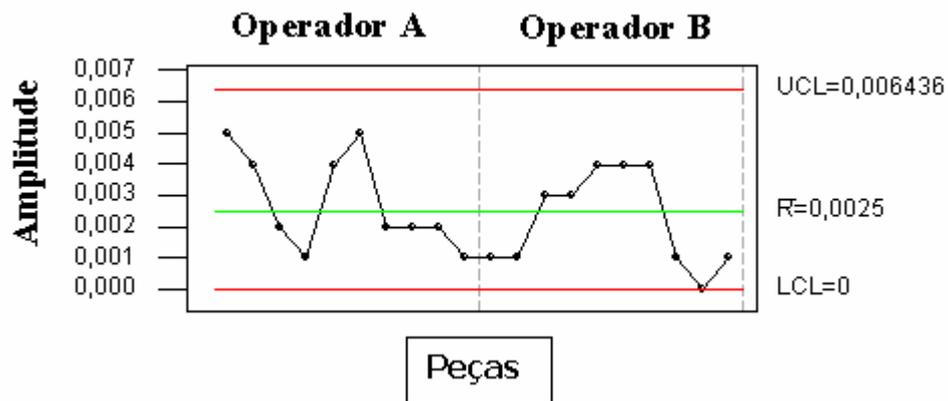


Figura 5.6 Gráfico da Amplitude das medições evidenciando a estabilidade do processo de medição.

Neste mesmo gráfico verifica-se que o processo de medição apresenta boa discriminação para detectar a variabilidade do próprio processo de medição, 7 pontos possíveis (0; 1; 2; 3; 4; 5; e 6 μm) entre os limites de controle.

5.4 GRÁFICO DAS MÉDIAS DAS MEDIÇÕES

O gráfico das médias das medições apresentado na Figura 5.7 indica que o erro de medição não inviabiliza a detecção da variabilidade do processo de fabricação, pois menos de um quarto dos pontos encontram-se dentro dos limites de controle, mais precisamente apenas dois dos vinte pontos do gráfico da média caíram dentro (sobre) dos limites de controle.

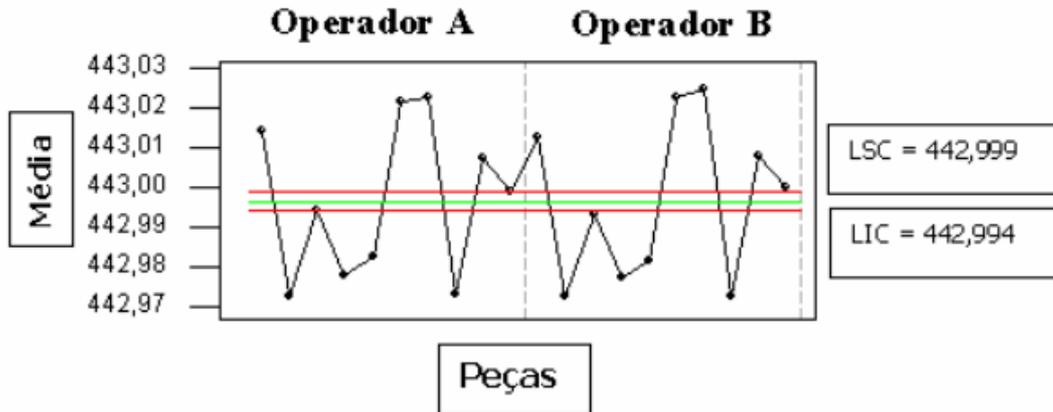


Figura 5.7 Média das medições de cada peça realizada pelo operador A e pelo operador B.

Analisando-se o padrão da curva gerada pela média das medições do operador A, nota-se que este padrão se repete para curva gerada pela média das medições do operador B (ver Figura 5.7). Verifica-se também que as médias das medições de cada peça são similares, ou seja, não existe um desvio (diferentes tendências) entre os operadores A e B. Esta análise permite que se afirme que o processo de medição de comprimentos de virabrequins apresenta boa Reprodutibilidade.

5.5 GRÁFICO DAS MEDIÇÕES POR PEÇA

No gráfico das medições por peça, mostrado na Figura 5.8, nota-se que a dispersão das medições realizadas se mantém similar para cada peça não indicando a presença de interação entre peça e operador.

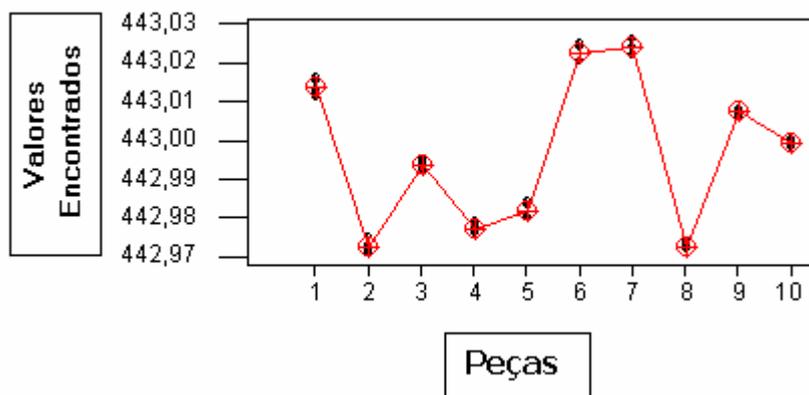


Figura 5.8 Medições por peça , processo de medição de comprimento de virabrequins.

5.6 GRÁFICO DAS MEDIÇÕES POR OPERADOR

Analisando-se o gráfico das médias das medições por operador para o processo de medição de comprimento de virabrequins mostrado na Figura 5. nota-se que não há diferença significativa

entre a média e amplitude das medições realizadas pelos operadores A e B, confirmando a boa reprodutibilidade do processo de medição de comprimento de virabrequins.

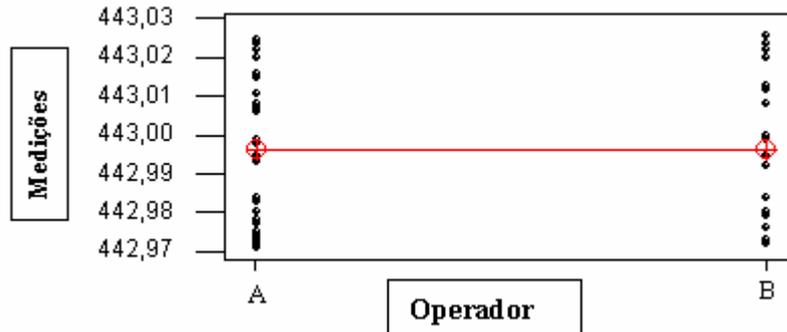


Figura 5.9 Média das medições por operador para o processo de medição de comprimento de virabrequins.

5.7 GRÁFICO DA MÉDIA DAS MEDIÇÕES POR OPERADOR SOBREPOSTO

O gráfico da média das medições para o operador A sobreposto ao mesmo gráfico para o operador B, ver Figura 5., mostra um paralelismo bastante acentuado entre as linhas referentes a cada operador, as linhas praticamente coincidem, não indicando a presença de interação entre peça e operador para o processo de medição de comprimento de virabrequins.

