

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS JOINVILLE
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE

**MSA E VDA 5: UMA METODOLOGIA INTEGRADA PARA ANÁLISE
DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO**

GABRIEL WESTPHAL

NOVEMBRO / 2017

GABRIEL WESTPHAL

MAS E VDA 5: UMA METODOLOGIA INTEGRADA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS
DE MEDIÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva no Curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientadora: Sueli Fischer Beckert

Joinville
2017

MSA E VDA 5: UMA METODOLOGIA INTEGRADA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS
DE MEDIÇÃO

GABRIEL WESTPHAL

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 24/11/2017.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Sueli Fischer Beckert

Presidente/Orientadora

Prof. Dr. Maurício de Campos Porath

Membro

Prof. Me. James Schipmann Eger

Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que pela graça de Jesus Cristo me trouxe onde estou hoje e me ajudou ao longo de toda a graduação, todo o melhor de mim é graças ao Pai.

Agradeço a meus pais pelo amor, apoio e socorro em todos os momentos necessários durante o estudo e formação.

Agradeço a meus avós por sua confiança e incentivo, sempre felizes e torcendo por mim.

Agradeço à minha orientadora, Professora Sueli Fischer Beckert, por sua paciência e atenção para comigo ao longo deste trabalho e por ter despertado em mim tamanho apreço pela estatística.

Agradeço ao Professor Leonel Rincon Cancino que em tempos de dúvida me ajudou a escolher uma área de estudo para meu TCC.

Agradeço aos amigos Matheus Santana Carvalho, Guilherme Fischer e Guilherme Venturi pela contribuição tão significativa disponibilizando seu tempo e habilidades para realizar as medições necessárias a este trabalho.

Agradeço aos amigos que entenderam quando o TCC foi prioridade e que se lembraram de mim em suas orações.

RESUMO

A análise dos sistemas de medição é um requisito das normas da indústria automotiva. O procedimento que avalia os produtos/processos também deve ser avaliado, para que assim a qualidade dos mesmos seja garantida por um sistema certificado. Para fazer a avaliação dos sistemas de medição, as montadoras recomendam manuais de referência. O foco deste trabalho é comparar os manuais de referência MSA 4ª ed. e VDA volume 5, buscando uma metodologia compatível aos dois e que seja aplicável no meio industrial. A escolha desses manuais é pelo fato do primeiro ser o mais popular no meio industrial e o segundo ser muito similar à norma internacional que propõe o estudo de capacidade de processos de medição.

Através de revisão bibliográfica, análise comparativa de métodos e estudo de caso para dois sistemas de medição diferentes, balança de precisão e micrômetro, foi elaborada uma metodologia integrada, unindo semelhanças e conciliando diferenças.

Neste estudo é observado que aplicando os critérios de aceitação de ambos os manuais é possível aprovar sistemas que a princípio seriam rejeitados. Aliás, certos critérios deveriam ser revisados pelos autores.

Palavras chave: Capacidade dos processos de medição, incerteza de medição, repetitividade, reprodutibilidade.

ABSTRACT

The measurement system analysis is a requirement of the automotive industry standards. The procedure that evaluates the products/processes needs to be evaluated, so its quality is guaranteed by a certified system. To evaluate the measuring systems, the companies recommend reference manuals. The focus of this work is to compare the MSA 4th edition and VDA volume 5 reference manuals, looking for a compatible methodology for both, which could be applied to the industry. These manuals were chosen, because the first one is the most popular in the industrial environment and the second one is very similar to the international standard about capability of the measuring processes.

Through literature review, method comparing analysis and case study with two different measuring systems, precision balance and micrometer, an integrated methodology was elaborated, binding similarities and reconciling differences.

In this study it is observed that by applying both manuals acceptance criteria it is possible to accept systems that at the beginning were rejected. Also, certain acceptance criteria should be reviewed by the authors.

Keywords: capability of measuring processes, measurement uncertainty, repeatability, reproducibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Exemplo de regressão linear	19
Figura 2 -	Tabela de coeficientes para estimativa	24
Figura 3 -	Fluxograma para metodologia MSA	31
Figura 4 -	Fluxograma de análise do VDA 5	46
Figura 5 -	Fluxograma de análise integrada de capacidade dos sistemas de medição.	63
Figura 6 -	Micrômetro Mitutoyo	65
Figura 7 -	Moedas para estudo de repetitividade e reprodutibilidade do micrômetro	66
Figura 8 -	Gráfico das médias de diâmetro das moedas	67
Figura 9 -	Gráfico das amplitudes de cada operador, micrômetro	68
Figura 10 -	Balança	74
Figura 11 -	Gráfico de controle da balança para a média	75
Figura 12 -	Gráfico de controle da balança para amplitudes	76
Figura 13 -	Gráfico das médias das massas das moedas	77
Figura 14 -	Gráfico das amplitudes de cada operador, balança	78
Figura 15 -	Peças para análise de linearidade da balança	81
Figura 16 -	Linearidade da balança	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Modelo de folha de coleta de dados de repetitividade e reprodutibilidade	22
Tabela 2 -	Tabela de ANOVA	30
Tabela 3 -	Modelo para estudo de repetitividade e reprodutibilidade	53
Tabela 4 -	Modelo de resultados de ANOVA	54
Tabela 5 -	Modelo de balanço de incerteza para equipamento de medição	56
Tabela 6 -	Modelo de resultados de capacidade do equipamento	57
Tabela 7 -	Modelo de balanço de incerteza para sistema de medição	58
Tabela 8 -	Modelo de resultados do sistema de medição	58
Tabela 9 -	Dados de repetitividade e reprodutibilidade do micrômetro	62
Tabela 10 -	Resultados da ANOVA do micrômetro	63
Tabela 11 -	Medições para análise de tendência do micrômetro	64
Tabela 12 -	Incertezas padrão do dispositivo, micrômetro	66
Tabela 13 -	Resultados do dispositivo, micrômetro	67
Tabela 14 -	Incertezas padrão do sistema de medição, micrômetro	68
Tabela 15 -	Resultados do sistema de medição, micrômetro	68
Tabela 16 -	Dados de repetitividade e reprodutibilidade da balança	71
Tabela 17 -	Resultados da ANOVA da balança	73
Tabela 18 -	Resultados da ANOVA sem interação para a balança	73
Tabela 19 -	Medições para análise de tendência da balança	74
Tabela 20 -	Medições para análise de linearidade da balança	75
Tabela 21 -	Teste de hipótese para linearidade e tendência	76
Tabela 22 -	Incertezas padrão do dispositivo, balança	78
Tabela 23 -	Resultados do dispositivo, balança	79
Tabela 24 -	Incertezas padrão do sistema de medição, balança	79
Tabela 25 -	Resultados do sistema de medição, balança	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivo geral.....	11
1.2	Objetivos específicos.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1	Manual MSA.....	13
2.2	Manual VDA 5.....	32
3	ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS	48
3.1	Resolução	48
3.2	Estabilidade	49
3.3	Tendência	49
3.4	Linearidade.....	50
3.5	Repetitividade e reprodutibilidade	51
3.6	Incertezas.....	51
3.7	Comparação Geral.....	52
4	METODOLOGIA INTEGRADA.....	54
4.1	Resolução	54
4.2	Estabilidade	54
4.3	Tendência	55
4.4	Linearidade.....	55
4.5	Repetitividade e reprodutibilidade	56
4.6	Incerteza de calibração	58
4.7	Incerteza de repetitividade num padrão de referência.....	59
4.8	Incerteza por não homogeneidade.....	59
4.9	Incerteza pela temperatura	59
4.10	Incertezas por outros componentes de influência	59
4.11	Incerteza combinada e capacidade do equipamento de medição	60
4.12	Incerteza combinada e capacidade do sistema de medição.....	61
5	ESTUDO DE CASO.....	65
5.1	Micrômetro.....	65
5.2	Balança.....	74
6	CONCLUSÕES	87

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva é um dos setores mais exigentes dentro do mercado mundial, isso devido à precisão necessária na fabricação de diversos componentes, mecânicos, eletrônicos, hidráulicos, etc.

Como afirma Pandiripalli (2007), as medições são os elementos fundamentais na melhoria de produtos, processos, ou serviços de qualquer tipo. Portanto, o sistema de medição influencia diretamente na hora de tomar decisões para ajuste ou controle do processo de fabricação. A qualidade das medições é vital para a compreensão, monitoramento e melhoria de processos. Se as informações estão “contaminadas” com erros significativos, elas podem levar a decisões equivocadas, tais como aprovar um produto fora das medidas desejadas ou descartar um produto com medidas aceitáveis. Muitos problemas de qualidade industriais são solucionados identificando e corrigindo dados e processos de medição imprecisos.

A maneira como uma indústria analisa, inspeciona e valida seus produtos depende do seu sistema de gestão. Muitos são baseados nas normas ISO, porém nem todos são aplicações práticas. Hoyle (2005) faz uma comparação entre empresas e alunos acadêmicos: assim como há alunos que aprendem, se qualificam e alunos que apenas passam pela universidade para receber um diploma, há empresas que aprendem as normas, aplicam-nas e vivem uma gestão padronizada e empresas que apenas recebem ou compram os certificados.

Em 2016 a International Automotive Task Force (IATF) publicou a norma IATF 16949:2016 para gestão da qualidade no setor automotivo. Essa norma é baseada na norma de gestão da qualidade ISO 9001:2015, e define os requisitos de sistema de gestão da qualidade para as organizações de produção automotiva e de peças de reposição.

A seção 7.1.5.1 da IATF 16949:2016 trata de generalidades dos recursos de monitoramento e medição. A norma afirma que estudos estatísticos devem ser conduzidos para analisar a variação presente nos resultados de cada tipo de sistema de inspeção, medição e equipamento de teste identificados no plano de controle. Os métodos de análise e critérios de aceitação devem estar de acordo com os manuais de referência de análise de sistemas de

medição exigidos pelos clientes. Métodos analíticos e critérios de aceitação alternativos podem ser aplicados se aprovados pelos clientes.

Dentre os materiais desenvolvidos destacam-se o método de Análise de Sistemas de Medição (Measurement Systems Analysis, MSA) e o manual VDA 5 sobre Capacidade dos Processos de Medição da Associação da Indústria Automobilística (Verband der Automobilindustrie, VDA). Ambos atuam na mesma área: avaliação de qualidade na medição de componentes físicos. O primeiro foi desenvolvido pela indústria automotiva norte-americana e o segundo pela indústria automotiva alemã.

A proposta destes manuais é, através de ferramentas estatísticas, analisar os sistemas de medição de seus fornecedores e verificar se são capazes de obter medições de qualidade, ou seja, dados úteis tanto para correção do processo de fabricação, quanto para atestado de qualidade do produto.

Dietrich (2011) afirma que devido à falta de normas internacionais até meados de 2011, o MSA se tornou a diretriz mais popular no meio industrial. Com o surgimento do VDA 5 em 2003, vários fornecedores começaram a fazer suas análises de capacidade de acordo com o MSA e com o VDA 5, porque os grupos automotivos alemães incluíram este entre os documentos aplicáveis. Essas informações são relativas à comunidade automotiva alemã, na qual o Dr. Dietrich está inserido. Dietrich (2011) também mostra uma perspectiva futura de que com o surgimento de normas internacionais, como a ISO/DIS 22514-7:2011, a análise de capacidade de sistemas de medição será baseada nessa norma, até mesmo fora do setor automotivo.

A comparação apresentada por Dietrich (2011) é uma breve revisão apontando as principais diferenças entre os manuais de referência para cada fator analisado. Sua análise é dividida da mesma forma que o VDA 5 trabalha suas fontes de incerteza, comparando cada uma delas com as respectivas propostas do MSA. O autor apresenta práticas utilizadas no ambiente industrial e que não constam nos manuais, informações para reforçar a dificuldade presente na aplicação dos métodos e afirma que a principal vantagem do MSA é sua popularidade, enquanto que a análise detalhada dos componentes de incerteza é ponto favorável do VDA 5.

A metodologia abordada neste trabalho consiste na revisão bibliográfica dos manuais MSA e VDA 5, apresentando os métodos de cada um, os fatores envolvidos e os critérios de avaliação, para então apresentar diferenças e pontos comuns. Conhecendo as recomendações e procedimentos de cada manual de referência, uma metodologia única e comum a eles foi

desenvolvida, de tal forma que as amostras dos estudos satisfaçam ambos e que os resultados possam ser compartilhados. Métodos comuns de cálculo são tratados como uma única etapa, os resultados são avaliados separadamente e depois comparados a fim de avaliar os sistemas de medição. Um estudo de caso foi aplicado à metodologia integrada, mostrando a cooperação dos manuais na avaliação de dois sistemas de medição, uma balança e um micrômetro.

Esse trabalho propõe ressaltar as vantagens e desvantagens de ambos os métodos e achar uma solução comum a eles, simplificando a metodologia necessária aos fornecedores e facilitando a obtenção dos resultados, de tal forma que seus sistemas e processos de medição sejam capazes de atender ao MSA 4ª edição e ao VDA 5. Talvez assim, através do estudo realizado, os fornecedores tenham um método preparatório para as possíveis mudanças nas recomendações da qualidade, conforme a padronização dos métodos se desenvolve internacionalmente.

1.1 Objetivo geral

Propor um método de utilização integrada dos métodos MSA e VDA.

1.2 Objetivos específicos

- Pesquisar os métodos MSA e VDA;
 - Realizar a comparação destacando semelhanças e diferenças;
 - Propor etapas para a implementação integrada dos métodos;
 - Realizar experimento com um sistema de medição replicável para validar proposta.
-

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Cada sistema de medição apresenta propriedades estatísticas, variações intrínsecas devidas ao meio, ao método de operação, às condições físicas do sistema, entre outros fatores aleatórios. Para avaliar estas propriedades faz-se uso de ferramentas estatísticas e metodologias definidas pelos clientes. Dentre as principais ferramentas estatísticas é possível citar: análise de estabilidade, estudo de tendência, avaliação de repetitividade e reprodutibilidade ou de R&R (variação combinada da repetitividade e reprodutibilidade) e estudo das incertezas associadas ao sistema e ao processo de medição.

Os dados resultantes da aplicação dessa ferramenta revelam a capacidade dos sistema/processo de medição. De acordo com o manual da VDA 5 de Capacidade dos Processos de Medição (2011, pág. 11) “é requerida uma evidência da capacidade do processo de medição usado para fabricar e liberar o produto. Se esta evidência não puder ser fornecida, os resultados de medição, sobre os quais a avaliação dos produtos é baseada, serão sempre contestados”.

Quanto à nomenclatura, existe certa diferença conceitual entre os manuais sobre o que é sistema de medição e o que é processo de medição. Como o objetivo desse trabalho não se relaciona com esse tipo de conceito, resumidamente pode-se dizer que para o MSA todos os fatores analisados são características do sistema de medição. Já para o VDA 5, sistema de medição é o que se refere ao equipamento/dispositivo de medição e processo de medição é tudo que envolve a medição em si: os métodos, os operadores, o ambiente, as peças, o equipamento, etc.

Para este trabalho, sistema de medição é tudo que envolve a medição: os procedimentos, os avaliadores, os instrumentos, o ambiente, as peças e etc. O que for restrito ao equipamento será tratado como característica do equipamento/dispositivo de medição.

Os manuais abrangem os mais diferentes tipos de medições, porém por questões de simplificação e sabendo que a maioria das medições é do tipo replicável, a comparação entre os manuais citados será voltada a esse tipo de medição e mais especificamente a medições

geométricas. Antes que se possa efetivamente comparar os métodos, as características e critérios de cada manual estão descritos a seguir.

2.1 Manual MSA

De acordo com a AIAG (2010), o seu método de análise dos sistemas de medição é diferente da análise de incerteza. Seu foco é a compreensão do processo de medição, quantificando o erro no processo e avaliando o quão adequado o sistema de medição é para controle do processo e do produto, é uma metodologia desenvolvida pela AIAG e estabelece parâmetros mínimos para os sistemas de medição, bem como passos a serem cumpridos na análise de certas características.

Antes de iniciar o estudo, algumas premissas são consideradas no MSA: os operadores estão treinados e familiarizados com o equipamento de medição, o equipamento é estável ao longo do tempo e não há influência do ambiente sobre o processo de medição. A princípio o MSA é uma ferramenta que confirma a capacidade do sistema de medição à sua aplicação, ele não tem como objetivo provar/testar a equipe de operadores nem o processo de fabricação, porque se considera que as premissas são verdadeiras. Caso não sejam, os resultados apontarão que áreas precisam de correção.

Os fatores e características estudados seguem listados.

2.1.1 Resolução do equipamento de medição

No manual, o termo utilizado é discriminação e ela “é a quantidade de mudança de um valor de referência que um instrumento pode detectar e indicar de maneira confiável”.

O ponto de partida para a determinação da resolução é a regra de que ela não deve ser maior que um décimo da amplitude a ser medida. Em termos práticos, a resolução não deve ser maior que 10% da tolerância do produto, considerando que o processo produtivo opera dentro da tolerância.

A recomendação final é de que o número de distintas categorias (ndc) seja cinco ou maior. Supondo uma amostra de vários exemplares do mesmo produto, se o sistema de medição consegue medir esses exemplares e separá-los em diferentes categorias, ou seja, detectar a variabilidade do processo, então significa que sua resolução é aceitável. Para o cálculo do ndc é usada a Equação 1:

$$ndc = 1,41 \cdot VP / R\&R = 1,41 \cdot \frac{\sqrt{VT^2 - R\&R^2}}{R\&R} \quad (1)$$

Na qual:

ndc é o número de distintas categorias;

VP é a variação das peças;

R&R é o desvio padrão do sistema de medição para repetitividade e reprodutibilidade;

VT é a variação total do sistema de medição.

O detalhamento sobre *VP*, *VT* e *R&R* está apresentado na seção 2.1.5 deste trabalho.

2.1.2 Estabilidade

De acordo com MSA (2010) estabilidade é “a variação total nas medições obtidas com um sistema de medição no mesmo padrão-mestre ou peças quando medindo uma característica única no decorrer de um período de tempo prolongado”.

A garantia de um sistema estável é a premissa para o restante das análises. Sendo o sistema estável, então é seguro considerar que a variação do sistema de medição é devida somente a causas comuns e as causas especiais podem ser descartadas.

A estabilidade é analisada somente graficamente, de acordo com o manual, utilizando as cartas de controle convencionais. Primeiramente é necessário obter uma amostra e estabelecer seus valores de referência contra um padrão rastreável. Se não houver um padrão, então deve ser escolhida uma peça da produção e que se encontre no meio da amplitude das medições. Ela é então denominada amostra-padrão para análise de estabilidade.

O próximo passo é medir periodicamente a amostra-padrão de três a cinco vezes, podendo ser diária ou semanalmente, ou como convier, mas mantendo a periodicidade. O tamanho da amostra e a frequência com que é medida devem estar de acordo com o conhecimento que se tem sobre o sistema de medição. Alguns fatores que podem ser incluídos são a frequência com que o sistema é calibrado ou reparado, a frequência de uso do sistema e o quão severas são as condições de uso do mesmo. As medições devem ser realizadas em momentos distintos a fim de representar as condições práticas e de uso real do sistema de medição. Assim, serão levados em consideração a fase de preparação, o ambiente e possíveis outros fatores que variem ao longo do dia.

