

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

**UMA SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA
QUALIDADE METROLÓGICA APLICADA EM
AMBIENTE INDUSTRIAL**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa
Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Metrologia**

Autor: Anderson Cesar da Silva, Eng.

Orientador: Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

Florianópolis, Setembro de 2005.

UMA SISTEMÁTICA PARA GARANTIA DA QUALIDADE METROLÓGICA APLICADA EM AMBIENTE INDUSTRIAL

Anderson Cesar da Silva

Esta 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. Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Coordenador do Curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e
Industrial

Banca Examinadora:

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph. D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Analucia Vieira Fantin, Dra. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Celso Nickel Veiga, Dr. Eng.
Pontifícia Universidade Católica - Paraná

Paulo Gustavo Veloso de Moura da Silva, M. Sc. Eng.
Zen S.A.

“Revelemo-nos mais por atos do que por palavras

dignos de possuir este grande país”

Dr. Theodomiro Carneiro Santiago

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente aos meus pais que com muito amor sempre me acompanharam desde o início nessa longa caminhada.

Ao meu orientador Gustavo Donatelli por mostrar os caminhos e passar ensinamentos que carrego comigo, mas principalmente por muitas vezes ser mais do que um professor ou orientador e sim um amigo.

Não posso esquecer dos amigos, Clayton, Suelen, Rodolfo, Daniel, Bruno ao pessoal da T2003, André, Poletto, Patrick, Daniel, Raphael, Liliana, ao pessoal do Labmetro os quais destaco, Andréia, Marcão, Crhistian, Paulo Gustavo além de todos do doutorado das Turmas 2002 e 2004, a minha namorada Adriana. Aos importantes professores, onde sei que aprendi muito, Armando, Flesch, Schneider, Cavaco, todos colaboradores do Labmetro, sem esquecer é claro da Rosana que sempre me auxiliou sendo além de tudo uma amiga, aos colaboradores da Fundação CERTI, Gilmar, Thiago, Alexandre, dona Olga entre vários outros.

Não posso deixar o meu muitíssimo a todos da Zen S.A. onde destaco meus amigos Gilson, Jairo, Volnei, Márcio, todo pessoal que convivi na “casa dos estagiários”, Reinaldo, Picolli, Laurence entre vários outros.

Também gostaria de agradecer a Bosch Rexroth por ter me incentivado nessa reta final.

Aos professores da Unifei José Leonardo e Luiz Fernando Barca por terem acreditado e incentivado o meu ingresso nessa jornada.

Por último ao Programa de Pós-Graduação Científica Industrial e toda estrutura que me proporcionaram essa oportunidade única.

RESUMO

Devido à grande concorrência no mercado internacional todas as indústrias procuram a garantia da qualidade de seus produtos com um mínimo gasto possível e com isso aumenta a difusão dos conceitos metrológicos para satisfação desses requisitos supracitados. Para então atender essas necessidades, as empresas certificadas QS 9000 e ISO/TS 16949 necessitam implantar ferramentas estatísticas de qualificação de Sistemas de Medição que auxiliem na confiabilidade da metrologia empregada.

Este trabalho apresenta as ferramentas mais utilizadas no âmbito industrial e laboratorial, incluindo também procedimentos para o seu uso, passando posteriormente pela criação de uma sistemática de aplicação das mesmas em todas as etapas de utilização de um sistema, desde sua seleção até o seu controle. Finalizando com exemplos da aplicação desenvolvidos em uma empresa do ramo automobilístico certificada com ISO/TS 16949.

ABSTRACT

Because of a large competition in the international market all the industries are looking for the quality assurance of your products with a minimum possible expense and because of this there is an increasing diffusion of the metrology concepts for satisfaction of these requirements above mentioned. With the purpose of acquiring satisfying needs, certified QS 9000 and ISO/TS 16949 companies need to implant statistical tools of qualification of Measurement Systems that assist in the reliability of the metrology employed.

This report presents the most used tools in the industrial and laboratorial scope, also including procedures, later passing through the creation of an application systematic in all the stages of use of a Measurement System, since the selection until the control. Finishing with examples of the application in a certified ISO/TS 16949, that works with automobile products.

LISTA DE SIGLAS

MSA	Measurement System Analysis
ISO	International Organization for Standardization
R&R	Repetitividade e Reprodutibilidade
SM	Sistemas de Medição
SGQM	Sistema de Garantia da Qualidade das Medições
PGQM	Plano de Garantia da Qualidade das Medições
PMAP™	Process Measurement Assurance Program
QS	Quality System
TS	Technical Specification
EMP	Evaluating Measuring Process
VPMM	Verificação Periódica dos Meios de Medição
CEP	Controle Estatístico do Processo
VA	Variação entre Operadores
VT	Variação Total
VE	Variação do Equipamento
VP	Variação entre Peças
LIE	Limite Inferior Especificado
LSE	Limite Superior Especificado
WECO	Western Electric Company
FM	Faixa de Medição
M&A	Média e Amplitude

ÍNDICE ANALÍTICO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO.....	2
1.2 ESTRUTURA	3
CAPÍTULO 2 MÉTODOS EXISTENTES PARA O ESTUDO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	4
2.1 REQUISITOS RELATIVOS À RESOLUÇÃO.....	6
2.2 ESTUDO DE ESTABILIDADE	8
2.3 ESTUDO DE TENDÊNCIA	10
2.4 ESTUDO DE LINEARIDADE	18
2.5 ESTUDO DE REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE	22
2.6 REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO AUTOMÁTICOS	34
2.7 ESTUDO DE REPETITIVIDADE E TENDÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	35
2.8 PROGRAMA DE GARANTIA DA QUALIDADE DAS MEDICÕES EM PRODUCAO – PMAP™	37
CAPÍTULO 3 PROPOSTA DE GARANTIA DA QUALIDADE DAS MEDIÇÕES EM AMBIENTE FABRIL	41
3.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE GARANTIA DA QUALIDADE EM EMPRESAS.....	46
3.2 DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM OPERAÇÃO	49
3.3 AVALIAÇÃO DOS REQUISITOS INICIAIS	52

3.4	TESTES DE ACEITAÇÃO.....	53
3.5	LIBERAÇÃO PARA USO EM PRODUÇÃO.....	59
3.6	SUPERVISÃO CONTÍNUA DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO.....	62
3.7	PLANO DE GARANTIA DA QUALIDADE DAS MEDIÇÕES (PGQM) ..	66
	CAPÍTULO 4 ESTUDO DE CASO.....	71
4.1	ESTUDO PRELIMINAR.....	73
4.2	PGQM NA EMPRESA.....	79
4.2	ANÁLISE DE SM EXISTENTES NA CÉLULA	81
4.3	ANÁLISE DE SM A SEREM IMPLANTADOS	84
4.4	APLICAÇÃO DA SUPERVISÃO CONTÍNUA.....	87
	CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Gráfico de controle construído com resolução 0,001 mm.....	7
Figura 2.2 – Gráfico de controle construído com os mesmos dados brutos usados na figura 2.1, mas arredondados para resolução 0,01 mm.	7
Figura 2.3 – Conceito de estabilidade.....	8
Figura 2.4 – Conceito de tendência.....	11
Figura 2.5 – Dispositivo de inspeção equipado com dois relógios comparadores.....	17
Figura 2.7 - Gráfico mostrando os resultados do estudo de linearidade.	21
Figura 2.8 – Conceito de repetitividade e reprodutibilidade.....	23
Figura 2.9 - Planilha de coleta e análise de um estudo de sistema de medição pelo método da média e amplitude (3 operadores, 10 peças, 3 réplicas).	27
Figura 2.10 – Gráfico de controle de média e amplitude plotado com os valores informados na figura 2.9.	29
Figura 2.11 – Relação entre $R\&R(\%VT)$ e ndc	33
Figura 2.8 – Exemplo de um gráfico de controle baseado no conceito de PMAP™.....	39
Figura 3.1 – Processo de desenvolvimento de uma solução de medição.....	43
Figura 3.2 – Atividades da garantia qualidade preventiva das medições.....	43
Figura 3.3 – Atividades da garantia da qualidade das medições.....	45

Figura 3.4 – Fluxograma representativo da sistemática para garantia da qualidade das medições de produção	48
Figura 3.5 – Check-list sugerido para diagnosticar a adequabilidade potencial de sistemas de medição em operação.....	51
Figura 3.6 – Exemplo de dados de catálogo ... Erro! Indicador não definido.	
Figura 3.7 – Exemplo de uma análise de repetitividade de tendência do sistema de medição.....	55
Figura 3.8 – Exemplo de relatório de análise de R&R.	57
Figura 3.9 – Exemplo de um estudo de repetitividade para sistemas de medição automáticos.	58
Figura 3.10 – Exemplo de um gráfico de controle do PMAP TM	65
Figura 3.11 – Resumo da aplicação dos métodos estatísticos para garantia da qualidade das medições de produção.....	68
Figura 3.12 – Exemplo de PGQM.....	69
Figura 4.1 – Planta da Zen S.A. em Brusque	71
Figura 4.2 – Exemplo de produtos da série automotiva	72
Figura 4.3 – Base metrológica em uma célula de trabalho	73
Figura 4.4 – Peça selecionada para o Estudo.....	74
Figura 4.5 – Micrômetro Digital	75
Figura 4.6 – Projetor de Perfil utilizado.....	75
Figura 4.7 – Características selecionadas para o experimento	76
Figura 4.8 – Exemplo dos gráficos obtidos pelo estudo	78
Figura 4.9 – Relacionamento da base de dados do Gerenciador de Documentos – MSA.....	80
Figura 4.10 – Peça (pinhão) com a característica analisada destacada.....	82

Figura 4.11 – Novo SM selecionado	83
Figura 4.12 – Máquina de Medição de Fi e Batimento	85
Figura 4.13 – Carta de Controle com ponto fora de controle	88
Figura 4.14 – Carta de Controle com pontos no limite de controle	89
Figura 5.1 – Funções propostas em um Manual de Garantia da Qualidade das Medições.....	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 Características críticas analisadas	81
Tabela 4.2 Resultado de GR&R para utilização do paquímetro	83
Tabela 4.3 Resultado de GR&R para utilização do micrômetro	84
Tabela 4.4 Resultado de GR&R para o batimento	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O controle de processos de fabricação e a avaliação de conformidade de produto precisam se basear em medições confiáveis. Por esta razão, os sistemas da qualidade da indústria automotiva, QS 9000 [1] e TS 16949 [2] exigem que o fornecedor realize análises periódicas dos seus sistemas de medição. Essas análises estão descritas no manual MSA (Measurement Systems Analysis), atualmente na sua terceira edição [3] e também em outras publicações do gênero.

Sistemas de medição, que operam na inspeção de características significativas ou críticas da qualidade, devem ser submetidos a estudos de “estabilidade”, “tendência”, “linearidade” e “repetitividade e reprodutibilidade” [3] [4]. De forma similar, sistemas de inspeção por atributos devem ser avaliados em um estudo de “repetitividade e reprodutibilidade”. Esses estudos devem ser realizados usando várias peças de produção, envolvendo dois ou três operadores, os quais medem as peças repetidas vezes. Assim, por exemplo, um estudo de R&R convencional por variáveis pode requerer 90 medições e um estudo de R&R por atributos, de 180 a 210.

Além do fato supracitado, é necessário se fazer uma supervisão contínua desses sistemas de medição, fazendo-se o uso de ferramentas estatísticas alternativas existentes no mercado.

Quando se multiplica o tempo necessário para um estudo pelo número de sistemas de medição operados numa empresa qualquer, fica evidente que o tempo e dinheiro gastos no estudo dos sistemas de medição pode se tornar inaceitável ou inviável. Cientes dessa realidade, muitas empresas limitam o número de sistemas de medição sujeitos a estudo, aplicando critérios nem sempre bem fundamentados. Isso resulta em problemas de qualidade e despesas desnecessárias, além de expô-las a “não-conformidades” nas auditorias de cliente ou de terceira parte. [5] [6].

No entanto, os estudos mencionados são ferramentas da engenharia da qualidade, que visam consolidar as bases para uma gestão de processos eficiente. Por isso, devem ser aplicados nos casos em que seja tecnicamente necessário e no momento apropriado. Aplicá-los onde e quando não é necessário, é perder dinheiro. Não aplicá-los quando é necessário, pode resultar em perdas de produto e/ou operação “sub-ótima” dos processos.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo de idealizar e implantar um sistema que garanta a confiabilidade das medições/inspeções em uma indústria, consistente nas exigências da ISO/TS 16949. Esse sistema deve direcionar mais responsabilidades para os operadores, líderes e supervisores de produção, liberando tempo dos metrologistas para atuarem na melhoria contínua.

1.2 ESTRUTURA

Com objetivo de apresentar uma estrutura concisa de informações, este documento será dividido em 4 partes:

- Estado da arte;
- Proposta metodológica;
- Estudo de caso;
- Conclusões e melhorias.

O estado da arte abrangerá uma coletânea de informações e bibliografias pertinentes à apresentação de ferramentas utilizadas na garantia da qualidade de medições existentes no mercado e seus procedimentos de aplicação.

Na proposta metodológica será apresentada uma sistemática baseada nas informações obtidas no estado da arte, a qual será direcionada na aplicação em empresas certificadas ISO/TS 16949 ou em qualquer empresa que visa aplicar um método que auxilie na garantia da qualidade das medições realizadas.

O estudo de caso foi realizado na Zen S.A, localizada em Brusque no estado de Santa Catarina. Nesse estudo de caso pode-se dizer que existe uma divisão em duas partes, pois em primeira instância faz-se necessário um reconhecimento do ambiente para posteriormente mostrar exemplos da aplicabilidade da metodologia desenvolvida e um software dedicado como auxílio dessa aplicação.

A partir dos resultados obtidos pode-se então chegar a algumas conclusões e propostas de melhorias.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS EXISTENTES PARA O ESTUDO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Para se ter confiabilidade no resultado de uma medição é preciso se ter o conhecer e analisar os processos de medição e para isso são necessários alguns métodos e ferramentas estatísticas. Na avaliação de um sistema de medição, três questões fundamentais devem ser consideradas:

- A sensibilidade do sistema de medição deve ser adequada.
- O sistema de medição deve ser estável.
- As propriedades estatísticas (erros) devem ser consistentes ao longo do intervalo de medição esperado e adequadas ao propósito de medição (controle do produto e/ou controle do processo).

A primeira questão se refere à capacidade de discriminar entre valores diferentes da quantidade sujeita à medição. A propriedade dominante neste sentido é a resolução do dispositivo indicador ou, mais geralmente, a resolução com que se registram e processam os dados.

A segunda questão tem relação direta com a estabilidade ou estado de controle estatístico do processo de medição. Processos sob controle estatístico estão sob ação do sistema de causas comuns e isso os torna previsíveis. A

propriedade de previsibilidade é fundamental durante a aplicação, quando se espera que o sistema de medição opere de uma forma conhecida e consistente no tempo. Porém, é importante também quando se trata de avaliar o processo de medição. Se ele estiver sob controle, os resultados da avaliação poderão ser considerados válidos no futuro. Se não estiver sob controle, os resultados são, somente, a descrição estatística de um estado histórico transitório, sem valor para predição do comportamento futuro. Assim, avaliar sistemas instáveis não deixa de ser um mau investimento.

A terceira questão refere-se à adequabilidade do processo de medição no contexto da garantia da qualidade de produto e processo. A conhecida tradição de limitar o erro de medição somente a uma porcentagem da tolerância é inadequada para os desafios do mercado que enfatiza a estratégia do aperfeiçoamento contínuo do processo. Quando os processos são modificados e aperfeiçoados, o sistema de medição deve obrigatoriamente ser reavaliado quanto ao seu pretendido propósito. É essencial à organização (gerência, planejador da medição, operador de produção e analista da qualidade) compreender o propósito da medição e aplicar a avaliação apropriada.

O manual de referência MSA[3] propõe que as propriedades estatísticas dos sistemas de medição sejam avaliadas em quatro estudos básicos: estabilidade, tendência, linearidade e repetitividade e reprodutibilidade(R&R). Para cada um deles, é proposto um plano experimental e um suporte para processamento e análise dos resultados. Os estudos de estabilidade, tendência e linearidade podem ser considerados testes de significância estatística, que objetivam revelar se certos desvios de desempenho específicos são

significativos frente à variação natural do sistema de medição, dada pelo erro de repetitividade. O estudo de repetitividade e reprodutibilidade busca avaliar a variação remanescente do sistema de medição, para que possa ser comparada com a variação do processo de fabricação ou a tolerância de produto. Assim, esse estudo é a base de um critério de capacidade da medição, permitindo avaliar se o sistema de medição é ou não apto para uma determinada aplicação.

2.1 REQUISITOS RELATIVOS À RESOLUÇÃO

A resolução com que os dados são levantados e processados tem efeito decisivo sobre a qualidade da informação coletada. Se a resolução for excessiva, informação pode ser perdida e decisões erradas podem ser tomadas.

Um exemplo desta situação pode ser observado nas figuras 2.1 e 2.2. Em cada uma delas se mostra um gráfico de controle de média e amplitude (à direita) e os dados usados na sua construção (à esquerda). Na figura 2.1, os dados usados apresentam uma resolução de 0,001 mm. Na figura 2.2, a resolução foi aumentada para 0,01 mm e os dados foram obtidos por arredondamento daqueles usados no gráfico da figura 2.1.

No gráfico da figura 2.2 podem-se observar reiteradas indicações de fora de controle, tanto das médias dos subgrupos como das amplitudes. Trata-se de alarmes falsos, gerados pela resolução excessivamente grosseira que não estavam presentes no gráfico de controle anterior, construído com resolução 0,001 mm.

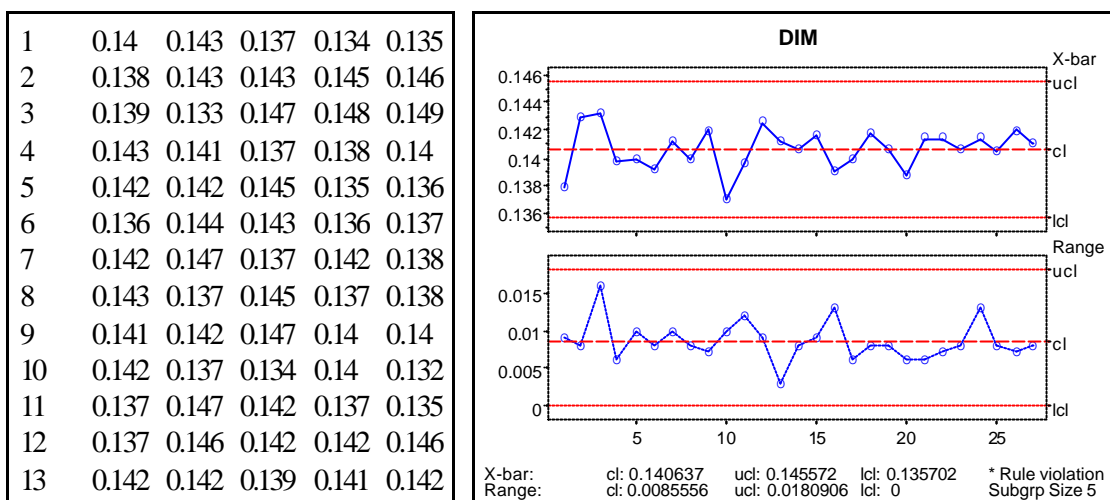


Figura 2.1 – Gráfico de controle construído com resolução 0,001 mm.

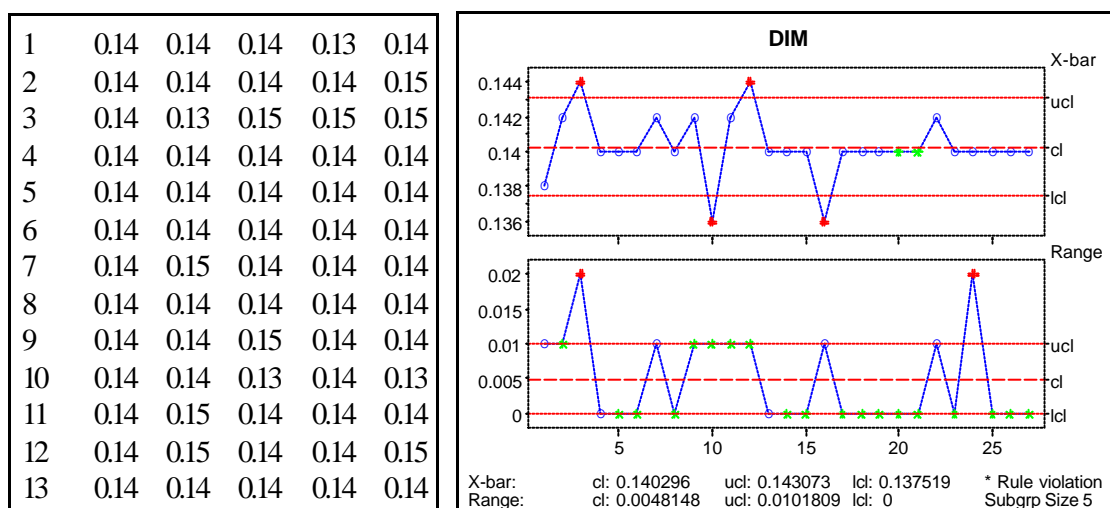


Figura 2.2 – Gráfico de controle construído com os mesmos dados brutos usados na figura 2.1, mas arredondados para resolução 0,01 mm.