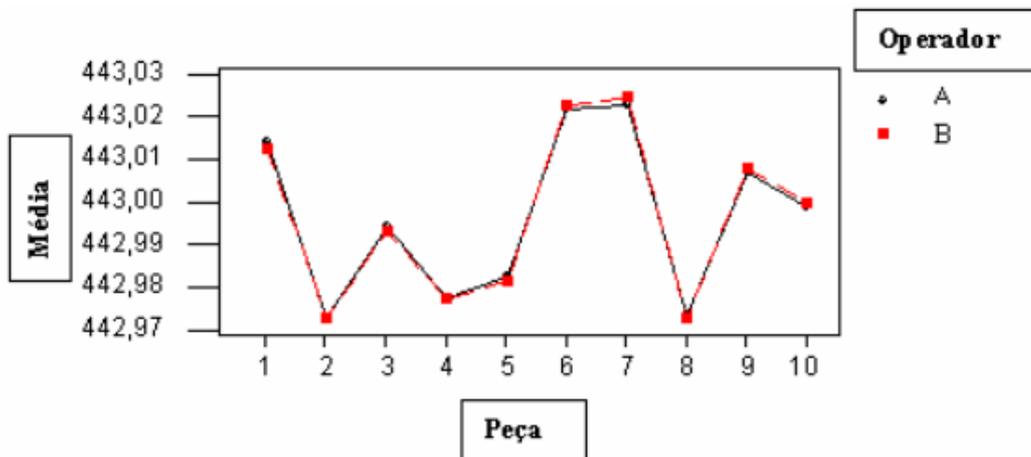


Figura 5.10 Média das medições do operador A sobreposto a média das medições do operador B.

5.8 ANÁLISE DA R&R DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTOS.

A Repetitividade, Reprodutibilidade e o R&R do processo de medição de comprimentos de virabrequins é calculado através da Equação 3.3, 3.6 e 3.8 e conforme discutido na Seção 3.8 onde obtemos os valores:

$$Re\ pe = 0,0076mm \quad (5.1)$$

$$Re\ pro = 0 \quad (5.2)$$

$$R \& R = 0,0076mm \quad (5.3)$$

Estes resultados confirmam a boa Reprodutibilidade do processo de medição. A análise da adequação da Repetitividade e do R&R deve ser realizada comparando-se estes valores com a tolerância do processo de fabricação (Tol), com a variação do processo de fabricação (VP) e com a variação total (VT). Os cálculos realizados para efetuar estas comparações foram discutidos na Seção 3.8.4. Para o processo de medição de comprimentos de virabrequins analisado neste capítulo será calculado apenas para o valor de R&R, uma vez que $Repro = 0$ e $R\&R = Repe$.

Pode-se comparar a R&R com a tolerância através da Equação 3.12 conforme segue:

$$\%R \& R_{Tol} = 100 \bullet (0,0076 \div 0,2) = 3,8\% \quad (5.4)$$

Usando-se o critério de aprovação definido na Seção 3.8.5 pode-se concluir que o processo de medição de comprimentos de virabrequins é aceitável, pois a variação do mesmo abrange 3,8% da tolerância.

Através da Equação 3.15, compara-se a R&R com a Variação do Processo (0,083mm ver Equação 3.16) conforme segue:

$$\%R \& R_{VP} = 100 \bullet (0,0076 \div 0,083) = 9,2\% \quad (5.5)$$

Usando-se o critério de aprovação definido na seção 3.8.5, pode-se concluir que o processo de medição de comprimentos de virabrequins é aceitável, pois a variação do mesmo abrange 9,2% da variação do processo. A análise da adequação da %R&R poderia se encerrar por aqui, não requerendo uma comparação do R&R com a variação total, uma vez que esta é maior que a variação do processo, a seguir será calculado %R&R_{VT} para fins didáticos.

A variação total (VT), conforme Equação, é determinada da seguinte maneira:

$$VT = \sqrt{(0,0076)^2 + (0,083)^2} = 0,0833mm \quad (5.6)$$

Da Equação 3.20, tem-se:

$$\%R \& R_{VT} = 100 \bullet (0,0076 \div 0,0833) = 9,1\% \quad (5.7)$$

Portanto o processo de medição de comprimentos de virabrequins representa 9,1% da variação total do estudo.

5.9 TABELA ANOVA

A tabela ANOVA para o processo de medição de comprimentos de virabrequins é mostrada na Figura 5.11. Conforme discutido na Seção 3.8.6, a análise desta tabela nos permite afirmar que:

- O fator peça (variação do processo de fabricação) tem impacto na variância do estudo, ou seja, como o valor de P na tabela ANOVA é 0,00 então a probabilidade de errar ao se afirmar que a variação do processo de fabricação possui impacto significativo no estudo é 0%.
- O fator operador não tem impacto significativo na variância do estudo, ou seja, como o valor de P na tabela ANOVA é 0,85 então a probabilidade de errar ao se afirmar que o operador possui impacto significativo no estudo é de 85%.
- A interação peça*operador também não tem impacto significativo na variância do estudo, ou seja, como o valor de P na tabela ANOVA é 0,70 então a probabilidade de errar ao se afirmar que a interação peça*operador possui impacto significativo no estudo é de 70%.

Tabela ANOVA					
Fonte	DF	SS	MS	F	P
Peça	9	0,0213477	0,0023720	1260,69	0,00000
Operador	1	0,0000001	0,0000001	0,04	0,85487
Operador*peça	9	0,0000169	0,0000019	0,71	0,70012
Repetitividade	40	0,0001067	0,0000027		
Total	59	0,0214713			

Figura 5.11 Análise da variância dos fatores peça, operador e interação peça*operador no processo de medição de comprimento de virabrequins.

O nível de risco em assumir que um fator tem influência significativa no estudo deve ser escolhido pelo avaliador.

5.10 CONCLUINDO A AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE COMPRIMENTO

Após a realização da análise prática, gráfica e analítica conclui-se que o sistema de medição é adequado quanto a sua variabilidade, porém ações devem ser realizadas para eliminar os problemas de interpretação da medida objetivada e problemas ergonômicos relacionados ao processo de medição.

Através da análise prática verificou-se a necessidade de efetuar um treinamento dos operadores quanto ao controle do processo incluindo aspectos como a preparação e manuseio do sistema de medição e interpretação dos resultados e valor objetivado.

Quanto ao problema ergonômico notou-se que sua abrangência englobava toda a gama de sistemas de medição de comprimento utilizados na linha de usinagem, já que foram confeccionados através de projetos similares. Para minimizar este problema duas alternativas foram utilizadas:

- a) Diminuir o peso dos Sistemas de Medição de Comprimento atualmente utilizados, através de furos de alívio como pode ser observado na Figura 5.12.

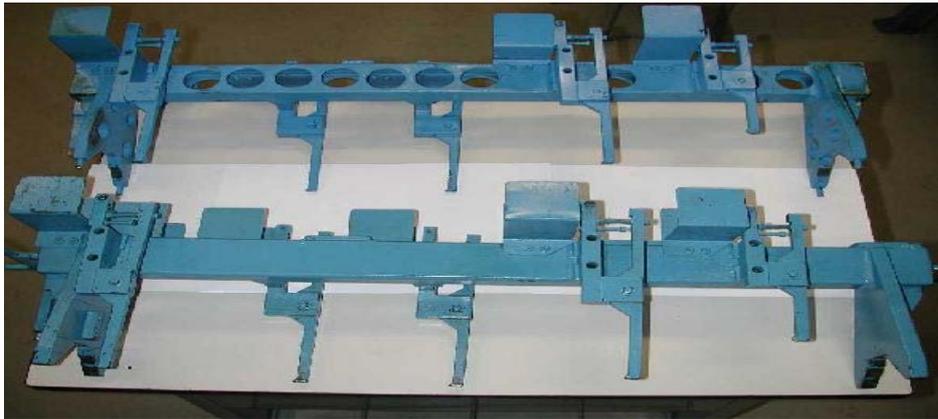


Figura 5.12 Sistemas de Medição de Comprimento sem furo de alívio de peso (abaixo) e com furo de alívio de peso (acima).

Esta alternativa possui a vantagem de ser rápida e econômica, porém não é muito eficiente, pois a redução de peso é pequena como no caso do Sistema de Medição mostrado na Figura 5.12, onde o peso antes de efetuar os furos de alívio era 8700 gramas e após a realização dos furos 8000 gramas.