Por fim, os dados coletados devem ser plotados em ordem cronológica numa carta de controle de média e amplitude ou de média e desvio padrão. Os limites de controle são então estabelecidos e a partir da análise convencional de cartas de controle é feita a avaliação de estabilidade, observando padrões de instabilidade ou condições fora de controle.

Os métodos para geração dos gráficos de controle e sua análise são de acordo com o Manual de Referência de Controle Estatístico de Processo, CEP, também da AIAG.

2.1.3 Tendência

É a diferença entre a média observada das medições numa característica numa mesma peça e o valor de referência dessa peça. A metodologia recomendada pelo manual é a execução do teste t de Student para verificar se a tendência é significativamente diferente de zero. No mínimo 10 medições devem ser realizadas pelo mesmo operador de maneira convencional com uma amostra da produção referenciada contra um padrão rastreável.

Caso não seja possível obter um padrão, usar outra peça da produção como referência, ela deve estar situada no meio das amplitudes das medições feitas na produção. Um mínimo de 10 medições desta peça de referência deve ser realizado em ambiente controlado com uma resolução melhor que a do equipamento em análise e a média dessas medições será admitida como o valor de referência da peça-padrão.

Os erros de cada medição são obtidos subtraindo de cada medida o valor de referência.

Com os valores medidos, calcular o erro de medição de cada medida conforme a Equação 2:

$$Td_i = x_i - ref \quad (2)$$

Na qual:

Td_i é erro de medição da i -ésima medição;

x_i é a i -ésima medida;

ref é o valor de referência do padrão/peça padrão.

Resultados gráficos, como histogramas, podem ser plotados para melhor visualização e análise da distribuição de frequências.

A partir dos erros de medição é calculada a tendência, \overline{Td} , e o desvio padrão da repetitividade, σ_r . A partir do desvio padrão, determinar se a repetitividade é aceitável pelo cálculo da Equação 3:

$$\%VE = 100 \cdot \sigma_r / VT \quad (3)$$

Em que:

$\%VE$ é a porcentagem de repetitividade;

σ_r é o desvio padrão da repetitividade;

VT é a variação total.

A análise sobre o VE é relativa à seção 2.1.5 deste trabalho, ele não deve ser grande para que assim sua contribuição no R&R não exceda os limites.

O σ_r serve como uma garantia da análise de tendência: se seu valor for muito alto e a tendência for próxima do valor de referência, a tendência passa no teste de Student, mas a repetitividade será um problema. Isso pode ser usado como uma maneira de acompanhar a repetitividade do processo ou para evitar manipulação de resultados.

A estatística t para teste de Student é obtida pela Equação 4:

$$t_{tendência} = \frac{\overline{Td} \cdot \sqrt{n}}{\sigma_r} \quad (4)$$

Na qual:

$t_{tendência}$ é a estatística t de Student calculada para a tendência;

\overline{Td} é a tendência do equipamento;

n é o número de medições realizadas para calcular a média;

σ_r é o desvio padrão dos erros de medição.

A tendência será aceitável se o valor de probabilidade p correspondente ao $t_{tendência}$ for maior que 0,05 (intervalo de confiança de 95% e n-1 graus de liberdade).

2.1.4 Linearidade:

Segundo o MSA (2010, pág 52, adaptado) “a variação da tendência ao longo do intervalo de operação esperado no equipamento é chamada de linearidade”.

Para a linearidade o procedimento é similar ao de tendência. No entanto, são necessárias no mínimo 5 peças cujas medidas compreendam toda a amplitude de operação do dispositivo de medição, a fim de verificar se a variação é constante em toda a faixa de operação do sistema. Cada peça deve ser medida num sistema com melhor resolução para obter seu valor de referência. Semelhantemente, cada peça deve ser medida por um mesmo operador no mínimo 10 vezes.

Com os valores medidos, calcula-se o erro de cada medição em relação ao valor de referência e então a tendência de cada peça. Com os dados preparados, é obtida a linha de melhor ajuste, a regressão linear, no formato da Equação 5:

$$\bar{y}_i = a \cdot x_i + b \quad (5)$$

Em que:

\bar{y}_i é a tendência da i-ésima peça;

a é o coeficiente angular;

x_i é o valor de referência da i-ésima peça;

b é o coeficiente linear.

Os coeficientes a e b podem ser obtidos através das Equações 6 e 7:

$$a = \frac{\sum xy - \left(\frac{1}{gm} \sum x \sum y\right)}{\sum x^2 - \frac{1}{gm} (\sum x)^2} \quad (6)$$

e

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (7)$$

Nas quais:

a é o coeficiente angular da regressão, inclinação;

b é o coeficiente linear da regressão, interseção da reta com o eixo vertical;

x são as medidas individuais das peças do estudo;

y são os erros de cada peça do estudo;

g é o número de peças;

m é o número de medições realizadas por peça;

\bar{y} é a média das tendências;

\bar{x} é a média de todas as medidas das peças.

O desvio padrão da variabilidade da repetitividade, s , é obtido através da Equação 8:

$$s = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - b \sum y_i - a \sum x_i y_i}{gm - 2}} \quad (8)$$

Em que:

s é o desvio padrão da variabilidade da repetitividade;

y_i é o valor da tendência da i -ésima peça;

x_i é o valor de referência da i -ésima peça;

g é o número de peças;

m é o número de medições por peça

b é o coeficiente linear da regressão;

a é o coeficiente angular da regressão;

Os limites de confiança para a regressão podem ser calculados a partir das Equações 9 e 10:

$$\text{Limite inferior: } b + ax_0 - \left[t_{gm-2, 1-\alpha/2} \left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{0,5} s \right] \quad (9)$$

$$\text{Limite superior: } b + ax_0 + \left[t_{gm-2, 1-\alpha/2} \left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{0,5} s \right] \quad (10)$$

Nas quais:

b é o coeficiente linear da regressão;

a é o coeficiente angular da regressão;

\bar{x} é a média de todas as medições das peças;

$t_{gm-2,1-\alpha/2}$ é o valor da estatística t para $gm - 2$ graus de liberdade e 95% de confiança (bilateral);

s é o desvio padrão da variabilidade da repetitividade;

x_0 é um valor dado de na faixa de operação, argumento para gerar os limites;

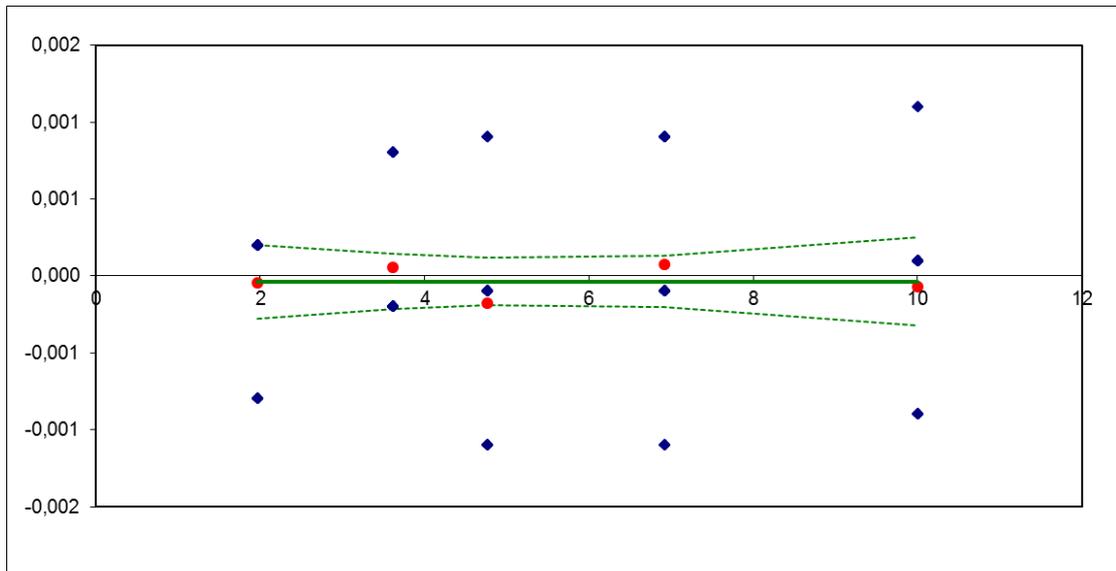
x_i é o valor de referência da i -ésima peça;

g é o número de peças;

m é o número de medições por peça.

Todos esses valores, as medidas individuais, as médias, a reta de regressão e os limites de confiança, são plotados em um gráfico. Para que a linearidade seja aceitável, a linha de “tendência = 0” deve estar completamente contida no intervalo de confiança calculado. A Figura 1 apresenta um exemplo de regressão e seus intervalos de confiança para um caso de linearidade e tendência significativamente iguais a zero:

Figura 1 – Exemplo de regressão linear.



Fonte: Autor (2017).

Se a análise gráfica concluir que a linearidade é aceitável, o teste de hipótese deve verificar se a não é significativamente diferente de zero, de acordo com a condição proposta pela Equação 11:

$$|t| = \frac{|a|}{\left[\frac{s}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \right]} \leq t_{gm-2, 1-\alpha/2} \quad (11)$$

Em que:

a é o coeficiente angular da regressão;

\bar{x} é a média de todas as medições das peças;

$t_{gm-2, 1-\alpha/2}$ é o valor da estatística t para $gm - 2$ graus de liberdade e 95% de confiança (bilateral);

s é o desvio padrão da variabilidade da repetitividade;

t é o valor do teste de hipótese a ser comparado com o intervalo de confiança;

x_i é o valor de referência da i -ésima peça;

g é o número de peças;

m é o número de medições por peça.

Se a hipótese de a significativamente igual a zero não for rejeitada, então a tendência é igual para toda a faixa de operação do sistema e o coeficiente b deverá ser testado de mesma maneira. A Equação 12 a seguir apresenta as condições:

$$|t| = \frac{|b|}{\left[\frac{1}{gm} + \frac{\bar{x}^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \right]} \leq t_{gm-2, 1-\alpha/2} \quad (12)$$

Em que:

b é o coeficiente linear da regressão;

\bar{x} é a média de todas as medições das peças;

$t_{gm-2, 1-\alpha/2}$ é o valor da estatística t para $gm - 2$ graus de liberdade e 95% de confiança (bilateral);

t é o valor do teste de hipótese a ser comparado com o intervalo de confiança;

x_i é o valor de referência da i -ésima peça;

g é o número de peças;

m é o número de medições por peça.

Se a hipótese de que b é significativamente nulo não for rejeitada, então a tendência é nula para toda a faixa de operação do sistema.

Se houver problema de linearidade, o sistema deve ser recalibrado para conseguir a tendência zero por meio de alterações no dispositivo, software ou ambos.

Se a tendência não puder ser ajustada a zero ao longo da faixa de operação do sistema de medição, ele pode ainda ser usado para controle de produto e/ou processo, porém não será analisado como um sistema que permaneça estável e deve ser aprovado pelo cliente.

2.1.5 Repetitividade e reprodutibilidade em peças

Segundo o MSA (2010, pág. 54 e 55), “repetitividade é a variação nas medições obtidas com um instrumento de medição, quando usado várias vezes por um avaliador, enquanto medindo uma característica idêntica de uma mesma peça” e “reprodutibilidade é tipicamente definida como a variação das médias das medições feitas por diferentes avaliadores, utilizando um mesmo instrumento de medição, enquanto medindo uma mesma característica de uma mesma peça”.

Os autores apresentam três métodos de análise para esses parâmetros: método da amplitude, método da média e amplitude e o método ANOVA. O método da amplitude não é um bom avaliador, o manual afirma que é apenas uma ferramenta de revisão que verifica se os valores de repetitividade e reprodutibilidade continuam dentro do que já foi avaliado.

O método da média e amplitude (\bar{x} & R) é muito prático, principalmente se comparado com a ANOVA. Ele apresenta uma boa estimativa dos valores de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição, mas não permite observar variações causadas por interações entre operador e peça. O número de repetições em cada peça e de avaliadores pode variar, mas a recomendação é que no mínimo 10 peças que representam a amplitude de variação do processo de fabricação sejam selecionadas para o estudo. A recomendação é de que a coleta seja feita aleatoriamente para garantir a independência estatística durante o estudo. Independente de como serão sorteadas as medições, muito cuidado deve ser tomado durante a coleta, evitando comunicação entre operadores, ou que operadores tenham acesso às medidas já realizadas, essa precaução pode eliminar possíveis induções ou tendências de medição.

Os exemplos apresentados pelo manual abordam em sua maioria três operadores e três medições por peça, e recomendam o uso de uma folha de coleta de dados, semelhante a da Tabela 1:

Tabela 1 – Modelo de folha de coleta de dados de repetitividade e reprodutibilidade.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Avaliador A:											
Medida 1											
Medida 2											
Medida 3											
Média											
Amplitude											
Avaliador B:											
Medida 1											
Medida 2											
Medida 3											
Média											
Amplitude											
Avaliador C:											
Medida 1											
Medida 2											
Medida 3											
Média											
Amplitude											

Fonte: Autor (2017).

Ao fim das medições, calcula-se a média e a amplitude para cada peça de cada operador. A média é simplesmente a média aritmética dos valores de medições repetidas e a amplitude é a diferença entre o maior e o menor valor de repetição.

Com as médias obtidas, então se calcula a média aritmética das médias de cada operador e a média aritmética das amplitudes de cada operador.

O desvio padrão da repetitividade, VE, pode ser estimado através da Equação 13:

$$\sigma_{VE} = \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad (13)$$

Em que:

σ_{VE} é o desvio padrão da repetitividade, VE;

\bar{R} é a média aritmética das amplitudes médias dos avaliadores;

d_2^* é um valor tabelado para estimativa.

O valor de d_2^* é proveniente da tabela de d_2 ao final do manual do MSA. Essa tabela segue ao final do trabalho como Anexo A.

O desvio padrão da reprodutibilidade só pode ser estimado após a estimativa do VE, pois a Equação 14 depende dele:

$$\sigma_{VA} = \sqrt{\left(\frac{\overline{x_{diff}}}{d_2^*}\right)^2 - \frac{(VE)^2}{n \cdot r}} \quad (14)$$

Na qual:

σ_{VA} é o desvio padrão da reprodutibilidade, VA;

$\overline{x_{diff}}$ é a diferença entre a maior e a menor média dos avaliadores;

d_2^* é um valor tabelado para estimativa;

VE é o desvio padrão da repetitividade;

n é o número de peças;

r é o número de medições repetidas por peça.

Os resultados gráficos são gráficos de controle da média, no qual são plotados os valores das médias de cada operador para cada peça, e de controle de amplitude, no qual são plotadas as amplitudes dos operadores para cada peça.

Os limites de controle para o gráfico das amplitudes são criados a partir de estimativas, obtidas através das seguintes Equações 15 e 16:

$$LIC_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (15)$$

e

$$LSC_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (16)$$

Nas quais:

\bar{R} é média aritmética das amplitudes médias dos operadores;

D_3 é o coeficiente de estimativa do limite inferior de controle da amplitude;

D_4 é o coeficiente de estimativa do limite superior de controle da amplitude;

LIC_R é o limite inferior de controle da amplitude;

LSC_R é o limite superior de controle da amplitude.

E para o gráfico das médias são usadas as Equações 17 e 18:

$$LIC_x = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{\bar{R}} \quad (17)$$

e

$$LSC_x = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{\bar{R}} \quad (18)$$

Nas quais:

$\bar{\bar{R}}$ é média aritmética das amplitudes médias dos operadores;

A_2 é o coeficiente de estimativa dos limites de controle da média;

$\bar{\bar{x}}$ é média aritmética de todas as médias dos operadores;

LIC_x é o limite inferior de controle da média;

LSC_x é o limite superior de controle da média.

Os valores de A_2 , D_3 e D_4 são tabelados e provenientes do Manual de Referência de Controle Estatístico do Processo, CEP. A Figura 2 apresenta os valores em função do número de repetições, na tabela é a coluna n .

Figura 2 – Tabela de coeficientes para estimativa.

n	A_2	d_2	D_3	D_4	A_3	c_4	B_3	B_4	\bar{A}_2
2	1,880	1,128	—	3,267	2,659	0,7979	—	3,267	1,880
3	1,023	1,693	—	2,574	1,954	0,8862	—	2,568	1,187
4	0,729	2,059	—	2,282	1,628	0,9213	—	2,266	0,796
5	0,577	2,326	—	2,114	1,427	0,9400	—	2,089	0,691
6	0,483	2,534	—	2,004	1,287	0,9515	0,030	1,970	0,548
7	0,419	2,704	0,076	1,924	1,182	0,9594	0,118	1,882	0,508
8	0,373	2,847	0,136	1,864	1,099	0,9650	0,185	1,815	0,433
9	0,337	2,970	0,184	1,816	1,032	0,9693	0,239	1,761	0,412
10	0,308	3,078	0,223	1,777	0,975	0,9727	0,284	1,716	0,362
11	0,285	3,173	0,256	1,744	0,927	0,9754	0,321	1,679	—
12	0,266	3,258	0,283	1,717	0,886	0,9776	0,354	1,646	—
13	0,249	3,336	0,307	1,693	0,850	0,9794	0,382	1,618	—
14	0,235	3,407	0,328	1,672	0,817	0,9810	0,406	1,594	—
15	0,223	3,472	0,347	1,653	0,789	0,9823	0,428	1,572	—

Fonte: CEP 2ª ed. (2005).

Exemplos desses gráficos com valores práticos de medição podem ser observados no estudo de caso.

Cada gráfico tem uma análise própria. Para o gráfico de amplitudes, como usualmente se espera de um gráfico de controle, todos os valores devem estar dentro dos limites. Havendo pontos fora, a causa deve ser investigada e/ou analisada.

Já para o gráfico de médias a análise é inversa, o esperado para bom comportamento da média é que mais da metade dos pontos fiquem fora dos limites de controle. Basicamente, quanto maior o intervalo entre os limites, menos sensível o equipamento é à variação e a incerteza é maior. Por exemplo, se dois valores, medidos em peças de dimensões distintas, estão dentro dos limites isso significa que, estatisticamente, para o equipamento elas podem não ter diferença entre si. Isso é um problema, porque se uma das peças é aceitável e a outra não, é possível que ambas sejam aprovadas pelo sistema de medição, ou ambas sejam descartadas, dependendo do valor medido.

É necessário que o dispositivo seja sensível o suficiente para detectar diferenças em medições de diferentes peças e que repita bem as medições feitas na mesma peça.

O cálculo do desvio padrão de repetitividade e reprodutibilidade, R&R, é feito de acordo com a Equação 19:

$$R\&R = \sqrt{VE^2 + VA^2} \quad (19)$$

Em que:

R&R é o desvio padrão de repetitividade e reprodutibilidade;

VE é o desvio padrão da repetitividade;

VA é o desvio padrão da reprodutibilidade.