Existem diversas recomendações para selecionar a resolução de um sistema de medição. Segundo Wheeler, para que não se produza o efeito mencionado acima, a resolução com que são coletados os dados deve ser, no mínimo, igual ao desvio padrão do processo de fabricação[7]. O manual de referência MSA recomenda que a resolução seja, como máximo, 10% da

tolerância[3]. Outras recomendações estabelecem uma resolução máxima de 5% da tolerância [8] [9].

2.2 ESTUDO DE ESTABILIDADE

Estabilidade (ou deslocamento lento e gradual) é a variação total nas medições obtidas com um sistema de medição aplicado sobre o mesmo padrão a peça, quando medida uma única característica no decorrer de um período de tempo prolongado. Isto é, estabilidade é a variação da tendência ao longo do tempo[3] (figura 2.3).

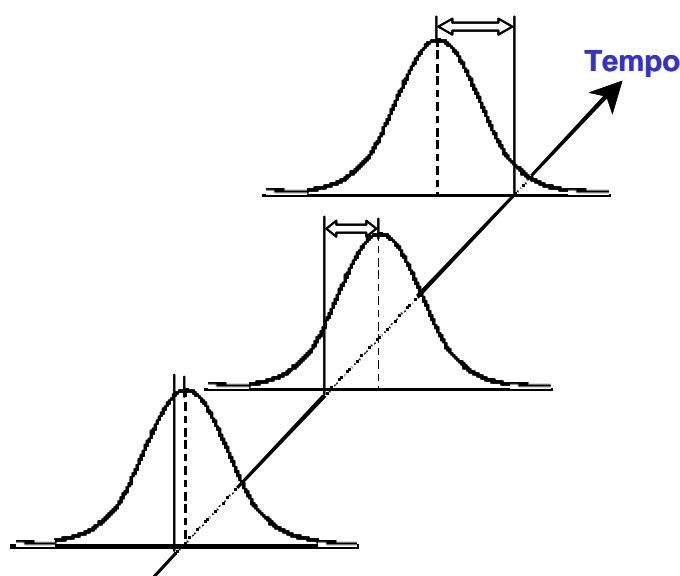


Figura 2.3 – Conceito de estabilidade

O estudo de estabilidade não é nada mais do que um estudo fase 1 de controle estatístico de processo, onde a variável de interesse é a variação da medição. Para executá-lo, deve se obter uma peça ou padrão tal que seu valor de referência esteja aproximadamente no meio do intervalo de tolerância ou na média do processo de fabricação. A peça ou padrão usado num estudo de

estabilidade não precisa estar calibrada, mas deve ser estável e permanecer inalterada durante todo o tempo de execução do estudo.

O tamanho da amostra e a sua frequência de medição devem se basear no conhecimento do sistema de medição. Alguns fatores são: quão freqüente é necessária a re-calibração, quão freqüente é necessário o reparo, quão freqüentemente o sistema de medição é utilizado e quão estressantes são as condições operacionais.

As leituras devem ser tomadas em diferentes momentos para representarem bem o comportamento real do SM. Isto levará em conta a preparação/início de corrida, o ambiente os outros fatores que podem variar durante o dia.

Os dados podem ser plotados numa carta de controle de média e *range* ou de média e amplitudes, mantendo a seqüência em função do tempo. Um mínimo de 25 subgrupos é recomendado para poder calcular os limites de controle. Para o gráfico de amplitude, estes são calculados usando as equações a seguir:

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k R_i \quad (1)$$

$$LIC_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (2)$$

$$LSC_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (3)$$

Onde \bar{R} é a media das amplitudes dos subgrupos, D_3 e D_4 são coeficientes que dependem do tamanho de subgrupo e podem ser obtidos na bibliografia sobre controle estatístico de processos (e.g. [10]).

Os limites de controle da média são calculados usando as equações a seguir:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k \bar{X}_i \quad (4)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (5)$$

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (6)$$

Onde $\bar{\bar{X}}$ é a grande média e A_2 é um coeficiente que pode ser obtido da bibliografia mencionada anteriormente.

Uma vez construídos os gráficos de controle, deve-se analisar a presença de sinais fora de controle. Se existirem, devem-se realizar ações corretivas e continuar com a amostragem até que o sistema esteja sob controle estatístico. Além das análises das cartas de controle convencionais, não há análise numérica específica para a instabilidade.

Uma desvantagem deste tipo de estudo é o tempo que se leva para chegar a uma conclusão sobre a estabilidade do sistema de medição, impossibilitando a aplicação imediata do sistema na linha de produção. No entanto, o estudo de estabilidade permite conhecer como o sistema de medição opera numa ampla variedade de condições de operação. Por isso, ele é o estudo que mais informação gera sobre o sistema de causas do erro de medição[11].

2.3 ESTUDO DE TENDÊNCIA

A tendência é a diferença entre a média de um conjunto de medições repetidas de uma mesma característica numa mesma peça e o valor verdadeiro convencional da mesma característica (ou valor de referência), obtido por calibração[3] (figura 2.4).

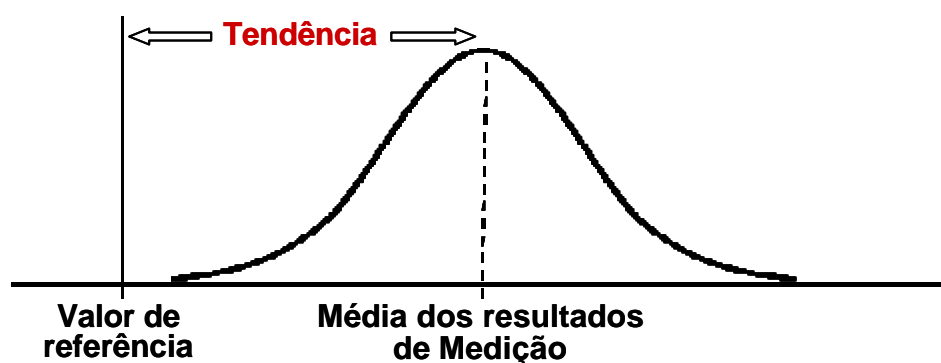


Figura 2.4 – Conceito de tendência

A tendência é a estimativa do erro sistemático de um processo de medição. É uma parcela do erro total, composta dos efeitos combinados de todas as fontes de erro, conhecidas ou desconhecidas, que tende a deslocar consistentemente e previsivelmente todos os resultados de repetidas aplicações de um mesmo processo de medição na ocasião da realização das medições.

O manual de referência MSA[3] propõe avaliar a tendência usando um critério de significância estatística. Se a tendência observada for, em valor absoluto, maior que o intervalo de confiança que representa a variação amostral que pode se esperar para a mesma, então ações corretivas serão necessárias para diminuir a tendência. Se não for esse o caso, a tendência pode ser considerada aceitável, dependendo do erro de repetitividade. Quanto

maior for o desvio padrão do erro de repetitividade, tanto maior será o valor limite de tendência que pode ser considerado aceitável. Inversamente, sistemas com elevada repetitividade serão objeto de ações corretivas a menos que apresentem tendências proporcionalmente reduzidas [3].

O estudo de tendência pode ser realizado com padrões ou com uma amostra de produto. Neste caso, é necessário estabelecer o valor de referência em relação a um padrão rastreável. O valor de referência deveria ser próximo ao centro do intervalo de tolerância de fabricação.

O manual MSA sugere dois métodos para estimar a tendência. O método da amostra independente usando medições repetidas, obtidas num curto intervalo de tempo. O método do gráfico de controle usando os resultados de um estudo de estabilidade realizado com um padrão ou amostra calibrada.

Para realizar um estudo de tendência pelo método da amostra independente, um único operador deve fazer no mínimo 10 medições repetidas da amostra. É sempre conveniente plotar os dados num histograma e/ou num gráfico de controle, para determinar se estão presentes quaisquer causas especiais ou anomalias. Se as variações do processo de medição durante o estudo são consistentes, é provável que a distribuição dos dados coletados seja aproximadamente normal, dentro do que cabe esperar para uma amostra tão pequena. Qualquer outro tipo de distribuição indicará um processo de medição inconsistente (e.g. distribuição bi-modal, um ou dois dados isolados, etc.). Se esse for o caso, o estudo deve ser abortado até que as causas das variações atípicas possam ser identificadas e eliminadas.

Para um processo que apresenta variação consistente, pode se calcular a média das leituras obtidas e o desvio padrão de repetitividade pelas equações a seguir:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

$$\sigma_r = \frac{\text{máximo}(X_i) - \text{mínimo}(X_i)}{d_2^*} \quad (8)$$

O coeficiente d_2^* relaciona o valor de amplitude com o desvio padrão estimado. Seu valor pode ser obtido de tabelas em função do número de subgrupos e do tamanho de subgrupo [2] [3]. No estudo de tendência pelo método da amostra independente, conta-se com um único subgrupo de tamanho $n \geq 10$.

O valor da tendência e seu desvio padrão estimado podem ser calculados como:

$$\text{tendência} = \bar{X} - \text{valor de referência} \quad (9)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_r}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Pode-se afirmar que a tendência do processo de medição é aceitável no nível α se o valor zero se situar dentro dos limites de confiança $(1 - \alpha)$, em torno do valor da tendência:

$$\text{tendência} - \left[\frac{d_2 \cdot \sigma_t}{d_2^*} \cdot \left(t_{v, 1-\alpha/2} \right) \right] \leq \text{zero} \leq \text{tendência} + \left[\frac{d_2 \cdot \sigma_t}{d_2^*} \cdot \left(t_{v, 1-\alpha/2} \right) \right] \quad (11)$$

Onde d_2 é o valor limite de d_2^* quando o número de subgrupos é grande (i.e. maior que 20). O número de graus de liberdade ν e o valor da variável *t-Student* $t_{\nu, 1-\alpha/2}$ também podem ser achados em tabelas (Apêndice C [2]).

Um detalhe interessante nesta equação é que a diferença percentual entre os valores dos coeficientes d_2 e d_2^* é praticamente irrelevante. Por exemplo, para um subgrupo de tamanho 10, $d_2 = 3,17905$ e $d_2^* = 3,07751$, diferença irrelevante se comparada com outras fontes de variação presentes no estudo. Assim, a equação (11) pode ser simplificada sem perda de qualidade nos resultados:

$$\text{tendência} - \left[\sigma_t \cdot \left(t_{\nu, 1-\alpha/2} \right) \right] \leq \text{zero} \leq \text{tendência} + \left[\sigma_t \cdot \left(t_{\nu, 1-\alpha/2} \right) \right] \quad (12)$$

Essa equação é usada na tradução brasileira do manual de referência MSA[12]. Uma outra possibilidade é usar a estimativa de desvio padrão em lugar da amplitude. O desvio padrão experimental utiliza toda a informação disponível e não somente os extremos:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

Com essa alteração, a equação (12) fica idêntica à equação que permite estimar o intervalo de confiança da média:

$$\text{tendência} - t_{\nu, 1-\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \text{zero} \leq \text{tendência} + t_{\nu, 1-\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (14)$$

O valor da variável *t-Student* pode ser obtido das tabelas citadas, para um número de graus de liberdade $\nu = n - 1$ e um nível de confiança $1 - \alpha$. As

equações (12) e (14) produzem resultados similares, diferindo somente pela variação amostral.

Como já foi mencionado, um outro método para estimar a tendência é usar os resultados do estudo de estabilidade, realizado geralmente com 20 a 30 subgrupos de tamanho 2 a 5. As equações usadas para avaliar se a tendência é ou não significativa são semelhantes às usadas no método da amostra independente e podem ser consultadas na referência[3].

Embora o estudo de tendência, independentemente do método usado, seja conceitualmente simples, ele apresenta algumas dificuldades na ocasião de aplicá-lo aos processos de medição reais. A primeira e principal dificuldade é que muitos sistemas de medição apresentam uma variabilidade de curto prazo que é pequena frente à resolução. Assim, quando se usa o método da amostra independente, não é raro encontrar casos nos quais as repetições produzem resultados idênticos ou que diferem em um valor da resolução. Quando a amplitude desses valores é usada para estimar o desvio padrão da tendência, o intervalo de confiança decorrente resulta menor que valor da resolução. Assim, o resultado da avaliação é freqüentemente a reprovação do processo de medição, ainda que esse apresente uma tendência irrelevante para os fins práticos e que, de todas as formas, não pode ser ajustada.

O fenômeno descrito acima também pode acontecer quando o estudo de tendência se faz aproveitando os dados do estudo de estabilidade. Porém, esse estudo abrange normalmente um intervalo de tempo maior, incluindo componentes de variação que não aparecem num estudo pelo método da

amostra independente. Assim, o desvio padrão de repetitividade tende a ser maior, diminuindo a probabilidade de reprovar o processo de medição.

Para salvar esta situação, torna-se necessário introduzir cláusulas adicionais. Uma possibilidade é que, independentemente do resultado da avaliação estatística pela equação (14), o sistema é aprovado para esse estudo se a tendência for, em valor absoluto, menor ou igual à resolução do indicador. Essa cláusula reconhece que é fisicamente impossível ajustar um sistema cuja tendência seja menor que a resolução. Outra possibilidade é relacionar a tendência com a tolerância de produto, aprovando o sistema se a relação estiver abaixo de certo valor padronizado. Existem recomendações nesse sentido, que estabelecem[13]:

$$\frac{Tendência}{Tolerância} \cdot 100 \leq 10\% \quad (15)$$

Essa recomendação é similar à que constava no manual MSA da Segunda Edição[14], antes que o critério de significância estatística fosse adotado. Observa-se que a equação (15) aceitaria um sistema de medição com uma tendência igual à resolução, no caso limite em que esta fosse igual a um décimo da tolerância[14]. Porém, já foi colocado que esse requisito sobre a resolução causa freqüentemente a aceitação de sistemas de medição que depois apresentam uma resolução insuficiente para o controle do processo, devendo ser substituído por condições mais exigentes, tais como a proposta na referência[8], que faz de uso de 5% ou invés de 10% como mostrado anteriormente.

Uma outra questão prática de interesse é decidir quando o estudo deve ser realizado. Em princípio, o estudo é necessário quando não for possível garantir a validade dos resultados da calibração na medição da produção, devido ao fato da calibração não englobar todas influências no ambiente da produção. Essa situação é comum quando se trata de transdutores ou relógios comparadores que formam parte de dispositivos de inspeção (figura 2.5).

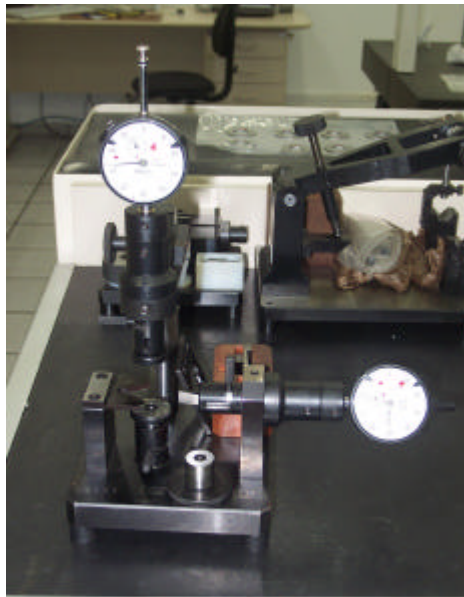


Figura 2.5 – Dispositivo de inspeção equipado com dois relógios comparadores.

Um outro caso em que podem aparecer tendências significativas é quando existe uma diferença de métodos entre a medição de referência, que é consistente com a definição do mensurando, e a medição da produção, mais rápida, porém não completamente consistente com a definição do mensurando. Esse tipo de tendência decorre de escolhas feitas durante o planejamento da medição e precisam ser estudadas e neutralizadas, para que o sistema de

medição da produção não aprove peças que o método de referência rejeitaria, e vice-versa.

Deve-se observar que, em muitos casos, o valor da tendência pode ser alterado por qualquer operação de ajuste realizada durante a utilização do instrumento. Assim, não é suficiente avaliar a tendência durante a liberação do instrumento, mas devem ser tomadas todas as precauções possíveis para que essa tendência não seja degradada por ajustes inadequados, feitos por pessoas inexperientes. Trata-se, então, de implementar um sistema de gestão da tendência que opere no dia a dia de trabalho do instrumento. Pode-se optar por lacrar os elementos de ajuste da tendência, de forma tal que os lacres somente possam ser removidos pela Metrologia, ou por treinar os operadores, lhes fornecendo os meios para ajustar a tendência quando necessário.

2.4 ESTUDO DE LINEARIDADE

A linearidade pode ser entendida como a variação linear da tendência com referência à dimensão medida.

A maioria dos instrumentos de medição comerciais apresenta um comportamento linear, ou seja, mantém constante a relação entre o valor da grandeza medida e o resultado de medição, ao longo de toda a faixa de operação. Nesses casos, a própria calibração fornece informação sobre os desvios com referência ao comportamento linear, usualmente pequenos frente a outros erros que podem aparecer durante o uso do sistema de medição. Nesses casos, não é necessário realizar o estudo de linearidade como o proposto pelo manual MSA. Porém, existem outros casos em que a linearidade

de um transdutor pode se ver afetada pela sua montagem num dispositivo de controle. Outros casos existem, ainda, nas quais a linearidade é afetada pelo ajuste de ganho no módulo de tratamento de sinal (e.g. transdutores indutivos e pneumáticos de deslocamentos). Nessas situações, pode ser necessário avaliar e eventualmente corrigir a linearidade do sistema de medição, usando o procedimento a seguir.

O estudo de linearidade requer 5 ou mais peças ou padrões, cujos valores de referência se distribuam uniformemente na faixa de operação do dispositivo de medição. As peças devem ser calibradas, para determinar seus valores de referência e para confirmar se o intervalo de operação do dispositivo de medição em pauta foi completamente coberto.

Cada peça deve ser medida $m = 10$ vezes no dispositivo em questão, por um dos operadores que normalmente usam tal dispositivo de medição. É conveniente medir as peças aleatoriamente, para minimizar a possibilidade de que o avaliador “relembre” a tendência durante a realização das medições.

Calcular a tendência de cada peça ‘i’ para cada medição ‘j’:

$$\text{tendência}_{ij} = y_{ij} = x_{ij} - x_{0i} \quad (16)$$

Onde x_{0i} é o valor de referência de cada peça usada no estudo. Após verificar que não existem dados atípicos, calculam-se as médias das tendências para cada uma das peças:

$$\overline{\text{tendência}}_{i=} = \bar{y}_i = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m y_{ij} \quad (17)$$

O passo seguinte é ajustar uma reta aos valores de tendência média das peças, seguindo o procedimento padrão de regressão linear simples aplicado

aos pares ordenados formados pelo valor de referência da peça e sua tendência média correspondente:

$$\bar{y}_i = a \cdot x_{0i} + b \quad (18)$$

$$a = \frac{\sum x_0 \cdot y - \left(\frac{1}{g \cdot m} \cdot \sum x_0 \cdot \sum y \right)}{\sum x_0^2 - \frac{1}{g \cdot m} \cdot (\sum x_0)^2} \rightarrow \text{inclinação} \quad (19)$$

Sendo g o número de peças.

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}_0 \rightarrow \text{interseção} \quad (20)$$

Deve se verificar que efetivamente o modelo linear seja representativo do comportamento do sistema de medição. Se a linha reta não se ajustar aos valores das tendências médias, o estudo deve ser abortado. A verificação pode ser feita estimando o valor do coeficiente de ajuste R^2 e comparando seu valor com algum limite recomendado[3]. Contudo, deve se fazer uma análise crítica do gráfico, pois a partir do mesmo pode-se obter mais informações.

A partir da linha de regressão, é calculado o desvio padrão dos resíduos aplicando a equação a seguir:

$$s = \sqrt{\frac{\sum y^2 - b \cdot \sum y - a \cdot \sum x_0 \cdot y}{v}} \quad (21)$$

Onde o número de graus de liberdade é $v = g \cdot m - 2$ e m o número de medições replicadas. De posse dos valores acima, pode se calcular o intervalo de confiança para a reta de regressão para cada valor de referência x :

$$\Delta(x) = t_{v, 1-\alpha/2} \cdot s \cdot \sqrt{\frac{1}{g \cdot m} + \frac{(x - \bar{x}_0)^2}{\sum (x_{0i} - \bar{x}_0)^2}} \quad (22)$$

Onde $\Delta(x)$ é a amplitude do intervalo em função do valor de referência do objeto medido e $t_{v,1-\alpha/2}$ é o valor da variável *t-Student* obtido de tabelas[7].