- b) Modificar o projeto do Sistema de Medição de Comprimento utilizando sempre que possível material mais leve (alumínio) de modo que para novos produtos o problema ergonômico seja minimizado, a Figura 5.9 traz uma foto de um Sistema de Medição de Comprimento confeccionado em alumínio com um peso significativamente menor (4100 gramas) apesar de ser utilizado para a medição de comprimentos maiores.



Figura 5.9 Sistemas de Medição de Comprimento confeccionado em alumínio peso 4100 gramas.

Esta alternativa é muito eficiente, pois a redução de peso é bastante grande, porém o custo é alto sendo necessário a confecção de um Sistema de Medição totalmente novo, por esta razão a empresa optou em adotar este Sistema apenas para produtos novos. Ressalta-se aqui a importância de se manter o padrão de ajuste do sistema de medição confeccionado no mesmo material que o produto medido, aço, bem como a necessidade de manter a prática de “zerar” o sistema de medição antes de cada medição, de maneira a minimizar o efeito temperatura na variabilidade do processo de medição.

Outras Ações Recomendadas

Após o estudo recomendou-se:

- Uma análise do Lay Out da operação verificando a possibilidade de posicionar a bancada de medição mais próximo da linha de transferência do produto entre operações minimizando a movimentação do produto e do sistema de medição.
- Verificar a viabilidade de introduzir um sistema de sustentação do peso do sistema de medição de modo a minimizar o esforço do operador na movimentação do mesmo.
- Efetuar uma análise da estabilidade do processo de medição em um período maior de tempo (4, 6, 8, 10 e 12 meses), de maneira a verificar a adequação da frequência de calibração [28].

Capítulo 6

MACRO ANÁLISE DA VARIABILIDADE DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS EM UMA LINHA DE USINAGEM

As metodologias de análise de processos de medição utilizadas pelas empresas, (ex.: MSA da QS_9000) , tratam os processos de medição de maneira individual, não abordando aspectos comuns envolvidos, dificultando uma análise mais ampla que possibilite a avaliação de macro oportunidades de melhorias nos processos de medição e seu gerenciamento.

O objetivo deste capítulo é fornecer uma visão geral da variabilidade dos Sistemas de Medição (SM) atualmente utilizados em uma linha de usinagem de virabrequins.

Os dados apresentados neste capítulo foram obtidos de 47 estudos realizados (ver Figura 6.1), em processos de medição utilizados na linha de usinagem apresentada no capítulo 4, utilizando-se da metodologia apresentada nos capítulos 3 e 5.

Características	Número de Estudos
Comprimento	31
Posição Angular	5
Meio Curso	4
Empenamento	3
Diâmetro	4

Figura 6.1 Número de estudos realizados por tipo de processo de medição.

6.1 MACRO ANÁLISE DISCRIMINAÇÃO

A “Capacidade do processo de medição de identificar diferenças entre medições provenientes do processo de medição quando se mede uma mesma característica, numa mesma peça”, como discutido na Seção, é denominada de discriminação do processo de medição.

O gráfico da Figura 6.2, apresenta o resultado da análise das avaliações realizadas durante o desenvolvimento desta dissertação.

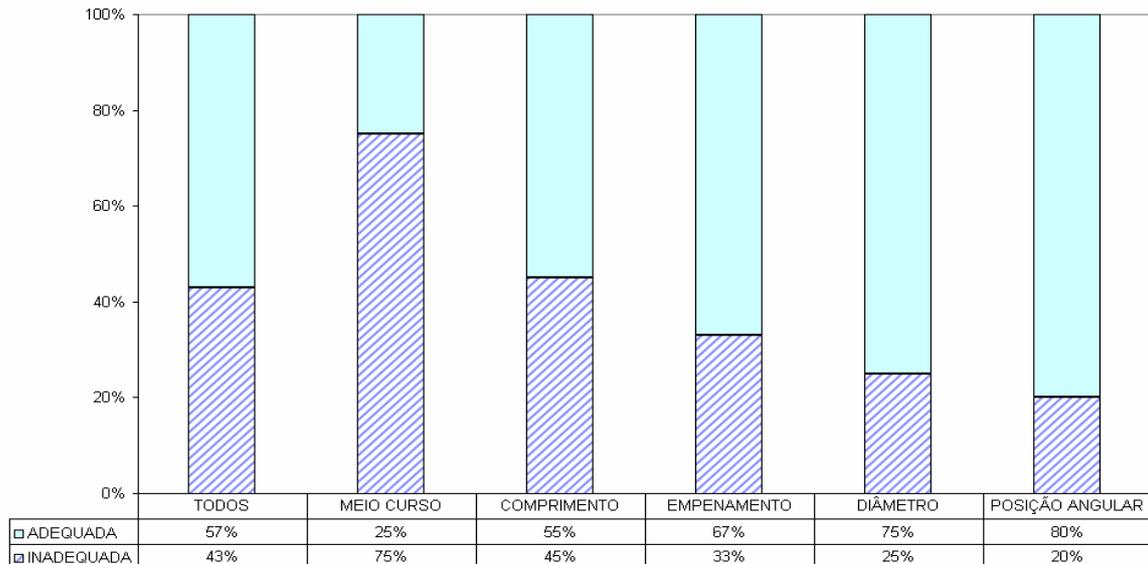


Figura 6.2 Macro análise da discriminação de 5 tipos de processos de medição.

Neste gráfico nota-se que:

- Pouco mais da metade dos estudos realizados (57 %) indicam que o processo de medição é adequado quanto a discriminação;
- 43 % indicam que o processo de medição não possui discriminação adequada para detectar a variabilidade do próprio processo de medição.

Analisando-se a adequação da discriminação por tipo de processo de medição, nota-se que todos os tipos de processo de medição analisados apresentaram-se em maior (Meio Curso 75%) ou menor (Posição Angular 20%) grau não adequados quanto a discriminação. Este fato pode trazer distorções na análise da estabilidade dos processos de medição, como será abordado na Seção 6.2.

6.2 MACRO ANALISE ESTABILIDADE A CURTO PRAZO

A aptidão de um processo de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo [27] como discutido na Seção 3.7.1, é a definição de estabilidade de um processo de medição. A Figura 6.3 traz uma visão geral da estabilidade a curto prazo dos processos de medição avaliados nesta dissertação, uma vez que o período de tempo utilizado para a realização das medições foi sempre inferior a 10 dias.

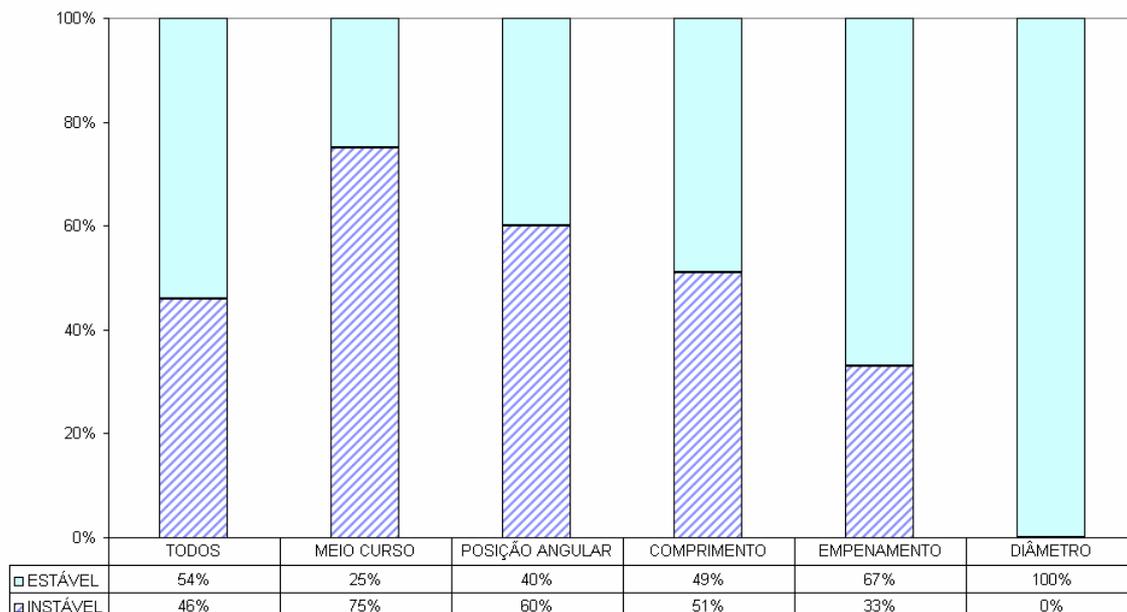


Figura 6.3 Comparação da estabilidade de 5 tipos de processos de medição utilizados na linha de usinagem.