Esses valores de *VE*, *VA* e *R&R* devem ser comparados com a variação total. Existem quatro possibilidades a serem consideradas para a variação total: Usar a variação do processo de fabricação como variação total (recomendado), usar a variação de outro processo similar (caso o processo em questão não tenha amostras suficientes), usar o valor objetivo de P_p ou P_{pk} (índice de variação e índice combinado de variação, respectivamente. São índices de performance de processo advindos do CEP, 2005), ou usar a tolerância da especificação.

A decisão mais correta é usar a variação do processo, se ele estiver operando dentro da tolerância. Caso o processo esteja com variação maior que a tolerância, esta deverá ser

considerada a variação total, porque é o valor mais conservador e que realmente deve ser cumprido.

Em termos de valor, a variação total neste trabalho será de acordo com a tolerância de especificação, segundo a Equação 20, para um intervalo de confiança de 99,73%:

$$VT = \frac{LSE - LIE}{6} \quad (20)$$

Nas quais:

VT é a variação total considerada;

LSE é o limite superior de especificação;

LIE é o limite inferior de especificação;

A porcentagem de contribuição de VE , VA e $R\&R$ são obtidas da razão de cada um deles com a variação total, conforme as Equações 21, 22 e 23:

$$\%VE = 100 \cdot 6 \cdot VE / VT \quad (21)$$

$$\%VA = 100 \cdot 6 \cdot VA / VT \quad (22)$$

$$\%R\&R = 100 \cdot 6 \cdot R\&R / VT \quad (23)$$

Nas quais:

$\%VE$ é a contribuição percentual de repetitividade na variação total;

$\%VA$ é a contribuição percentual de reprodutibilidade na variação total;

$\%R\&R$ é a contribuição percentual de repetitividade e reprodutibilidade na variação total;

VE é o desvio padrão de repetitividade;

VA é o desvio padrão de reprodutibilidade;

$R\&R$ é o desvio padrão de repetitividade e reprodutibilidade;

VT é a variação total.

Os critérios de aceitação são de que:

- $\%R\&R$ maior que 30% é inaceitável e o sistema de medição deve ser melhorado;

- %R&R abaixo de 10% é aceitável e recomendável, principalmente para controle apertado de processo;
- %R&R entre 10% e 30% pode ser aceito, dependendo da situação, de custos de equipamento, dificuldade de medição. O sistema de medição deve ser aprovado pelo cliente.

A análise de variância (ANOVA) é complexa e detalhada, por isso requer as mesmas medidas tomadas na coleta para o método de média e amplitude.

Quanto à condução do estudo, novamente um mínimo de 10 peças deve ser selecionado atendendo a amplitude do processo. Os dados coletados são organizados numa folha de coleta semelhante à de média e amplitude.

Já a análise numérica, devido à sua complexidade e ao seu grande número de somas e produtos, é mais bem executada com auxílio computacional. O estudo de ANOVA examina a influência de cada fator envolvido, verificando se há diferença entre as médias e avaliando diferenças dentro e entre amostras. No caso dos sistemas de medição, as fontes de variação são os operadores/avaliadores, as peças, a combinação operador/peça e o próprio equipamento de medição.

Os dados são analisados primeiramente através de somatórios gerando as SQ 's, somas dos quadrados. Elas são divididas pelos seus respectivos graus de liberdade, GL , e o resultado são os quadrados médios, QM . A partir dos quadrados médios são estimadas as variâncias dos fatores. Os desvios padrão são obtidos pela raiz quadrada das estimativas de variância. As Equações a seguir apresentam o procedimento de cálculo dessas variáveis:

$$SQ_P = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{i..}^2}{kr} \right) - \frac{x_{...}^2}{nkr} \quad (24)$$

$$SQ_A = \sum_{j=1}^k \left(\frac{x_{.j.}^2}{nr} \right) - \frac{x_{...}^2}{nkr} \quad (25)$$

$$SQT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r (x_{ijm}^2) - \frac{x_{...}^2}{nkr} \quad (26)$$

$$SQ_{AP} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left(\frac{x_{ij.}^2}{r} \right) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{i..}^2}{kr} \right) - \sum_{j=1}^k \left(\frac{x_{.j.}^2}{nr} \right) + \frac{x_{...}^2}{nkr} \quad (27)$$

$$SQ_E = SQM - [SQ_A + SQ_P + SQ_{AP}] \quad (28)$$

$$QM_A = \frac{SQ_A}{(k-1)} \quad (29)$$

$$QM_P = \frac{SQ_P}{(n-1)} \quad (30)$$

$$QM_{AP} = \frac{SQ_{AP}}{(n-1)(k-1)} \quad (31)$$

$$QM_E = \frac{SQ_E}{nk(r-1)} \quad (32)$$

$$VE = \sqrt{QM_E} \quad (33)$$

$$VA = \sqrt{\frac{QM_A - QM_{AP}}{nr}} \quad (34)$$

$$I_{AP} = \sqrt{\frac{QM_{AP} - QM_E}{r}} \quad (35)$$

$$R\&R = \sqrt{VE^2 + VA^2 + I_{AP}^2} \quad (36)$$

$$VP = \sqrt{\frac{QM_P - QM_{AP}}{kr}} \quad (37)$$

$$F = \frac{QM_{AP}}{QM_E} \quad (38)$$

$$QM_{comp} = \frac{SQ_E + SQ_{AP}}{(nkr - k - r + 1)} \quad (39)$$

$$VE = \sqrt{QM_{comp}} \quad (40)$$

$$VA = \sqrt{\frac{QM_A - QM_{comp}}{nr}} \quad (41)$$

$$R\&R = \sqrt{VE^2 + VA^2} \quad (42)$$

$$VP = \sqrt{\frac{QM_P - QM_{comp}}{kr}} \quad (43)$$

As variáveis apresentadas nas Equações 24 a 43 significam:

SQ_P é a soma dos quadrados das peças;

SQ_A é a soma dos quadrados dos avaliadores;

SQT é a soma dos quadrados total;

SQ_{AP} é a soma dos quadrados de interação avaliador/peça;

SQ_E é a soma dos quadrados do erro do dispositivo de medição;

n é o número de peças;

k é o número de avaliadores;

r é o número de repetições;

$x_{...}$ é a soma de todos os valores de medições;

$x_{i..}$ é a soma de todas as medições de uma peça i ;

$x_{.j.}$ é a soma de todas as medições de um operador j ;

x_{ijm} é uma repetição m de um operador j numa peça i ;

$x_{ij.}$ é a soma de todas as repetições de um operador j numa peça i ;

QM_A é o quadrado médio dos avaliadores;

QM_P é o quadrado médio das peças;

QM_{AP} é o quadrado médio da interação avaliador/peça;

QM_E é o quadrado médio do erro do dispositivo de medição;

F é o valor da estatística F para o teste de Fisher;

QM_{comp} é o quadrado médio composto;

VE é o desvio padrão de repetitividade do sistema de medição;

VA é o desvio padrão de reprodutibilidade dos operadores;

I_{AP} é o desvio padrão de interação avaliador/peça;

$R\&R$ é o desvio padrão de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição;

VP é o desvio padrão de variação peça a peça.

Os graus de liberdade associados a cada fonte são descritos como:

- Avaliador: $k - 1$ graus de liberdade;
- Peças: $n - 1$ graus de liberdade;
- Avaliador por peça: $(n - 1)(k - 1)$ graus de liberdade;
- Equipamento: $nk(r - 1)$ graus de liberdade;
- Total: $nkr - 1$ graus de liberdade;

O valor F representa a estatística calculada para o teste de Fisher para interação. Se o valor de probabilidade calculado em função do F obtido for menor que 0,05, então existe interação entre avaliador e peça. Caso a probabilidade seja maior que 0,05, então não há interação e algumas equações mudam em função de valores compostos.

O quadrado médio composto (QM_{comp}) é na realidade a consideração de que a incerteza de interação deve ser atribuída ao equipamento de medição quando não existe interação. Isso ocorre também com os graus de liberdade das respectivas fontes de variação.

A Tabela 2 mostra o que realmente é a análise de variância, onde são relacionados as fontes de variabilidade, as somas dos quadrados, os quadrados médios, os graus de liberdade e os valores da estatística F para teste de Fisher.

Tabela 2 – Tabela de ANOVA.

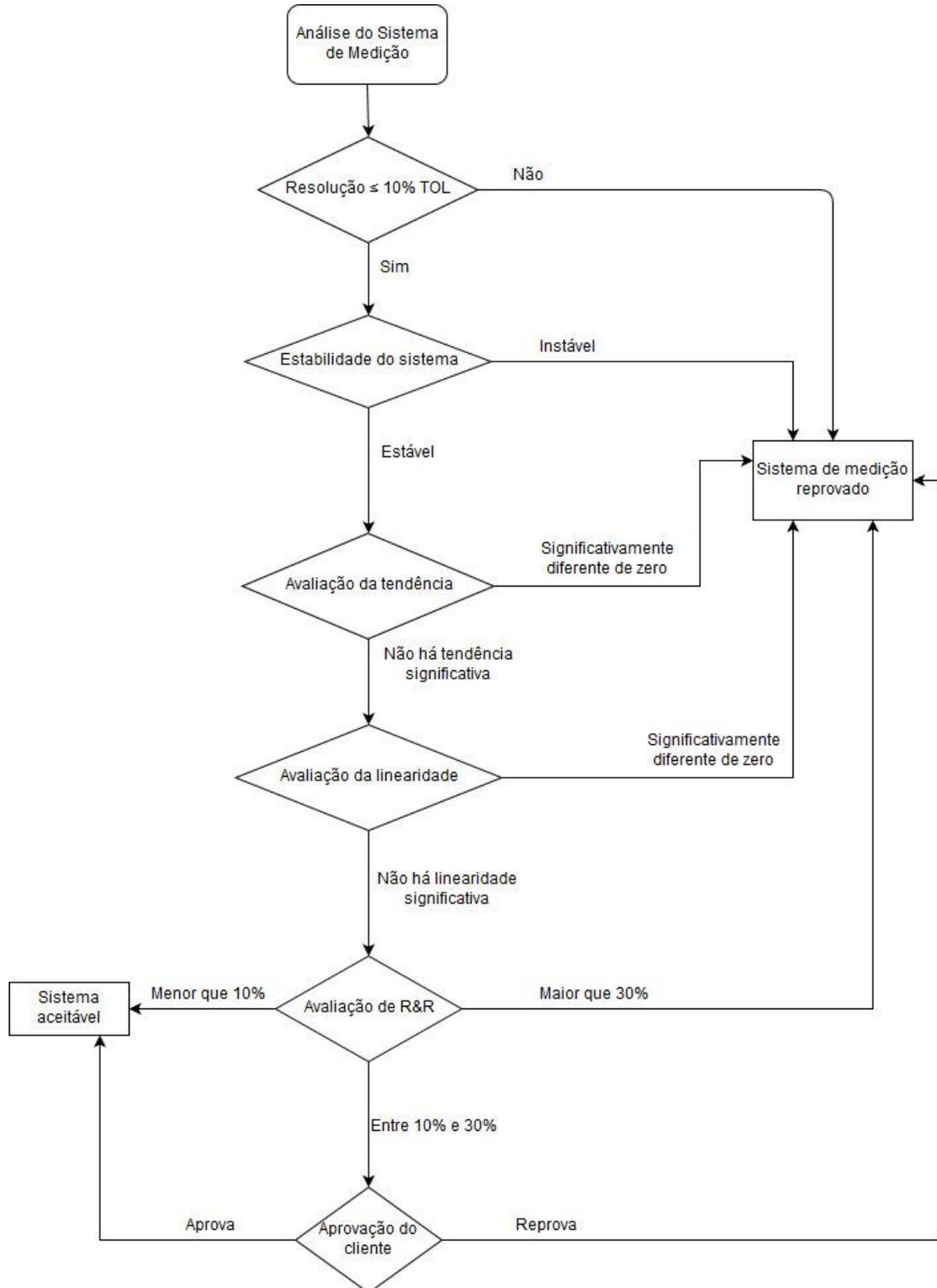
Fonte	GL	SQ	QM	F
Avaliador	$k - 1$	SQ_A	$QM_A = \frac{SQ_A}{(k - 1)}$	
Peças	$n - 1$	SQ_P	$QM_P = \frac{SQ_P}{(n - 1)}$	
Avaliador por peça	$(n - 1)(k - 1)$	SQ_{AP}	$QM_{AP} = \frac{SQ_{AP}}{(n - 1)(k - 1)}$	$F = \frac{QM_{AP}}{QM_E}$
Equipamento	$nk(r - 1)$	SQ_E	$QM_E = \frac{SQ_E}{nk(r - 1)}$	
Total	$nkr - 1$	SQT		

Fonte: Autor (2017).

Os valores de R&R e seus componentes são calculados de acordo com as Equações 33 a 43. A avaliação da porcentagem e os critérios de aprovação são os mesmos apresentados anteriormente.

Uma forma simplificada de observar as etapas de avaliação do sistema de medição é um fluxograma como o apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma para metodologia MSA.



Fonte: Autor (2017).

O fluxograma demonstra de maneira simplificada como cada etapa da análise pode rejeitar o sistema de medição. A aceitação só é possível no cumprimento de todos os critérios. Havendo reprovação em um critério apenas, não é necessário continuar o estudo, porque o sistema já é rejeitado.

2.2 Manual VDA 5

O principal foco desenvolvido pelos autores é estabelecer a capacidade do processo de medição através das incertezas de medição. Detalhe é que já na sua abordagem inicial, os autores afirmam que a incerteza não é um critério negativo, nem deficiência. Por isso não deve ser chamada de “erro de medição”, afinal ela aponta a qualidade verdadeira de uma medição, ou pode-se dizer que indica a segurança atribuída ao valor medido.

O manual é compatível com a norma ISO/DIS 22514-7 2011, a qual trata de especificamente de Capacidade de Processos de Medição. Partindo das incertezas menores, relativas às características que compõem o processo de medição, é possível obter a incerteza padrão combinada do processo.

Como explicado anteriormente, o VDA 5 faz distinção entre sistema de medição e processo de medição, considerando sistema apenas o que é referente ao equipamento de medição e processo tudo que envolve a medição, ambiente, método, operadores, etc.

Primeiro o sistema é avaliado. Os dois critérios de reprovação são a resolução e a capacidade do sistema de medição, avaliados um após o outro na respectiva ordem. Se for reprovado, o sistema deve ser substituído ou corrigido, dependendo do caso. Tendo sido aprovado o sistema de medição, então é avaliada a capacidade do processo de medição. Cada uma das capacidades é calculada em função das incertezas atribuídas ao sistema e ao processo de medição.

Cada fonte de incerteza e método para obtenção das mesmas são apresentados a seguir.

2.2.1 Resolução, u_{RE}

A resolução não deve ser maior que 5% da especificação da peça (para os autores, especificação tem o mesmo significado que tolerância), caso contrário, o sistema de medição deve ser trocado por outro com resolução adequada.

O cálculo da incerteza padrão da resolução é através da Equação 44:

$$u_{RE} = \frac{RE}{2\sqrt{3}} \quad (44)$$

Na qual:

u_{RE} é a incerteza padrão associada à resolução do sistema de medição;

RE é a resolução do sistema de medição.

2.2.2 Estabilidade

A análise de estabilidade é voltada ao monitoramento contínuo da capacidade do sistema de medição e é idêntica à recomendada pelo MSA. Usar um padrão de referência adequado ou uma peça calibrada com o valor conhecido. A frequência de medição não é estipulada, é recomendada num exemplo de que seja diária ou no início/fim do turno, ou antes de cada medição. Plotar os valores numa carta de controle juntamente com os limites de controle usando as técnicas já citadas na seção 2.1.2 do MSA. E finalmente fazer a análise se há ou não sinal de fora de controle. Caso haja sinal de fora de controle, considera-se que o sistema de medição mudou, deve ser revisado e a incerteza expandida deve ser corrigida.

As incertezas atribuídas à estabilidade são de acordo com os estudos de repetitividade da seção 2.2.4 e de tendência da seção 2.2.5, porém usando os valores medidos periodicamente. A incerteza padrão pela da estabilidade deve ser comparada com a calculada no estudo de tendência e a maior delas deve ser usada no cálculo da incerteza expandida. O mesmo se aplica à repetitividade da estabilidade, deve ser comparada com a obtida no estudo de repetitividade num padrão e o maior valor será considerado como incerteza padrão de repetitividade para obtenção da incerteza expandida.

2.2.3 Incerteza de um padrão de referência ou Incerteza de calibração, u_{CAL}

É obtida diretamente do certificado de calibração de padrões de referência. Caso a incerteza seja relatada no certificado como uma incerteza expandida, então basta dividir esse valor pelo fator de abrangência utilizado. Os fatores de abrangência são estabelecidos em função do intervalo de confiança e podem ser obtidos no próprio certificado de calibração, porém o manual afirma que é usual o fator de abrangência $k_{CAL} = 2$, valor para intervalo de confiança de aproximadamente 95%. Portanto, o cálculo para a incerteza padrão de calibração pode ser descrito conforme a Equação 45:

$$u_{CAL} = U_{CAL}/k_{CAL} \quad (45)$$

Na qual:

u_{CAL} é a incerteza padrão de calibração;

U_{CAL} é a incerteza de calibração expandida;

k_{CAL} é o fator de abrangência de calibração, usualmente igual a 2.

2.2.4 Repetitividade do padrão de referência, u_{EVR}

Para a obtenção dessa incerteza é recomendado um estudo Tipo 1. A incerteza do padrão de referência vem do desvio padrão da repetitividade estimada através de no mínimo 25 medições repetidas no padrão. Isso para um padrão, mas caso escolha-se fazer com dois padrões (um próximo do limite superior de especificação e outro próximo do limite inferior de especificação, $\pm 10\%$ em torno desses limites) então devem ser realizadas no mínimo 15 medições repetidas em cada padrão, calcular o desvio padrão de cada um e o maior dos dois valores será o componente de incerteza. Ainda para o caso de três padrões (um próximo do centro da especificação, um próximo do limite superior e outro do limite inferior de especificação, todos numa faixa de $\pm 10\%$ em torno dos limites citados), deve-se realizar no mínimo 10 medições repetidas em cada padrão e obter seus respectivos desvios padrão. O maior dentre os três valores será admitido como componente de incerteza. O manual apresenta a Equação 46 para o cálculo da incerteza:

$$u_{EVR} = s_g = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (y_i - \bar{x}_g)^2} \quad (46)$$

Na qual:

u_{EVR} é a incerteza padrão pela repetitividade no padrão de referência;

s_g é o desvio padrão da repetitividade;

K é o número de medições repetidas (valor mínimo depende do número de padrões);

y_i é o valor da i -ésima medição de um padrão;

\bar{x}_g é a média aritmética de todos os valores da amostra de um padrão.