O intervalo assim calculado pode ser somado e subtraído dos valores das ordenadas correspondentes à reta de regressão, obtendo-se assim duas curvas que definem a região onde poderá ser encontrada a reta que representa o verdadeiro comportamento linear do sistema de medição, com uma confiança de $(1 - \alpha)$, usualmente 95%.

$$\begin{aligned} L_{\text{inf}}(x) &= b + a \cdot x - \Delta(x) \\ L_{\text{sup}}(x) &= b + a \cdot x + \Delta(x) \end{aligned} \quad (23)$$

Na figura 2.6 pode se observar um gráfico que resume os resultados da análise anterior. A linha contínua representa a reta de regressão; as linhas pontilhadas, os limites do intervalo de confiança $L_{\text{inf}}(x)$ e $L_{\text{sup}}(x)$, respectivamente.

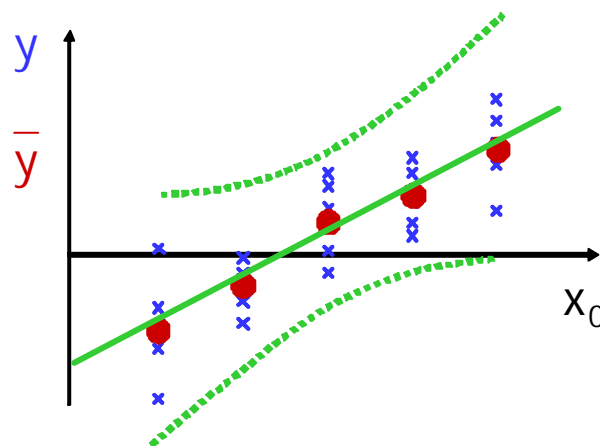


Figura 2.6 - Gráfico mostrando os resultados do estudo de linearidade.

A linearidade pode ser aceita quando o eixo de abscissas, que representa a ausência de tendência em toda a faixa de operação do instrumento, fica

incluído dentro da região entre os limites de confiança do estudo de linearidade. Se isso não acontecer deverá se concluir que o desvio de linearidade é estatisticamente significativo, iniciando ações corretivas para assegurar que a tendência se torne insignificante em toda a faixa de operação do sistema de medição.

O estudo de linearidade apresenta diversas desvantagens que limitam seu uso. A primeira dela é a necessidade de calibrar 5 ou mais peças com uma incerteza suficientemente pequena, a qual não é sempre possível. A segunda desvantagem é de caráter operacional e tem a ver com o tempo necessário para fazer as 50 ou mais medições e os cálculos associados. Além dessas desvantagens, está o fato do estudo ser afetado pela resolução com que se coletam os dados, assunto já tratado para o estudo de tendência. Por essas razões, o estudo de linearidade deve ser aplicado somente quando estritamente necessário, após prévia análise do sistema de causas de erro de medição para definir se realmente existe possibilidade do sistema apresentar um erro de linearidade excessivo.

2.5 ESTUDO DE REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE

A repetitividade é variação das medições obtidas com um instrumento de medição, usado várias vezes por um mesmo operador, enquanto medindo uma mesma característica de uma mesma peça. A repetitividade é comumente denominada “variação do equipamento” (VE), embora isto seja uma idéia errada. O melhor termo para designar a repetitividade é variação dos valores medidos dentro do sistema, pois as condições de medição são fixas e

definidas: instrumento, peça, padrão, método, operador, ambiente e premissas. De fato, a repetitividade é a variação de causa comum decorrente de sucessivas medições feitas sob condições definidas[3] (figura 2.7).

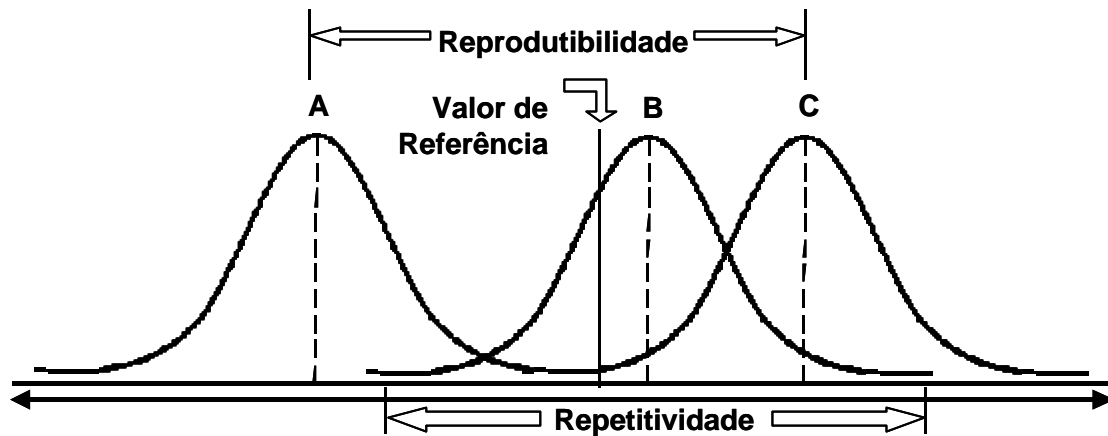


Figura 2.7 – Conceito de repetitividade e reprodutibilidade

Tradicionalmente a reprodutibilidade é conhecida como a variabilidade “entre avaliadores”. Assim, a reprodutibilidade é tipicamente definida como a variação das médias feitas por diferentes avaliadores, utilizando um mesmo instrumento de medição, enquanto medindo uma mesma característica de uma mesma peça. Isto é muito real para instrumentos manuais influenciados pela habilidade do operador, mas não é real para processos de medição em que o operador não se constitui na maior fonte de variação (por exemplo, em sistemas automáticos). Contudo, ainda nesse tipo de sistemas outros fatores podem influenciar o desempenho do sistema de medição em forma semelhante. Por esta razão, a reprodutibilidade deve ser interpretada como a variação das médias de medições repetidas correspondentes a diferentes condições de medição.

A repetitividade e reprodutibilidade de um processo de medição (i.e. R&R) é uma estimativa da variação combinada da repetitividade e da reprodutibilidade. Dito de outra forma, o R&R é a variância resultante da combinação das variâncias decorrentes do erro de repetitividade e do erro de reprodutibilidade.

O estudo dos sistemas de medição por variáveis pode ser realizado com diferentes técnicas e serão apresentados três métodos[3]:

- Método da análise de variância (ANOVA);
- Método da média e amplitude ou método longo (M&A);
- Método da amplitude ou método curto.

Os dois primeiros métodos utilizam várias peças (5 a 10) que são medidas por vários operadores (2 ou 3) repetidas vezes (2 ou mais vezes). Embora a estrutura de dados seja a mesma, os métodos são capazes de gerar distintos resultados, em função das diferentes técnicas de processamento.

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística padrão que pode ser utilizada para separar as componentes da variação atuantes no sistema de medição: variação entre peças, variação entre avaliadores, interação entre peças e avaliadores e o erro de replicação devido ao sistema de medição (i.e. erro de repetitividade). Por outro lado, o método da média e amplitude, baseado no controle estatístico de processos, não permite separar a componente de interação entre as peças e os avaliadores. Existe certa tendência em considerar o ANOVA como método de referência, com maior capacidade de discriminação, ao qual deve-se recorrer em caso de resultados duvidosos[13]. Apesar disso, o método mais utilizado na indústria é sem dúvida

o da média e amplitude. Essa preferência não é arbitrária, mas se baseia nas razões a seguir:

- O método ANOVA requer softwares de suporte para realizar os cálculos e faz uso de tabelas estatísticas que tornam o processo mais demorado;
- O método da M&A (Média e Amplitude) precisa somente de cálculos simples, que podem ser realizados em qualquer planilha de cálculo ou em calculadora;
- O método da M&A, adequadamente suportado por ferramentas gráficas, permite análises tanto ou mais criteriosas que o método ANOVA.

Larry Barrentine, em seu livro sobre estudos de repetitividade e reprodutibilidade[15], afirma que a única vantagem do método ANOVA, isto é a capacidade de separar o efeito da interação operador-peça, é relativamente pouco interessante para a indústria. Ele reporta que sistemas de medição usados por operadores treinados têm uma baixa tendência a produzir interações relevantes e afirma que estudos de repetitividade e reprodutibilidade não devem envolver operadores leigos. Assim, o citado autor promove decisivamente a utilização do método da M&A.

O método da amplitude é um estudo simplificado do sistema de medição, que fornece de forma rápida uma estimativa da variabilidade total das medições. O estudo é realizado geralmente por dois operadores que medem várias peças (de 5 a 10) uma vez cada um. O método não permite decompor a variabilidade em repetitividade e reprodutibilidade e é geralmente usado para

uma rápida verificação de possível mudança na variação das medições e não como uma referência na aplicação de R&R. Comparando os tempos necessários para realizar um estudo pelo método curto e o pelo método da M&A é difícil justificar a utilização do primeiro. De fato, um estudo pelo método da amplitude realizado com 10 peças e 2 operadores precisa da realização de 20 medições, amostra muito pequena para se chegar a conclusões estatisticamente consistentes. Por outro lado, um estudo pelo método da M&A realizado com 5 peças, 3 operadores e 2 repetições precisa de 30 medições e gera informação bem mais adequada para o diagnóstico do sistema.

Nesta dissertação focar-se-á na aplicação do método da M&A. O método ANOVA e o método da amplitude foram descartados pelas razões acima.

Para execução de um estudo de R&R pelo método da M&A é necessário separar 5 ou mais peças do processo de fabricação. Essas peças devem ser representativas da variação da grandeza sob estudo, apresentando valores espaçados uniformemente dentro do intervalo de tolerância ou da variação natural do processo de fabricação, o que for maior. A amostra pode ser obtida em forma aleatória ou selecionada especialmente, mas isso deve ser considerado quando os resultados são analisados.

Os operadores, identificados pelo nome ou por uma letra (A, B, ..) devem medir as peças, identificadas por um número não visível ao operador, várias vezes (usualmente 2 ou 3 vezes). A ordem em que estas medições são realizadas pode mudar dependendo da situação, mas deve se ter em consideração que efeitos não aleatórios que mudem durante o estudo podem tornar falsos os resultados. Assim, é importante conhecer o sistema de causas

do erro de medição antes de planejar o experimento e usar esse conhecimento quando se analisam os resultados. A figura 2.8 mostra parte de uma planilha eletrônica de coleta e análise típica de um estudo de R&R. Podem se observar nela os blocos correspondentes aos três operadores e os valores das estatísticas básicas calculadas com os dados brutos.

OPERADOR (OPERATOR)	MEDIÇÃO (TRIAL)	PEÇA (PART)										MÉDIA (AVERAGE)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
CARLOS	1	0,290	-0,560	1,340	0,470	-0,800	0,020	0,590	-0,310	2,260	-1,360	X _A -bar	0,194
	2	0,410	-0,680	1,170	0,500	-0,920	-0,110	0,750	-0,200	1,990	-1,250		0,166
	3	0,640	-0,580	1,270	0,640	-0,840	-0,210	0,660	-0,170	2,010	-1,310		0,211
MÉDIA (AVERAGE)		0,447	-0,607	1,260	0,537	-0,853	-0,100	0,667	-0,227	2,087	-1,307	X _A -bar	0,190
AMPLITUDE (RANGE)		0,350	0,120	0,170	0,170	0,120	0,230	0,160	0,140	0,270	0,110	R _A -bar	0,184
JOSÉ	1	0,080	-0,470	1,190	0,010	-0,560	-0,200	0,470	-0,630	1,800	-1,680	X _B -bar	0,001
	2	0,250	-1,220	0,940	1,030	-1,200	0,220	0,550	0,080	2,120	-1,620		0,115
	3	0,070	-0,680	1,340	0,200	-1,280	0,060	0,830	-0,340	2,190	-1,500		0,089
MÉDIA (AVERAGE)		0,133	-0,790	1,157	0,413	-1,013	0,027	0,617	-0,297	2,037	-1,600	X _B -bar	0,068
AMPLITUDE (RANGE)		0,180	0,750	0,400	1,020	0,720	0,420	0,360	0,710	0,390	0,180	R _B -bar	0,513
ROBSON	1	0,040	-1,380	0,880	0,140	-1,460	-0,290	0,020	-0,460	1,770	-1,490	X _C -bar	-0,223
	2	-0,110	-1,130	1,090	0,200	-1,070	-0,670	0,010	-0,560	1,450	-1,770		-0,256
	3	-0,150	-0,960	0,670	0,110	-1,450	-0,490	0,210	-0,490	1,870	-2,160		-0,284
MÉDIA (AVERAGE)		-0,073	-1,157	0,880	0,150	-1,327	-0,483	0,080	-0,503	1,697	-1,807	X _C -bar	-0,254
AMPLITUDE (RANGE)		0,190	0,420	0,420	0,090	0,390	0,380	0,200	0,100	0,420	0,670	R _C -bar	0,328
											R-dbar	0,342	
MÉDIA DAS PEÇAS (PART AVERAGE)		0,169	-0,851	1,099	0,367	-1,064	-0,186	0,454	-0,342	1,940	-1,571	UCL _R	0,879
											R _P	3,511	
											X-bar _{DIFF}	0,445	

Figura 2.8 - Planilha de coleta e análise de um estudo de sistema de medição pelo método da média e amplitude (3 operadores, 10 peças, 3 réplicas).

A tabela a seguir resume os cálculos estatísticos básicos realizados na planilha da figura 2.8. O subíndice $i=1...n$ identifica as peças e o subíndice $j=1...m$ identifica os operadores. Na análise, $n=10$ e $m=3$.

Amplitude das medições de cada peça por cada operador

$$R_{i,j} = \text{máx}(X_{i,j}) - \text{mín}(X_{i,j}) \quad (24)$$

Amplitude média de cada operador quando mede todas as peças

$$\bar{R}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n R_{i,j} \quad (25)$$

Amplitude média (todas as peças medidas por todos os operadores)

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \bar{R}_j \quad (26)$$

Média das medições de cada peça por cada operador

$$\bar{X}_{i,j} = \frac{1}{r} \cdot \sum_{i=1}^r X_{i,j} \quad (27)$$

Média de cada operador quando mede todas as peças

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{X}_{i,j} \quad (28)$$

Grande média (todas as peças medidas por todos os operadores)

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m \bar{X}_j \quad (29)$$

Os valores decorrentes da aplicação das equações acima ao caso sob análise podem ser plotados num gráfico de controle, no qual os limites são calculados pelo procedimento padrão (figura 2.9).

A análise do gráfico de amplitudes permite conhecer se o erro de repetitividade está sob controle. É essencial que as causas especiais sejam identificadas e removidas antes que um estudo possa ser considerado relevante. Se todas as amplitudes estiverem sob controle, significa que todos os operadores estão fazendo o mesmo trabalho. Se um dos operadores está fora de controle, o método por ele utilizado difere dos restantes. O método deve ser observado e, se necessário, o operador treinado é indicado para realizar as medições corretamente. Se todos os operadores têm amplitudes fora de

controle, significa que o sistema de medição é sensível às técnicas de cada operador, e necessita de melhorias para poder gerar resultados confiáveis.

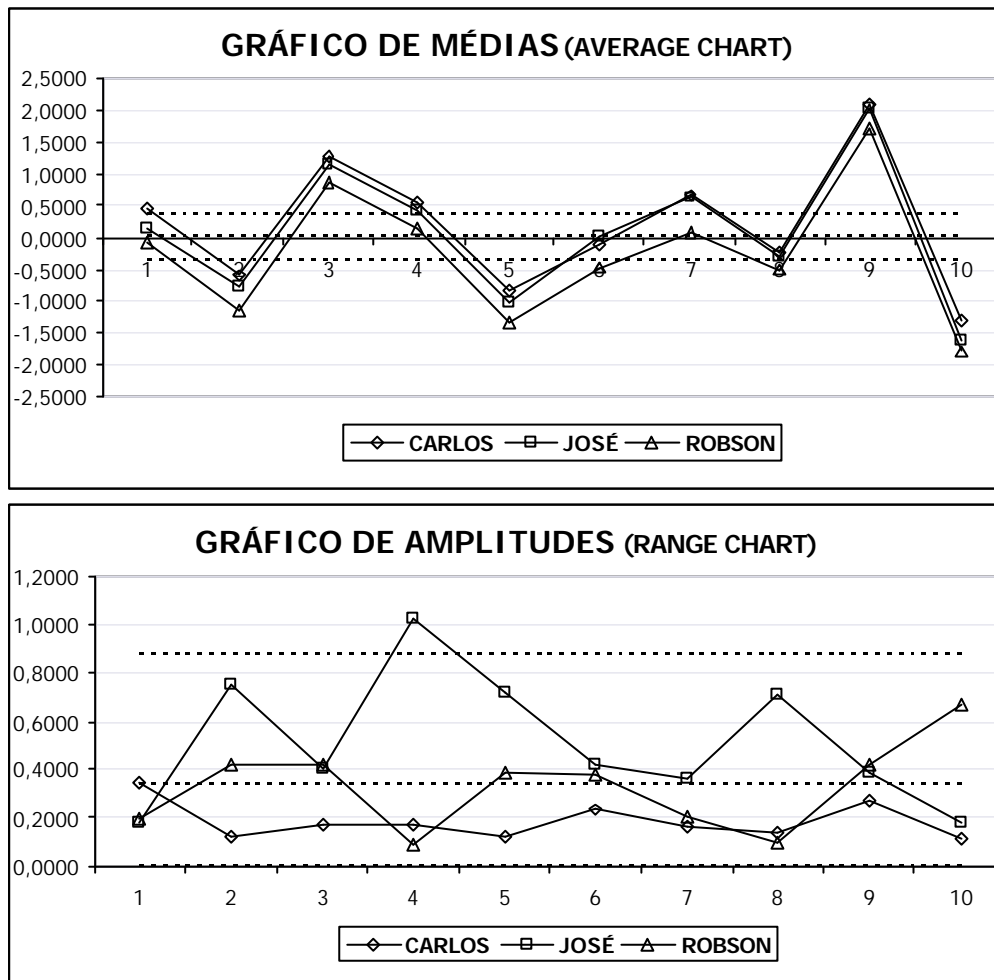


Figura 2.9 – Gráfico de controle de média e amplitude plotado com os valores informados na figura 2.9.

A análise do gráfico de médias permite conhecer se existem tendências entre os operadores (ver gráfico da figura 2.9). Além disso, é possível ter uma idéia da capacidade do sistema de medição, comparando a amplitude da região entre os limites de controle com a dispersão dos valores médios das amostras. A área entre os limites de controle representa o “ruído” da medição.

Uma vez que o grupo de peças utilizado representa a variação do processo, metade das médias ou mais deve cair fora dos limites de controle. Nesse caso, o processo de medição é adequado para detectar variação entre peças. Se mais da metade das médias ficarem dentro dos limites de controle, pode ser que:

- A amostra não represente a variabilidade do processo;
- O processo de medição seja incapaz de detectar a variação entre peças.

De todas as formas, existe também um procedimento analítico para quantificar a capacidade do sistema de medição. Esse procedimento usa as equações a seguir para determinar o desvio padrão do erro de repetitividade (VE), o desvio padrão do erro de reprodutibilidade (VA) e o desvio padrão combinado de repetitividade e reprodutibilidade ($R\&R$):

Desvio padrão do erro de repetitividade	$VE = \bar{\bar{R}} \cdot K_1$	(31)
-----------------------------------------	--------------------------------	------

Amplitude das médias dos operadores	$\bar{X}_{DIF} = \text{máx}(\bar{X}_j) - \text{mín}(\bar{X}_j)$	(32)
-------------------------------------	-----------------------------------------------------------------	------

Desvio padrão do erro de reprodutibilidade	$VA = \sqrt{(\bar{X}_{DIF} \cdot K_2)^2 - (VE)^2} / n.r$	(33)
--------------------------------------------	----------------------------------------------------------	------

Desvio padrão combinado de repetitividade e reprodutibilidade	$R\&R = \sqrt{(VE)^2 + (VA)^2}$	(34)
---------------------------------------------------------------	---------------------------------	------

Observa-se que na equação (33) se introduz uma correção para compensar o efeito do erro de repetitividade na amplitude das médias dos

operadores. Os coeficientes K_1 e K_2 podem ser obtidos na literatura sobre o assunto [3].