Este resultado, apresentado na Figura 6.3, possui uma influência da discriminação do processo de medição, uma vez que processos de medição com baixa discriminação tendem a apresentar sinais de instabilidade devido a diminuição da estimativa do desvio padrão para o cálculo dos limites de controle acarretando em uma instabilidade "aparente" do processo de medição (ver Seção 3.7.2). Na Figura 6.4, efetua-se uma comparação da estabilidade e discriminação dos processos de medição.

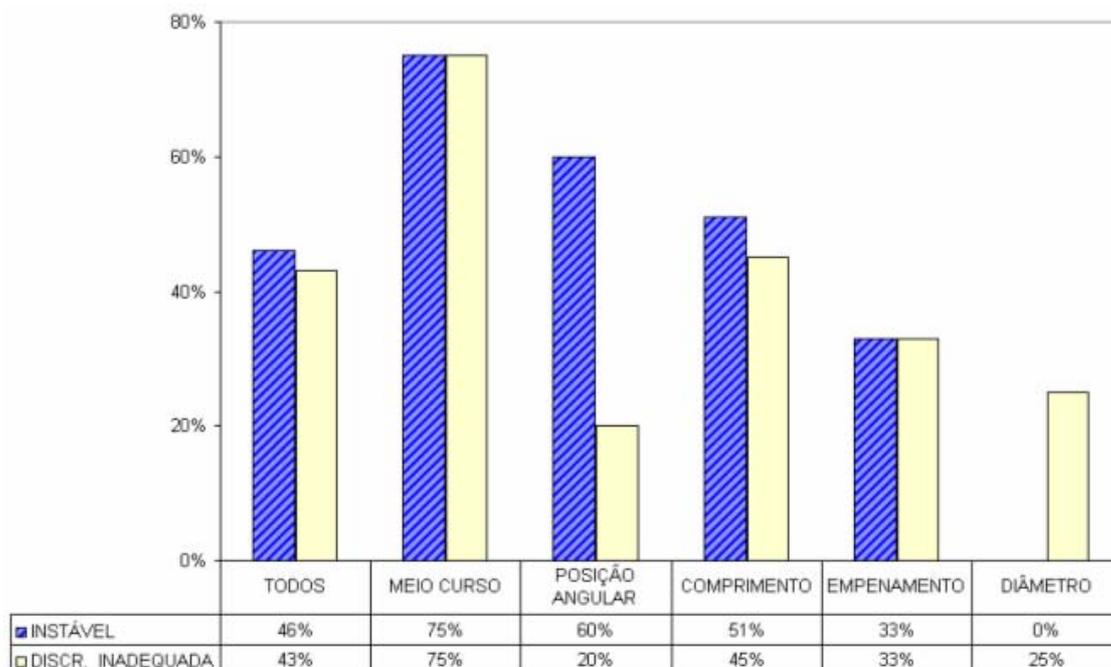


Figura 6.4 Comparação da discriminação e estabilidade de processos de medição.

Medição utilizados em uma Linha de Usinagem.

Para o processo de medição de meio curso observa-se a mesma quantidade de processos com discriminação inadequada e instável. Na prática uma simples substituição do dispositivo mostrador por outro com maior resolução, de 0,01 mm para 0,001 mm, resultou na eliminação do problema de discriminação e “instabilidade” do processo de medição.

6.3 COMPARANDO O R&R COM A TOLERÂNCIA E A VARIABILIDADE DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.

O gráfico da Figura 6.5 compara o valor do R&R com a tolerância do processo de fabricação indicando que 9% dos processos de medição possuem uma variabilidade maior que 30% da tolerância do processo de fabricação e portanto não são aceitáveis, segundo os critérios adotados pela grande maioria das empresas de auto peças, ver Seção 3.8.5. Apenas 46% dos processos de medição foram considerados aceitáveis sem restrições.

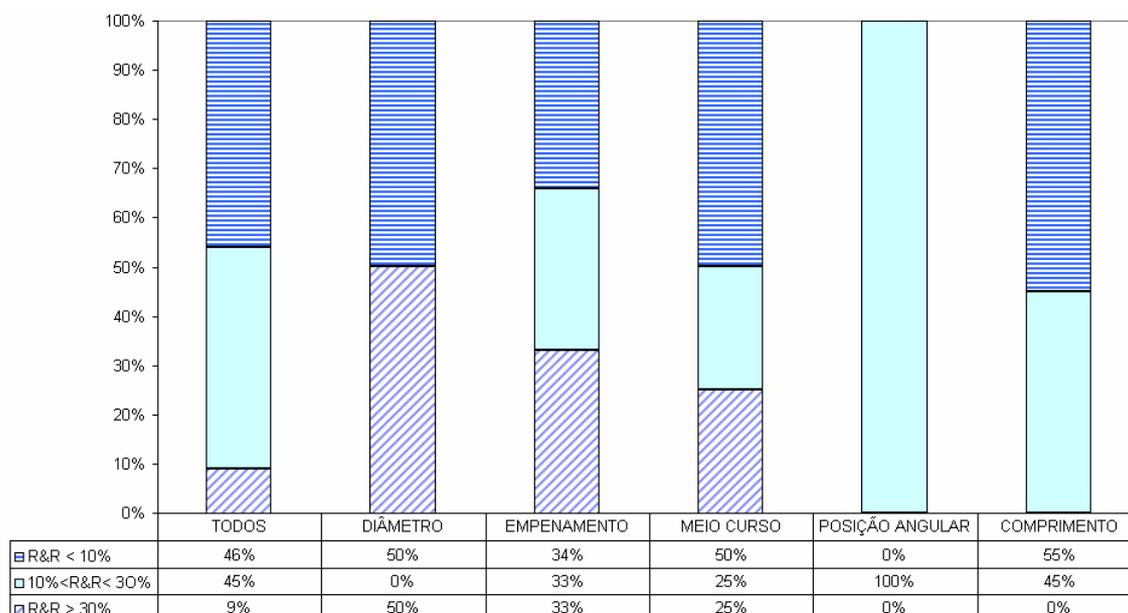


Figura 6.5 Comparação do R&R com a tolerância do processo de fabricação.

Quando se compara o valor do R&R com a variabilidade do processo de fabricação (Figura 6.6) verifica-se que 17% dos processos de medição possuem uma variabilidade maior que 30% da variabilidade do processo de fabricação e portanto não são aceitáveis, ver Seção 3.8.5 . Apenas 30% dos processos de medição foram considerados aceitáveis sem restrições.