Apenas uma observação dos autores, se ocorrer de $u_{EVR} < u_{RE}$, então a incerteza padrão pela resolução u_{RE} deve ser usada como incerteza padrão pela repetitividade. Esse fato

se dá quando todas as medições são iguais ($u_{EVR} = 0$) ou quando apenas uma é diferente, gerando uma variação pequena.

2.2.5 Tendência, u_{BI}

O manual não estabelece limites para a tendência, afinal o equipamento de medição será avaliado em função de todas as incertezas atribuídas a ele. São usadas as mesmas medições da análise de repetitividade num padrão de referência. O cálculo para obtenção da incerteza padrão devido à tendência é através da Equação 47 a seguir:

$$u_{BI} = \frac{|\bar{x}_g - x_m|}{\sqrt{3}} \quad (47)$$

Na qual:

u_{BI} é a incerteza padrão pela tendência;

\bar{x}_g é a média aritmética de todos os valores da amostra;

x_m é o valor da grandeza de referência do padrão de medição.

2.2.6 Linearidade, u_{LIN}

Em certos casos, a incerteza pela linearidade é determinada através dos dados do fabricante do equipamento ou através do certificado de calibração. A incerteza padrão pela linearidade é calculada pela Equação 48:

$$u_{LIN} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (48)$$

Na qual:

u_{LIN} é a incerteza padrão pela linearidade;

a é um valor especificado pelo fabricante.

Se for necessário determinar a linearidade do equipamento de medição, uma análise de regressão deve ser feita para determinar a função de regressão. Para o estudo devem ser usados no mínimo três padrões de referência uniformemente espalhados ao longo da zona de especificação, com a margem de $\pm 10\%$ em torno dos valores médio, superior e inferior de

especificação. As equações dos coeficientes da função de regressão são as mesmas da seção 2.1.4 do MSA.

Os resíduos da regressão linear são aplicados à ANOVA de modelo II (somente componentes aleatórios da incerteza). As Equações 49 a 61 são referentes a esse estudo:

$$y_{n\cdot} = \sum_k y_{nk} \quad (49)$$

$$\bar{y}_{n\cdot} = \frac{y_{n\cdot}}{k} \quad (50)$$

$$SQ_{Res} = \sum_n \sum_k (y_{n\cdot} - \hat{y}_n)^2 \quad (51)$$

$$SQ_{LIN} = \sum_n \sum_k (\bar{y}_{n\cdot} - \hat{y}_n)^2 \quad (52)$$

$$SQ_{EVR} = \sum_n \sum_k (y_{nk} - \bar{y}_{n\cdot})^2 \quad (53)$$

$$SQ_{Res} = SQ_{LIN} + SQ_{EVR} \quad (54)$$

$$QM_{Res} = \frac{SQ_{Res}}{(nk-2)} \quad (55)$$

$$QM_{LIN} = \frac{SQ_{LIN}}{(n-2)} \quad (56)$$

$$QM_{EVR} = \frac{SQ_{EVR}}{n(k-1)} \quad (57)$$

$$F = \frac{QM_{LIN}}{QM_{EVR}} \quad (58)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{QM_{Res}} \quad (59)$$

$$\hat{\sigma}_{LIN} = \sqrt{QM_{LIN}} \quad (60)$$

$$\hat{\sigma}_{EVR} = \sqrt{QM_{EVR}} \quad (61)$$

As variáveis apresentadas nas Equações 49 a 61 significam:

SQ_{Res} é a soma dos quadrados do resíduo;

SQ_{LIN} é a soma dos quadrados da linearidade;

SQ_{EVR} é a soma dos quadrados do erro puro, repetitividade;

n é o número de peças;

k é o número de repetições;

y_{nk} é o valor da k -ésima repetição na n -ésima peça;

y_n é a soma dos valores das repetições da n -ésima peça;

\bar{y}_n é o valor médio das repetições na n -ésima peça;

\hat{y}_n é o valor ajustado da n -ésima peça;

QM_{Res} é o quadrado médio residual;

QM_{LIN} é o quadrado médio da linearidade;

QM_{EVR} é o quadrado médio do erro puro;

$\hat{\sigma}$ é o desvio padrão residual;

$\hat{\sigma}_{LIN}$ é o desvio padrão da linearidade, ou falta de ajuste;

$\hat{\sigma}_{EVR}$ é o desvio padrão da repetitividade, ou erro puro;

F é o valor da estatística F para o teste de Fisher.

Os graus de liberdade associados às fontes de variação são:

- Resíduo: $nk - 2$ graus de liberdade;
- Linearidade: $n - 2$ graus de liberdade;
- Erro puro: $n(k - 1)$ graus de liberdade;

O teste de Fisher é aplicado e se o valor de probabilidade calculado em função do F obtido for menor que 0,05, então a linearidade é significativa. Se não for significativa, a soma dos quadrados da linearidade é atribuída ao erro puro, bem como seus graus de liberdade. A incerteza padrão pela linearidade é considerada nula, mas a repetitividade encontrada é utilizada no cálculo da incerteza padrão combinada.

A incerteza padrão pela linearidade é igual ao valor do desvio padrão da linearidade ($u_{LIN} = \hat{\sigma}_{LIN}$) e a incerteza padrão da repetitividade é igual ao desvio padrão de erro puro ($u_{EVR} = \hat{\sigma}_{EVR}$).

Caso esse estudo de linearidade seja feito, ele é aplicado ao sistema corrigido para linearidade e o estudo de repetitividade num padrão deve ser comparado com o erro puro da linearidade, o maior dos dois valores será utilizado no cálculo da incerteza padrão combinada do equipamento de medição.

2.2.7 Incerteza combinada e capacidade do equipamento de medição, u_{MS} e Q_{MS}

A partir das informações e metodologias relacionadas anteriormente, é possível calcular o quociente de capacidade do equipamento de medição. A Equação 62 descreve as incertezas padrão de medição combinadas:

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max(u_{EVR}^2, u_{RE}^2) + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{MS_REST}^2} \quad (62)$$

Na qual:

u_{MS} é a incerteza padrão combinada do equipamento de medição;

u_{CAL} é a incerteza padrão de calibração;

u_{EVR} é a incerteza padrão de repetitividade em padrões;

u_{RE} é a incerteza padrão da resolução;

u_{BI} é a incerteza padrão pela tendência;

u_{LIN} é a incerteza padrão pela linearidade ou falta-de-ajuste;

u_{MS_REST} é a incerteza de outros componentes de influência do equipamento de medição.

A incerteza u_{MS_REST} é situacional, se houver outras incertezas relacionadas com o sistema de medição não citadas anteriormente, elas podem ser incluídas como uma parcela a mais no cálculo da incerteza combinada.

Existe ainda outra possibilidade, se o erro máximo permissível do equipamento de medição for conhecido, rastreável e documentado, ele pode ser usado para calcular a incerteza padrão combinada do equipamento de medição através da Equação 63:

$$u_{MS} = \sqrt{\frac{EMP^2}{3}} \quad (63)$$

Na qual:

u_{MS} é a incerteza padrão combinada no equipamento de medição;

EMP é o erro máximo permissível do equipamento de medição.

Caso mais de um valor de EMP tenha efeito sobre a incerteza combinada, então o cálculo pode ser feito através da Equação 64:

$$u_{MS} = \sqrt{\frac{EMP_1^2}{3} + \dots + \frac{EMP_i^2}{3}} \quad (64)$$

Na qual:

u_{MS} é a incerteza padrão combinada no sistema de medição;

EMP_1 é o primeiro erro máximo permissível considerado;

EMP_i é o i-ésimo erro máximo permissível considerado.

A partir da incerteza combinada é possível calcular a incerteza expandida de medição do sistema de medição e a partir desta o quociente de capacidade do sistema de medição. Para obter a incerteza expandida basta multiplicar a incerteza combinada pelo fator de abrangência, que usualmente é considerado 2 (intervalo de confiança de 95%). A Equação 65 é a seguinte:

$$U_{MS} = k \cdot u_{MS} \quad (65)$$

Na qual:

U_{MS} é a incerteza de medição expandida do sistema de medição;

k é o fator de abrangência;

u_{MS} é a incerteza padrão combinada no sistema de medição.

O quociente de capacidade do sistema de medição é retratado como porcentagem. Ele leva em consideração a incerteza expandida do sistema de medição e a tolerância, de acordo com a Equação 66 a seguir:

$$Q_{MS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{TOL} \cdot 100\% \quad (66)$$

Em que:

Q_{MS} é o quociente de capacidade de medição do sistema de medição;

U_{MS} é a incerteza de medição expandida do sistema de medição;

TOL é a tolerância.

Outra informação interessante que pode ser calculada é o intervalo de tolerância (chamado pelo manual apenas de tolerância) mínimo requerido para que o sistema seja considerado capaz. Basicamente a equação anterior é rearranjada para que a tolerância fique em função da incerteza expandida de medição e do quociente máximo de capacidade do sistema. Dependendo do resultado, é uma maneira numérica de ver o quão inadequado o equipamento é para a aplicação ou do quão grande é a liberdade que o equipamento tem para trabalhar dentro da tolerância. A Equação 67 é apresentada em sequência:

$$TOL_{MIN_UMS} = \frac{2 \cdot U_{MS}}{Q_{MS_max}} \cdot 100\% \quad (67)$$

Em que:

TOL_{MIN_UMS} é o intervalo de tolerância mínimo para que o sistema seja capaz;

U_{MS} é a incerteza de medição expandida do sistema de medição;

Q_{MS_max} é o quociente máximo de capacidade de medição do sistema de medição [%].

O quociente máximo de capacidade do sistema de medição, Q_{MS_max} , estabelecido pela VDA é de 15% e para que o sistema de medição seja considerado capaz o quociente de capacidade calculado, Q_{MS} , deve ser menor que esse valor. De maneira sucinta, se $Q_{MS} < Q_{MS_max} = 15\%$, então o sistema de medição é capaz.

Tendo sido aprovado o sistema de medição, o processo deverá ser avaliado, considerando as variações do procedimento de medição, dos operadores, do ambiente, entre outros fatores.

Das incertezas relacionadas ao processo, as seguintes componentes são obtidas através de experimentos: repetitividade em peças de teste, reprodutibilidade dos operadores, reprodutibilidade dos sistemas de medição (em caso de haver dois ou mais sistemas semelhantes), reprodutibilidade ao longo do tempo (estabilidade) e incerteza por interações. Para todos os estudos é necessário que o tamanho amostral seja de no mínimo 30 medições, no mínimo duas medições repetidas em no mínimo três peças de teste, realizadas por no mínimo dois operadores (no caso das interações e da reprodutibilidade) e em no mínimo dois sistemas de medição separados (se na prática forem usados mais de um).

Com exceção a múltiplos sistemas de medição, a mesma amostra pode ser utilizada em todos os estudos acima. Um estudo de ANOVA deve ser aplicado para obter as variâncias, da mesma forma descrita pelo MSA, inclusive usando as mesmas equações da seção 2.1.5.

Alguns detalhes respectivos de cada incerteza serão apresentados a seguir.

2.2.8 Incerteza por interações, u_{IA}

É calculada somente quando há mais de um operador, afinal é a incerteza associada à interação de operadores e peças. Quando há somente um operador, a incerteza do mesmo se resume à sua repetitividade. É o desvio padrão I_{AP} da ANOVA do MSA.

2.2.9 Reprodutibilidade dos sistemas de medição, u_{GV}

Somente necessária quando há mais de um sistema de medição no processo de medição, porque avalia a capacidade de sistemas diferentes obterem as mesmas medições.

2.2.10 Repetitividade em peças de teste, u_{EVO}

É obtida pela ANOVA e é similar à repetitividade VE obtida do MSA, porém ao invés de usá-la para calcular o R&R, ela será uma parcela da incerteza combinada do processo de medição. É a variação atribuída ao próprio equipamento de teste.

Quando houver um operador apenas e ele não afetar o resultado ou o sistema for automatizado, devem ser feitas duas medidas repetidas em pelo menos 25 peças e calcular o desvio padrão combinado, a partir dos desvios padrão obtidos em cada peça.

2.2.11 Reprodutibilidade dos operadores, u_{AV}

É obtida no estudo de ANOVA e é equivalente à reprodutibilidade VA obtida do MSA. Avalia a capacidade entre operadores de obterem medições semelhantes entre si.

2.2.12 Incerteza por não-homogeneidade da peça, u_{OBJ}

Essa incerteza está associada ao desvio de forma causado pelas imperfeições do processo de fabricação. Peças submetidas a essa condição têm, na maioria dos casos, especificações quanto ao máximo desvio de forma. Estas podem ser obtidas em desenhos, folhas de dados de materiais, tabelas ou até em gráficos de controle. A Equação 68 relaciona o máximo desvio de forma e a incerteza por não-homogeneidade é a seguinte:

$$u_{OBJ} = \frac{a_{OBJ}}{\sqrt{3}} \quad (68)$$

Na qual:

u_{OBJ} é a incerteza devida à não-homogeneidade da peça;

a_{OBJ} é o máximo desvio de forma

2.2.13 Incerteza causada por temperatura, u_T

A temperatura influencia diretamente sobre a dimensão dos materiais, causando contrações ou dilatações e que geram incerteza de medição por causa das novas dimensões da peça. Logo, a aplicação dessa incerteza é para sistemas de medição dimensionais, que medem apenas grandezas geométricas.

Todas as análises são feitas considerando a diferença de temperatura em relação ao padrão de 20°C. O ideal é que o ambiente de trabalho seja climatizado a 20°C e que a temperatura seja monitorada constantemente a fim de observar pequenas variações. Esse passo senão reduz, potencialmente elimina a incerteza pela temperatura.

Antes de determinar a incerteza deve-se aquecer a peça e realizar medições enquanto ela esfria. Com os valores dessas medições é possível calcular o coeficiente de dilatação térmica linear da peça.

A incerteza causada pela temperatura é composta por duas outras incertezas, uma associada ao coeficiente de dilatação térmica e outra associada à diferença de temperaturas.

A incerteza devida à diferença de temperaturas entre o instrumento e as peças pode ser calculada a partir da Equação 69 a seguir:

$$u_{TD} = \frac{\Delta T \cdot \alpha \cdot l}{\sqrt{3}} \quad (69)$$

Na qual:

u_{TD} é a incerteza por diferença de temperatura;

ΔT é a diferença de temperatura entre o instrumento de medição e a peça;

α é o coeficiente de dilatação térmica linear da peça;

l é o valor observado da medida do comprimento.

Para a incerteza causada pelos coeficientes de dilatação, é usada a Equação 70 abaixo:

$$u_{TA} = \frac{|T-20^{\circ}\text{C}| \cdot u_{\alpha} \cdot l}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{6}} \quad (70)$$

Em que:

u_{TA} é a incerteza devida aos coeficientes de dilatação;

T é a temperatura média durante a medição, ou máxima diferença aceitável em relação a 20°C;

u_{α} é a incerteza no coeficiente de dilatação térmica;

l é o valor observado da medida do comprimento.

2.2.14 Incerteza combinada e capacidade do processo de medição, u_{MP} e Q_{MP}

Então, a partir dessas novas informações e das incertezas atribuídas ao processo, pode-se calcular o quociente de capacidade do processo. A incerteza de medição combinada do processo, importante para a obtenção desse quociente, pode ser calculada através da Equação 71 a seguir:

$$u_{MP} = \sqrt{u_{CAL}^2 + \max\{u_{EVR}^2, u_{EVO}^2, u_{RE}^2\} + u_{BI}^2 + u_{LIN}^2 + u_{AV}^2 + u_{GV}^2 + u_{OBJ}^2 + u_T^2 + u_{REST}^2 + u_{IA}^2} \quad (71)$$

Na qual:

u_{MP} é a incerteza padrão combinada do processo de medição;

u_{CAL} é a incerteza padrão de calibração;

u_{EVR} é a repetitividade em padrões;

u_{EVO} é a repetitividade na peça de teste;

u_{RE} é a incerteza padrão associada à resolução;

u_{BI} é a incerteza padrão pela tendência;

u_{LIN} é a incerteza padrão pela linearidade ou falta-de-ajuste;

u_{AV} é a reprodutibilidade dos operadores;

u_{GV} é a reprodutibilidade dos equipamentos de medição, em caso de mais de um;

u_{OBJ} é a incerteza padrão por não homogeneidade de peça de teste;

u_T é a incerteza padrão pela temperatura;

u_{REST} é a incerteza de outros componentes de influência;

u_{IA} é a incerteza padrão por interação.

O maior valor entre u_{RE} , u_{EVR} e u_{EVO} é escolhido como incerteza padrão pela repetitividade, as outras duas incertezas não são levadas em consideração no cálculo.

Novamente, incertezas não listadas no manual, mas conhecidas pela empresa, podem ser consideradas no cálculo através da incerteza u_{REST} .

Conhecendo então a incerteza padrão combinada do processo de medição, é possível calcular a incerteza expandida. A Equação 72 apresenta a relação entre as incertezas:

$$U_{MP} = k \cdot u_{MP} \quad (72)$$

Na qual:

U_{MP} é a incerteza expandida do processo de medição;

k é o fator de ;

u_{MP} é a incerteza padrão combinada do processo de medição.

A partir dessa nova informação é possível obter o quociente de capacidade do processo. A expressão para o cálculo desse quociente é apresentada na Equação 73:

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{TOL} \cdot 100\% \quad (73)$$

Em que:

Q_{MP} é o quociente de capacidade do processo de medição;

U_{MP} é a incerteza expandida do processo de medição;

TOL é a tolerância do processo de fabricação.