Os índices de capacidade propostos no MSA são basicamente três:

$$\begin{array}{ll} \text{R\&R percentual da variação total} & \\ \text{presente nos dados} & \%R \& R = 100 \cdot \left(R \& R / VT \right) \end{array} \quad (35)$$

$$\begin{array}{ll} \text{R\&R percentual da tolerância} & \\ & \%R \& R = 100 \cdot \left[\frac{R \& R}{\text{Tolerância}/6} \right] \end{array} \quad (36)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Número de categorias distintas} & \\ & ndc = 1,41 \cdot \left(VP / R \& R \right) \end{array} \quad (37)$$

Para fins desta análise, considera-se que a variação total é composta pela variação própria do processo e a variação devida ao sistema de medição:

$$\begin{array}{ll} \text{Variação total presente nos dados} & \\ & VT = \sqrt{(R \& R)^2 + (VP)^2} \end{array} \quad (38)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Amplitude da média das peças} & \\ & R_p = \text{máx}(\bar{X}_i) - \text{mín}(\bar{X}_i) \end{array} \quad (39)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Variação própria do processo} & \\ & VP = R_p \cdot K_3 \end{array} \quad (40)$$

Existem duas formas de estimar a variação total VT . A primeira delas é a partir da estimação de VP usando a amplitude das médias das peças, como indicado nas equações (39) e (40). A segunda é importando diretamente VT de um gráfico de controle ou da análise de capacidade do processo de fabricação em questão. Embora a primeira seja amplamente usada na indústria, ela não é aconselhável, devido ao fato que as 5 ou 10 peças envolvidas num estudo de

R&R constituem uma amostra pequena demais para estimar a variação de um processo[15]. Observa-se que se a variação do processo for subestimada ou superestimada o índice da equação (35) terá seu valor diretamente afetado.

Os valores limite recomendados para os índices detalhados nas equações (35), (36) e (37) podem ser observados nas referências sobre o assunto[3].

Eles são:

$%R\&R \leq 10\%$	\Rightarrow	O SM pode ser considerado aceitável
$10\% < \%R\&R \leq 30\%$	\Rightarrow	O SM pode ser considerado aceitável, dependendo a criticidade da aplicação e o preço da ação de melhoria
$\%R\&R > 30\%$	\Rightarrow	O SM não pode ser considerado aceitável
$ndc \geq 5$	\Rightarrow	O SM pode ser usado para controle e para análise de processo
$2 = ndc < 5$	\Rightarrow	O SM pode ser usado somente para controle de processo
$ndc < 2$	\Rightarrow	O SM não pode ser considerado aceitável

Outro aspecto que precisa ser considerado é quais os índices que devem ser usados para ter uma adequada caracterização da capacidade do sistema de medição. O índice que relaciona a variação do sistema de medição com a tolerância, $R\&R(\%ToI)$, é um bom indicador no que diz respeito ao desempenho do sistema de medição para tarefas de inspeção (e.g. inspeção 100%). Os índices $R\&R(\%VT)$ e ndc relacionam a variação do sistema de

medição com a variação do processo de fabricação. Conseqüentemente, eles são eficientes indicadores do desempenho sistema de medição no controle de processo (e.g. CEP). Porém, não é necessário usar estes dois índices, senão somente um deles. De fato, existe uma relação matemática entre o $R\&R(\%VT)$ e ndc (figura 2.10).

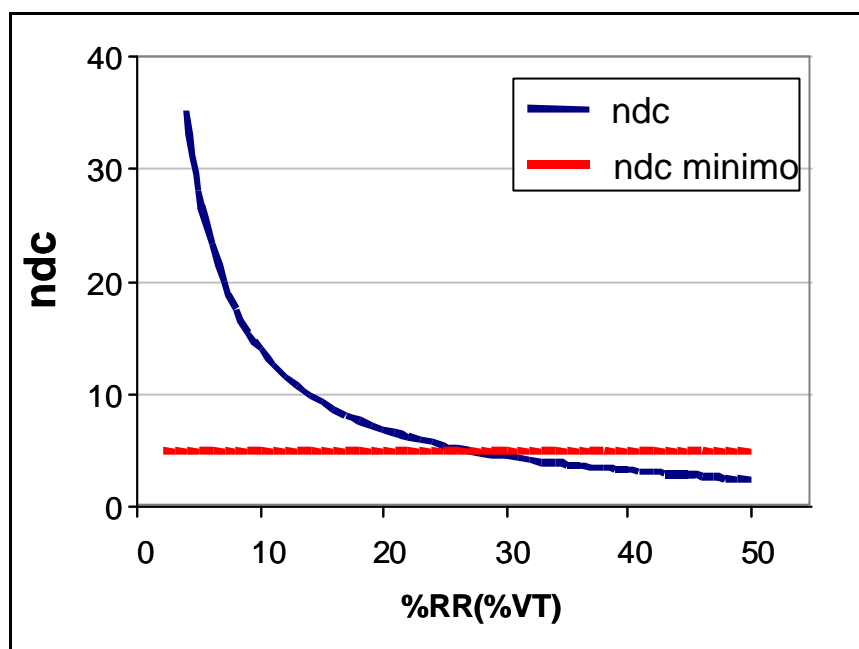


Figura 2.10 – Relação entre $R\&R(\%VT)$ e ndc .

Assim, somente são necessários dois índices para caracterizar completamente o desempenho do sistema de medição: $R\&R(\%ToI)$ e ndc ou $R\&R(\%ToI)$ e $R\&R(\%VT)$.

O método da média e amplitude, tal como apresentado nesta dissertação, está baseado no procedimento de análise de sistemas de medição introduzido por D. Wheeler na referência [4], que denominaremos de método EMP (acrônimo de *Evaluating the Measurement Process*). Não existem diferenças entre o método da M&A e o EMP no que diz respeito à estrutura de dados nem

aos dados estatísticos usados. A diferença principal entre os métodos é que o EMP considera que a componente básica do erro de medição é o erro de repetitividade. Conseqüentemente, o método propõe que, caso tendências entre operadores sejam identificadas, ações corretivas devem ser tomadas para que as mesmas sejam estatisticamente não significativas. Uma outra diferença é no processamento final dos resultados para avaliar a capacidade da medição. Wheeler propõe o uso de um índice chamado “relação de discriminação” baseado no quociente entre desvio padrão de repetitividade e o desvio padrão do processo de fabricação. Essa avaliação (EMP) também conhecida como estudo Básico de Tendência e de Inconsistência não será utilizado como ferramenta principal de avaliação dos Sistemas de Medição e sim para reconhecimento inicial do ambiente de trabalho.

2.6 REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE PARA SISTEMAS DE MEDIÇÃO AUTOMÁTICOS

Quando um sistema de medição não sofre influência dos operadores, por ex. equipamentos automáticos de medição, o uso do método descrito acima produz resultados incorretos. O ensaio é então efetuado com 25 peças de produção escolhidas aleatoriamente, sendo que os seus valores característicos devem estar, no possível, dentro do faixa de tolerância [8] [9].

Cada peça é medida duas vezes em condição de repetitividade, calculando-se para cada uma delas a amplitude das duas réplicas. A média das amplitudes das 25 peças é usada então na equação (31) para calcular VE , desvio padrão do erro de repetitividade.

$$\text{Desvio padrão de repetitividade} \quad VE = \bar{R} \cdot K_1 \quad (41)$$

$$\text{Repetitividade percentual da variação total presente nos dados} \quad \%Re = 100 \cdot \left(\frac{VE}{VT} \right) \quad (42)$$

$$\text{Repetitividade percentual da tolerância} \quad \%Re = 100 \cdot \left[\frac{VE}{\text{Tolerância}/6} \right] \quad (43)$$

$$\text{Número de categorias distintas} \quad ndc = 1,41 \cdot \left(\frac{VP}{VE} \right) \quad (44)$$

Outros conceitos são similares aos já tratados na seção 2.4 e não precisam ser detalhados novamente.

2.7 ESTUDO DE REPETITIVIDADE E TENDÊNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O estudo descrito nesta seção é aplicado principalmente para avaliar o potencial dos sistemas de medição para atender aos requisitos específicos impostos pela sua aplicação. O estudo é usado geralmente durante o processo de aceitação de sistemas de medição embora possa também ser usado em outras situações, e.g. após reparos ou ajustes[8].

O estudo é executado com um padrão calibrado, cujo valor de referência X_{ref} deve, se possível, estar no centro da faixa de tolerância da característica a ser medida posteriormente com o sistema de medição. Nos pontos de medição definidos (a serem documentados) o padrão deve ser medido $n \geq 25$ vezes sob condições de repetitividade. É conveniente examinar graficamente o

comportamento dos dados, buscando padrões não aleatórios, antes de calcular os parâmetros estatísticos a seguir:

$$\text{Desvio padrão de repetitividade} \quad s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (45)$$

$$\text{Média das medidas} \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (46)$$

A partir da média e do desvio padrão de repetitividade, podem se calcular os índices de capacidade preliminar C_g e C_{gk} :

$$\text{Índice de capacidade potencial da medição (repetitividade)} \quad C_g = \frac{0,2 \cdot Tol}{6 \cdot s} \quad (47)$$

$$\text{Índice de desempenho da medição (repetitividade e tendência)} \quad C_{gk} = \frac{0,1 \cdot Tol - |\bar{X} - X_{ref}|}{3 \cdot s} \quad (48)$$

A análise deve ser adaptada aos valores limite da característica, como segue.

- Característica com um limite superior de especificação LSE e um limite inferior de especificação $LIE \Rightarrow Tol = LSE - LIE$
- Característica com um limite superior de especificação e um limite inferior natural (igual a zero) $\Rightarrow Tol = LSE$
- Característica com apenas um valor limite (LSE ou LIE) \Rightarrow a tolerância não existe (não é possível o cálculo de C_g e C_{gk})

Neste último caso o campo admissível para os valores característicos encontra-se abaixo de $LSE - 4 \cdot s$ ou conforme o caso acima de $LIE + 4 \cdot s$. O

valor de referência X_{ref} do padrão deveria estar próximo ao valor limite com divergência de aproximadamente 10% do *LSE* ou *LIE*.

Utiliza-se $C_g = 1,33$ e $C_{gk} = 1,33$ como critério de capacidade preliminar para esse método em medições em padrão e $C_{gk} = 1,33$ nas medições em uma peça de série calibrada[8].

O fato de usar um único padrão, em vez de múltiplas peças como usam os estudos descritos nas seções 2.4 e 2.5, limita o sistema de causas do erro de medição atuante durante o estudo. O mesmo acontece no que diz respeito ao ambiente, quando o mesmo é realizado na planta do fornecedor, e ao operador, tipicamente um especialista em metrologia. Assim, o estudo fornece informação sobre a melhor performance que poderia ser obtida do instrumento numa condição próxima á de referência. Por essa razão, as conclusões sobre estabilidade e capacidade decorrentes de sua aplicação devem ser consideradas como otimistas.

2.8 PROGRAMA DE ASSEGURAMENTO DA QUALIDADE DAS MEDIÇÕES DE PRODUÇÃO – PMAP™

O PMAP™ é um conceito de calibração contínua para equipamentos de medição que atua na lacuna entre o chão de fábrica e o laboratório de calibração[16].

O conceito é baseado no uso de um padrão de controle calibrado. O padrão é escolhido ou produzido para representar o produto, ou uma característica específica do produto, para assim poder determinar o erro sistemático e as variações aleatórias do processo de medição.

As cartas do controle de PMAPTM, ao contrário das cartas típicas de controle do CEP (Controle Estatístico do Processo), são projetadas para determinar mais do que as variações aleatórias de um SM. O PMAPTM determina o erro sistemático tão bem quanto o erro aleatório. A utilização de padrão de controle na carta PMAPTM torna-se a referência porque se tem o estabelecimento dos erros sistemáticos e aleatórios.

A seguir, descreve-se um dos métodos possíveis para utilização deste conceito. São feitas em média 20 medições do padrão de controle, por profissionais especializados (e.g da metrologia), com ou sem o auxílio dos operadores. A partir dessas medições, são calculados os parâmetros estatísticos a seguir:

$$\text{Média das medições} \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (45)$$

$$\text{Desvio padrão da variação aleatória} \quad V_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (46)$$

(i.e. erro de repetitividade)

$$\text{Limite de referência inferior} \quad LIR = \bar{X} - k \cdot V_A \quad (47)$$

($k = 3$ para 99,73%)

$$\text{Limite de referência superior} \quad LSR = \bar{X} + k \cdot V_A \quad (48)$$

($k = 3$ para 99,73%)

Os valores individuais medidos são plotados em seqüência temporal num gráfico de controle cuja média está definida pela equação (45) e cujos limites são dados pelas equações (47) e (48). Adicionam-se ao gráfico o valor de

referência e dois limites de especificação, centrados no valor de referência (figura 2.11).

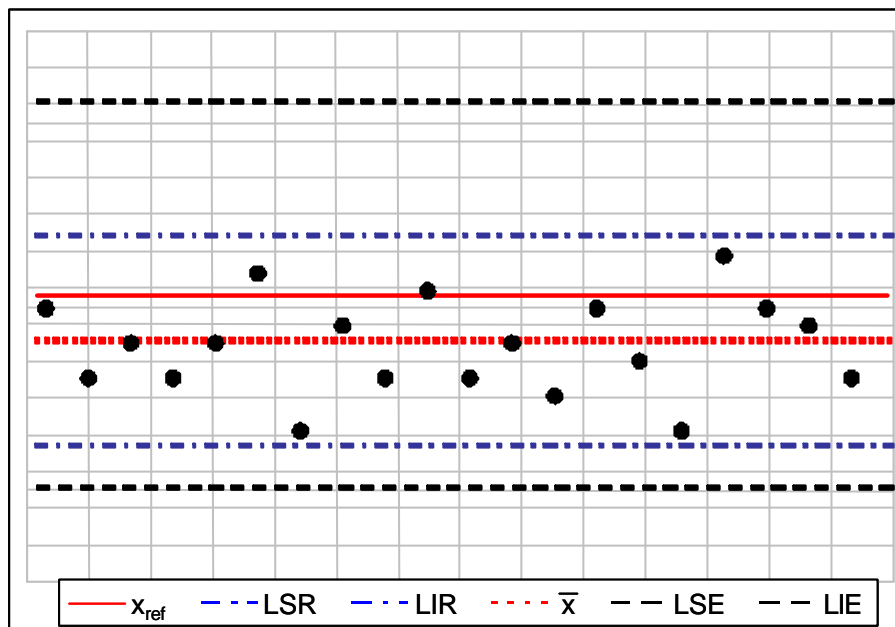


Figura 2.11 – Exemplo de um gráfico de controle baseado no conceito de PMAP™.

Coloca-se a carta de controle em serviço no chão de fábrica, sendo então o preenchimento feito pelos operadores. A frequência de medição do padrão é estabelecida considerando a estabilidade do sistema de medição. Sob o ponto de vista operacional, pode ser vantajoso realizar uma medição no início e uma medição no final de cada turno de trabalho. Após vinte a trinta medições feitas em condições normais de produção é feito o cálculo da média e dos limites. É colocada uma nova carta com os limites recalculados com valores obtidos no ambiente de utilização.

A avaliação da condição de controle do processo de medição pode ser realizada usando a regra de “um ponto além dos limites de controle”. Porém, se

for interessante, pode se usar também as quatro regras de Western Electric, que adicionam à anterior três regras de corrida[10].

O PMAP™ permite acompanhar o desempenho do sistema de medição no dia a dia de trabalho. Depois de certo tempo de uso, os dados coletados podem ser usados para estimar a incerteza de medição e estimar, com base em evidência concreta, a frequência de calibração do instrumento de medição. Quando acompanhados por um diário de bordo, os gráficos de PMAP™ permitem checar a consistência das medições realizadas por diferentes operadores e nortear a busca de causas especiais de variação.

CAPÍTULO 3

PROPOSTA DE GARANTIA DA QUALIDADE DAS MEDIÇÕES EM AMBIENTE FABRIL

O capítulo anterior descreveu as ferramentas estatísticas para análise dos sistemas de medição propostas pelo manual de referência MSA. Foram acrescentadas ainda algumas ferramentas adicionais, recomendadas por outras literaturas para situações não contempladas no MSA. Assim, além dos estudos de estabilidade, tendência, linearidade e R&R (repetitividade e reprodutibilidade), explicitaram-se os estudos de repetitividade para sistemas automáticos, de C_g e C_{gk} (repetitividade e tendência) para avaliações preliminares e de PMAPTM, para supervisão contínua dos sistemas de medição.

Os estudos de tendência, linearidade, R&R e repetitividade descrevem o desempenho do sistema de medição durante um intervalo curto da sua vida: o intervalo abarcado pelo próprio estudo sob consideração. Quando o sistema se acha sob controle estatístico, é possível usar esses resultados para previsão do desempenho ao longo da vida do mesmo. No entanto, sabe-se que o estado de controle estatístico não é natural dos processos, mas deve ser alcançado e mantido pela realização de contínuos ajustes para manter o sistema operando no alvo, com variância mínima. De fato, são inúmeras as perturbações

imprevistas que um sistema de medição pode sofrer durante sua utilização no agressivo ambiente fabril, por exemplo, decorrentes de quedas e maltrato dos instrumentos, uso por operadores não suficientemente treinados, ajustes incorretos, condições ambientais extremas, entre outras. Essas perturbações minam a confiabilidade das medições realizadas no dia a dia, tornando inútil o investimento realizado na execução de estudos complexos e demorados, como alguns dos descritos no capítulo anterior.

Vários são os meios pelos quais os operadores de processos tentam manter a confiabilidade das medições no dia a dia de trabalho. São relativamente comuns as verificações do instrumento com padrões calibrados, quando estes se acham disponíveis, e a comparação das leituras de um instrumento suspeito com outros instrumentos similares existentes na mesma célula de produção ou em células vizinhas. Porém, essas verificações informais apresentam limitado valor quando consideradas sob o ponto de vista de um sistema de gestão da qualidade. Além disso, elas não permitem decidir quando o instrumento precisa ser ajustado, favorecendo os ajustes sem necessidades ou a falta dos mesmos.

O PMAPTM pareceria ser uma resposta idônea ao problema levantado nos parágrafos anteriores, mas só fornece limitada informação sobre o desempenho do sistema de medição. Assim, ele precisa ser suportado por outros métodos de avaliação de desempenho, dentro de uma sistemática consistente e formal de garantia da qualidade das medições. Para fins deste trabalho, entende-se que *“garantir a qualidade das medições é conseguir que cada resultado de medição gerado no chão de fábrica e nos laboratórios*

apresente um erro inferior àquele que inviabilizaria o seu uso adequado na avaliação de conformidade de produto e no controle de processo”.

Essa sistemática deveria operar durante todo o processo de desenvolvimento da medição, desde seu planejamento até a operação no dia a dia de produção (figura 3.1).

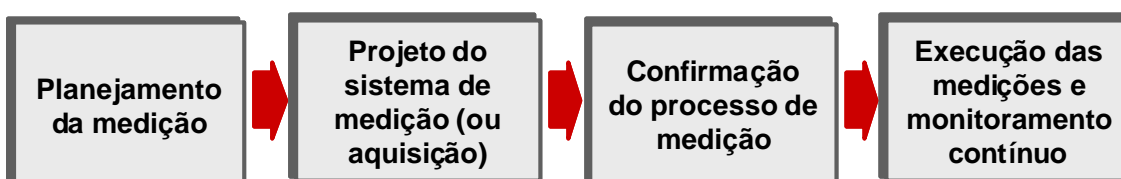


Figura 3.1 – Processo de desenvolvimento de uma solução de medição.

As figuras 3.2 e 3.3 mostram as macro-atividades da garantia da qualidade das medições atuando durante o processo de desenvolvimento de uma solução de medição.

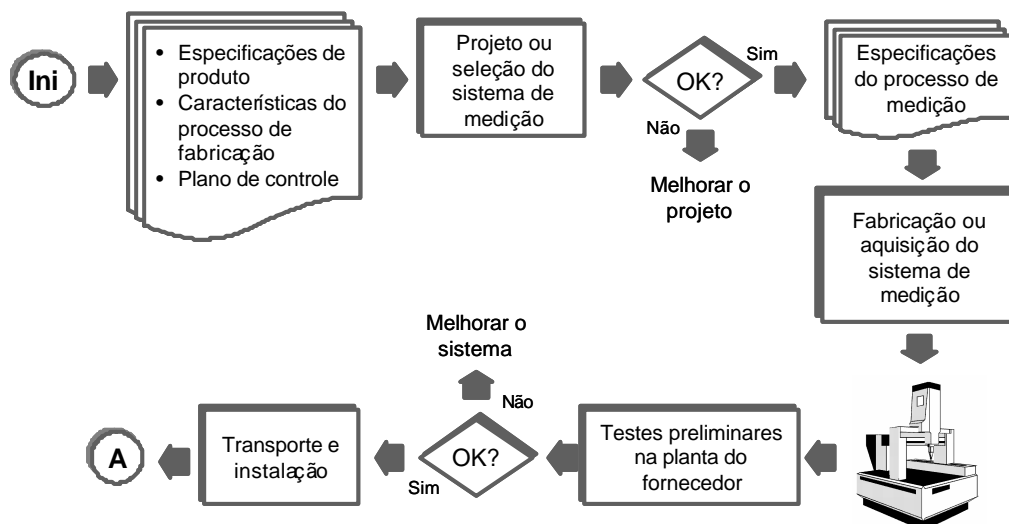


Figura 3.2 – Atividades da garantia qualidade preventiva das medições.