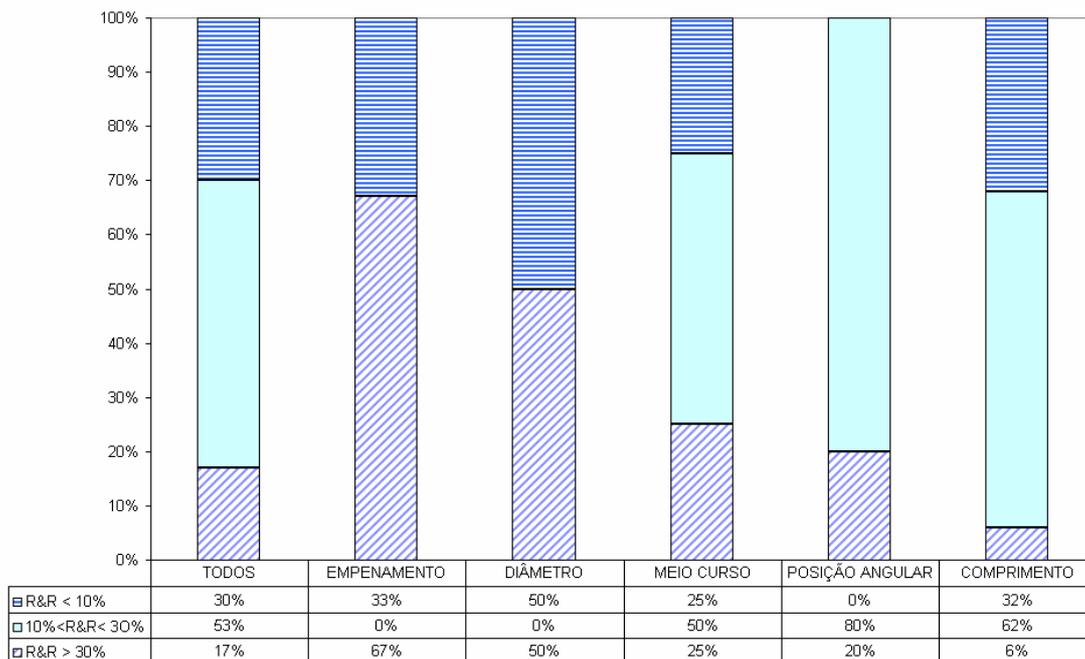


Figura 6.6 Comparação do R&R com a variabilidade do processo de fabricação.

A análise dos gráficos da Figura 6.5 e Figura 6.6 indicam que nos cinco tipos de processos de medição analisados há a necessidade de diminuir a variabilidade dos mesmos.

6.4 FATOR DE MAIOR INFLUÊNCIA NO R&R

Nesta seção será comparada de uma maneira geral à influência da Repetitividade e da Reprodutibilidade na variabilidade dos processos de medição. Considerou-se que um fator possui maior influência no R&R se a diferença entre este e o outro é superior a 1% da variabilidade do processo.

Na Figura 6.7 observa-se que na maioria (57%) dos processos de medição analisados o fator de maior influência no R&R é a Repetitividade, indicando que a diminuição da variabilidade dos mesmos deve ser iniciada pela diminuição da variabilidade dos sistemas de medição. Apesar da Reprodutibilidade dos processos de medição ser o fator de maior influência na menor parte dos processos de medição analisados o fator operador na variabilidade do processo de medição deve ser considerado já que a Reprodutibilidade é o fator de maior influência em 30% dos estudos realizados, chegando a 50% nos processos de medição de meio curso.

Medição utilizados em uma Linha de Usinagem.

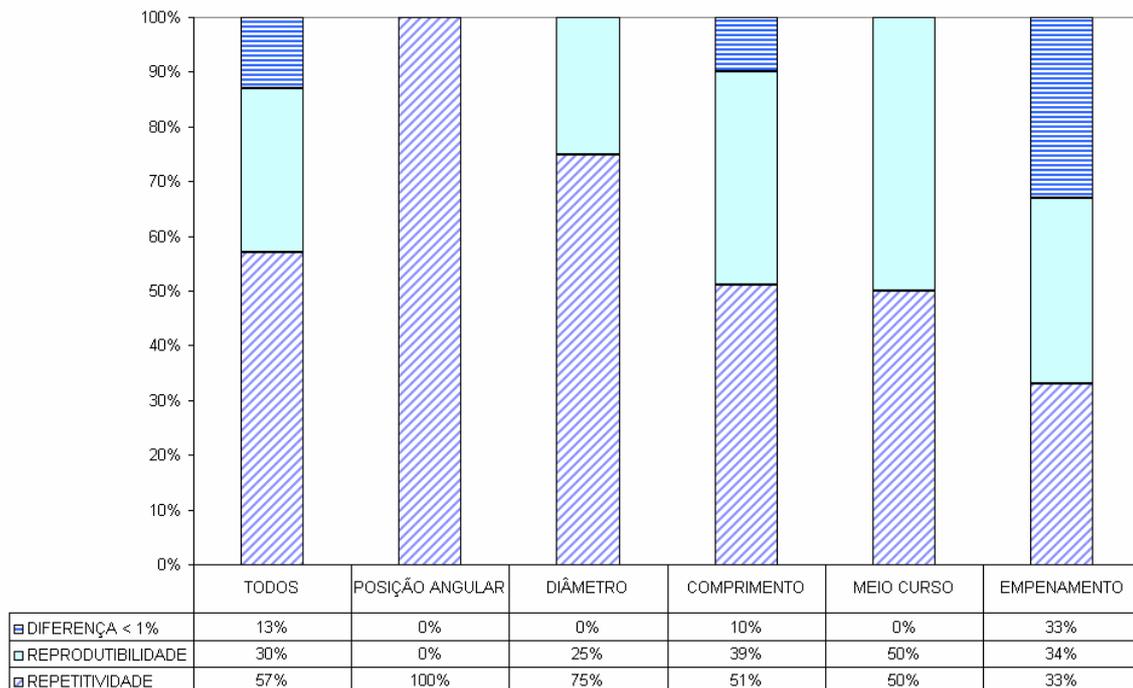


Figura 6.7 Fator de maior influência no R&R.

6.5 CONCLUSÕES

Após a análise destes processos de medição as seguintes ações são recomendadas:

- Efetuar um programa para minimizar a variabilidade dos processos de medição rejeitados.
- Treinar os inspetores das salas de dispositivos a avaliar os processos de medição incluindo discriminação, estabilidade, R&R e a importância da realização do estudo pelo usuário final (operador ou inspetor final)
- Estabelecer um programa de manutenção dos sistemas de medição incluindo um treinamento do usuário final em relação aos cuidados necessários na utilização do mesmo.

6.6 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA A OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

Para analisar as alternativas para otimizar os processos de medição devem ser considerados todos os problemas apontados nas análises prática, gráfica e analítica, neste caso o uso de tabelas auxilia na análise dos dados.

Uma primeira análise é realizada para verificar os possíveis locais de utilização dos sistemas de medição avaliados. Na tabela da Figura 6.8 nota-se que:

- sistemas de medição de comprimento são requeridos em todas as operações analisadas

Medição utilizados em uma Linha de Usinagem.

- sistemas de medição de diâmetro são requeridos em 3 das 4 operações analisadas (75%)
- sistemas de medição de empenamento são requeridos em 3 das 4 operações analisadas (75%)
- sistemas de medição de meio curso são requeridos em 2 das 4 operações analisadas (50%)
- sistemas de medição de posição angular são requeridos em 2 das 4 operações analisadas (50%)

Esta situação, discutida com a equipe do projeto, traz a tona a indagação **É POSSÍVEL REALIZAR ESTA MEDIÇÃO COM UM ÚNICO SISTEMA DE MEDIÇÃO?**

Na continuidade da análise da tabela da Figura 6.8 verifica-se que possivelmente 3 tipos de sistemas de medição sejam requeridos conforme segue:

- um para controlar as 5 características analisadas a ser utilizado nas operações de fresar e retificar;
- um para controlar as características comprimento e diâmetro na operação de tornear;
- um para controlar as características de comprimento e empenamento na operação de temperar

Característica a controlar	Local de Utilização			
	Tornear	Fresar	Temperar	Retificar
Comprimento	sim	sim	sim	sim
Diâmetro	sim	sim	não	sim
Empenamento	não	sim	sim	sim
Meio Curso	não	sim	não	sim
Posição Angular	não	sim	não	sim

Figura 6.8 Análise dos locais de utilização de sistemas de medição de comprimento, diâmetro, empenamento, meio curso e posição angular.