Fazendo o processo inverso, é possível obter a tolerância mínima necessária para atender a incerteza expandida obtida anteriormente. A Equação 74 abaixo descreve o cálculo:

$$T_{MIN_UMP} = \frac{2 \cdot U_{MP}}{Q_{MP_max}} \cdot 100\% \quad (74)$$

Em que:

TOL_{MIN_UMP} é a tolerância mínima para que o processo seja capaz;

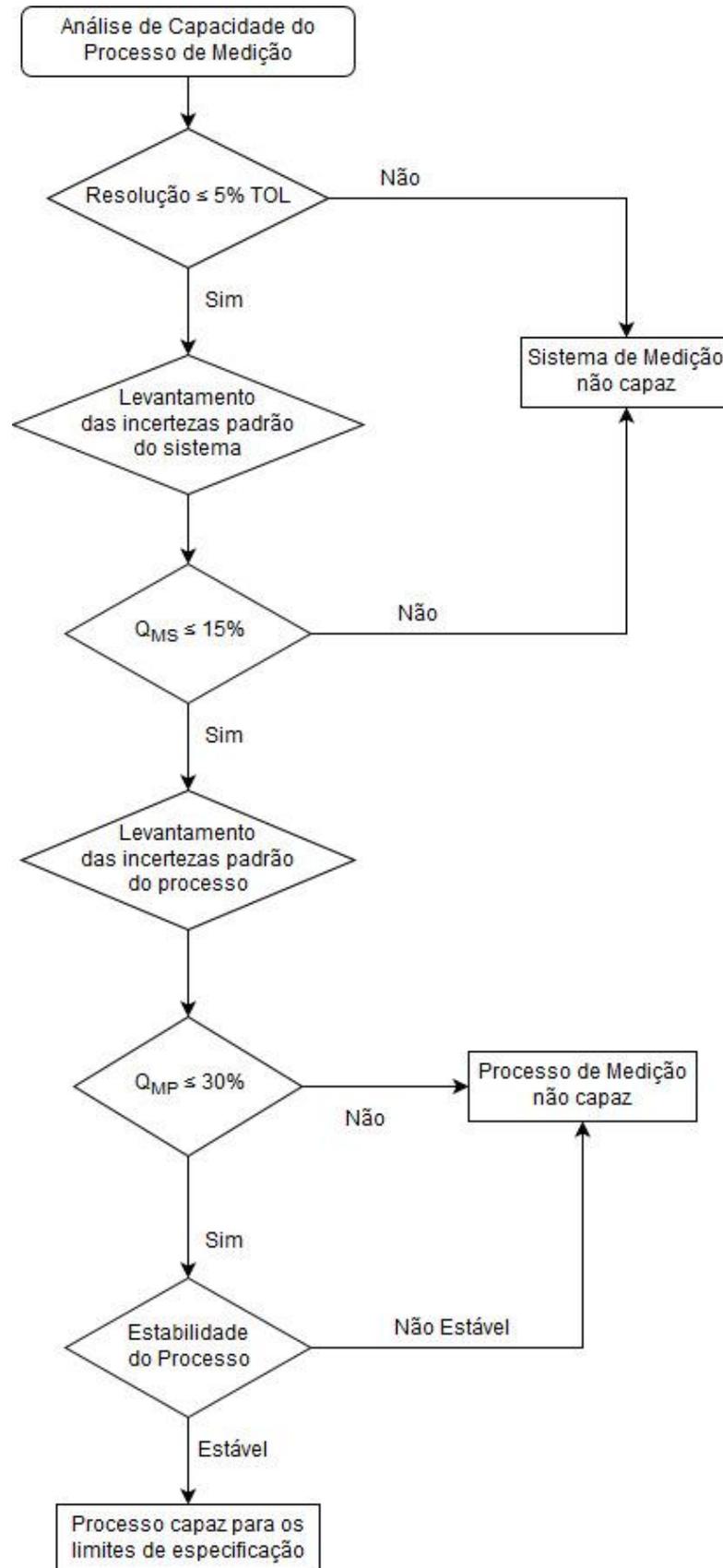
U_{MP} é a incerteza de medição expandida do processo de medição;

Q_{MP_max} é o quociente máximo de capacidade de medição do processo de medição [%].

O manual requer que o valor do quociente de capacidade calculado não seja maior que o quociente máximo de capacidade de medição do processo, 30%. Se o resultado obtido for maior que 30%, o processo não é capaz, deve ser corrigido e reavaliado.

A Figura 4 representa as etapas de avaliação do VDA 5, um fluxograma com o procedimento simplificado da obtenção das incertezas e comparação com os critérios estabelecidos.

Figura 4 – Fluxograma de análise do VDA 5.



Fonte: Autor (2017).

Apesar de haver a possibilidade de o equipamento de medição ser rejeitado antes de concluir a análise completa, os critérios de avaliação são coletivos, não descartando o sistema ou processo por causa de um fator ruim, mas somente por um resultado geral fora dos critérios.

3 ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS

Os dois manuais possuem pontos positivos e negativos, seja na metodologia proposta, nos conceitos abordados ou na clareza com que apresentam seus requisitos. O objetivo dessa comparação não é condenar um manual e exaltar o outro, mas com base na leitura, interpretação e julgamento de seus conteúdos, e amparadas nos resultados obtidos no estudo de caso, as críticas visam apontar os pontos fracos, confusos e redundantes para que os usuários dos manuais, em sua maioria fornecedores, poupem tempo e recursos quando aplicarem as metodologias aos seus sistemas de medição e tenham total entendimento do estudo, compreendendo o que estão fazendo e porque o fazem.

A comparação será feita para as características ou fatores abordados pelos manuais e no caso de alguma característica não ser contemplada em ambos, os conceitos mais próximos e relativos ao tópico serão analisados.

3.1 Resolução

A resolução é o fator inicial de análise para qualquer equipamento. Se a resolução não for adequada, o restante do estudo não é necessário e é por esse motivo que ambos os manuais a usam como primeiro critério de avaliação. O VDA é mais rígido que o MSA nesse critério, pois trabalha com uma resolução mínima de 5% da tolerância, contra 10% do MSA. Não é um critério muito rigoroso, ao ponto de inviabilizar o estudo, pois resoluções nessa faixa tendem a ser sensíveis às variações das peças, podendo classificar com propriedade peças aceitáveis e inaceitáveis, sendo assim adequadas às necessidades de medição.

A questão do ndc apontada pelo MSA, em seu conceito, é muito interessante, a sensibilidade e a resolução dos sistemas de medição são aspectos importantes da adequação a cada uso específico. Porém surge contradição, pois é possível ter equipamentos na faixa dos 5% ou 10% de resolução, mas que devido a problemas de R&R não alcançam ndc maior ou igual a cinco. O estudo desenvolvido por García e del Río (2013) mostra que a relação direta entre R&R e ndc por uma expressão matemática faz com que a existência de dois critérios de

aceitação seja incoerente. García e del Río (2013) ainda afirmam que, apesar de o ndc não dizer nada que o R&R não diga, o ndc ainda deve ser observado no estudo, não como critério de aceita o, mas como uma fonte de informa o sobre a utilidade das medi es para propósitos de controle. Uma revisão dos critérios de aceita o deve ser feita e esses parâmetros não deveriam mais ser considerados independentes.

3.2 Estabilidade

  um fator importante e similar entre os manuais, mas que são pode ser analisado de um único jeito: medindo periodicamente o mesmo padrão para acompanhar o comportamento do sistema de medi o ao longo do tempo. Os métodos propostos são os mesmos em ambos os manuais, plotar cartas de controle para analisar o sistema de medi o em fun o do tempo.

Não há críticas quanto às cartas de controle, são um método prático e funcional, e, portanto são adequadas ao sistema produtivo industrial, independente se   do setor automotivo ou não.

3.3 Tendência

Sobre a tendência, cada um dos manuais tem pontos fortes e fracos. Infelizmente os pontos fracos de ambos são considerados numa análise integrada.

O MSA   muito prático em suas medi es e análise numérica, requerendo apenas 10 medi es repetidas num padrão ou utilizando os dados da carta de controle de estabilidade, o que facilita muito para os operadores. Mesmo sem a ajuda de software, os resultados numéricos são obtidos rapidamente, pois as equa es são simples. No entanto, quando a amostra   pequena qualquer varia o tem alta influência e pode levar a resultados pouco condizentes com a realidade.

Outro empecilho   que para o MSA não pode existir tendência, o que na realidade não acontece. O teste de hipótese apenas demonstra se há ou não evidências estatísticas suficientes para desprezar a tendência, mas sempre haverá tendência. O manual acaba sendo rigoroso demais com um erro que várias vezes pode ser aceitável. Mesmo que o teste de hipótese diga que o erro   significativo, quando comparado com a tolerância ou com o erro máximo admissível sua contribui o   muito pequena e seria imprudente descartar um equipamento assim.

Quanto ao VDA, o fato de não haver critério de rejei o ou aprova o diretamente associado   tendência   uma vantagem, porque assim mesmo pequenos erros sistemáticos não

comprometem o estudo todo. O efeito da tendência é observado na incerteza combinada, se a sua contribuição for significativamente grande, os quocientes de capacidade indicarão problema no sistema de medição.

Porém, por serem necessárias no mínimo 25 medições em um padrão, ou no mínimo 30 medições ao todo quando houver mais padrões (para que o número de graus de liberdade seja considerável), o procedimento se torna demorado e pouco prático. Dependendo da empresa e dos recursos, um estudo assim pode ser penoso à rotina.

3.4 Linearidade

A linearidade é, em resumo, uma estimativa da tendência ao longo da faixa de operação do equipamento. Por isso, o número de medições é consideravelmente grande e a complexidade é maior.

O MSA é bem prático quanto aos dados iniciais. É muito semelhante ao estudo de tendência, apenas aplicado a mais de um padrão. Por mais que as fórmulas sejam complexas, suas aplicações são também bem práticas.

É interessante ressaltar que o MSA faz uma análise prévia da repetitividade, o que não é de impacto muito grande, mas ajuda a observar parte do comportamento do sistema.

O lado negativo da análise é que, assim como na tendência, a linearidade deve ser nula e a discussão é a mesma. O manual não deixa claro se a faixa de operação a ser analisada é a faixa nominal em que o equipamento pode operar ou se é a faixa em que ele será aplicado na prática. Se for somente a faixa usada na prática, os erros de linearidade podem ser bem menores e o sistema é aprovado, porém quando toda a faixa do sistema é posta à prova, a probabilidade de o erro de linearidade ser grande é maior e assim o sistema é rejeitado, quando poderia atender satisfatoriamente as peças ao qual era destinado.

Há ainda a possibilidade de corrigir a linearidade, mas na prática industrial, no ritmo produtivo é complicado para os operadores corrigirem cada medição efetuada, porque afinal o sistema analisado é o sistema usado na produção.

A vantagem do VDA é de que a amostra mínima é menor (30 medições contra 50 do MSA) e que não há uma regra que rejeite automaticamente o sistema.

O VDA, no entanto é mais elaborado. Além de calcular a regressão, um estudo de ANOVA é realizado sobre os resíduos. Logo, a complexidade do estudo requer auxílio computacional e possivelmente um software que faça análise de variância, pois mesmo em um computador, as equações são bem complexas para serem programadas a mão.

A ANOVA é somente aplicada quando se quer corrigir o erro de linearidade e os resultados de variância são utilizados para cálculo das incertezas. Se não houver correção, então as incertezas são estimadas através de uma simples análise de tendência das amostras das peças, mas que tendem a maiores incertezas. Então, se por um lado fica mais fácil obter as incertezas sem utilizar ANOVA, por outro pode haver erros de linearidade no sistema.

A diferença está naquilo que cada manual usa como parâmetro de análise da linearidade. O MSA considera o coeficiente angular da reta de regressão, já o VDA 5 usa o maior erro de tendência na faixa de operação para obter as incertezas padrão.

3.5 Repetitividade e reprodutibilidade

A principal diferença está nas metodologias apresentadas. O MSA apresenta o método de média e amplitude e o método ANOVA, enquanto o VDA 5 apresenta somente a ANOVA. Nada impede de que seja usado o método de média e amplitude para o VDA 5, mas o manual não apresenta outra alternativa, possivelmente porque a recomendação é a ANOVA, devido à sua robustez e capacidade de calcular variações causadas por interações.

A grande dificuldade está no resultado, para o MSA o R&R só é aceito se menor que 10%, o que é uma meta complicada principalmente para peças de tolerâncias mais apertadas. Entre 10% e 30% existe a possibilidade de o cliente aprovar, mas como fica a critério dele, é muito simples de se rejeitar.

De acordo com Drégelyi-Kiss e Czifra (2014) o que intensifica essa dificuldade é o intervalo de confiança utilizado por cada manual nas incertezas expandidas. Enquanto o VDA aceita um intervalo de 95%, o MSA utiliza um intervalo de probabilidade de 99,73%, por isso o número de desvios padrão para uma distribuição normal considerados na análise são respectivamente 4 e 6. Essa é a grande diferença que torna o MSA tão rígido: mais desvios padrão significam maiores incertezas.

3.6 Incertezas

Essa é a diferença conceitual entre os dois manuais. O VDA 5 é minucioso e descreve cada fator de influência como uma incerteza de medição. Para o MSA fatores como a calibração, temperatura e desvio de forma são parte das premissas. Se as premissas não são cumpridas, então é de se esperar que o resultado apresente maior variabilidade.

A grande questão é que no MSA, cada característica é analisada separadamente, enquanto que no VDA 5 é feito o balanço de incertezas para o sistema de medição e para o processo de medição.

Quanto à repetitividade, os dois manuais mencionam diversas maneiras de obtê-la. Ela é analisada na tendência, na linearidade e no estudo de repetitividade e reprodutibilidade. Ambos os manuais calculam diversos valores de repetitividade como uma forma de prever o comportamento do sistema de medição e também como uma garantia de que os estudos estão em harmonia, pois o desvio padrão de repetitividade deveria ser o mesmo em todos os casos, qualquer valor de repetitividade muito distante dos observados pode indicar algum erro no procedimento do estudo.

3.7 Comparação Geral

Comparando globalmente os dois manuais sem abordar fatores específicos, o MSA é mais rápido de se aplicar, porque requer menos medições e apresenta métodos simples de cálculo até nas metodologias mais complexas. O VDA 5 por sua vez é mais flexível nos critérios de aceitação, deixando faixas mais factíveis para seus usuários, mesmo que o levantamento de dados seja extenso.

Os métodos de coleta de dados e cálculo das principais características, descritas nas seções anteriores, são muito parecidos nos dois manuais, possivelmente porque as ferramentas estatísticas são quase todas as mesmas.

Duas grandes diferenças são notáveis entre os manuais. A primeira é que o MSA analisa cada fator separadamente e tem critérios de avaliação para cada um, enquanto o VDA 5 faz um levantamento geral dos fatores e avalia suas influências de maneira combinada, com um critério para o sistema todo. E a segunda diferença é com relação ao intervalo de confiança do estudo de R&R, em que o MSA é mais rígido devido aos 6 desvios padrão equivalentes a 99,73% de confiança.

Mas quando aplicados juntos, os manuais se ajudam. Naquilo que um acaba sendo rígido demais, o outro consegue desenvolver argumentos para provar que mesmo o sistema não sendo aceito no critério do primeiro, ele é capaz de atender às especificações e necessidades de medição. É o caso que ocorre na tendência principalmente, onde o VDA 5 com seu quociente de capacidade do sistema de medição, mostra que a capacidade do sistema não é comprometida quando da existência de tendência significativamente diferente de zero.

Unindo as informações e dados levantados para os dois manuais, os usuários terão maior subsídio para provar a capacidade e confiabilidade de seus sistemas de medição.



4 METODOLOGIA INTEGRADA

O resultado da integração dos métodos dos manuais deve avaliar qualquer caso independente de quem seja o cliente. Isso significa que aplicando a integração em um sistema de medição e ele sendo capaz, ele deve ser aprovado em ambos os manuais separadamente. Para que isso ocorra serão escolhidos os critérios e métodos mais rígidos dos manuais para cada característica analisada. Há situações em que há divergência na metodologia e por isso o método integrado deve abordar as requisições dos dois manuais.

A fim de simplificar as terminologias, os nomes usados serão:

- a) Dispositivo/equipamento de medição: é qualquer equipamento ou dispositivo usado para obter medições. Por exemplo, paquímetro, micrômetro, balança, multímetro, etc.
- b) Sistema de medição: é o conjunto de instrumentos, dispositivos, equipamentos, operadores, peças, padrões, métodos, ambiente, software, premissas usados para determinar uma unidade de medição ou corrigir a avaliação do mensurando. É todo o processo envolvido na obtenção de medidas.

4.1 Resolução

Inicialmente, a resolução *RE* do sistema deve ser menor ou igual a 5% da especificação e a incerteza associada à resolução é obtida de acordo com a seção 2.2.1.

Ainda assim, ao fim de toda a avaliação é necessário calcular o *ndc*, o qual deverá ser maior ou igual a cinco, porém só é possível obter o *ndc* após o cálculo de ANOVA para avaliação do R&R, conforme seção 2.1.1.

4.2 Estabilidade

Para o estudo de estabilidade é necessário selecionar um padrão de referência ou uma peça padrão situada no meio da amplitude das medições feitas na produção. Então, diária ou semanalmente, medir o padrão de três a cinco vezes ao longo do dia, de forma que represente os diferentes períodos de uso do dispositivo. Os valores medidos são anotados e plotados num

gráfico de controle de média e amplitude ou média e desvio padrão, em alguns casos pode ser aplicável o gráfico de valores individuais e amplitude móvel.

Se houver algum ponto fora de controle, checar as causas e o que pode ser feito para corrigir, caso contrário o sistema será considerado instável.

As incertezas padrão para tendência e de repetitividade devem ser calculadas com base nos dados de estabilidade e então comparadas com o estudo de tendência e de repetitividade num padrão, conforme seção 2.2.2.

4.3 Tendência

Para analisar a tendência é preciso obter uma amostra de 25 medições repetidas num padrão rastreável ou numa peça padrão de valor convencional conhecido.

Com as medições feitas, usar as equações da seção 2.1.3 para obter os erros, a tendência e desvio padrão da repetitividade σ_r .

O σ_r poderá ser usado como VE (ou u_{EVR} no estudo de incertezas) para testar a repetitividade nesse estudo específico. Porém, no estudo de R&R deve-se usar o valor de VE calculado pela ANOVA, pois representa melhor a repetitividade do sistema de medição.

O teste de Student é realizado conforme indicado na sessão 2.1.3. A tendência será aceitável se o valor p correspondente ao $t_{tendência}$ for maior que 0,05 (intervalo de confiança de 95%).

Se após o estudo de linearidade não for feita correção do erro de linearidade, a tendência a ser considerada para cálculo de incerteza será a maior tendência dentre as peças utilizadas na linearidade.

A incerteza devido à tendência u_{BI} é calculada conforme seção 2.2.5.

4.4 Linearidade

Em ambos os casos a linearidade é um tópico complexo, principalmente porque existe uma relação direta com a tendência e porque na verdade o estudo de linearidade é a verificação de diferentes tendências ao longo da faixa de operação. Para iniciar o estudo são necessárias no mínimo cinco peças cujas medidas cubram a amplitude de operação do dispositivo de medição. Os valores de referência de cada peça devem ser conhecidos.

Cada peça deve ser medida no mínimo 10 vezes. Então se deve calcular o erro de medição de cada medida em relação ao seu respectivo valor de referência e em sequência calcular a tendência de cada série de medições. Com as tendências é possível obter a reta de

regressão e os coeficientes que descrevem a função da reta. Logo após, calcula-se o desvio padrão da variabilidade da repetitividade s da seção 2.1.4, que mais adiante será usado como fonte de incerteza, bem como os desvios padrão de cada peça, conforme seção 2.2.6.

Com os valores de tendência e erro de medição, juntamente com a reta de regressão, gerar o gráfico de tendência em função dos valores de referência.

Se a análise gráfica indicar que a linearidade é aceitável, o teste de Student deve ser aplicado ao coeficiente angular a para verificar se ele é significativamente diferente de zero. Se ele for considerado significativamente igual a zero, então a tendência é igual para todos os valores de referência.

Para verificar se a tendência é significativa, é aplicado o teste de Student no coeficiente linear b . Se b for significativamente igual a zero, então não há tendência.

Uma análise de variância deve ser aplicada sobre a regressão para investigar a incerteza de linearidade e de tendência. Caso a incerteza pela linearidade seja fornecida pelo fabricante do equipamento de medição, então a ANOVA sobre a regressão não será necessária.