Na figura 3.2 pode-se observar o fluxograma das atividades que acontecem antes que o sistema de medição seja instalado na linha de

produção. Essas atividades constituem a denominada “garantia da qualidade preventiva”, cujo objetivo é assegurar que o sistema de medição selecionado possua as propriedades desejadas.

Embora este trabalho não possua foco na garantia da qualidade preventiva das medições, serão listados a seguir alguns conceitos chave para “fazer direito da primeira vez” no âmbito da metrologia de produção:

- Definir claramente as necessidades dos usuários, incluindo requisitos metrológicos, ergonômicos, de ambiente, de produtividade, entre outros[17].
- A partir da informação contida nos desenhos da peça, no plano de controle, além da informação disponível sobre o processo de fabricação e outros registros históricos, construir um caderno de encargos descrevendo em detalhes o que o sistema de medição deve fazer. Esse caderno deve ser usado como documento de transferência de informação durante os processos de consulta de preços e aquisição do sistema de medição[18].
- Realizar uma revisão de projeto, analisando se as especificações são consistentes com o que se espera do sistema de medição.
- Realizar testes preliminares de aceitação do sistema de medição, preferencialmente na planta do fornecedor, antes de autorizar o transporte e a instalação.

No caso de sistemas de medição simples ou instrumentos que são usados em grandes quantidades dentro da empresa, o processo anterior pode ser demorado e dispendioso demais. No entanto, pode-se utilizar o conceito de

qualificação do fornecedor e qualificação de modelo. A qualificação de fornecedor é de caráter mais formal e contempla aspectos tais como a existência de um sistema da qualidade, o histórico de entregas no prazo, o histórico de reclamações, e assim por diante. A qualificação de modelo visa a determinar se certo tipo de instrumento, por exemplo, um modelo de paquímetro em particular, satisfaz às necessidades de exatidão, robustez e durabilidade da empresa. Instrumentos de modelos qualificados podem ser adquiridos sem testes e investigações individuais.

A segunda parte da garantia da qualidade das medições começa após a instalação do sistema de medição no seu local de uso. Dependendo do sistema, pode ser necessária uma calibração ou verificação metrológica e estudos estatísticos como os propostos pelo MSA. Uma vez satisfeitas as condições de aplicação, o sistema pode ser liberado para produção. Durante o uso deverá ser realizada a supervisão contínua do desempenho metrológico e, periodicamente, o sistema deverá ser re-confirmado por calibração.

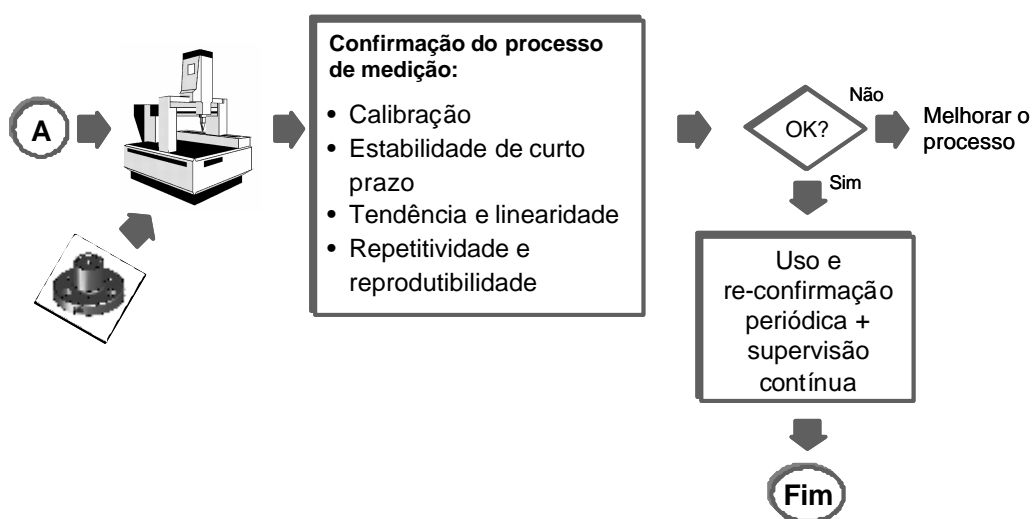


Figura 3.3 – Atividades da garantia da qualidade das medições

As figuras 3.2 e 3.3 descrevem uma sistemática genérica, que contém os elementos importantes da garantia da qualidade das medições, mas não é necessariamente aplicável passo por passo a qualquer instrumento e empresa. Na aplicação, mudanças de seqüência, eliminação ou acréscimo de atividades deverão ser necessários.

A partir do que foi citado anteriormente, foi desenvolvido como proposta de trabalho um novo método de aplicação, para que assim se consiga uma fácil implantação no ambiente industrial. Esse método será apresentado no decorrer desse capítulo.

3.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE GARANTIA DA QUALIDADE EM EMPRESAS

A implementação em empresas pode se deparar com duas situações diferentes. A primeira acontece quando a empresa já possui sistemas de medição em operação, que precisam ser analisados e validados, e a segunda quando se trata de sistemas novos ou a serem adquiridos para satisfazer certa necessidade de controle da qualidade.

Como a própria denominação já informa, os sistemas de medição “em operação” são aqueles que já se acham em utilização na fábrica, mas precisam ser incorporados ao sistema de garantia da qualidade das medições. Essa categoria também contempla os sistemas que sofreram melhorias ou que atuavam em um setor e foram remanejados para outro, para realizar medições em características similares. Nestes casos, o ponto chave é a falta de registro

de informações pertinentes ao desempenho do sistema de medição, que permitam confirmá-lo como apto para satisfazer à necessidade em pauta.

Os sistemas de medição para novas necessidades não precisam de maiores esclarecimentos. Porém, deve se compreender que essa vertente da sistemática, mais completa e abrangente, pode também ser usada para sistemas de medição em operação, sempre que a relação custo-benefício assim o justifique. Assim, pode-se detalhar a sistemática em duas cadeias principais, segundo o fluxograma da figura 3.4.

No fluxograma da figura 3.4 destacam-se alguns elementos essenciais, que serão tratados com maior detalhe nas seções a seguir:

- O diagnóstico de sistemas de medição em operação;
- A avaliação dos requisitos iniciais para sistemas novos;
- Os testes de aceitação para sistemas de medição novos;
- Os testes de liberação, para sistemas em operação ou novos;
- A supervisão contínua.

Todas as operações citadas serão analisadas no decorrer deste capítulo.

Deve se observar que em ambas as vertentes existem tomadas de decisão, caracterizadas pelos losangos, nas quais o não atendimento dos requisitos implica em ações de melhoria, que podem ser de diferente escopo e complexidade.

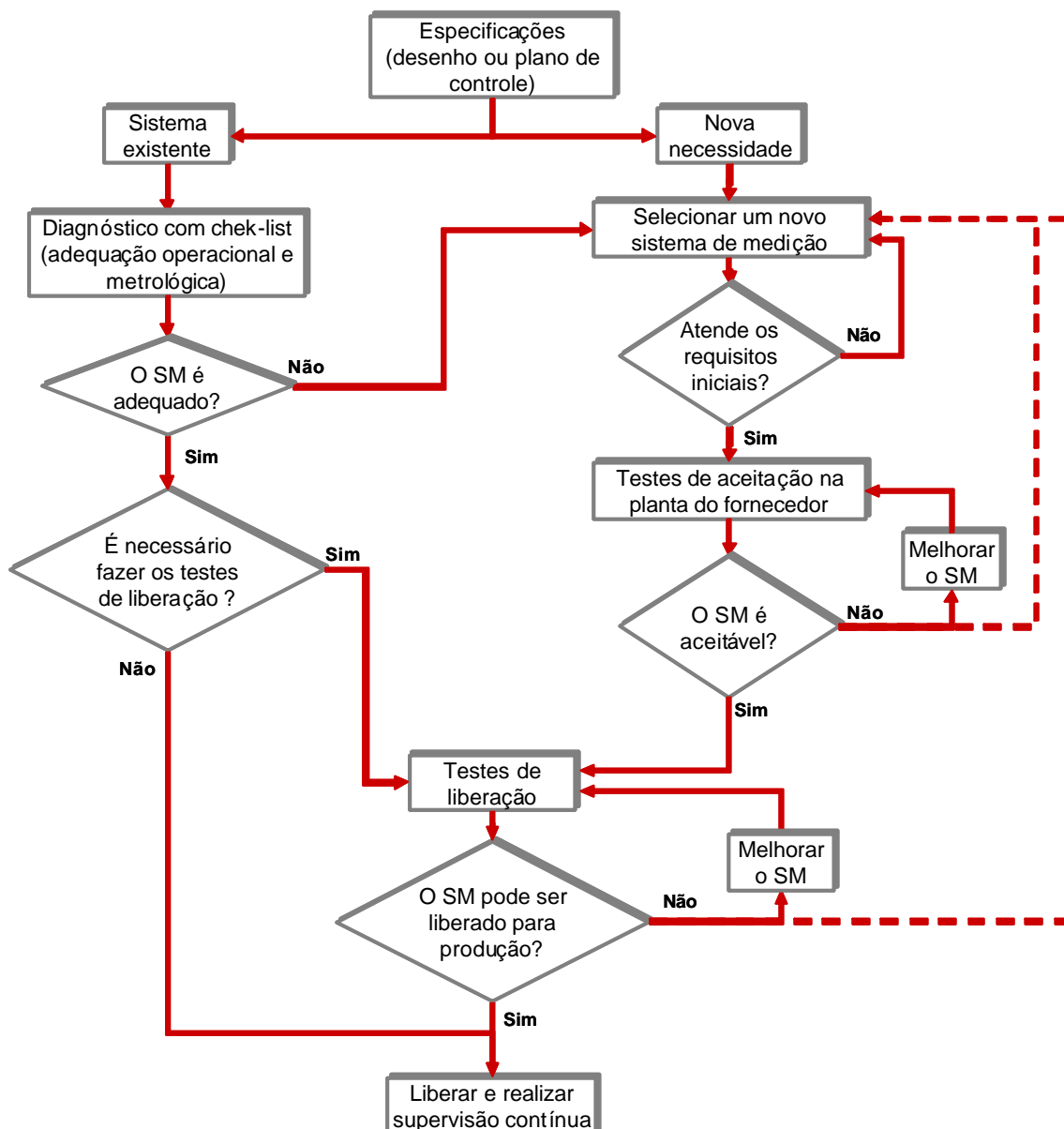


Figura 3.4 – Fluxograma representativo da sistemática para garantia da qualidade das medições de produção

No caso dos sistemas em operação, prevê-se que quando os resultados do diagnóstico não são favoráveis, deve-se partir para selecionar um novo sistema de medição. Isso não é sempre necessário, já que algumas ações corretivas podem ser tomadas para melhorar a situação em aspectos específicos. Porém, isso raramente é possível na prática, devido aos

afastamentos da condição ideal, que são em geral bastante grosseiros e não podem ser resolvidos com ações locais, que precisariam de muito trabalho e teriam pouco retorno.

As instâncias de decisão, na vertente dos sistemas novos, são basicamente três. A primeira delas se produz durante o próprio processo de seleção. A segunda e a terceira decorrem de testes realizados com o sistema em diferentes situações, sendo que nestes casos, um resultado negativo pode levar à necessidade de realizar modificações em alguma das causas do erro de medição, ou então à seleção de um novo sistema.

A opção pela modificação ou pela seleção de um novo SM depende da magnitude do problema e da possibilidade de solucionar o mesmo com ajustes e re-trabalhos locais. Porém, deve-se lembrar que um sistema de medição de produção é um elo da cadeia de produção: quando ele falha, a produtividade é prejudicada. Assim, às vezes é mais interessante selecionar um novo sistema do que continuar fazendo modificações e melhorias, nem sempre confiáveis. Por isso, é conveniente limitar o número de iterações de melhoria a uma ou duas, podendo variar de acordo com a visão e experiência do metrologista. Obviamente, nesses casos deve prevalecer o bom senso e a experiência do metrologista.

3.2 DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM OPERAÇÃO

Sistemas que já se encontram em operação, quando a sistemática proposta nesta dissertação é implantada, precisam ser revisados segundo

pontos de vista operacional e metrológico. Podem acontecer aqui duas situações diferentes:

- O sistema já possui registros da aplicação de métodos estatísticos, mas os resultados são de duvidosa representatividade;
- O sistema nunca foi avaliado usando métodos estatísticos.

Em todos os casos, é necessário realizar uma avaliação operacional visando determinar qual a possibilidade de que o sistema seja propenso a produzir erros grosseiros ou falhas funcionais. No caso em que já existe uma avaliação das propriedades estatísticas deve-se, ainda, verificar a consistência da mesma antes de definir se os seus resultados podem ser mesmo aceitos dentro do sistema.

Para o primeiro tipo de avaliação propõe-se usar um *check-list* como o da figura 3.5. O mesmo visa colocar em evidência todos os aspectos que devem ser considerados quando se toma a decisão sobre a aptidão potencial de uma solução de medição.

Um *check-list* derivado do anterior pode ser utilizado para dar suporte ao processo de seleção de sistemas de medição para novas necessidades. Nesse caso, não será possível dispor de informação baseada em fatos e dados, senão que algumas das perguntas deverão ser respondidas tomando como base a experiência do metrologista ou, eventualmente, informação histórica sobre o comportamento de sistemas semelhantes operando na empresa ou fora dela. Portanto o próprio resultado, se o sistema de medição pode ser considerado “apto” em continuar exercendo sua função, será baseada na análise do metrologista perante as respostas.

Categories	Questões
Sistema de medição	O sistema de medição usado, é o mesmo citado no plano de controle e nas instruções de medição?
	O mostrador é digital ou analógico?
	O SM é ergonômico?
	O SM é de simples operação?
	O sistema de medição é o mais adequado para a realização desta tarefa?
	O S.M. é adequado ao meio de trabalho? É robusto?
	O S.M. possui o comportamento dinâmico necessário para realizar a tarefa de medição?
	Os dados são coletados automaticamente e gravados em uma base de dados?
	São realizados algum tipo de tratamento estatístico com os dados medidos? Qual?
Padrão (e acessórios)	Existe um padrão disponível para verificar e ajustar o instrumento?
	A geometria do padrão é similar à da peça a ser medida?
	O padrão é calibrado?
	A incerteza de calibração do padrão é consistente com os requisitos metrológicos sobre a medição?
	São usados acessórios não previstos nas instruções de medição? Quais?
	Acessórios que afetam à confiabilidade metrológica, são validados/verificados/calibrados?
Procedimento de Medição	O procedimento de medição é consistente com a definição do mensurando?
	Existe uma instrução de medição completa e clara disponível na bancada de medição?
	O instrumento permanece na bancada de medição? Existem trocas informais?
Peça	A peça tem (pode ter) rebarbas ou qualquer outro defeito que leve a erros de medição?
	A peça é limpada antes da medição?
Operador	O operador realiza a medição conforme à instrução de medição?
	Existe a possibilidade de erros de leitura ou paralaxe?
	A medição é realizada numa postura confortável?
	O operador realiza medições repetidas em rápida seqüência? (cansanco, tédio)
	Os operadores possuem o treinamento necessário? Quem ministrou?
	No caso de incidentes com o SM, o operador comunica imediatamente ao seu superior?
Ambiente	É perceptível algum tipo de dificuldades em manusear o S.M. por qualquer um dos operadores da célula?
	A temperatura ambiente é adequada?
	A condição de iluminação é adequada?
	Existem vibrações ou impactos que possam prejudicar a medição?
	Existem campos electromagnéticos que possam prejudicar a medição?

Figura 3.5 – *Check-list* sugerido para diagnosticar a adequabilidade potencial de sistemas de medição em operação.

No caso em que existam registros de estudos estatísticos anteriores, geralmente estudos de R&R, os mesmos devem ser analisados criticamente para identificar evidências que possam invalidar os resultados. Alguns desvios comuns aos quais deve se atentar são:

- Amostras de peças do processo não representativas. Isso pode ser evidenciado, por exemplo, quando se compara o quociente entre o $R\&R(\%VT)$ e o $R\&R(\%Tol)$ com o C_p estimado do processo de fabricação. Se houver diferenças expressivas, pode ser que a amostra seja inapropriada ou esteja falseada propositalmente para conseguir aprovar o sistema.
- Estudos feitos em condições excessivamente otimistas, que não representam o *timing* de medição em produção.
- Operadores “especiais”, por exemplo técnicos do laboratório da empresa ou pessoal de um serviço contratado.

3.3 AVALIAÇÃO DOS REQUISITOS INICIAIS

A avaliação dos requisitos iniciais é parte integrante do processo de seleção de sistemas de medição para novas necessidades. Embora essa atividade não esteja no foco desta dissertação, será brevemente comentada para melhor entendimento das atividades decorrentes, i.e. os testes de aceitação e de liberação.

Normalmente, a seleção de sistemas de medição simples se realiza através de catálogos, avaliando as características apresentadas e comparando com as necessidades do caso em pauta. Essas necessidades são de acordo com o produto, o processo e o plano de controle, como já foi antecipado, sendo então cada caso analisado separadamente.

Os critérios que tomam destaque nos catálogos são, por exemplo, os seguintes:

- Faixa de medição que precisa ser condizente com a necessidade;
- Resolução máxima de 5% do valor da tolerância da característica a ser mensurada;
- Robustez às condições ambientais do chão de fábrica;
- Robustez potencial aos efeitos do operador e da peça;
- Compatibilidade com outros equipamentos já instalados e com a cultura da empresa.

Outro importante item que não consta nos catálogos que também é de grande valor na seleção de um novo sistema é o custo, principalmente quando os itens anteriores selecionam mais de um sistema de medição como adequados para certa aplicação.

Uma vez selecionado o sistema e realizada a aquisição, podem se realizar os testes de aceitação. Esses são descritos na seção a seguir.

3.4 TESTES DE ACEITAÇÃO

O objetivo dos testes de aceitação é garantir, dentro do possível, que o sistema de medição fornecido efetivamente atenda aos requisitos decorrentes da aplicação em pauta e, conseqüentemente, tenha elevada probabilidade de se mostrar adequado quando instalado na sua localização de uso e operado pelo pessoal da produção. Para esse fim, podem ser aplicados alguns dos métodos estatísticos descritos no capítulo 2.

Em geral, existe uma obrigatoriedade de se ter uma calibração inicial, visando demonstrar que o sistema de medição está conforme com suas especificações. Porém, essa calibração não fornece uma base confiável para

avaliar o desempenho do instrumento em ambiente de produção. Neste trabalho se propõe usar dois tipos de testes durante o processo de aceitação: o teste de C_g C_{gk} (repetitividade e tendência) (seção 2.7) e o teste de R&R (repetitividade e reprodutibilidade) (seção 2.5).

O teste de repetitividade e tendência deveria ser realizado, se possível, na planta do fornecedor. Para isso, deve-se então enviar um padrão calibrado que tenha características semelhantes às da peça a ser mensurada, ou até mesmo uma peça padrão. O critério de aceitação recomendado para esse estudo é $C_{gk} \geq 1,33$ (conseqüentemente $C_g \geq 1,33$). Os resultados do teste trazem informação sobre um conjunto de causas do erro de medição bastante restrito. De fato, influências da peça, do ambiente e do operador são praticamente negligenciadas por ser um teste realizado num ambiente estável e com operadores altamente qualificados. Porém, esse estudo permitirá descartar sumariamente sistemas de medição que não possuem propriedades estatísticas aceitáveis. Assim, é interessante realizá-lo antes do transporte do sistema de medição, para delimitar as responsabilidades do fabricante e da transportadora.

A figura 3.6 apresenta um exemplo de um relatório de análise do sistema de medição pelo método de repetitividade e tendência. Observe que foi acrescentado um diagrama de linhas, mostrando os valores sucessivos. No caso da figura, esse diagrama mostra sinais inequívocos de resolução insuficiente. Conseqüentemente, pode-se esperar que o erro de repetitividade seja subestimado.