Na Figura 6.9 pode ser observado de maneira resumida os tipos de problemas encontrados nos processos de medição avaliados.

Medição utilizados em uma Linha de Usinagem.

Característica a controlar	Tipo de Problemas									
	Ergonômicos	Estabilidade	Discriminação	Repetibilidade	Reprodutibilidade	Custo de Manutenção	Custo de Calibração	Flexibilidade	Adequação às necessidades do processo	Registro
Comprimento	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	sim
Diâmetro	sim	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Empenamento	não	sim	sim	sim	sim	não	não	não	não	sim
Meio Curso	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	sim
Posição Angular	não	sim	sim	sim	sim	não	não	não	não	sim

Figura 6.9 Tipos de problemas dos processos de medição de comprimento, diâmetro, empenamento, meio curso e posição angular.

Após análise realizada pela equipe do projeto, foram extraídas as seguintes informações:

- Os processos de medição de empenamento e posição angular não apresentam problemas relativos a ergonomia, pois não requerem uma grande movimentação para efetuar a medição.
- Em geral é notório a necessidade de aumentar o poder de discriminação dos processos de medição.
- Os problemas de repetibilidade dos sistemas de medição estão correlacionados, além dos problemas de discriminação, ao estado de deterioração dos mesmos requerendo uma reanálise da sistemática de manutenção e calibração dos sistemas de medição.
- A reprodutibilidade apesar de não ser o principal fator de influencia na variabilidade dos sistemas de medição traz a tona a necessidade de rever a sistemática de treinamento dos operadores quanto a utilização dos sistemas de medição.
- Pode ser observado que o custo de manutenção e calibração dos sistemas de medição são menores para sistemas flexíveis, capazes de medir uma maior gama de produtos, como no caso do controle de empenamento e posição angular onde um único sistema de medição é capaz de medir todos os tipos de peças produzidos na linha de usinagem.
- Quanto a adequação do sistema de medição às necessidades do processo, com exceção dos demais tópicos mencionados, pode se notar que apenas o sistema de medição de diâmetro não atende a este requisito, isto se deve ao fato da necessidade de controle desta característica em todo o seu contorno (360°) o que é inviável utilizando-se o sistema de medição analisado pois seria necessário girar a peça (ou o sistema de medição) e aumentaria o risco do operador lesionar sua mão (cortar) na rebarba do produto já que o sistema de medição não permite o giro da peça sem um contato físico nas regiões com rebarba.
- O preenchimento de registros das inspeções realizadas também foi apontado como um problema na utilização de todos os sistemas de medição, pois são realizados manualmente

Medição utilizados em uma Linha de Usinagem.

pelo operador que pode acarretar em um acréscimo de erro no momento de transcrever o resultado da medição para o registro assim como exige um tempo do operador para o preenchimento do mesmo.

6.7 AÇÕES RECOMENDADAS

Projetar um único Sistema de Medição capaz de controlar as características de comprimento, posição angular, diâmetro, meio curso e empenamento de todas as peças produzidas na linha de usinagem com registro eletrônico tomando por base os sistemas de medição existentes e corrigindo as deficiências dos mesmos.

Introduzir este novo conceito para os novos produtos a serem produzidos e avaliar o retorno do investimento necessário para substituir os sistemas existentes [50][51][52] .

Estabelecer um programa de treinamento e integração de novos operadores abrangendo a utilização dos sistemas de medição.

Revisar a da sistemática de manutenção e calibração dos sistemas de medição de maneira a minimizar a deterioração dos mesmos.

Capítulo 7

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos principais fatores para o sucesso dos projetos Seis Sigma é a integração das ferramentas aplicadas na metodologia, que proporciona uma visão geral do processo analisado priorizando ações a serem realizadas com objetivos claros, voltados a uma única finalidade a diminuição da variabilidade do processo gerando retorno financeiro.

A metrologia dentro desta metodologia é fundamental para que as informações geradas sejam confiáveis e permitam um direcionamento preciso das ações a serem tomadas para minimizar a variabilidade do processo em torno do valor alvo.

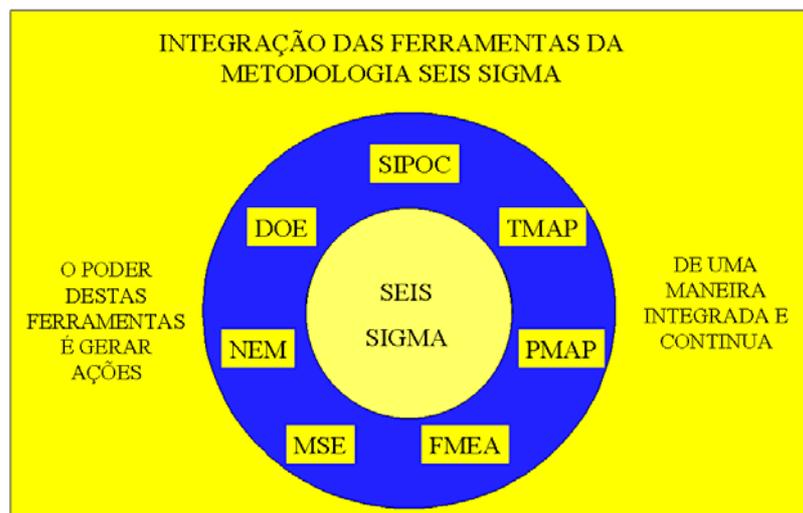


Figura 7.1 Ferramentas da metodologia Seis Sigma gerando ações de maneira integrada e contínua.

Conclui-se que, em projetos de melhoria numa empresa industrial, 4 pontos relevantes devem ser considerados:

- ✓ Antes de se estabelecer um projeto em uma indústria deve ser avaliado o impacto financeiro do mesmo nos resultados da empresa. Uma análise dos indicadores de custos da

empresa é um bom direcionador de projetos.

- ✓ Numa empresa industrial onde o lucro é gerado através da venda de produtos manufaturados, e não através da medição dos mesmos, cabe ao metrologista, o papel de questionar a necessidade de realização das medições estabelecidas.
- ✓ Um trabalho em equipe focado em reduzir desperdício através da minimização da variabilidade de processos críticos, utilizando uma metodologia estruturada como o a metodologia Seis Sigma, onde se visualiza claramente os ganhos financeiros do projeto, certamente terá o suporte necessário dos níveis mais altos da organização para ser bem sucedido.
- ✓ Após a realização de um projeto de melhoria os resultados devem ser divulgados de maneira a incentivar o estabelecimento de novos projetos.

Como descrito no capítulo 3 esta dissertação foi desenvolvida no contexto da implementação de um projeto Seis Sigma, o qual teve como meta a diminuição do refugo em uma linha de usinagem. Na Figura 7.2 é mostrado a evolução do nível de refugo (em PPM) na linha de usinagem utilizada para o estudo de caso, observa-se que o resultado do primeiro mês (agosto/01) do projeto é ainda pior que o resultado acumulado nos seis meses anteriores, este fato deveu-se a tendência que o processo de fabricação apresentava antes do início do projeto. Na Figura 7.3 e Figura 7.4 é mostrado o retorno financeiro gerado.