Se houver correção da linearidade para o sistema de medição, então a incerteza pela linearidade será obtida na falta de ajuste e a incerteza de repetitividade será advinda do erro puro. Porém se o teste de Fisher mostrar que a falta de ajuste é significativamente igual a zero, então a incerteza da linearidade é considerada nula e a incerteza de repetitividade é obtida através da variância residual (erro).

Caso não seja feita a correção no sistema de medição, então a incerteza de linearidade é considerada nula e as incertezas de tendência e repetitividade são calculadas usando os maiores valores de tendência e desvio padrão obtidos no estudo com as cinco peças.

4.5 Repetitividade e reprodutibilidade

A análise dessas fontes de variação será feita obrigatoriamente através da ANOVA, porque é contemplada nos dois manuais. Pelo menos 10 peças devem ser medidas no mínimo duas vezes por no mínimo dois operadores. A amostra mínima do VDA 5 é 30 e o número mínimo de peças é 10 pelo MSA. O que se observa nos manuais é que a maioria dos exemplos aponta três operadores, mas repetições variam entre duas ou três. Conforme a amostra aumenta, o estudo se aproxima do real comportamento do sistema, porém exige mais tempo e recursos.

Para cada operador são calculados as médias das medições de cada peça e também as amplitudes das medições de cada peça. A partir da média das médias e da média das amplitudes médias, são plotados os limites dos gráficos de média e de amplitude. Todos esses dados podem ser organizados como na Tabela 3:

Tabela 3 – Modelo para estudo de repetitividade e reprodutibilidade.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Avaliador A:											
Medida 1											
Medida 2											
Medida 3											
Média											
Amplitude											
Avaliador B:											
Medida 1											
Medida 2											
Medida 3											
Média											
Amplitude											
Avaliador C:											
Medida 1											
Medida 2											
Medida 3											
Média											
Amplitude											

Fonte: Autor (2017).

4.5.1 Análise Gráfica

A análise gráfica é uma prévia do comportamento do sistema. Se os resultados gráficos apontarem erros muito grandes, provavelmente não será necessária análise numérica, antes correções devem ser aplicadas e uma nova amostra deve ser coletada.

Os gráficos devem ser gerados conforme a seção 2.1.5 e analisados segundo os critérios nela definidos.

4.5.2 Análise Numérica de ANOVA

Partindo dos valores coletados e aplicando as devidas fórmulas da análise de variância, os resultados são apresentados conforme o modelo de resultados da Tabela 4.

Tabela 4 – Modelo de resultados de ANOVA.

Fonte	GL	SQ	QM	Variância	σ	Fobtido	Valor P	6 σ	%
R&R									
Equipamento (VE)									
Avaliador (VA)									
Avaliador por amostra									
Amostras (VP)									
Total (VT)									
								ndc =	

Fonte: Autor (2017).

A primeira análise a ser feita é testar se há significativa interação entre avaliador (operador) e amostra. Se sim, os resultados permanecem os mesmos, se não, a variância e os graus de liberdade do “Avaliador por amostra” são atribuídos ao “Equipamento”.

A avaliação final depende de R&R ser menor que 30%. Se estiver abaixo de 10%, o sistema é considerado aceitável e é o recomendado. Se for maior que 30%, as fontes de variação devem ser analisadas, a porcentagem de cada fonte mostra o quanto cada uma influencia na variação total do sistema. As fontes com maior influência devem ser corrigidas para que se faça um novo estudo.

Entre 10% e 30%, o sistema pode ser considerado aceitável e a decisão de aprova-lo depende de fatores como aplicação do sistema de medição, dificuldade para realizar o estudo, cumprimento das premissas, custos de equipamento e trabalho. Nessa faixa, o sistema deve ser aprovado pelo cliente.

Com relação às incertezas obtidas na ANOVA, elas são de acordo com a coluna de desvios padrão σ :

- A incerteza padrão da repetitividade nas peças de teste u_{EVO} é igual ao desvio padrão do Equipamento VE;
- A incerteza padrão da reprodutibilidade dos operadores u_{AV} é igual ao desvio padrão do Avaliador VA;
- E a incerteza padrão por interação u_{IAi} é igual ao desvio padrão de Avaliador por amostra, se a interação for considerada significativa.

4.6 Incerteza de calibração

É obtida do certificado de calibração e calculada a partir da maior incerteza expandida de calibração, segundo seção 2.2.3.

4.7 Incerteza de repetitividade num padrão de referência

A princípio, a repetitividade do equipamento é calculada através da amostra do estudo de tendência e é igual ao desvio padrão das medições. Porém, a repetitividade aparece também no estudo de linearidade através de diferentes análises e no estudo de estabilidade. Conforme seção 2.1.4, o desvio padrão da variabilidade da repetitividade pode ser usado como repetitividade, o desvio padrão de erro puro no método para regressão linear em casos de correção e no caso de não correção da linearidade usa-se o maior desvio padrão dentre as peças medidas no estudo.

A incerteza u_{EVR} definitiva usada na incerteza padrão combinada será o maior valor de repetitividade entre esses citados, conforme a Equação 75:

$$u_{EVR} = \text{máx}\{\sigma_{BI}, \sigma_r, \sigma_{stab}, \sigma_{EVR}, \hat{\sigma}, \sigma_1, \dots, \sigma_g\} \quad (75)$$

Na qual:

u_{EVR} é a incerteza de repetitividade definitiva;

σ_{BI} é o desvio padrão das amostras de tendência;

σ_r é o desvio padrão da variabilidade da repetitividade;

σ_{stab} é o desvio padrão da repetitividade da estabilidade;

σ_{EVR} é o desvio padrão de erro puro (sistema corrigido);

$\hat{\sigma}$ é o desvio padrão residual (sistema sem correção);

σ_1 é o desvio padrão da primeira peça do estudo de linearidade (sistema sem correção);

σ_g é o desvio padrão da g-ésima peça do estudo de linearidade (sistema sem correção).

4.8 Incerteza por não homogeneidade

Caso haja incertezas devido a desvio de forma, textura de superfície ou propriedades do material da peça, elas devem ser obtidas conforme seção 2.2.12.

4.9 Incerteza pela temperatura

As incertezas devido à temperatura devem ser calculadas conforme seção 2.2.13.

4.10 Incertezas por outros componentes de influência

Qualquer outra incerteza, suposta ou conhecida, deve ser estimada separadamente por experimentos ou dados referenciados (tabelas, manuais, especificações do fabricante). Se for

atribuída ao equipamento, deve ser incluída na incerteza combinada do equipamento, mas se for característica do sistema, então será incluída somente na incerteza combinada do sistema de medição.

4.11 Incerteza combinada e capacidade do equipamento de medição

Seguindo a metodologia da seção 2.2.7, a incerteza combinada do equipamento é obtida em função das incertezas da resolução, de tendência, de linearidade, de calibração e outros componentes de influência, caso haja.

A incerteza combinada é mais bem representada num balanço de incertezas, tal como na Tabela 5:

Tabela 5 – Modelo de balanço de incerteza para equipamento de medição.

Fonte de incerteza	Símbolo	Incerteza (unidade)
Resolução do equipamento	u_{RE}	
Incerteza de calibração	u_{CAL}	
Repetitividade no padrão	u_{EVR}	
Linearidade	u_{LIN}	
Tendência	u_{BI}	
Outros componentes	u_{REST}	
Incerteza combinada do equipamento	u_{MS}	

Fonte: Autor (2017).

A capacidade do equipamento é avaliada de acordo com a incerteza expandida, a qual é obtida da incerteza combinada. Os passos para calcular a capacidade são também definidos na seção 2.2.7.

A representação dos resultados é feita também na forma de uma tabela, conforme o modelo da Tabela 6:

Tabela 6 – Modelo de resultados de capacidade do equipamento.

Resultados avaliados	Valor obtido
Tolerância	$TOL =$
Resolução	$RE =$ %
Incerteza padrão combinada	$u_{MS} =$
Incerteza expandida de medição	$U_{MS} =$
Quociente limite de capacidade	$Q_{MS-máx} = 15\%$
Quociente de capacidade	$Q_{MS} =$ %

Fonte: Autor (2017).

O quociente de capacidade não deve ser maior que 15%. Caso o quociente seja levemente maior que 15%, o estudo pode prosseguir a fim de comprovar os resultados obtidos para o equipamento, porém deve atender estritamente às condições de capacidade do sistema de medição. Caso os valores obtidos no estudo do sistema confirmem a incapacidade do equipamento, este deve ser revisado e corrigido.

4.12 Incerteza combinada e capacidade do sistema de medição

Similarmente ao equipamento, a incerteza combinada do sistema fica mais bem apresentada como um balanço das incertezas da resolução, de calibração, da repetitividade num padrão, da linearidade, da tendência, da repetitividade nas peças, da reprodutibilidade dos operadores, de estabilidade, por interações, por não homogeneidade, pela temperatura e por outros componentes de influência. A Tabela 7 apresenta o balanço de incertezas para o sistema de medição.

Tabela 7 – Modelo de balanço de incerteza para sistema de medição.

Fonte de incerteza	Símbolo	Incerteza (unidade)
Resolução do equipamento	u_{RE}	
Incerteza de calibração	u_{CAL}	
Repetitividade no padrão	u_{EVR}	
Linearidade	u_{LIN}	
Tendência	u_{BI}	
Repetitividade nas peças	u_{EVO}	
Reprodutibilidade dos operadores	u_{AV}	
Interação peça/operador	u_{IA}	
Não homogeneidade	u_{OBJ}	
Temperatura	u_T	
Outros componentes	u_{REST}	
Incerteza combinada do equipamento	u_{MP}	

Fonte: Autor (2017).

A capacidade do sistema é avaliada em função da incerteza expandida do sistema de medição, que é fruto da incerteza combinada do sistema. A Tabela 8 apresenta o modelo de resultados para a capacidade do sistema:

Tabela 8 – Modelo de resultados do sistema de medição.

Resultados avaliados	Valor obtido
Incerteza padrão combinada	$u_{MP} =$
Incerteza padrão expandida	$U_{MP} =$
Quociente de capacidade limite	$Q_{MP-m\acute{a}x} = 30\%$
Quociente de capacidade	$Q_{MP} = \quad \%$

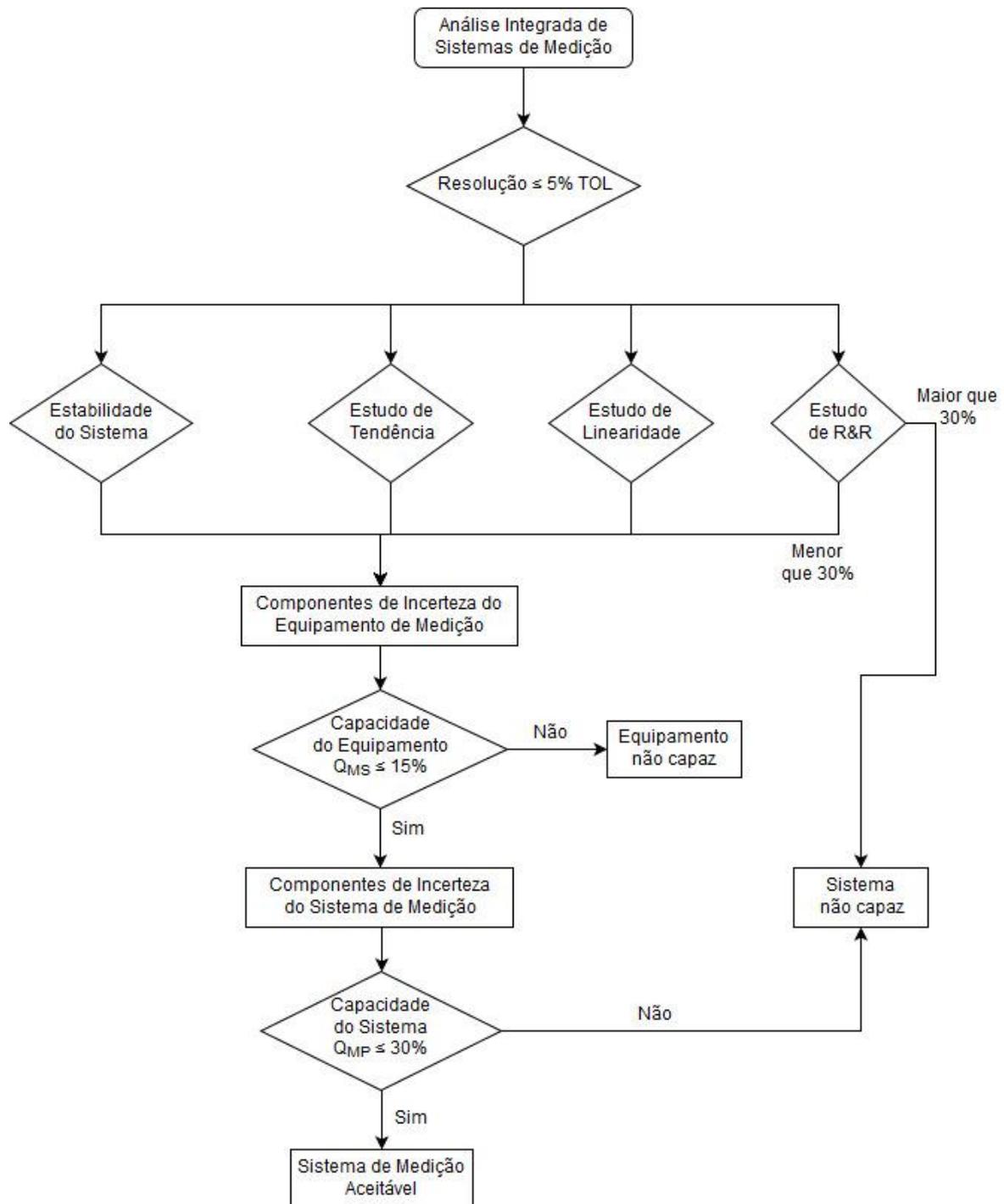
Fonte: Autor (2017).

O quociente de capacidade do sistema de medição não deve ser maior que 30%. Se passar desse limite, o sistema é considerado incapaz de atender as necessidades para controle de processo/produto. As fontes de incerteza devem ser investigadas e o sistema deve ser

corrigido. Um novo estudo deverá avaliar a nova capacidade do sistema. Não havendo soluções, provavelmente o sistema deverá ser substituído.

As etapas do método integrado de avaliação podem ser observadas no fluxograma da Figura 5:

Figura 5 – Fluxograma de análise integrada de capacidade dos sistemas de medição.



Fonte: Autor (2017).

Embora a metodologia proposta siga os critérios de ambos os manuais, a reprovação efetiva do equipamento ou sistema de medição só acontece após várias etapas, a fim de não rejeitar um sistema potencialmente capaz com problemas em apenas um componente de incerteza.

5 ESTUDO DE CASO

A metodologia integrada foi aplicada a um micrômetro e a uma balança. Embora o VDA 5 afirme que a metodologia é focada em dispositivos de medição geométrica e o MSA em medições replicáveis, a balança se adequa bem a ambos os manuais. Ela é um equipamento prático e que apresenta as características estudadas tanto pelo VDA 5 como pelo MSA. A inclusão da balança visa expandir as possibilidades de aplicação dos manuais, validando o estudo para mais equipamentos além dos geométricos.

Os elementos medidos pelos equipamentos foram moedas de dez centavos (R\$ 0,10) da primeira geração do Real. As medidas nominais e tolerâncias de fabricação da Casa da Moeda seguem no Anexo D. As especificações utilizadas estão a seguir:

- Diâmetro: $22,00 \pm 0,10$ mm;
- Massa: $3,59 \pm 0,31$ g.

5.1 Micrômetro

Primeiramente segue o estudo feito com o micrômetro. O equipamento é um micrômetro externo do fabricante Mitutoyo com faixa de medição de até 25 mm, com número de série 87249428. A Figura 6 abaixo apresenta o micrômetro montado na base suporte:

Figura 6 - Micrômetro Mitutoyo



Fonte: Autor (2017).

Cada característica do sistema ou método será analisado a seguir, buscando primeiramente realizar os pontos comuns entre os manuais.

5.1.1 Resolução:

A resolução do micrômetro é de 0,001 mm. Para uma tolerância de 0,2 mm, a resolução equivale a 0,5% e a regra de proporção é atendida para ambos os manuais. A incerteza padrão da resolução é aproximadamente igual a 0,00029 mm.

5.1.2 Estabilidade:

Não foi feito um estudo de estabilidade do micrômetro. Além de não haver registro prévio da estabilidade do micrômetro, nem tempo hábil para levantar esses dados, existe uma prática de que o micrômetro permanece estável entre calibrações. Se entre uma calibração e outra não há variação considerável no dispositivo, manter uma rotina de medições para monitorar sua estabilidade seria uma perda de tempo e recursos, isso porque o intervalo entre calibrações é consideravelmente longo, podendo ser de um ano ou mais.

5.1.3 Repetitividade e Reprodutibilidade:

Essas duas características são analisadas juntas pelo fato de o método da ANOVA obtê-las ao mesmo tempo. Além de que os valores obtidos nesse estudo de variância levam a valores de repetitividade úteis em outras análises.

Os dados foram coletados no micrômetro num laboratório com a temperatura controlada e o equipamento foi ajustado antes das medições. Dez moedas foram utilizadas no estudo, analisando seus diâmetros sempre na mesma posição. A Figura 7 apresenta as moedas utilizadas no estudo e já marcadas na posição em que foram medidas:

Figura 7 – Moedas para estudo de repetitividade e reprodutibilidade do micrômetro.



Fonte: Autor (2017).