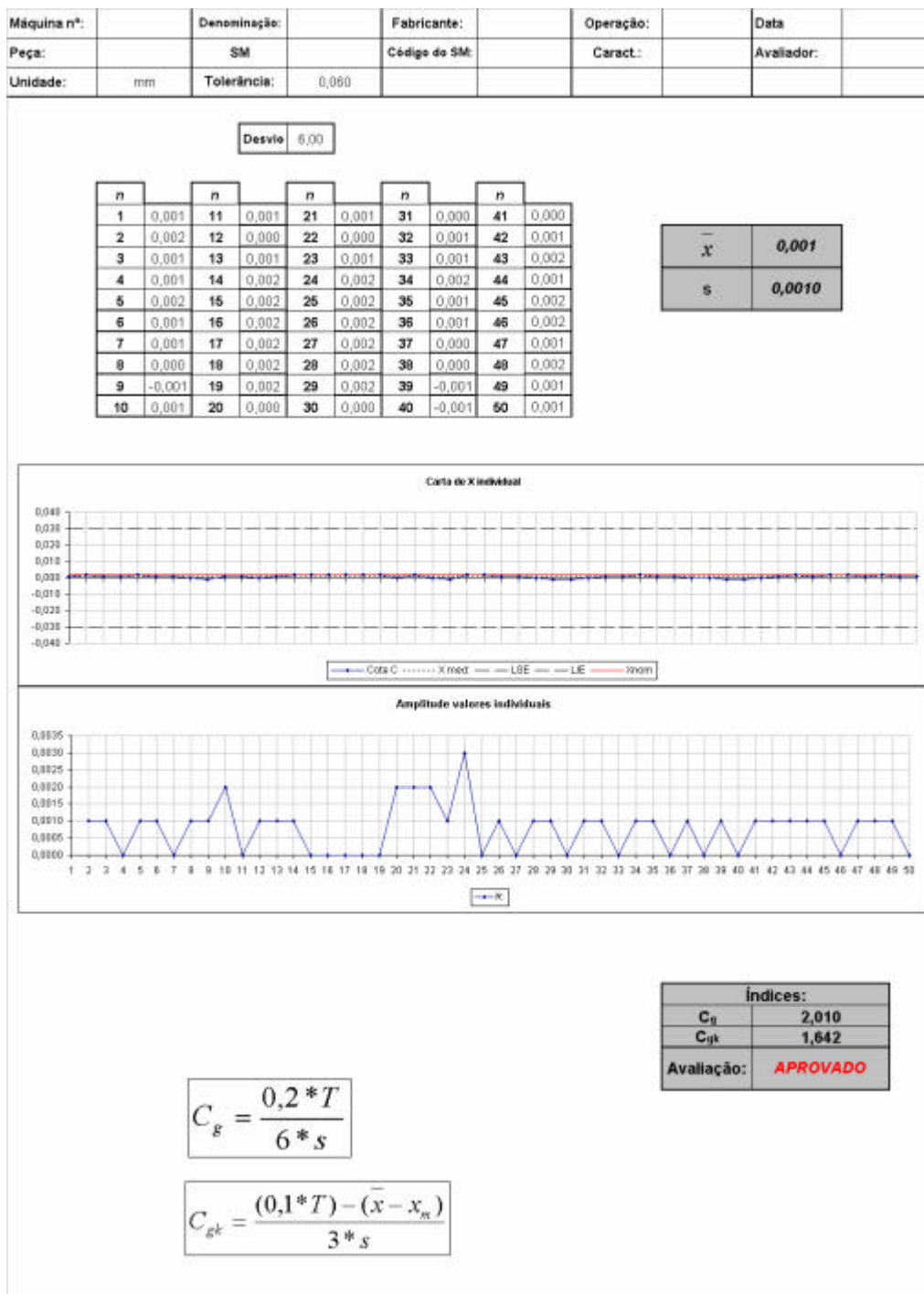


Figura 3.6 – Exemplo de uma análise de repetitividade de tendência do sistema de medição.

Normalmente, o relatório de calibração e o estudo de repetitividade e tendência não são suficientes para garantir que o SM esteja apto para o uso

em ambiente fabril. Assim, para completar a fase de aceitação é recomendável realizar um estudo de repetitividade e reprodutibilidade pelo método da média e amplitude. Nele leva-se em consideração fatores adicionais tais como a influência do operador e a variação das peças. Para que seja possível realizá-lo devem existir então, peças de produção disponíveis. É importante não usar nesse estudo peças especialmente fabricadas para o caso, pois essas peças não terão as características geométricas que são próprias do processo de fabricação, podendo levar a laudos errados sobre o desempenho do sistema.

O estudo de R&R deveria ser realizado, se possível, na planta do fornecedor, após o estudo de repetitividade e tendência. Porém, às vezes pode ser interessante realizá-lo após a chegada do sistema de medição na empresa. Quando se trata de sistemas de pequenas dimensões, que funcionam sobre bancadas de medição padrão, esse R&R pode ser feito no laboratório, antes de enviar o equipamento para sua localização de trabalho na planta. Considerando que nessa situação o desempenho do sistema de medição será, com certeza, melhor que na planta, estabelece-se que o sistema de medição deve ser irrecusavelmente reprovado quando $R\&R(\%Tol) > 20\%$. No entanto, para maior segurança, sistemas de medição apresentando valores de $R\&R(\%Tol) > 10\%$ deveriam ser objeto de ações de melhoria. Não existindo um valor de tolerância da característica a ser mensurada, deve-se avaliar o %R&R em relação à variação total, mantendo os mesmos critérios de aprovação e reprovação. A figura 3.7 mostra um exemplo de relatório para estudo de R&R.

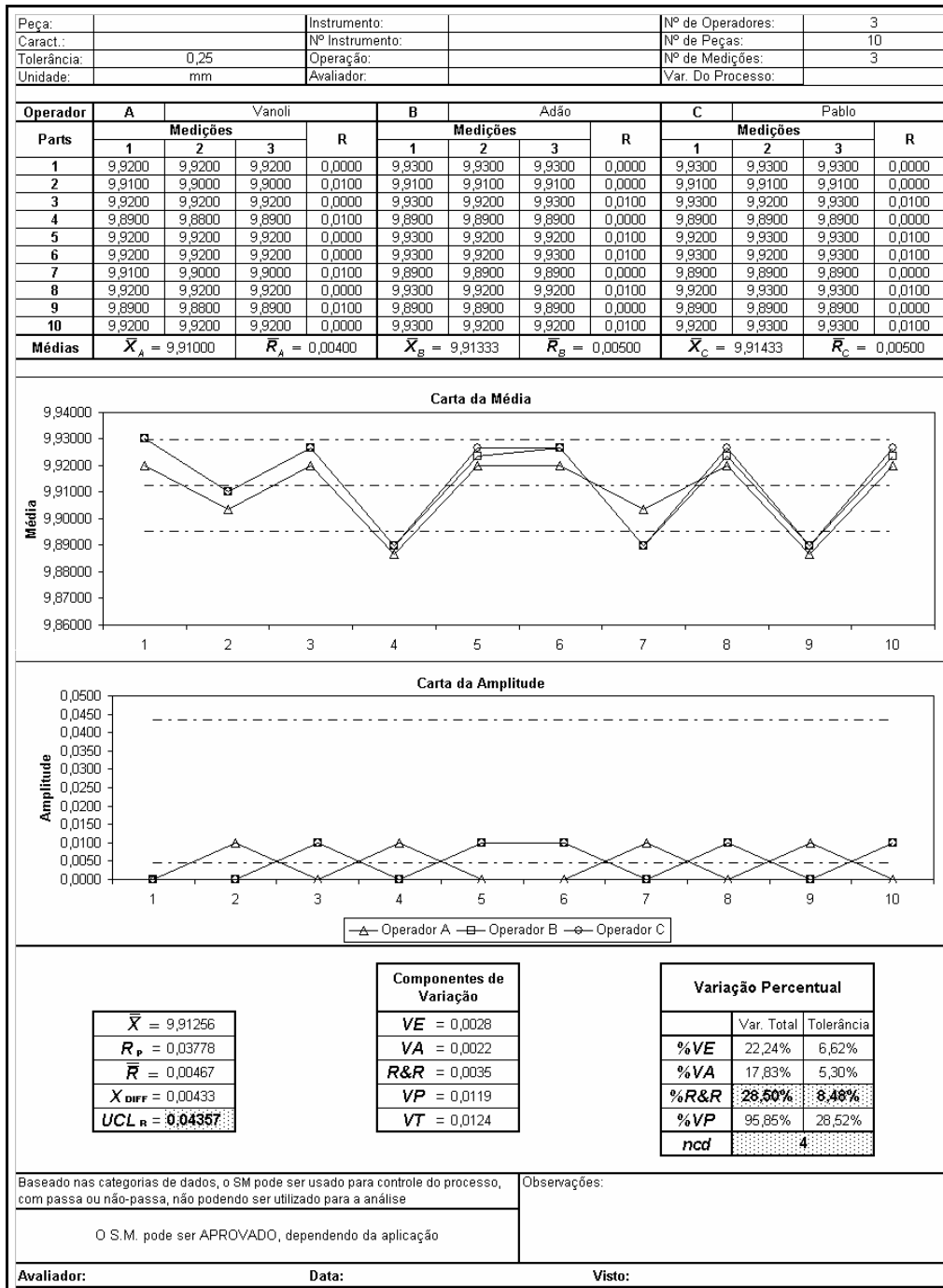


Figura 3.7 – Exemplo de relatório de análise de R&R.

É importante considerar que é possível encontrar sistemas de medição aprovados com referência ao Cgk e reprovados pela análise de R&R, já o contrário é de raro acontecimento.

Quando o sistema de medição é automático, não havendo a influência do operador, a análise de R&R deve ser substituída pelo estudo de repetitividade para sistemas automáticos, descrito na seção 2.6. Os valores limite para aceitação e reprovação podem ser mantidos iguais aos aplicados no estudo de R&R. A figura 3.8 apresenta um exemplo de um relatório dessa ferramenta.

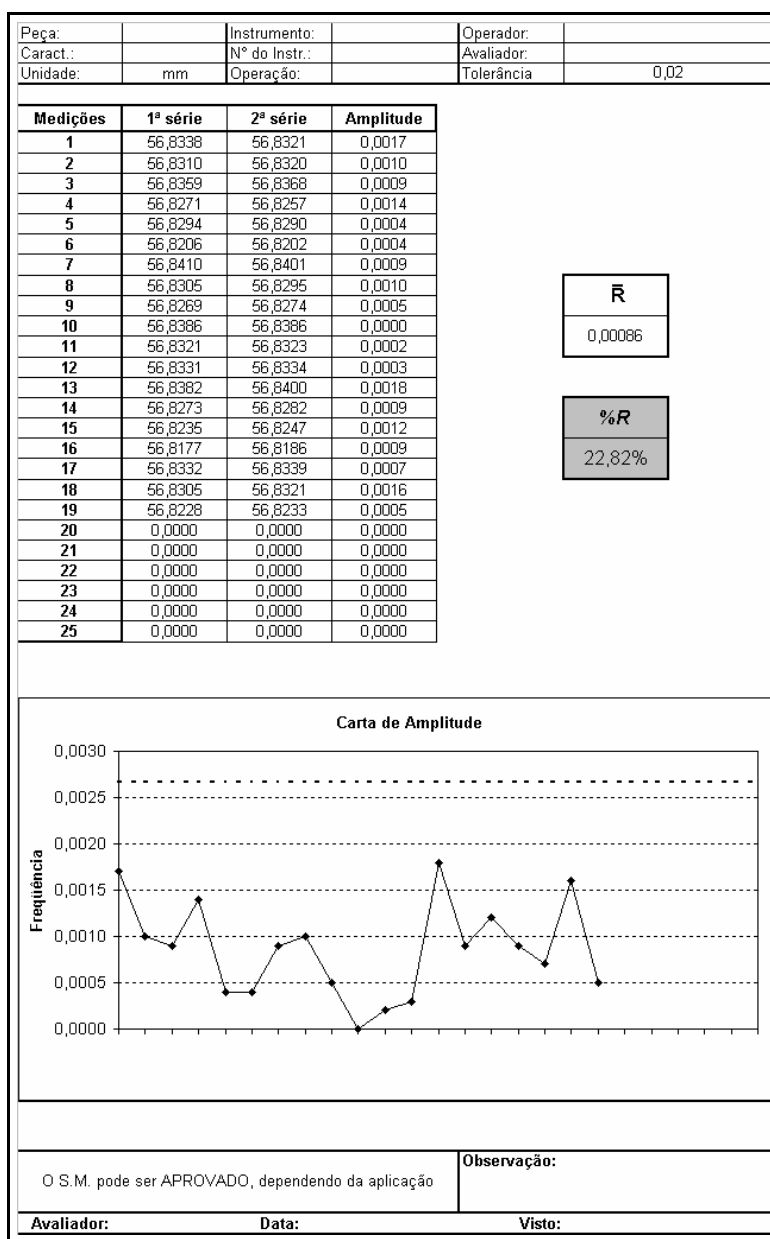


Figura 3.8 – Exemplo de um estudo de repetitividade para sistemas de medição automáticos.

A realização de estudos de R&R ou Re após a recepção do sistema de medição pode ser redundante quando se trata de sistemas de grandes dimensões ou que só podem ser operados após instalá-los no seu local de uso. Nesses casos, não existe diferença entre o estudo de R&R (ou Re) realizado na aceitação e aquele que será necessário para liberar o sistema de medição. Assim, se conveniente, pode se realizar diretamente o teste de liberação. A execução de estudos de tendência e linearidade durante a aceitação de sistemas de medição é, em geral, desnecessária.

3.5 LIBERAÇÃO PARA USO EM PRODUÇÃO

Nesta etapa devem-se usar métodos que consigam identificar todas as fontes de influência próprias do ambiente de utilização. Primeiramente, alguns sistemas de medição necessitam ser calibrados novamente, pois se exige que as condições de calibração sejam as do cotidiano de funcionamento.

Dependendo do caso, podem ser usados os estudos a seguir[3] [8] [9]:

- Estabilidade;
- Tendência;
- Linearidade;
- Repetitividade e reprodutibilidade;
- Repetitividade para sistemas automáticos.

A escolha de quais estudos devem ser realizados depende das características construtivas do sistema de medição e também de quais serão os métodos usados para supervisionar a confiabilidade das medições após a liberação do sistema de medição. Recomenda-se realizar, primeiramente, uma

avaliação criteriosa do sistema para identificar potenciais causas de erros de tendência e linearidade não controlados pela calibração. Na metrologia geométrica, esses casos acontecem quando um transdutor é montado num dispositivo de forma tal que sua tendência e/ou linearidade intrínsecas são alteradas pela geometria dos mecanismos intervenientes. Tendências expressivas também podem aparecer como consequência do ajuste de *offset* do sistema de medição.

Nos casos acima, é conveniente realizar estudos de tendência e linearidade, segundo os métodos explicitados nas seções 2.3 e 2.4. Quando o estudo de linearidade é executado, o estudo de tendência pode ser realizado reaproveitando os dados da medição repetida da peça ou padrão que apresenta valor verdadeiro convencional mais próximo ao centro da faixa de medição.

Porém, deve-se lembrar que esses estudos agregarão escasso valor à confiabilidade das medições se não for possível garantir que os ajustes realizados permaneçam estáveis durante a utilização do instrumento. Em particular, não deveria ser permitido que os operadores alterem a tendência ou a linearidade de forma arbitrária ajustando o *offset* ou ganho do instrumento.

Estudos de estabilidade serão necessários sempre que essa propriedade do sistema de medição seja desconhecida ou duvidosa. Embora esse estudo possa resultar demorado, ele é sem dúvida um dos que mais agregam conhecimento sobre as causas do erro de medição. No caso em que o estudo de estabilidade seja implementado, é conveniente realizá-lo com uma peça calibrada ou padrão, de forma tal que seus resultados possam ser aproveitados

para análise de tendência. Outro uso dos resultados deste estudo é para o cálculo dos limites de PMAPTM, caso essa ferramenta seja aplicada para supervisão da confiabilidade metrológica na rotina.

O estudo de R&R é a ferramenta de utilização mais freqüente. Na instância de liberação, deveria se realizar o estudo com os operadores que farão uso do sistema de medição na produção, procurando também que o ambiente seja o mesmo de utilização ou apresente condições parecidas (temperatura, luminosidade, vibração, etc.). Como antecipado no capítulo anterior, deve-se realizar todos os esforços por importar o desvio padrão VT de gráficos de controle do processo ou de estudos de capacidade realizados com 25 amostras ou mais. Se isso for possível, o estudo pode ser realizado com 5 amostras de produto, 3 operadores e 3 repetições. Contudo, sempre será preferível usar a configuração clássica com 10 amostras de produto, 3 operadores e 3 repetições. Na liberação, a obtenção do valor de %R&R inferior a 10% é o ideal, porém pode se aceitar em caráter condicional valores inferiores a 30%. Nesse caso é necessário documentar as razões da aceitação.

Quando se trata de sistemas automáticos ou sistemas nos quais a influência dos operadores é desprezível, o estudo de R&R deve ser substituído pelo estudo de repetitividade, usando entre 20 e 25 amostras de produto com 2 repetições.

Nesta etapa ainda existe a necessidade de análise de sistemas que já estão em ambiente de utilização sem terem sido avaliados na etapa inicial de aceitação. Nesses casos a análise deverá ser cuidadosa pelo fato dos sistemas já estarem em uso, embora isso não impeça que o instrumento seja

inadequado. Se essa condição for verificada, devem-se seguir as recomendações da sistemática, resumidas no fluxograma da figura 3.4, indicando melhorias e até mesmo a rejeição e pesquisa por um novo sistema de medição.

Após a etapa de liberação, serão definidos alguns parâmetros para a próxima fase, como também uma periodicidade necessária para a reavaliação do Sistema de Medição principalmente nos casos em que não é recomendável inserir um monitoramento contínuo, tipo PMAPTM.

Sendo então o sistema considerado estável e capaz, poderá ser colocado em operação, ou será validada sua operação (no caso de sistemas que já estão operando). Assim pode-se avançar para a terceira etapa, no intuito de controlar e garantir que continuem executando medições ou inspeções confiáveis de acordo com o resultado obtido na liberação.

3.6 SUPERVISÃO CONTÍNUA DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Nesta etapa se faz obrigatória a calibração periódica dos meios de medição[1]. A periodicidade pode ser definida através da experiência prática, considerando alguns aspectos como [20]:

- Quantidade de medições por dia (uma estimativa);
- Histórico de calibrações anteriores;
- Custo do equipamento e dos padrões de calibração e verificação;
- Conseqüências de um desvio não aceitável no status de calibração;
- Agressividade do ambiente de uso;
- Possibilidade de incidentes devidos a descuido, maus tratos, etc;

- Outros.

Também são amplamente usados métodos de cunho estatístico para ajuste dos intervalos de calibração, tais como o método de Schumacher[21] e outros existentes[22].

Porém, com o passar dos tempos, algumas questões foram levantadas sobre qual o real valor dos estudos de liberação e da calibração periódica na obtenção da garantia de confiabilidade das medições:

- Um instrumento com calibração periódica de seis meses garante as mesmas condições de uso no primeiro e no último dia?
- Podem ocorrer danos e/ou acidentes que alteram as condições de calibração?
- Podem surgir características de variações especiais não identificadas nos estudos iniciais?
- Novos operadores exercem diferentes influências em sua utilização no cotidiano?

Devido a esses e outros questionamentos foram estudados alguns métodos para se obter um maior controle dos sistemas de medição, aumentando a confiabilidade sem aumentar os custos.

Uma ferramenta que pode ser utilizada é o próprio R&R apresentado anteriormente, porém com uma periodicidade definida ou em casos especiais, quando é preciso verificar que um ou mais novos operadores não alteraram o funcionamento do sistema de medição. Isso pode ser necessário quando o R&R realizado na liberação mostra que a influência dos operadores é significativa, ou seja, quando a reprodutibilidade AV representa a maior parcela

do R&R. Esse é um assunto passível de desenvolvimento e não será aprofundado neste trabalho.

Um outro método muito utilizado informalmente é a verificação funcional. Normalmente é realizada sem nenhum registro de resultado, onde o operador confere de maneira rápida o funcionamento do sistema em forma tátil ou visual. Em muitos casos, a perda de confiabilidade metrológica está associada a sintomas que podem ser facilmente detectados por esses meios simples de análise. Contudo, é necessário gerar instruções padronizadas, treinar os operadores ou líderes e fornecer um meio simples para documentar a verificação e eventuais intervenções.

Finalizando as propostas para supervisão dos sistemas de medição na rotina, tem-se a adaptação do PMAPTM, técnica baseada em gráficos de controle já apresentada na seção 2.7. A aplicação do PMAPTM permite verificar continuamente a estabilidade e a tendência do sistema de medição. Sua aplicação para fins de supervisão tem influências na forma em que a liberação do sistema é planejada e realizada: o estudo de estabilidade torna-se então a fase 1 do PMAPTM e o estudo de tendência pode ser realizado com os mesmos dados coletados para determinar os limites de controle do estudo de estabilidade.

No gráfico de controle do PMAPTM (figura 3.9) o operador terá a responsabilidade em anotar:

- Data da medição;
- Horário;
- Valor obtido;

Neste trabalho recomenda-se enfaticamente o uso de PMAP™, combinado com a verificação funcional periódica. A frequência destas verificações deve ser, no mínimo, uma por turno, realizada preferencialmente no momento do rodízio, quando os operadores se revezam.