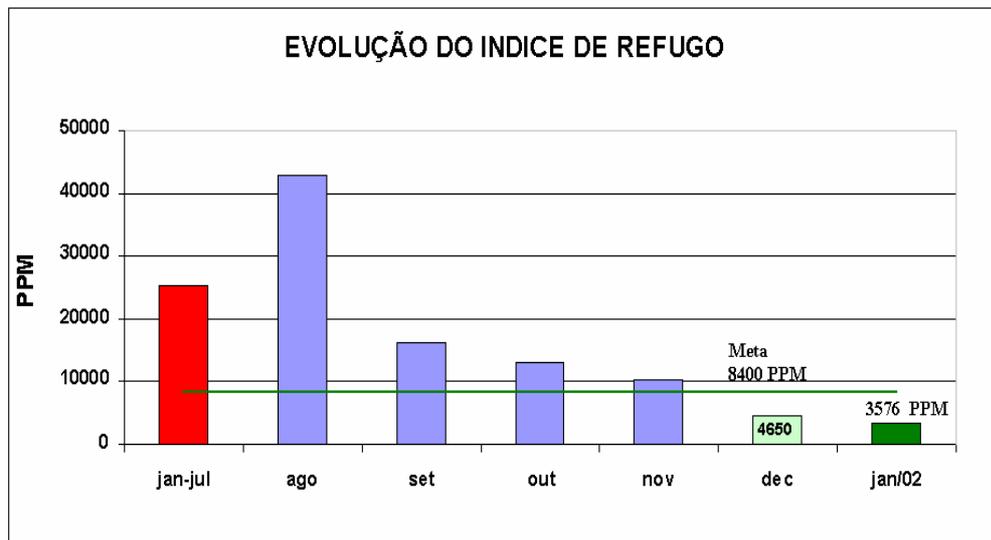


Figura 7.2 Evolução do indicador de refugo em uma linha de usinagem durante a implementação de um projeto Seis Sigma iniciado em agosto de 2001 e concluído em dezembro 2001

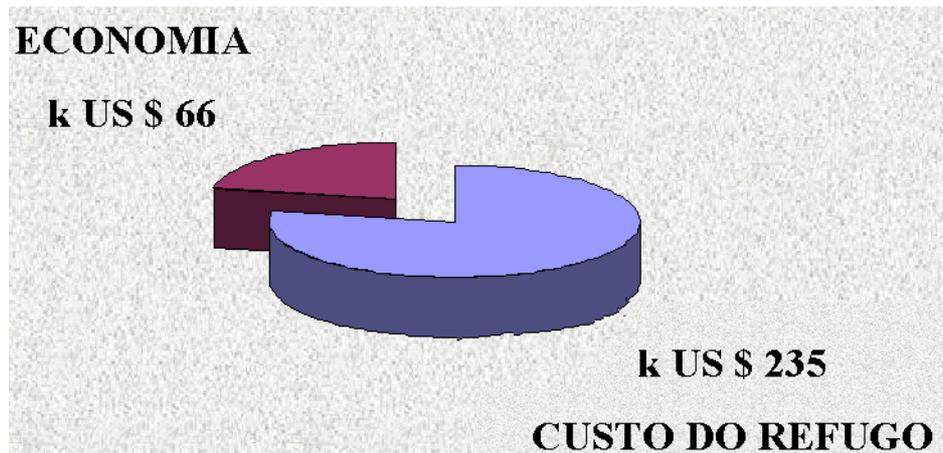


Figura 7.3 Economia realizada durante os cinco meses de desenvolvimento de um projeto Seis Sigma em uma linha de usinagem de virabrequins.

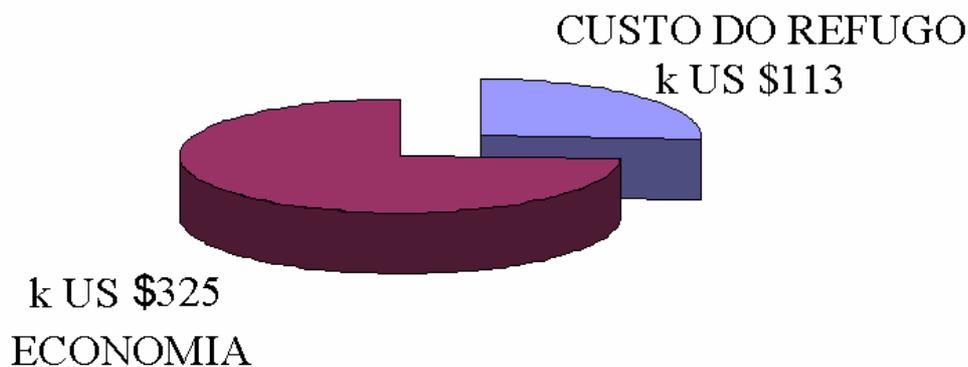


Figura 7.4 Economia anual projetada após a conclusão do projeto Seis Sigma em uma linha de usinagem de virabrequins.

Ressalta-se aqui que os resultados, apresentados na Figura 7.2, Figura 7.3 e Figura 7.4, não foram gerados única e exclusivamente pela avaliação do processo de medição, mas sim por um conjunto de ações realizadas de maneira integrada e direcionada para a minimização da variabilidade do processo de fabricação, acarretando num menor índice de refugo e conseqüentemente menor custo.

O método para avaliação de processos de medição proposto nesta dissertação traz uma seqüência lógica de atividades a serem realizadas de forma individual e coletiva, contemplando uma análise:

- prática, onde são avaliadas as observações e comentários realizados pelos operadores e pelo metrologista;
- gráfica, onde se verifica a discriminação, estabilidade, erro de medição, reprodutibilidade e a indicação da presença de interações entre o operador e a peça;
- analítica, onde se quantifica a repetitividade a reprodutibilidade e se compara com a tolerância e variabilidade do processo de fabricação, assim como a se verifica a significância

do impacto dos fatores variação do processo , operador, sistema de medição e interação entre peça e operador na variabilidade do estudo;

- da necessidade de realização de macro ações para manter e melhorar os processos de medição atualmente utilizados
- de alternativas para melhorar os processos de medição.

É importante ressaltar que recomenda-se aplicar este método, após a identificação de problemas a serem resolvidos através da diminuição da variabilidade do processo de fabricação, gerando uma melhora nos resultados financeiros da empresa. Destaca se, também, a necessidade da metodologia ser aplicada por uma equipe, onde a participação do dono do processo, da engenharia do processo e do metrologista é fundamental, para que sejam estabelecidas ações que proporcionem uma otimização dos processos de medição, sem a qual a aplicação desta avaliação não faria sentido.

A limitação da metodologia está na desvinculação com o sistema de rastreabilidade metrológica, uma vez que a avaliação é realizada com base em estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade utilizando peças produzidas pelo processo de fabricação, onde o sistema de medição é utilizado, portanto, além da metodologia apresentada nesta dissertação é fundamental que a empresa possua um sistema de calibração de seus sistemas de medição, rastreável a padrões internacionais, que garanta a centralização dos seus processos de medição.

Analisando-se o ambiente da empresa, em que foi realizado o estudo de caso, que, como descrito no capítulo 4, trata-se de uma empresa com elevada reputação quanto a qualidade de seus produtos, acredita-se que esta metodologia aplicada a outras empresas poderá demonstrar que o estado atual dos processos de medição das mesmas apresenta indicadores ainda menos satisfatórios do que os apresentados nesta dissertação.

Com base nesta hipótese e acreditando que a proliferação da aplicação da metodologia, descrita nesta dissertação, trará uma diminuição do atual nível de desperdício nas empresas brasileiras, gerando um melhor resultado financeiro e conseqüentemente um aumento de competitividade das mesmas, sugere-se desenvolver um Programa Nacional de Metrologia Industrial com Enfoque na Avaliação de Processos de Medição em Empresas Industriais Gerando Retorno Financeiro, que certamente trará um aumento da competitividade das empresas nacionais auxiliando-as a aumentar sua margem de participação no mercado brasileiro e no exterior.