Três operadores realizaram três medições para cada moeda, totalizando noventa medições. Os dados foram organizados na Tabela 9 a seguir:

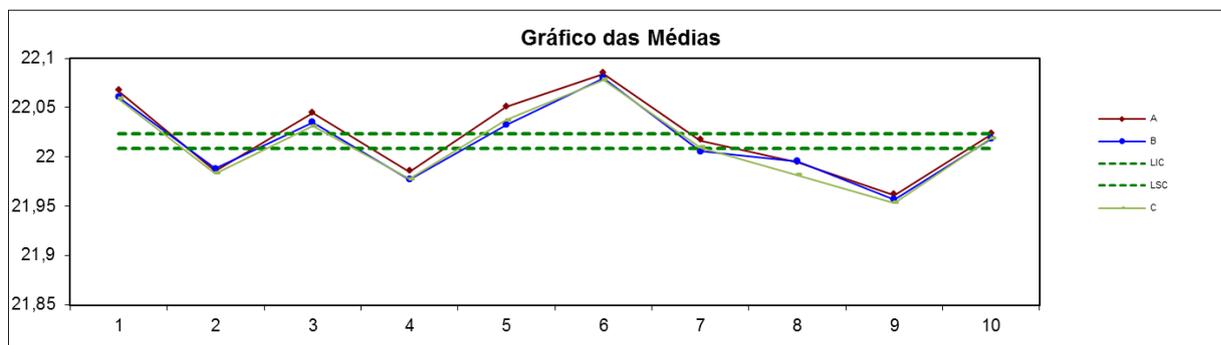
Tabela 9 – Dados de repetitividade e reprodutibilidade do micrômetro.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Avaliador A:	A										
Medida 1	22,069	21,985	22,044	21,985	22,047	22,083	22,014	21,997	21,960	22,024	
Medida 2	22,065	21,987	22,046	21,984	22,054	22,085	22,021	21,996	21,960	22,026	
Medida 3	22,067	21,987	22,044	21,987	22,051	22,085	22,015	21,990	21,965	22,019	
Média	22,067	21,9863	22,0447	21,9853	22,0507	22,0843	22,0167	21,9943	21,9617	22,0230	22,021
Amplitude	0,004	0,002	0,002	0,003	0,007	0,002	0,007	0,007	0,005	0,007	0,0046
Avaliador B:	B										
Medida 1	22,062	21,992	22,040	21,978	22,037	22,082	21,996	21,995	21,961	22,013	
Medida 2	22,062	21,988	22,027	21,973	22,027	22,070	22,003	21,999	21,954	22,028	
Medida 3	22,058	21,985	22,039	21,981	22,034	22,088	22,018	21,994	21,957	22,015	
Média	22,0607	21,988333	22,0353	21,9773	22,0327	22,08	22,0057	21,996	21,9573	22,0187	22,015
Amplitude	0,004	0,007	0,013	0,008	0,01	0,018	0,022	0,005	0,007	0,015	0,0109
Avaliador C:	C										
Medida 1	22,062	21,992	22,035	21,978	22,032	22,076	22,012	21,981	21,954	22,018	
Medida 2	22,054	21,977	22,033	21,978	22,041	22,078	22,011	21,986	21,953	22,018	
Medida 3	22,061	21,981	22,026	21,977	22,040	22,081	22,006	21,978	21,954	22,021	
Média	22,059	21,9833	22,0313	21,9777	22,0377	22,0783	22,0097	21,9817	21,9537	22,019	22,013
Amplitude	0,008	0,015	0,009	0,001	0,009	0,005	0,006	0,008	0,001	0,003	0,0065

Fonte: Autor (2017).

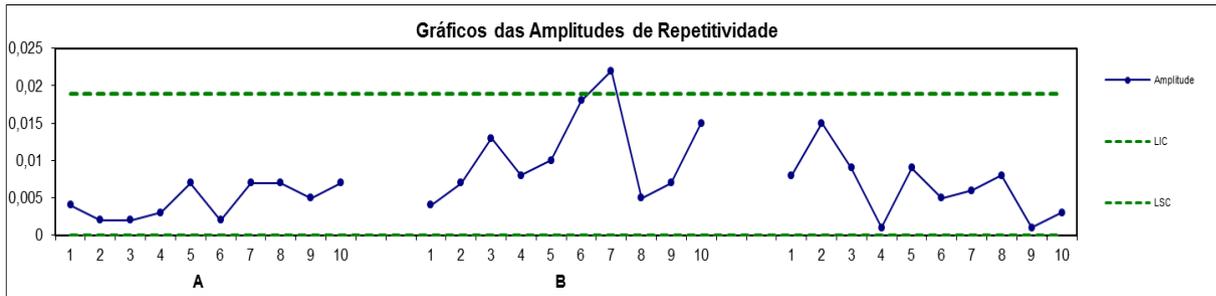
Os gráficos obtidos para o estudo de média e amplitude foram obtidos de acordo com a Tabela 9. É uma requisição do MSA a análise dos gráficos, mesmo que o método numérico seja o de ANOVA. Os gráficos da média e da amplitude seguem abaixo nas Figuras 8 e 9:

Figura 8 – Gráfico das médias de diâmetro das moedas.



Fonte: Autor (2017).

Figura 9 – Gráfico das amplitudes de cada operador, micrômetro.



Fonte: Autor (2017).

Observando o gráfico de médias, o comportamento de todos os operadores é bem similar, inclusive estão dentro do recomendado pelo MSA de que pelo menos 50% das médias dos avaliadores esteja fora dos limites de controle.

Em contrapartida, nas amplitudes era esperado que nenhum valor ficasse fora dos limites. Por causa disso o sistema poderia ser considerado incapaz. Porém, com base em análises posteriores e fatos ainda não observados, ao fim do estudo a causa desse ponto fora será esclarecida.

A análise de variância aplicada aos dados resultou dos seguintes valores apresentados na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Resultados da ANOVA do micrômetro.

Fonte	GL	SQ	QM	Variância	σ	Fobtido	Valor P	6 σ	%
R&R				4,44778E-05	0,00667			0,04002	20,0
Equipamento (VE)	60	0,001288	2,1467E-05	2,14667E-05	0,00463			0,02778	13,9
Avaliador (VA)	2	0,00111049	0,00055524	1,72128E-05	0,00415			0,0249	12,5
Avaliador por amostra	18	0,00069951	3,8862E-05	5,79835E-06	0,00241	1,810329	0,045	0,01446	7,2
Amostras (VP)	9	0,12305996	0,01367333	0,001514941	0,03892			0,23352	116,8
Total (VT)	89	0,12615796	0,001559419	0,03949				0,23694	
EXISTE INTERAÇÃO DE AVALIADOR POR PEÇA									ndc = 6

Fonte: Autor (2017).

O teste de Fisher indicou que existe interação significativa entre avaliador e peça, pois o valor P referente ao F calculado é menor que 0,05.

Os respectivos valores de variação de R&R, VA, VE e de interação entre operador/peça são observados na coluna σ . A porcentagem da variação de cada parcela está na última coluna. Os resultados apontam um sistema que pode ser aceito, desde que aprovado pelo cliente, afinal o R&R ficou em 20,0%.

Para o VDA os valores da Tabela 10 são os mesmos, porém são analisados como incertezas. O VE será usado como incerteza de repetitividade na peça de teste (u_{EVO}), o VA será considerado a incerteza da reprodutibilidade dos operadores (u_{AV}) e a variação devido à interação será considerada como incerteza devido à interação (u_{IA}). Esses valores serão contados junto com as outras incertezas na obtenção das incertezas combinadas.

5.1.4 Tendência:

Para o estudo de tendência foram feitas 25 medições repetidas numa das dez moedas do estudo de R&R com valor convencional atribuído de 21,9937 mm. As medidas obtidas e os valores de tendência de cada medida estão na Tabela 11:

Tabela 11 – Medições para análise de tendência do micrômetro.

	Medição (mm)	Erro de medição (mm)
1	21,991	-0,003
2	21,991	-0,003
3	21,991	-0,003
4	21,987	-0,007
5	21,987	-0,007
6	21,987	-0,007
7	21,991	-0,003
8	21,990	-0,004
9	21,988	-0,006
10	21,991	-0,003
11	21,991	-0,003
12	21,988	-0,006
13	21,987	-0,007
14	21,988	-0,006
15	21,991	-0,003
16	21,991	-0,003
17	21,988	-0,006
18	21,989	-0,005
19	21,989	-0,005
20	21,990	-0,004
21	21,990	-0,004
22	21,991	-0,003
23	21,991	-0,003
24	21,991	-0,003
25	21,990	-0,004
Tendência		-0,00414

Fonte: Autor (2017).

O valor de tendência é de $-0,00414$ mm e o desvio padrão da repetitividade é de $0,00158$ mm. A estatística t para o teste de hipótese foi calculada e é igual a $13,074$. O valor de t tabelado para 24 graus de liberdade e p igual a $0,975$ é de $2,064$ e, portanto a tendência é significativamente diferente de zero.

O sistema de medição é considerado inaceitável se não for corrigido. Porém, a tendência equivale a $2,07\%$ da tolerância. A incerteza devido à tendência (u_{BI}) é de $0,00239$ mm e a incerteza de repetitividade em padrões (u_{EVR}) é de $0,000158$ mm. A contribuição da tendência para a incerteza combinada do sistema de medição é de apenas 11% . Então por mais que o teste de hipótese infira que a tendência é significativa, sua contribuição para o sistema praticamente não é.

5.1.5 Linearidade:

Foi desprezado um estudo de linearidade devido ao princípio de funcionamento do dispositivo e por causa da fabricação do mesmo. Se durante a fabricação do micrômetro a precisão foi comprometida, seu erro se acumularia a cada passo do fuso e a linearidade seria evidente já na sua calibração. No certificado de calibração nada foi identificado fora dos padrões esperados, portanto a linearidade do dispositivo pode ser considerada inexistente. Na pior das hipóteses, apenas um problema de tendência poderia ser observado nos valores indicados pelo certificado.

5.1.6 Incerteza de calibração:

A incerteza de calibração obtida no certificado de calibração foi $u_{CAL} = 0,0013$ mm. O certificado de calibração segue ao final do trabalho como Anexo B.

5.1.7 Incerteza de repetitividade num padrão de referência:

O valor de incerteza de repetitividade u_{EVR} obtida foi de $0,00158$ mm.

5.1.8 Incerteza por não homogeneidade:

Para reduzir este efeito, foi estabelecida e marcada uma posição em cada moeda, onde as medições deveriam ser realizadas. Não há registros a respeito de não homogeneidade nas moedas, além de que na maioria dos exemplos o próprio manual não leva em consideração essa incerteza. Por estes motivos, essa incerteza não foi considerada no cálculo.

5.1.9 Incerteza pela temperatura:

Devido ao controle da temperatura ambiente e sabendo que o material das moedas é aço, tal como o dispositivo de medição, as variações devido à temperatura podem ser desprezadas, tal como o manual também faz em alguns de seus exemplos.

5.1.10 Incerteza por outros componentes de influência

O caso em questão não apresentou outros componentes de incerteza.

5.1.11 Incerteza combinada do equipamento de medição:

A incerteza combinada é mais bem retratada como um balanço de incertezas. A Tabela 12 a seguir apresenta as diferentes fontes de incerteza para o micrômetro:

Tabela 12 – Incertezas padrão do dispositivo, micrômetro.

Fonte de incerteza	Símbolo	Incerteza (mm)
Resolução do equipamento	u_{RE}	0,00029
Incerteza de calibração	u_{CAL}	0,0013
Repetitividade no padrão	u_{EVR}	0,00158
Linearidade	u_{LIN}	
Tendência	u_{BI}	0,00239
Outros componentes	u_{REST}	
Incerteza combinada do equipamento	u_{MS}	0,00315

Fonte: Autor (2017).

Quando a incerteza combinada do equipamento é calculada, comparar u_{RE} e u_{EVR} e usar a maior das duas como incerteza padrão pela repetitividade. A outra não entra no cálculo.

As fontes de incerteza que não apresentam valores são desconsideradas no cálculo da incerteza expandida e apenas estão na tabela para representar as recomendações de estudo do VDA 5. Em função desses valores é possível avaliar a capacidade do equipamento. Os valores analisados são apresentados na Tabela 13:

Tabela 13 – Resultados do dispositivo, micrômetro.

Resultados avaliados	Valor obtido
Tolerância (mm)	$TOL = 0,2$
Resolução	$RE = 0,5\%$
Incerteza padrão combinada (mm)	$u_{MS} = 0,00315$
Incerteza expandida de medição (mm)	$U_{MS} = 0,0063$
Quociente limite de capacidade	$Q_{MS-m\acute{a}x} = 15\%$
Quociente de capacidade	$Q_{MS} = 6,3\%$

Fonte: Autor (2017).

O valor do Q_{MS} demonstra quão equivocada é a decisão de reprovar o micrômetro por causa da tendência. Uma porcentagem de 6,3% para um limite de 15% é uma faixa segura de aceitação. Nesse caso específico é possível observar o respaldo que um manual pode fornecer ao outro, ajudando a comprovar que um equipamento pode ser aceitável, mesmo quando uma das suas características foi julgada inaceitável.

5.1.12 Incerteza combinada do sistema de medição:

O balanço de incertezas do sistema de medição segue na Tabela 14:

Tabela 14 – Incertezas padrão do sistema de medição, micrômetro.

Fonte de incerteza	Símbolo	Incerteza (mm)
Resolução do equipamento	u_{RE}	0,00029
Incerteza de calibração	u_{CAL}	0,0013
Repetitividade no padrão	u_{EVR}	0,00158
Linearidade	u_{LIN}	
Tendência	u_{BI}	0,00239
Repetitividade na peça	u_{EVO}	0,00463
Reprodutibilidade dos operadores	u_{AV}	0,00415
Estabilidade	u_{STAB}	
Incerteza por interações	u_{IA}	0,00241
Incerteza por não homogeneidade	u_{OBJ}	
Temperatura	u_T	
Outros componentes	u_{REST}	
Incerteza combinada do sistema	u_{MP}	0,0072

Fonte: Autor (2017).

Com esses valores, então é possível obter a capacidade do sistema de medição, lembrando que no cálculo da incerteza expandida, dentre u_{RE} , u_{EVR} e u_{EVO} , a maior das três é escolhida para representar a incerteza padrão de repetitividade, enquanto que as outras duas não entram na equação. Os valores resultantes estão relacionados na Tabela 15:

Tabela 15 – Resultados do sistema de medição, micrômetro.

Resultados avaliados	Valor obtido
Incerteza padrão combinada (mm)	$u_{MP} = 0,0072$
Incerteza padrão expandida (mm)	$U_{MP} = 0,0144$
Quociente de capacidade limite	$Q_{MP-máx} = 30\%$
Quociente de capacidade	$Q_{MP} = 14,4\%$

Fonte: Autor (2017).

Observando todos os resultados, o micrômetro é capaz de operar estável e possui resolução adequada para detectar variações do processo. Os valores de R&R em 20% são aceitáveis e o ndc é maior que cinco, os critérios de resolução são atendidos mais do que bem, 0,5% da tolerância, o quociente de capacidade do dispositivo em 6,3% e o quociente de capacidade do sistema em 14,4% comprovam que o sistema é capaz de atender à rotina de medição.

Os pontos fora de controle no R&R e os resultados numéricos de ANOVA são reflexos do descumprimento das premissas do MSA: um dos operadores não estava familiarizado com o equipamento, o mesmo que teve pontos fora de controle e que gerou interação entre operador e peça. O objetivo do estudo não é avaliar ou pressionar operadores, porque é suposto que tudo está de acordo com as premissas, porém, se houver problemas, o método identifica o que deve ser melhorado. É interessante ressaltar que mesmo em face desta situação, o sistema é capaz de atender as necessidades de medição do produto.

E como relatado na seção 3.5, a principal diferença entre os valores de 20% no R&R e 14,4% no Q_{MP} é devida ao intervalo de confiança usado em cada método. O intervalo de 99,73% do MSA é o que torna o critério difícil de alcançar.

5.2 Balança

O dispositivo utilizado nesse estudo é uma balança de precisão digital MH-03B de fabricante desconhecido, classe II, resolução de 0,002 g, faixa de medição de até 50 g e com erro máximo de fábrica de 0,02 g. A Figura 10 apresenta o equipamento utilizado:

Figura 10 – Balança.



Semelhante ao micrômetro, cada característica da balança será analisada a seguir:

5.2.1 Resolução:

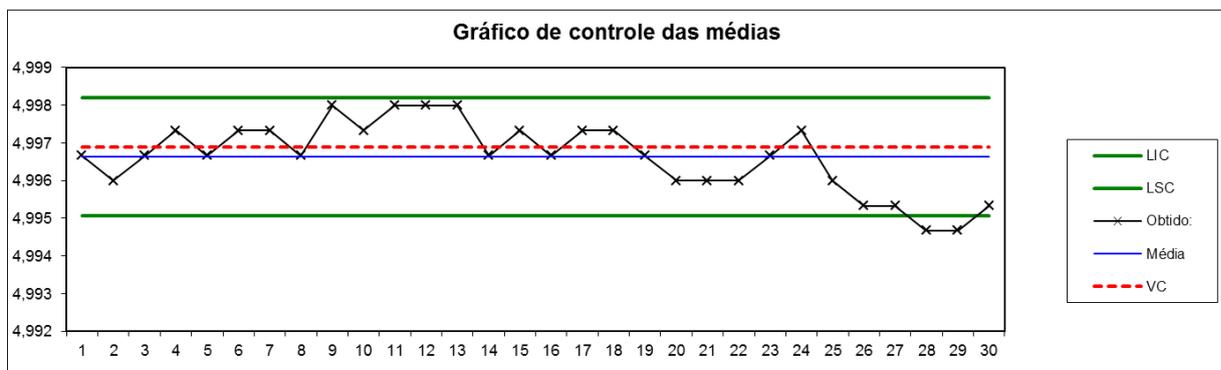
A resolução da balança é de 0,002 g. Para a tolerância de 0,62 g, a resolução equivale a 0,3% e a regra de proporção é atendida novamente para ambos os manuais. A incerteza da resolução é aproximadamente igual a 0,00058 g.

5.2.2 Estabilidade:

A análise de estabilidade foi feita com dados equivalentes a um mês (trinta dias) de monitoramento. As medidas coletadas foram plotadas em gráficos de controle de média e amplitude. Os valores de estabilidade são referentes a medições realizadas num peso padrão de valor convencional de 4,9969 g.

A Figura 11 a seguir apresenta o comportamento da balança ao longo do tempo:

Figura 11 – Gráfico de controle da balança para a média.

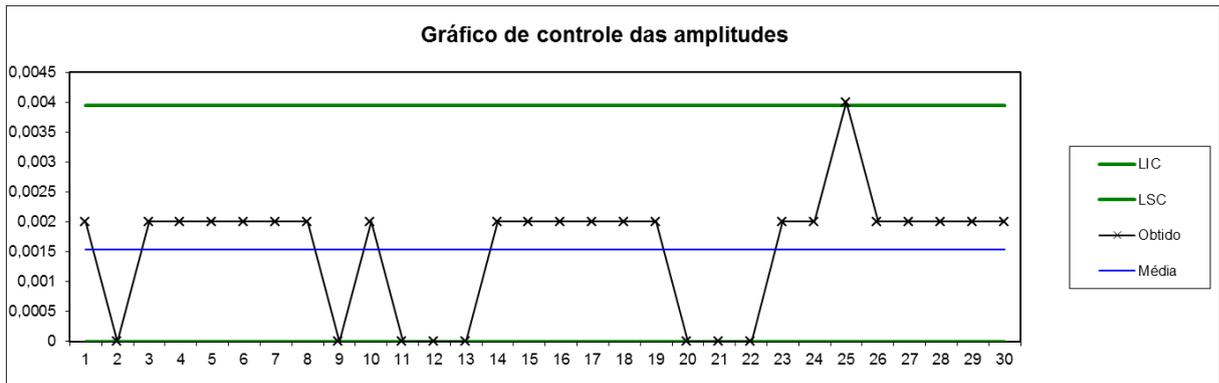


Fonte: Autor (2017).

Os valores oscilaram muito próximos do valor convencional do peso padrão. No entanto, os pontos fora de controle se deram principalmente devido ao fato de que uma pequena variação da medição resulta numa diferença considerável de resposta, pois a resolução é de 0,002 g e os limites de controle não levam em consideração que as medidas são sempre números pares.

O gráfico de amplitude apresentado na Figura 12 vem em sequência:

Figura 12 – Gráfico de controle da balança para amplitudes.