3.7 PLANO DE GARANTIA DA QUALIDADE DAS MEDIÇÕES (PGQM)

Aplicar os conceitos e a sistemática descrita nas seções anteriores deste capítulo a empresas reais não é fácil, principalmente devido ao grande número de sistemas de medição atuantes. Também está o foco na produção, que por uma parte é compreensível, mas que gera certa falta de comprometimento com a qualidade de produto e, particularmente, com a qualidade das medições de produção.

Para garantir o sucesso, a sistemática e as ferramentas precisam ser introduzidas no contexto do sistema de gestão da qualidade da empresa, com responsabilidades definidas para todos os setores intervenientes. Neste trabalho, propõe-se que a Metrologia seja responsável pelo planejamento das ações de garantia da qualidade das medições, pela elaboração de procedimentos e validação de planilhas de cálculo dos métodos estatísticos e pela realização dos testes de aceitação e liberação. Por outro lado, a Produção deve ser responsável pelas ações rotineiras de manutenção da confiabilidade metrológica no dia a dia.

Dentre as tarefas da Metrologia, está a elaboração de um procedimento mestre definindo claramente as regras para aplicação dos estudos estatísticos.

Na figura 3.10 pode se observar uma tabela resumindo as recomendações expressas neste capítulo com referência à aplicação dos estudos na aceitação, na liberação e na supervisão rotineira de sistemas de medição de produção.

A tarefa de definir que estudo deve ser realizado em cada caso particular deveria ser realizada durante o planejamento avançado da qualidade de produto e processo (PAQPP), pelas mesmas equipes multifuncionais que elaboram o plano de controle. Para fins de sistematizar e comunicar as ações do sistema de garantia da qualidade das medições sugere-se criar um documento denominado “Plano de Garantia da Qualidade das Medições” (PGQM). Adotando uma filosofia semelhante ao plano de controle, o PGQM é uma tabela na qual são listados todos os sistemas de medição e inspeção por atributos usados para controlar a qualidade de uma peça determinada (figura 3.11). Assim, o PGQM conterá as seguintes informações:

- A lista de características da qualidade a controlar para o produto em questão;
- Os sistemas de medição e inspeção utilizados em cada caso;
- As ferramentas estatísticas aplicadas;
- Outras informações importantes.

Opcionalmente, pode-se incluir o plano de calibração no PGQM, fornecendo assim num único documento toda a informação que a metrologia precisa para estruturar seus trabalhos.

	Aceitação	Liberação	Supervisão Contínua
Repetitividade e Tendência (Cg, Cgk)	Realizado preferencialmente na planta do fornecedor, antes de autorizar o transporte. Verificar estabilidade e capacidade potencial.		
Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R)	Realizado preferencialmente na planta do fornecedor, mas também para fins de teste de aceitação do sistema de medição na fábrica, especialmente no caso em que a instalação no local de uso possa ser demorada.	Realizado no local de trabalho, envolvendo usuários reais do sistema de medição. Usar 10 peças, 3 operadores, 3 repetições. Sempre que possível, importar a 1/7 de estudos de capacidade do processo de manufatura.	Realizado quando ocorre troca dos operadores da célula do setor. Neste caso predomina o AI/ na composição do R&R. Usar 5 peças, 3 operadores, 2 repetições.
Repetitividade para sistemas automáticos (Re)	Substitui o estudo de R&R no caso de sistemas de medição automáticos ou dispositivos sem influência do operador. Condições e situações de aplicação são as mesmas. Usar 20 a 25 peças e 2 repetições.		
Estabilidade		Realizada sempre que se trata de sistemas complexos, cuja estabilidade intrínseca não é bem sucedida, ou instalados em ambientes pouco controlados	
Tendência		Realizado quando a calibração não garante a ausência de tendências significativas. Particularmente em sistemas cuja tendência pode ser afetada pela montagem em dispositivos de controle ou pela ajustagem do zero. Pode ser substituído pelo estudo de linearidade (padrão centra) ou pelo estudo de estabilidade quando se usa um padrão calibrado. Usar peça ou padrão, 10 repetições.	Devem ser implementados meios e procedimentos para ajuste correto da tendência em sistemas com ajuste do zero. Ajustes periódicos de tendência são automaticamente controlados quando se implementa o PMAPTM.
Linearidade		Realizado quando a calibração não garante a ausência de erros de linearidade significativos. Particularmente em sistemas de medição com escalas não lineares ou ganho ajustável. Usar 5 peças ou padrões, 10 repetições.	Devem ser implementados meios e procedimentos para reajuste correto da linearidade em sistemas de ganho variável. Nesse caso, deverá-se dispor de 3 padrões para supervisão na rotina.
PMAP™			Realizado sempre que seja possível, mas particularmente em sistemas de medição de características significativas e críticas. Acompanhar de uma verificação funcional periódica documentada em um diário de bordo.

Figura 3.10 – Resumo da aplicação dos métodos estatísticos para garantia da qualidade das medições de produção.

PLANO DE GARANTIA DE QUALIDADE DAS MEDIÇÕES											Elaborado por: ADS		
Número do Produto: 639.0731.0		Pinhão									Data / /		
Nome do Produto:													
Característica	CC	Tolerância	Sistema de medição ou inspeção		Testes de aceitação	Calibração periódica	Estabilidade	Tendência	Linearidade	GR&R (var. ou GR (auto m.))	Verificação funcional / visual	PMAP	Observações
			Definição	Resolução Local									
Comprimento da pista	◇	7,50 mm 7,75 mm	Micrômetro de discos	0,01 mm	U - 07	Calibração	c/360d	Fase 1 PMAP	Não	10x3x3 (lb)	1/turno	1/turno	
Diâmetro interno	◇	12,08mm 12,13mm	GB - 1984	Atributos	U - 07	Calibração (fornecedor)	c/180d	NA	NA	NA	1/turno	Não	
Diâmetro interno	◇	12,08mm 12,13mm	Oliva Marpos	1 um	U - 07	Calibração + R&T (tom.)	c/360d	Fase 1 PMAP	Não	10x3x3 (lb)	1/turno	1/turno	
Batimento	◇	0 0,08 mm	Relógio Comp GB 1950	1um	U - 07	Calibração rebolo e dimens GB 1950 (fornecedor)	c/180d	Fase 1 PMAP	Não	10x3x3 (lb)	1/turno	1/dia	
Rugosidade do furo	◇	0 3,2 Ra	Rugosímetro	0,1 um	U - 07	Calibração	c/xxxid	Não	Não	NA	1/turno	Não	
Espessura do dente	◇	1,2 mm 1,8 mm	Projetor de perfis	1 um	U - 07	Calibração (fornecedor)	c/360d	Fase 1 PMAP	Não	10x3x3 (lb)	1/turno	1/sem.	

Figura 3.11 – Exemplo de PGQM

Para limitar o impacto da implantação da sistemática, inicialmente constarão no PGQM somente as características consideradas críticas tanto pelo cliente como pela empresa, salvo quando outras forem solicitadas por uma das duas partes.

Para atingir o ponto em que possa ser aplicado o que foi descrito nesse capítulo, assim como para implementação de qualquer ferramenta da qualidade[23], precisa-se da cooperação de todos os níveis internos, desde a alta diretoria ao chão de fábrica. Deve-se ressaltar também a importância de se ter acessibilidade a recursos como treinamentos, softwares e liberação de recursos financeiros, na medida em que exista necessidade dos mesmos.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASO

O desenvolvimento e aplicação da metodologia se deram na Zen S.A. planta Brusque (Figura 4.1) como ambiente para avaliação da eficiência.



Figura 4.1 – Planta da Zen S.A. em Brusque[24]

Fundada em 1960, a Zen S.A. tem atuado no mercado brasileiro há mais de 40 anos, e ao longo das décadas aperfeiçoou sua tecnologia para fabricação de componentes de precisão, forjados e usinados, tornando-se o maior fabricante brasileiro de impulsores de partida.

A Zen S.A. é certificada pela ISO/TS16949, certificado de qualidade reconhecido internacionalmente que comprova o padrão de qualidade de seus produtos em conformidade com a indústria automobilística mundial, padrão que se transfere também para os produtos destinados ao mercado de reposição.

A Zen S.A. planta de Brusque - SC conta hoje com:

- 32 000 m²;
- 1 100 funcionários;
- 7 milhões de peças produzidas anualmente[24].



Figura 4.2 – Exemplo de produtos da série automotiva

Os esforços de implementação da metodologia são focados nas características especiais, consideradas críticas, dos impulsores fabricados para o mercado original (OEM), sendo os mesmos produtos voltados para a exportação.

Espera-se que características não especiais e produtos fabricados para o mercado de reposição (não voltados para a exportação) se beneficiem naturalmente com a melhoria das práticas metrológicas implementadas.

Buscando essas condições supracitadas, foi definido um setor da fábrica, mais precisamente duas células de produção especializadas em produção, para um importante cliente.

Estas células de trabalho são espaços delimitados por máquinas e dispositivos auxiliares na produção de uma determinada peça, sendo separadas de acordo com a similaridade e etapas do processo de produção. As mesmas comportam a maior parte da metrologia necessária para garantia da

qualidade do produto final, como pode ser visto na figura 4.3, onde é apresentado um exemplo de uma bancada conhecida como “base metrológica” presente no chão de fábrica da área de produção.



Figura 4.3 – Base metrológica em uma célula de trabalho

Nesse capítulo serão apresentados exemplos das etapas discutidas no capítulo 3, e os resultados obtidos com a aplicação da metodologia.

4.1 ESTUDO PRELIMINAR

Visando uma melhor definição de todo o escopo do trabalho torna-se necessário um reconhecimento metrológico do ambiente de aplicação, para ser possível conciliar o desenvolvimento e a aplicação da metodologia desenvolvida e apresentada no capítulo anterior.

Foi então definido um experimento baseado no MP do Evaluating Measuring Process[7]. Para isso foram envolvidos:

- 2 Células de Produção
- 18 Operadores;

- 2 Sistemas de Medição;
- Peças fabricadas;

Para obter um resultado significativo foi necessário encontrar Sistemas de Medição que não dispendam de um elevado tempo para obtenção de resultados e que tenham grande incidência na realização dos estudos feitos na empresa (por exemplo, MSA CEP). Além disso esse tempo tem que levar em conta os intervalos na produção disponíveis pelos operadores

O experimento foi dividido em duas partes:

- Medição Simples – rápido treinamento, custo e tempo de medição relativamente baixo, pequenas influências do operador.
- Medição Crítica – treinamento minucioso (vários detalhes), custo e tempo de medição relativamente alto, grande influência do operador.

A escolha das peças foi de acordo com a produção no local (Figura 4.4) e a dos operadores de forma aleatória conforme a disponibilidade dos mesmos. A escolha das células teve a fabricação como critério, sendo direcionada para onde existissem semelhanças nas medições e nos Sistemas de Medição.



Figura 4.4 – Peça selecionada para o Estudo

Para o estudo da Medição Simples, foi utilizado um micrômetro milesimal digital para medição externa (Figura 4.5), exatamente pelo fato de ser de fácil manuseio e exigir um simples treinamento. Para o estudo da Medição Crítica, utilizou-se um projetor de perfil (Figura 4.6) devido a diversas fontes de variações que não ocorrem no micrômetro, como por exemplo, o paralaxe[25].



Figura 4.5 – Micrômetro Digital

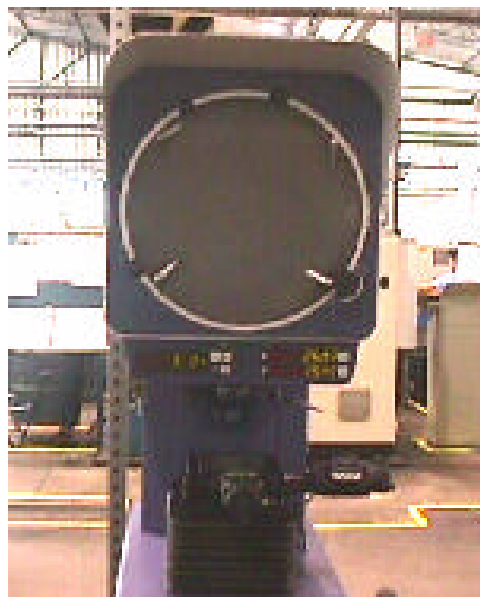


Figura 4.6 – Projetor de Perfil utilizado

Na “Medição Simples” escolheu-se o diâmetro da pista (Figura 4.7) e na “Medição Crítica” optou-se pela espessura do dente (Figura 4.7).

Para um reconhecimento da área de trabalho, conforme comentado no capítulo 2, foram realizados estudos Básicos de Tendência e de Inconsistência [7] entre:

- Operadores;
- Turnos;
- Células.

Ressaltando-se mais uma vez que esse reconhecimento não faz parte da metodologia apresentada no capítulo 3, mas de suma importância quando se encontra um ambiente desconhecido metrologicamente.

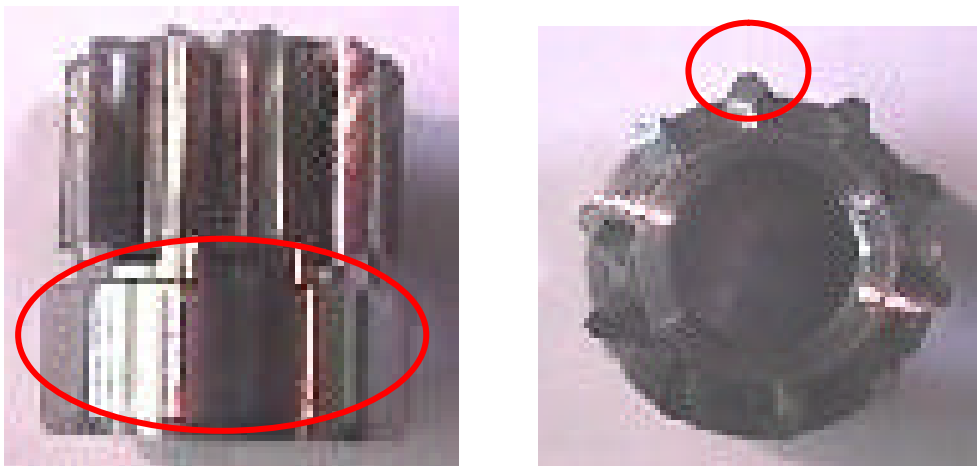


Figura 4.7 – Características selecionadas para o experimento

Esse estudo auxiliou na avaliação dos métodos como simples e crítico conforme segue:

- A Medição Simples não apresentou grande variabilidade e principalmente diferenças significativas entre operadores, turnos e células
- A Medição Crítica, conforme idéia inicial apresentou diversos fatores de variabilidade.

Para melhor evidenciar a afirmação acima, a figura 4.8 contém os resultados das avaliações entre os operadores, com 10 amostras e os dois SM citados anteriormente.

Mesmo sem apresentar inconsistências entre suas próprias medições, pode-se observar no estudo crítico uma diferença significativa nos valores obtidos pelos operadores, que juntamente com outros conjuntos de gráficos reafirma-se o que foi citado anteriormente.

A diferenciação entre simples e crítico não faz parte da metodologia, porém é necessário ter conhecimento das características dos Sistemas de Medição e do ambiente de utilização que será trabalhado.

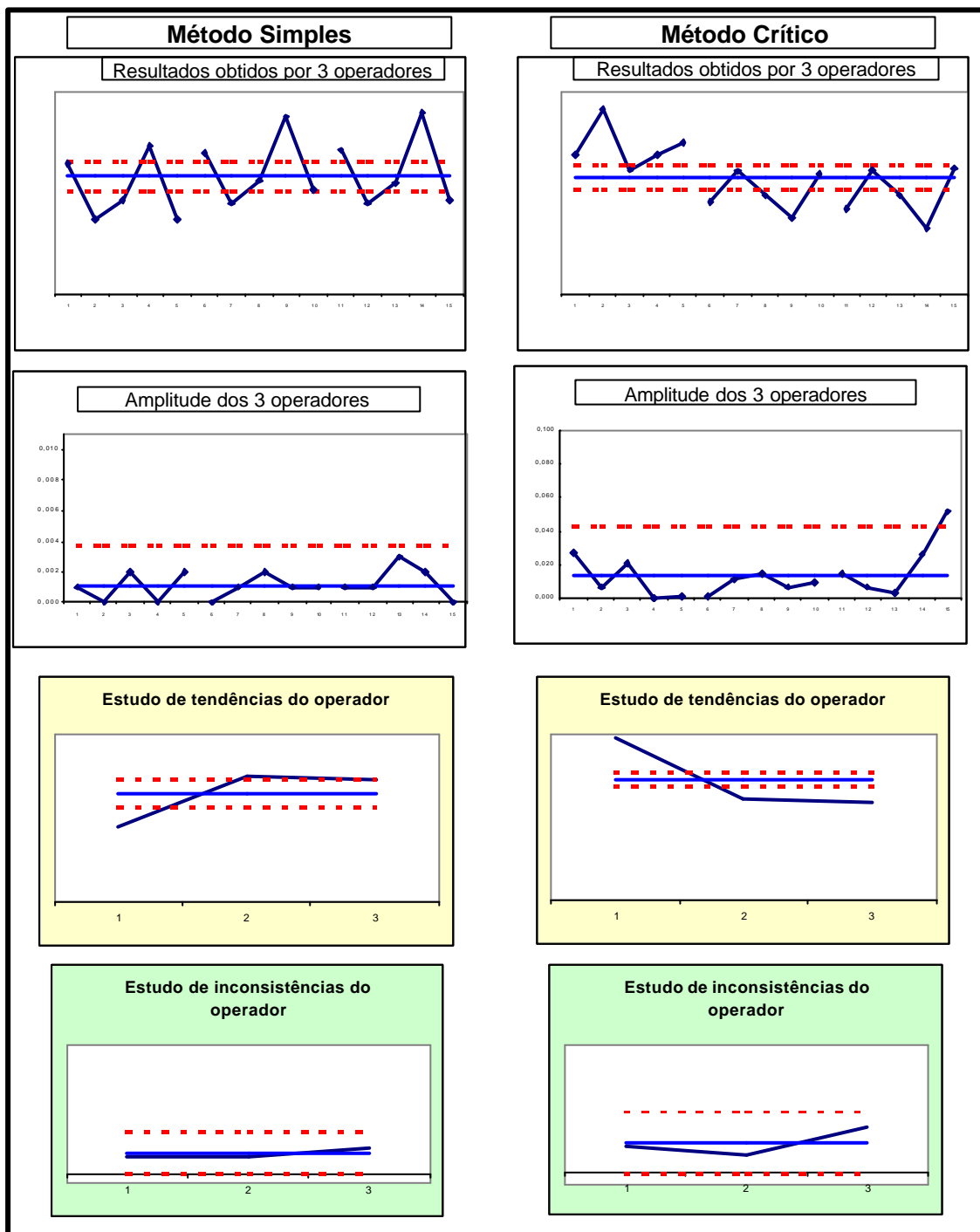


Figura 4.8 – Exemplo dos gráficos obtidos pelo estudo

4.2 PGQM NA EMPRESA

Após o estudo realizado para reconhecer o ambiente de utilização, foi desenvolvido o PGQM para as características críticas presentes. Para tanto, foi desenvolvido um *software* que suportasse a metodologia descrita no capítulo 3.

O *software* dedicado para o PGQM foi desenvolvido em parceria pelo então doutorando Marcos Marinovic (Labmetro – EMC- UFSC) de acordo com os requisitos exigidos pela sistemática, e atendendo às necessidades da Zen S.A.

O “*Gerenciador de Documentos – MSA*” nome dado ao aplicativo, tem como base Microsoft Access[®], e oriente as gestões da abertura, criação e visualização das planilhas de estudo de avaliação do sistema de medição[27] .

Este aplicativo, originalmente não contém as planilhas necessárias para a realização dos estudos, sendo necessário o desenvolvimento pelo próprio usuário ou consultante. Essa sistemática faz com que não exista uma interação do *software* com os dados contidos nestas planilhas, proporcionando uma flexibilidade na sua utilização e conseqüentemente não prendendo o usuário a fórmulas ou métodos pré-existentes.

A interatividade entre usuário e *software* é destacada, podendo obter-se informação desejada por buscas em várias características, conforme a figura 4.9, em montagem de banco de dados racional[26].