Referências Bibliográficas

- [1] Prado , H. R. **Preferencia pela conformidade. Instrumentação Metrologia no 4 , 2001, pág. 3**
- [2] Bachmair, Hans **The impact of globalization on today's metrology.** Anais do Metrocal 2001 – Segundo Congreso Internacional de Metrologia para la Productividad y la Calidad. Universidade de Concepción, p.485-497. Chile, 25 al 27 de abril de 2001
- [3] INMETRO **Barreiras Técnicas às exportações.** <http://www.inmetro.gov.br/articulacoes/barreirasTecnicas.asp>, 2002.
- [4] INMETRO **Entrevista com Paulo Ferracioli, coordenador geral de Articulação Internacional do INMETRO. "Contra Barreiras Técnicas".** <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/460.asp>, 2002.
- [5] Souza, Reinaldo D. F. **Tecnologia Industrial Básica como fator de competitividade.** Revista Parcerias Estratégicas nº 8, p. 103-126. Maio de 2000.
- [6] NBR ISO 9000:2000 **Sistemas de gestão da qualidade – Fundamentos e vocabulário.** Rio de Janeiro: ABNT, 26p. Dezembro de 2000.
- [7] Cerqueira Neto, Edgard P. **Gerenciando a Qualidade Metrológica.** Rio de Janeiro: Imagem Ed., ISBN 85-85487-04-6. 194p. 1993
- [8] NBR ISO 9001:2000 **Sistema de gestão da qualidade – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT. 21p. Dezembro de 2000.
- [9] QS 9000 **Requisitos do Sistema da Qualidade.** Tradução da 3ª ed. Americana. São Paulo: IQA – Instituto de Qualidade Automotiva, 113p. Março de 1998.

- [10] ISO/TS 16949 **Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations.** Second edition. 34p. Março de 2002.
- [11] Wheeler, D. J., Lyday, R.W. **Evaluating The Measurement Process** second edition, 1989.
- [12] AIT **Apostila Six Sigma Black Belt Training Session 1,** julho 2001.
- [13] AIT **Apostila Six Sigma Black Belt Training Session 2,** agosto 2001.
- [14] AIT **Apostila Six Sigma Black Belt Training Session 3,** setembro 2001.
- [15] AIT **Apostila Six Sigma Black Belt Training Session 4,** outubro 2001.
- [16] AIT **Apostila Six Sigma Black Belt Training Session 5,** dezembro 2001.
- [17] Chowohury, S. **The Power of Six Sigma,** 2001.
- [18] Harry, M. J. **The Vision of Six Sigma,** fourth edition, 1994
- [19] Shewart, W. **Economic Control of Quality of Manufactured Product,** 1931
- [20] IQA **Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial FMEA QS 9000 ,**1997
- [21] Stamatis, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution,** 1995
- [22] Eachus, J. **Failure Analysis in Brief. In Reliability and Quality Handbook,** 1982.
- [23] Sakurada, E. Y. **As Técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos,** 2001.
- [24] Ireson W. G. ; Coombs C. F.; Moss R. Y. **Handbook of Reliability Engineering and Management,** second edition, 1995.
- [25] Benbow D. W.; Berger R. W.; Elshennawy A. K.; Walker H. F **The Certified Quality Engineer Handbook,** 2002.
- [26] Pfeifer, T.; Torres F. **Manual de Gestión e Ingeniería de la Calidad,** 1999.

- [27] INMETRO **VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia.** Rio de Janeiro: INMETRO/DIMCI, 52p. 1995.
- [28] QS 9000 / MSA **MSA - Análise dos sistemas de medição: manual de referência.** 1ª. ed. brasileira. Tradução da 2ª. ed. americana. São Paulo: IQA – Instituto de Qualidade Automotiva. 126p. Junho de 1994.
- [29] Oliveira, P.L.L. ; Infante, C.E. **Apostila curso interno KRUPP Seis Sigma Green Belt Sessão I Parte I,** novembro 2002.
- [30] Oliveira, P.L.L. ; Infante, C.E. **Apostila curso interno KRUPP Seis Sigma Green Belt Sessão I Parte II,** novembro 2002.
- [31] Oliveira, P.L.L **Apostila interna KRUPP Noções Das Ferramentas do Seis Sigma,** novembro 2002.
- [32] MCT **Programa Tecnologia Industrial Básica e Serviços Tecnológicos para Inovação e Competitividade,** 2001
- [33] Juran, J.M. **Juran na Liderança pela Qualidade - Um Guia para Executivos – 3ª Edição,** tradução de João Mário Csilag – Editora Livraria Pioneira, 1995
- [34] MICT / CBM **Plano Nacional de Metrologia: sumário executivo** novembro 1999.
- [35] Minitab Inc. **Minitab: The Standard for Six Sigma Success**
www.minitab.com dezembro 2002
- [36] QS 9000 / CEP **Fundamentos de controle estatístico do processo (CEP): manual de referência.** 1ª. ed. brasileira. Tradução da 2ª. ed. americana. São Paulo: IQA – Instituto de Qualidade Automotiva. 168p. Junho de 1995.

- [37] THEISEN, Álvaro M. F. **A contribuição da calibração dos equipamentos de medição para a qualidade do produto.** Anais do II Congresso Brasileiro de Metrologia - Metrologia 2000. Volume 1: Generalist papers, p.412-416. São Paulo, Brasil, 4 a 7 de dezembro de 2000.
- [38] Urrutia, José I. D. **Avaliação dos processos de medição na indústria, baseada no impacto econômico da operação de controle geométrico.** Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC. 87p. Florianópolis, Agosto de 2000.
- [39] MDIC, CNI, INMETRO e SENAI **Barreiras Técnicas às Exportações – O que são e como superá-las,** 2002
- [40] Crosby, P.B. **Qualidade é Investimento? A arte de Garantir a Qualidade – 7ª Edição,** Editora J. Olympio, Rio de Janeiro – RJ, 1999.
- [41] Juran, J. M. Gryna, F. M. **Controle da Qualidade *Handbook* – Conceitos, políticas e filosofia da qualidade –** Editora McGraw-Hill, 1991.
- [42] Feigenbaum, A. V. **Total Quality Control –** Editora McGraw—Hill, 1986.
- [43] CERTI **Incerteza de Medição em Processo de Inspeção Dimensional em Chão de Fábrica. Apostila de curso,** julho 2001.
- [44] Gonçalves Junior, A.A. **Metrologia – Parte 1. Apostila do curso de mestrado em Metrologia Científica e Industrial,** abril 2000.

- [45] EA-4/02 **Expressão da Incerteza de Medição na Calibração.** Referência Original do Editor EAL-R2, Expression of Uncertainty of Measurements in Calibration. INMETRO ABNT, SBM, 1999.
- [46] ISO GUM **Guia para Expressão da Incerteza de Medição.** Segunda Edição Brasileira do "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement". INMETRO, ABNT, SBM, 1998.
- [47] Link, Walter **Metrologia Mecânica: Expressão da Incerteza de Medição,** julho 1997.
- [48] KMCL **Manual da Garantia da Qualidade KMCL,** 2002
- [49] Oliveira, P.L.L. ; Infante, C.E. **Apostila curso interno KRUPP Seis Sigma Green Belt Sessão II,** setembro 2002.
- [50] Urritia, José I. D. **Selecion de Processos de Medición, un Problema de Costos.** Anais do II Congresso Brasileiro de Metrologia – Metrologia 2000, dezembro 2000.
- [51] Dale, B. G.; Plunkett, J.J. **Quality Costing,** 3ª Edição, 1999
- [52] Campanella, J. **Principles of Quality Costs,** 3ª Edição, ASQ, 1999
- [53] INMETRO; CNI ; SENAI **Sistema Internacional de Unidades,** 6ª Edição, 2000.