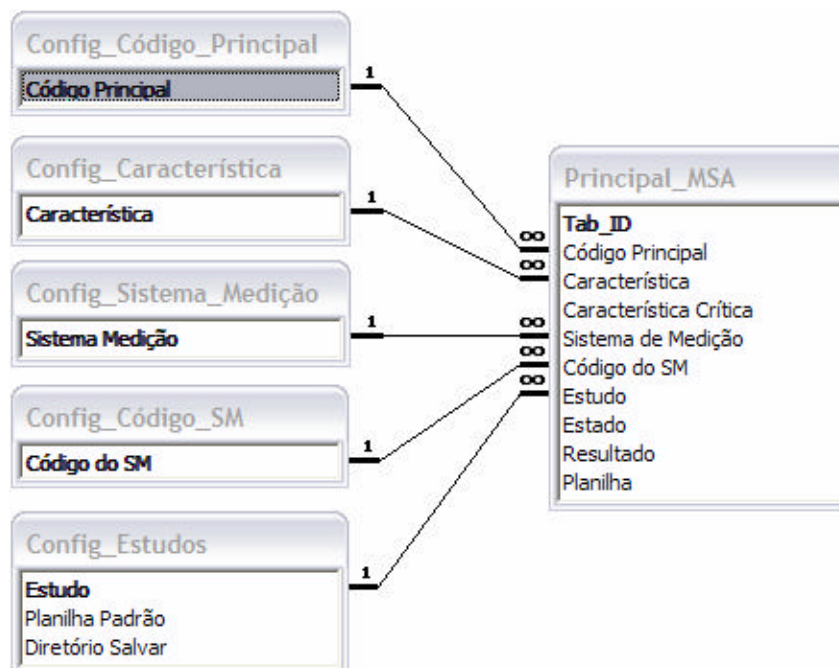


Figura 4.9 – Relacionamento da base de dados do Gerenciador de Documentos – MSA[27]

Além da rastreabilidade dos estudos, pode-se observar os seguintes recursos disponíveis no software:

- Abrir estudos existentes;
- Criar novos estudos;
- Atualizar os estudos realizados;

Com o auxílio desse *software* pode-se colocar em prática todo plano desenvolvido e apresentado, cadastrando as características e os estudos necessários para o ambiente de aplicação. Alerta-se também que o mesmo pode ser um facilitador na multiplicação e utilização do PGQM. Essa gestão automatizada evita a criação de uma planilha para cada célula de trabalho, auxiliando a rastreabilidade, confecção de indicadores e o arquivamento e utilização das ferramentas estatísticas já inseridas anteriormente. Além disso

inserir uma nova ferramenta via *software* favoreceu a manutenção do mesmo sempre com a última avaliação.

4.2 ANÁLISE DE SM EXISTENTES NA CÉLULA

Para iniciar a demonstração da aplicação da metodologia proposta no capítulo 3, foram definidos alguns sistemas de medição existentes para as análises. Esses sistemas são utilizados na medição de características críticas do plano de controle. A tabela 4.1 destaca pontos que ajudaram nas respostas desenvolvidas no *check-list*.

Tabela 4.1 Características críticas analisadas

	Resolução	Valores das características (mm)		
		min	max	V. tolerancia
Paquímetro	0,01	7,50 9,45	7,75 9,70	0,25
Micrômetro 123-101	0,01	9,75	10,00	0,25
Relógio + Gabarito	0,001	0	0,08	0,08

Foi realizado o *check-list*, sendo que todos os itens foram atendidos pelos Sistemas de Medição, porém levando-se em consideração a falta de registros anteriores deve-se então considerar a necessidade de aplicação do teste de liberação (seção 3.4).

Como os sistemas de medição foram definidos como simples na avaliação do ambiente de trabalho, tendo também atendido aos itens do *check-list* e considerando ainda a ausência de dados históricos, foi definido a utilização da Ferramenta R&R método longo completo (10 operadores, 3 ciclos e 3 repetições), para assim englobar todos fatores geradores de influência no processo de medição.

No caso do micrômetro e do relógio, os resultados foram abaixo de 10%, sendo então considerados capazes, e assim liberados para operação. Foi indicado à empresa a utilização de R&R periódico, período definido pela experiência metrológica, utilizando o software apresentado como método de controle.

Já para o paquímetro utilizado na medição de comprimento da pista do pinhão (Figura 4.10), o resultado não se mostrou satisfatório, mesmo se mostrando abaixo dos 30% na questão da tolerância (Tabela 4.2). Foi então indicado por bom senso, que o mesmo fosse considerado reprovado, já que pela variação total o resultado foi muito alto, quase 70% (Tabela 4.2) e também ressaltando que nessa característica a região de contato é feita em um canal e com isso a área de contato com o paquímetro é pequena.

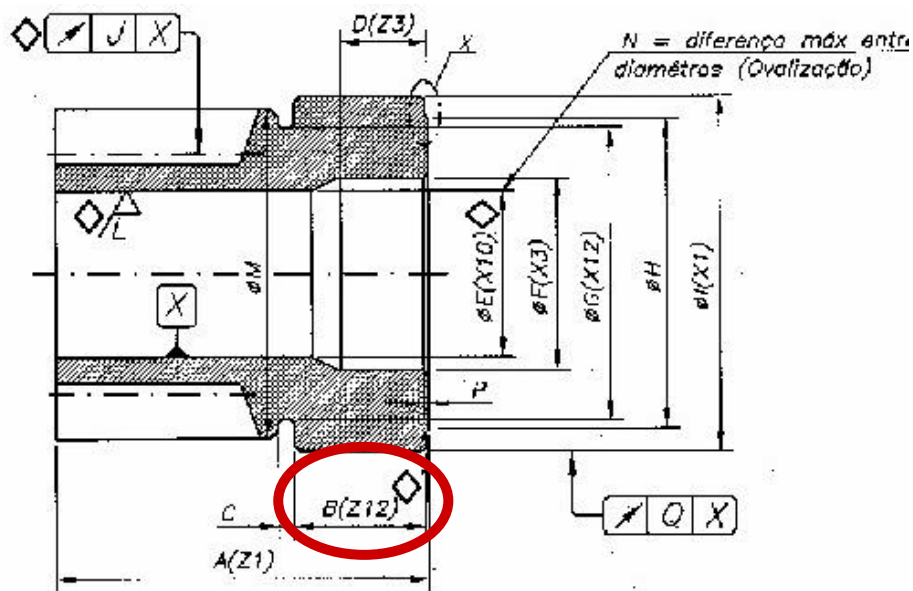


Figura 4.10 – Peça (pinhão) com a característica analisada destacada

Tabela 4.2 Resultado de GR&R para utilização do paquímetro

Variação Percentual		
	Var. Total	Tolerância
%VE	33,14%	13,23%
%VA	60,18%	24,03%
%R&R	68,70%	27,43%
%VP	72,66%	29,02%
ncd	1	

A partir desses resultados foi indicada a opção da troca por um outro sistema de medição que obtenha um melhor resultado, em substituição ao paquímetro.

A proposta de substituição deste SM por um micrômetro de disco (Figura 4.11) foi avaliada e utilizando-se a ferramenta de R&R, e notou-se uma melhoria significativa (Tabela 4.3).



Figura 4.11 – Novo SM selecionado

Tabela 4.3 Resultado de GR&R para utilização do micrômetro

Variação Percentual		
	Var. Total	Tolerância
%VE	14,97%	5,67%
%VA	21,75%	8,24%
%R&R	26,41%	10,00%
%VP	96,45%	36,54%
ncd	5	

A troca do SM é viável para a característica estudada e algumas considerações ainda foram feitas, como por exemplo, a troca do micrômetro analógico por um digital, pois durante o estudo identificaram-se algumas dificuldades na leitura de instrumentos analógicos.

A metodologia mostrou-se de simples aplicação e com resultados significativos para a empresa.

Com essa mudança além de um melhor resultado final, consegue-se aumentar a confiabilidade devido ao método que será utilizado, pois o micrômetro a disco aumentará a região de contato na medição.

4.3 ANÁLISE DE SM A SEREM IMPLANTADOS

A proposta também foi aplicada em uma solução de aquisição de novo SM para a empresa. Analisando o desenvolvimento de um dispositivo (Figura 4.12) de medição para características do perfil do pinhão já citado e apresentado anteriormente.



Figura 4.12 – Máquina de Medição de perfil do pinhão

O fornecedor selecionado pela Zen S.A. apresentou uma proposta frente aos requisitos iniciais das tarefas de medição.

Dados específicos dessa proposta não serão apresentados devido ao fato de ser um projeto já em andamento no momento que se iniciou o desenvolvimento da sistemática aqui sugerida.

Considerando-se então o atendimento aos requisitos iniciais aceitável, passa-se para a próxima etapa, segundo a proposta apresentada no capítulo 3.

De acordo com a metodologia, parte-se à aceitação (Figura 3.4). Para tanto, uma equipe da Zen S.A. se deslocou até o fornecedor com intuito de avaliar essa etapa.

Deste ponto em diante já serão utilizados conceitos sugeridos pela sistemática.

Para a análise, optou-se pela ferramenta do R&R.

Esse resultado foi suficiente para a reprovação do SM e pode ser observado na tabela 4.4.

Tabela 4.4 Resultado de GR&R para o batimento

Variação Percentual		
	Var. Total	Tolerância
%VE	40,31%	33,08%
%VA	2,08%	1,71%
%R&R	40,37%	33,13%
%VP	91,49%	75,08%
<i>n</i>	3	

Nesse caso a empresa tem duas opções:

- O fornecedor desenvolver a melhoria do sistema de medição;
- Partir para outra proposta.

Como um alto investimento já havia sido feito, foi definido desenvolvimento pelo fornecedor como a melhor opção.

Após as etapas de melhoria, um novo teste com a mesma ferramenta foi realizado (R&R). O dispositivo mostrou então uma melhora significativa, chegando a valores de R&R inferiores a 20%, segundo informação da empresa contratante (Zen S.A.). Sendo assim o mesmo foi liberado para a instalação na planta da fábrica.

A próxima etapa da metodologia é a realização dos testes para liberação, devido aos fatores de influência serem semelhantes aos encontrados na planta do fornecedor e, sendo o sistema de medição automático, implica na ausência de influência do operador. Foram comparados os valores de R&R inferiores a 20%, liberando o sistema para a produção.

Para a próxima etapa, a realização da supervisão contínua, utiliza-se o PMAP™, nomeado VPMM (Verificação Periódica dos Meios de Medição), descrita nos capítulos anteriores. O próximo item explanará sobre os resultados obtidos a partir dessa ferramenta.

4.4 APLICAÇÃO DA SUPERVISÃO CONTÍNUA

Com uma supervisão contínua, a aplicação do VPMM é uma alternativa do uso do R&R, porque pode se ter informação sobre o andamento do sistema de medição de maneira simultânea à medição realizada no processo, por se tratar de uma carta de controle.

A utilização do VPMM foi testada nas medições em uma máquina automática colocada na própria célula de trabalho.

Dados da máquina são considerados irrelevantes devido ao fato que a sistemática não ser restrigente e pode ser aplicada em diversos tipos, conforme apresentado no capítulo 2.

Em primeira parte são definidos os limites provisórios e determinada a frequência de medição. A partir desses dados são desenvolvidas as cartas de controle para assim serem colocadas em uso, conforme apresentado no Capítulo 2.

Essa aplicação avaliou a estabilidade do SM e também, conforme mostra a figura 4.13, auxiliou na realização de ações para a determinação da causa de um ponto fora de controle e sua conseqüente correção.

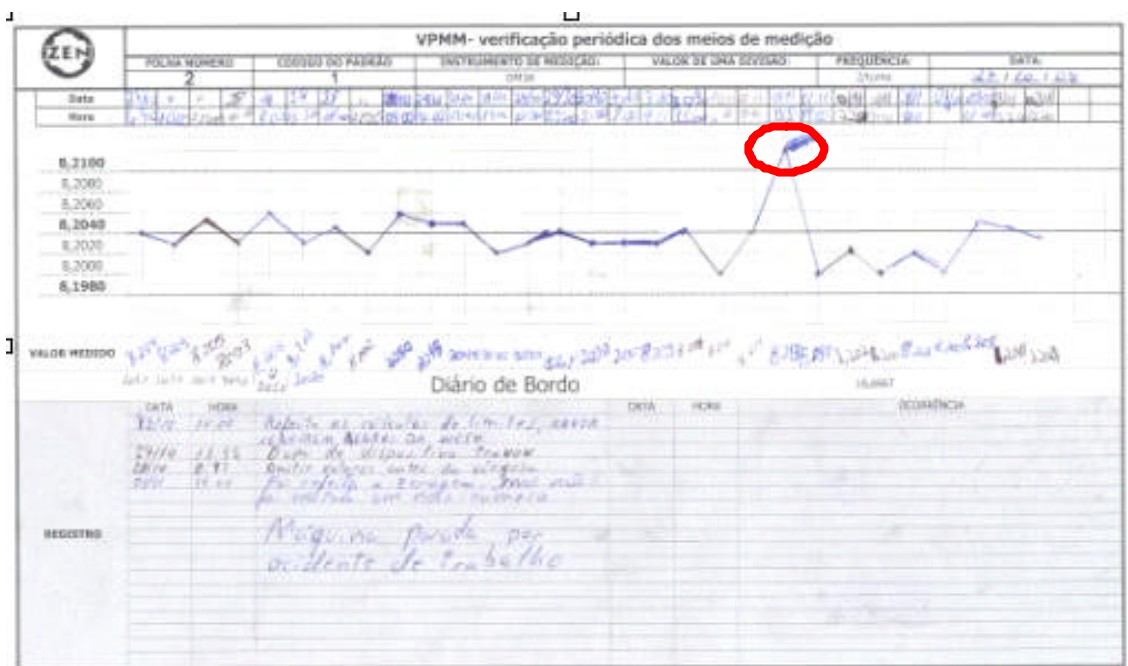


Figura 4.13 – Carta de Controle com ponto fora de controle

A estabilidade conhecida e pontos foras de controle detectados auxiliam na confiabilidade de medição evitando que o SM apresente Erros do Tipo 1 ou Tipo 2 [5], e em alguns casos pode gerar um pedido de manutenção devido ao mau funcionamento, evitado assim um custo adicional pelo fato de não se estar assegurando a qualidade do produto mensurado.

Já a figura 4.14 mostra casos onde não se tem o ponto fora de controle, mas sim valores muito próximos, apresentando também ao operador a possibilidade de inserir erros que não existiam antes e assim corrigir os mesmos.

Nessa aplicação o ponto determinante é o conhecimento da estabilidade do SM, obtendo-se assim uma boa ferramenta de suporte à melhoria no processo.



Figura 4.14 – Carta de Controle com pontos no limite de controle

Conforme se pode notar, essa ferramenta não tem o intuito de fornecer valores comparativos e sim, conforme as figuras apresentadas anteriormente, mostrar o funcionamento do processo de medição durante o período de intervalo de calibração garantindo assim, a confiabilidade das medições.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Esse trabalho mostrou a atual preocupação na adequabilidade dos Sistemas de Medição utilizando poderosas ferramentas estatísticas, não somente para atendimento de requisitos de clientes ou atendimento de normas, mas também com intuito de melhoria em seus processos, bem como redução de gastos agregados ao fato do não conhecimento do produto gerado. Estes gastos provêm de altos índices de refugo e do retrabalho, sendo que os mesmos poderiam em muitos casos ser evitados, ou, no mínimo, ter uma redução. Existindo o conhecimento e a veracidade de um resultado de medição, pode-se alterar um processo a fim de se chegar ao ponto ótimo entre produção e qualidade dos produtos.

Na demonstração da aplicabilidade do trabalho, apresentada nos estudos de casos, não se tem exatamente uma aplicação completa e sim várias etapas que em conjunto formam a sistemática sugerida. Isso ocorre comumente no caso de projetos de Sistemas de Medição, onde o período, desde o desenvolvimento até a instalação, pode ser maior que um ano. Fato esse verificado na própria empresa, a qual foram realizados os estudos de casos.

Outro ponto importante do trabalho é a serventia como guia para uma correta aplicação da metrologia no ambiente industrial, não ocorrendo, por

exemplo, uma compra ou fabricação desnecessária de SM que seriam inadequados para determinadas medições. Além disso, garantir que os sistemas sejam utilizados coerentemente com suas finalidades.

O retorno financeiro dessa aplicação não poder calculado, devido ao fato de como maior ponto positivo nessa questão o fato de se evitar custos adicionais, como por exemplo peças não conformes encontradas no cliente ou um grande refugo de peças em etapas posteriores da produção.

Nessa busca pela idealização, alguns aspectos portaram-se de maneira contrária. Um deles, devido esse assunto ser considerado “novo”, é o fato da não existência de uma grande diversidade de renomadas bibliografias consideradas aptas para o desenvolvimento do trabalho. Outro ponto que merece ser destacado é a dificuldade de mostrar a importância do projeto perante diversas barreiras impostas no dia a dia da empresa, e como consequência alguns setores como produção e processo não despenderem toda atenção necessária.

Propondo trabalhos futuros, destaca-se o desenvolvimento de um processo para análise de inspeção por atributos, pois o método do kappa de Cohen apresentado no MSA[28] não apresenta grande confiabilidade e nem aplicabilidade[28]. Outra proposta seria uma ferramenta de gestão semelhante a baseada no PMAPTM apresentado, porém sem a necessidade de cartas como, por exemplo, utilizando um próprio *check-list*, mas o mesmo assegurando a garantia e confiabilidade apresentada pela ferramenta utilizada neste trabalho. Uma terceira proposta é a evolução da metodologia buscando ajustes nos intervalos de calibração, conforme colocado no Capítulo 3.

O resultado final foi satisfatório, porém para uma maior eficiência dessa sistemática apresentada, faz-se recomendação às empresas a elaboração de um Manual da Garantia da Qualidade das Medições, onde o mesmo abranja todas as etapas descritas nesse trabalho, além de diversos recursos que agregam no objetivo final de acordo com a Figura 5.1, e com isso podemos obter com maior facilidade a Garantia da Qualidade Metrológica.



Figura 5.1 – Funções propostas em um Manual de Garantia da Qualidade das Medições

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ISO/QS 9000 Quality Systems Requirements, third edition, 1998
- [2] ISO/TS 16949 Quality management Systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations. 2002
- [3] MSA Measurement Systems Analysis, England: Chrysler, Ford and General Motors, third edition, 2002.
- [4] VIM Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, Brasília: segunda edição, 2000.
- [5] INFOMETRO www.infometro.hpg.ig, Homepage dedicada exclusivamente a Metrologia, disponível em 02/12/2003.
- [6] FILHO, Prado RODRIGUES, Ayrton O Retorno Financeiro que a Metrologia Oferece as Empresa, Revista Metrologia & Instrumentação, ano 3, nº 20, pg 20-24, editora banas, 2003.
- [7] WHEELER, Donald J.LYDAY, Richard W. EMP, Evaluating the Measurement Process, second edition, 2000
- [8] CADERNO 10 “Capabilidade dos Processos de Medição e Ensaio”, Bosch, segunda edição, 2002.
- [9] DIETRICH, Edgar, SCHULZE, Alfred, “Guidelines for the Evaluation of Measurement Systems and Processes”, 1998
- [10] D. Wheeler, “Understanding Statistical Process Control”, Segunda edição, 1992.

- [11] G.D. Donatelli, G.G. Soares, C. dos Campos Márquez, A. Schmidt, “Estabilidade Estatística da Medição”. Metrosul, Curitiba, 2002.
- [12] MSA “Análise de Sistema de Medição”, versão brasileira, terceira edição, 2004.
- [13] FIAT-GM POWERTRAIN, “Evaluation of Measurement Systems Specification”, version 10.6, revisão 2004.
- [14] MSA Measurement Systems Analysis, England: Chrysler, Ford and General Motors, second edition, 1997.
- [15] BARRENTINE, Larry B., Concepts for R&R Studies, segunda edição, 2003.
- [16] EVERHART, “Developing a process Measurement Assurance Program (PMAP)”, Cal Lab, 1997.
- [17] SILVA, Paulo G.V. Moura da. “Um método Sistemático adaptado ao Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de medição Automático Dedicado a Inspeção Geométrica”, PósMCI, UFSC ,2004.
- [18] GEMAQUE, Marcos J.A., “Abordagem para Solução de um Problema Metrológico na Indústria – Medição de Engrenagem” PósMCI, UFSC, 2003.
- [19] Millitron 1840 LED Display, Catálogo de Apresentação do Aparelho, 2004.

- [20] NBR ISO 10012, “Sistemas de Gestão de Medição – Requisitos para os processos de medição e Equipamentos de Medição”, primeira edição, 2004.
- [21] NCSL, National Conference of Standards Laboratories, "Establishment and Adjustment of Calibration Intervals", Recommended Practice n.º 1, november 1989
- [22] TAMS, “Technical Requirements for Calibration Interval Establishment for Test and Monitoring Systems”, Navy Metrology Engineering Center, California: jan.1986, 35p
- [23] NBR ISO 9000:2000, “Sistemas de Gestão da Qualidade”, 2000.
- [24] www.zensa.com.br, Página principal da Zen S.A., último acesso em julho de 2005.
- [25] TELECURSO 2000, “Módulo Metrologia”, 1997.
- [26] HEUSER C.A, “Projeto Banco de Dados”, Instituto de Informática da UFRGS, quarta edição, 2001.
- [27] MARINOVIC, Marcos. “Gerenciador de Documentos – MSA” Manual de Operação, versão 1.0, 2005.
- [28] OLIVEIRA, André Luiz M. de, “Racionalização dos Estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade para Sistemas de Inspeção por Atributos”, apresentado no COBEF 2005.