Fonte: Autor (2017).

É possível observar que há apenas um ponto levemente fora de controle, o que se deve principalmente a arredondamentos de cálculo e à resolução que só mede valores pares. Considerando essa característica do dispositivo, então o limite seria exatamente em 0,004 g, inclusive é por causa de uma única amplitude alta que o limite superior ficou nessa faixa.

As incertezas padrão pela linearidade e de repetitividade são calculadas conforme a seção 2.2.2 deste trabalho e devem ser comparadas com as outras incertezas padrão pela tendência e de repetitividade calculadas nos outros estudos. Os valores obtidos são $u_{BI} = 0,00015$ g e $u_{EVR} = 0,00127$ g.

5.2.3 Repetitividade e Reprodutibilidade:

Novamente foram usadas dez moedas de dez centavos (R\$ 0,10) da primeira geração do Real. O estudo foi feito com três operadores medindo três vezes cada moeda. Os valores obtidos seguem listados na Tabela 16:

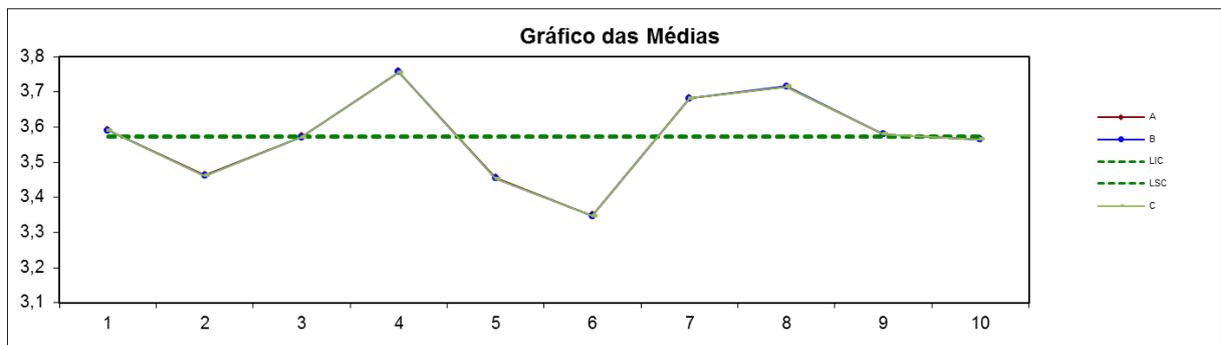
Tabela 16 - Dados de repetitividade e reprodutibilidade da balança.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Avaliador A:	A										
Medida 1	3,590	3,464	3,572	3,756	3,456	3,348	3,682	3,712	3,578	3,566	
Medida 2	3,590	3,462	3,572	3,756	3,454	3,348	3,682	3,714	3,58	3,564	
Medida 3	3,590	3,462	3,572	3,756	3,456	3,348	3,682	3,714	3,578	3,564	
Média	3,590	3,463	3,572	3,756	3,455	3,348	3,682	3,713	3,579	3,565	3,57227
Amplitude	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,00100
Avaliador B:	B										
Medida 1	3,590	3,462	3,570	3,758	3,456	3,346	3,684	3,716	3,580	3,566	
Medida 2	3,590	3,462	3,572	3,754	3,454	3,348	3,680	3,716	3,578	3,564	
Medida 3	3,590	3,462	3,572	3,756	3,454	3,348	3,682	3,716	3,580	3,566	
Média	3,590	3,462	3,571	3,756	3,455	3,347	3,682	3,716	3,579	3,565	3,57240
Amplitude	0,000	0,000	0,002	0,004	0,002	0,002	0,004	0,000	0,002	0,002	0,00180
Avaliador C:	C										
Medida 1	3,590	3,460	3,570	3,754	3,452	3,348	3,682	3,714	3,580	3,566	
Medida 2	3,590	3,462	3,572	3,756	3,454	3,346	3,682	3,714	3,578	3,564	
Medida 3	3,592	3,462	3,572	3,754	3,454	3,348	3,682	3,716	3,580	3,564	
Média	3,591	3,461	3,571	3,755	3,453	3,347	3,682	3,715	3,579	3,565	3,57193
Amplitude	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,002	0,00180

Fonte: Autor (2017).

Os gráficos de média e amplitude para a balança foram elaborados usando as mesmas equações de limites de controle apresentadas para o micrômetro. As Figuras 13 e 14 a seguir apresentam as médias e as amplitudes dos operadores para cada moeda:

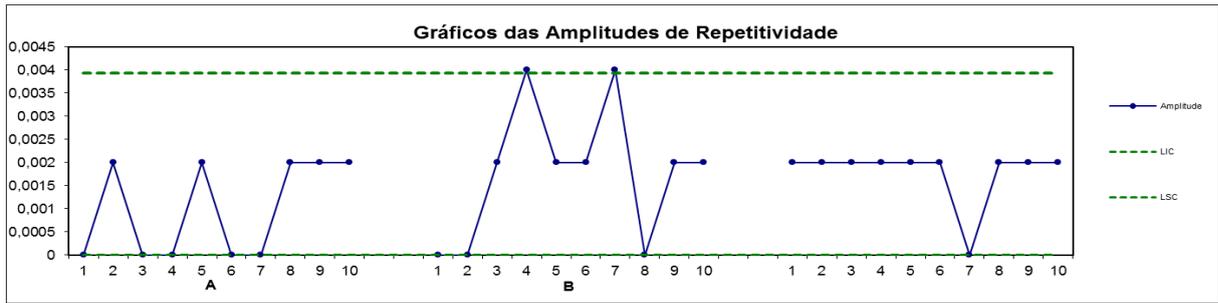
Figura 13 – Gráfico das médias das massas das moedas.



Fonte: Autor (2017).

As médias apresentaram comportamento muito semelhante, é difícil distinguir os valores dos operadores entre si, houve boa concordância entre eles, além de que mais de 50% dos valores obtidos ficaram fora dos limites de controle, atendendo ao MSA.

Figura 14 – Gráfico das amplitudes de cada operador, balança.



Fonte: Autor (2017).

Novamente aconteceram dois pontos fora de controle devido à variação implícita à resolução e a questões de arredondamento. É injusto rejeitar o sistema sem considerar esses dois fatos. Os resultados da ANOVA, ainda à frente, revelarão o real comportamento do sistema.

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise de variância para a balança.

Tabela 17 – Resultados da ANOVA da balança.

Fonte	GL	SQ	QM	Variância	σ	Fobtido	Valor P	6 σ	%
R&R				1,2E-06	0,0011			0,0066	1,1
Equipamento (VE)	60	6,6667E-05	1,1111E-06	1,11E-06	0,00105			0,0063	1,0
Avaliador (VA)	2	3,4667E-06	1,7333E-06	1,32E-08	0,00011			0,00066	0,1
Avaliador por amostra	18	2,4089E-05	1,3383E-06	7,57E-08	0,00028	1,204444	0,287	0,00168	0,3
Amostras (VP)	9	1,28586618	0,14287402	0,015875	0,126			0,756	121,9
Total (VT)	89	1,2859604		0,015876	0,126			0,756	
NÃO EXISTE INTERAÇÃO DE AVALIADOR POR PEÇA									
								ndc = 132	

Fonte: Autor (2017).

Pode-se observar que pelo teste de Fisher, o valor P é maior que 0,05 e, portanto não existe interação significativa entre operador e peça. A incerteza calculada por interação é então atribuída ao equipamento, bem como os graus de liberdade. A Tabela 18 apresenta os valores de variância para a balança considerando a inexistência de interação:

Tabela 18 – Resultados da ANOVA sem interação para a balança.

Fonte	GL	SQ	QM	Variância	σ		6 σ	%
R&R				1,18E-06	0,00109	DADOS VÁLIDOS, QUANDO NÃO HÁ INTERAÇÃO DE AVALIADOR POR PEÇA	0,00654	1,1
Equipamento (VE)	78	9,0756E-05	1,1635E-06	1,16E-06	0,00108		0,00648	1,0
Avaliador (VA)	2	3,4667E-06	1,7333E-06	1,9E-08	0,00014		0,00084	0,1
Amostras (VP)	9	1,28586618	0,14287402	0,015875	0,126		0,756	121,9
Total (VT)				0,015876	0,126		0,756	
							ndc = 133	

Fonte: Autor (2017).

Como se pode observar, os valores de repetitividade e reprodutibilidade são muito pequenos, ou seja, há concordância entre os operadores e o dispositivo repete as medidas muito bem. Esses baixos níveis de variância levam a um R&R de 1,1%.

Portanto, os pontos fora de controle vistos anteriormente são evidentemente fruto da resolução. Mesmo assim, a resolução é adequada, porque passa no critério de 5% da tolerância e o ndc é de 133.

Da mesma forma como foi feito com o micrômetro, o VDA usa os valores de VE e VA nas incertezas de repetitividade da peça e de reprodutibilidade dos operadores, porém a incerteza devido à interação (u_{IA}) será nula.

5.2.4 Tendência:

Para o estudo de tendência foram feitas 25 medições repetidas numa das dez moedas do estudo de R&R com valor convencional conhecido de 3,6212 g. As medidas obtidas e os valores de erro de medição de cada medida estão a seguir na Tabela 19:

Tabela 19 – Medições para análise de tendência da balança.

	Medição (g)	Erro de medição (g)
1	3,620	-0,0012
2	3,620	-0,0012
3	3,620	-0,0012
4	3,620	-0,0012
5	3,620	-0,0012
6	3,620	-0,0012
7	3,620	-0,0012
8	3,618	-0,0032
9	3,618	-0,0032
10	3,618	-0,0032
11	3,620	-0,0012
12	3,620	-0,0012
13	3,618	-0,0032
14	3,620	-0,0012
15	3,620	-0,0012
16	3,618	-0,0032
17	3,620	-0,0012
18	3,620	-0,0012
19	3,620	-0,0012
20	3,618	-0,0032
21	3,618	-0,0032
22	3,618	-0,0032
23	3,618	-0,0032
24	3,620	-0,0012
25	3,620	-0,0012

Fonte: Autor (2017).

O valor de tendência é de $-0,00192$ g e o desvio padrão da repetitividade é de $0,00098$ g. A estatística t para o teste de hipótese foi calculada e é igual a $9,798$. O valor de t tabelado para 24 graus de liberdade e p igual a $0,975$ é de $2,064$ e, portanto a tendência é significativamente diferente de zero.

O sistema de medição seria considerado incapaz só por causa da tendência, porém se comparada com o erro máximo admissível, a tendência não chega a 10% do erro. Além de que isso tudo é apenas devido à resolução, novamente, pois devido à variação de uma unidade na resolução leva a uma contribuição considerável nos valores de tendência.

A incerteza associada à tendência (u_{BI}) é de $0,00111$ g e a incerteza de repetitividade em padrões (u_{EVR}) é de $0,00098$ g.

5.2.5 Linearidade:

Para a balança foi feita uma análise de regressão com cinco peças que, apesar de não serem todos padrões nem peças, foram selecionadas para garantir que toda a faixa até 10 g fosse abrangida. A Figura 15 apresenta dois pesos padrão e três moedas (duas de dez centavos, primeira e segunda geração, e uma de um real).

Figura 15 – Peças para análise de linearidade da balança.



Fonte: Autor (2017).

Foram realizadas doze medições em cada peça. Os valores coletados foram dispostos na Tabela 20 abaixo:

Tabela 20 – Medições para análise de linearidade da balança.

Padrão	A	B	C	D	E
VC	1,9708	3,6212	4,7651	6,9221	10,0049
M 1	1,972	3,620	4,762	6,918	9,996
M 2	1,970	3,620	4,764	6,918	9,998
M 3	1,972	3,620	4,762	6,916	9,996
M 4	1,970	3,618	4,762	6,918	9,998
M 5	1,970	3,620	4,762	6,916	9,998
M 6	1,970	3,618	4,760	6,918	9,996
M 7	1,970	3,620	4,762	6,918	9,998
M 8	1,972	3,618	4,762	6,916	9,998
M 9	1,970	3,620	4,760	6,916	9,998
M 10	1,970	3,620	4,764	6,918	9,998
M 11	1,970	3,620	4,762	6,918	9,998
M 12	1,970	3,618	4,762	6,920	9,996
Média	1,9705	3,61933	4,762	6,9175	9,99733
Tendência	-0,0003	-0,0019	-0,0031	-0,0046	-0,0076

Fonte: Autor (2017).

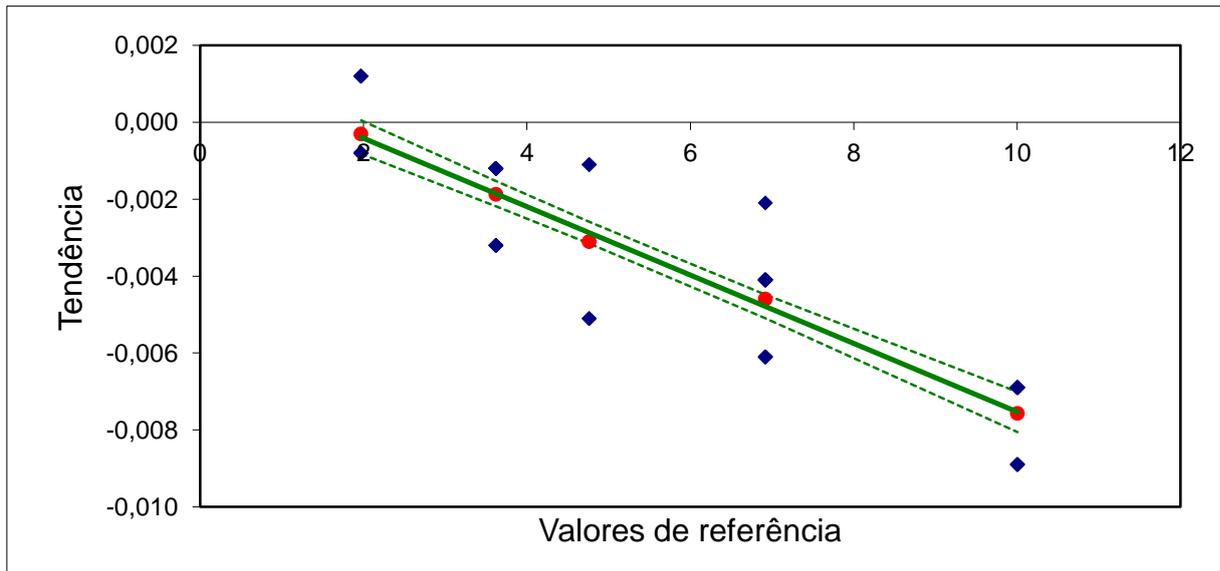
As letras A, B, C, D e E na Tabela 20 representam respectivamente o padrão menor, dez centavos primeira geração, dez centavos segunda geração, um real e padrão maior.

A partir dos dados foi obtida a reta de regressão linear de tendência no formato $y = ax + b$. A função que descreve a reta é a seguinte:

$$y = -0,0008894x + 0,001367$$

O gráfico que representa a linearidade e seu intervalo de confiança é apresentado na Figura 16:

Figura 16 – Linearidade da balança.



Fonte: Autor (2017).

Apenas observando o gráfico é possível afirmar que há problema de linearidade, porque a linha de tendência zero não está contida na faixa de confiança.

O desvio padrão de variabilidade da repetitividade (VE ou u_{EVR}) é 0,000019 g.

O teste de hipótese é aplicado para os coeficientes angular a e linear b da função. Os valores de t calculado e tabelado para cada caso são apresentados na Tabela 21:

Tabela 21 – Teste de hipótese para linearidade e tendência.

Coeficiente angular a			Coeficiente linear b		
$t_{a\text{cal:}}$	18,206		$t_{b\text{cal:}}$	4,566	
$t_{a\text{tab:}}$	2,002		$t_{b\text{tab:}}$	2,002	
Valor P:	0,000		Valor P:	0,000	
Linearidade significativamente diferente ZERO			Tendência significativamente diferente ZERO		

Fonte: Autor (2017).

A análise numérica comprova que o problema de linearidade é real e por isso o sistema de medição deve ser usado somente com aprovação do cliente. No entanto, como se pode observar no estudo acima, em torno da faixa de peso da moeda de dez centavos primeira geração, a tendência é pequena, muito menor que o erro máximo admissível. Se a aplicação da balança for somente para essa faixa em torno da moeda, rejeitar o sistema seria imprudente, uma vez que pra essa aplicação específica, a balança é totalmente capaz.

A incerteza devido à linearidade é calculada através de uma ANOVA para a correção do erro do sistema, seu valor é de $u_{LIN} = 0,000632$, porém como o sistema não será corrigido a incerteza de linearidade fica atribuída à incerteza pela tendência. Ou seja, $u_{LIN} = 0$ e a incerteza de tendência é em função do maior valor de tendência obtido na regressão, nesse caso $u_{BI} = 0,00437$.

5.2.6 Incerteza de calibração:

A incerteza obtida em função do certificado de calibração foi $u_{CAL} = 0,001$ g. O certificado se encontra ao final do trabalho como Anexo C.

5.2.7 Incerteza de repetitividade num padrão de referência:

O valor de incerteza de repetitividade u_{EVR} obtida na análise de tendência foi de 0,00098 g, porém comparando com os outros valores de repetitividade, o escolhido deve ser o maior deles, que no caso é proveniente da quarta peça do estudo de linearidade (moeda de 1 real) e tem valor de 0,00124 g.

5.2.8 Incerteza por não homogeneidade:

Essa incerteza não é levada em consideração porque erros de forma ou dimensão das peças não afetam a medição da massa.

5.2.9 Incerteza pela temperatura:

Havendo controle de temperatura e sabendo que a análise do efeito da temperatura é somente dimensional, as possíveis diferenças de dilatação entre peça e balança não interferem no peso, logo não há incerteza atribuída à temperatura.

5.2.10 Incerteza devido à excentricidade

É uma incerteza devido a outro componente de influência. Foi obtida do certificado de calibração e é igual ao maior erro de excentricidade dividido por $\sqrt{3}$, o que resulta em $u_{REST} = 0,00231$ g.

5.2.11 Incerteza combinada do equipamento de medição:

A incerteza combinada é mais bem retratada como um balanço de incertezas. A Tabela 22 a seguir apresenta as diferentes fontes de incerteza para o micrômetro:

Tabela 22 – Incertezas padrão do dispositivo, balança.

Fonte de incerteza	Símbolo	Incerteza (g)
Resolução do equipamento	u_{RE}	0,00058
Incerteza de calibração	u_{CAL}	0,001
Repetitividade no padrão	u_{EVR}	0,00127
Linearidade	u_{LIN}	
Tendência	u_{BI}	0,00437
Outros componentes	u_{REST}	
Incerteza combinada do equipamento	u_{MS}	0,00466

Fonte: Autor (2017).

É importante notar que toda vez que houve mais de um valor calculado pra uma das incertezas, usa-se o maior valor. Por exemplo, a da repetitividade é proveniente do estudo de estabilidade e a de tendência é proveniente do estudo de linearidade.

Em função desses valores é possível avaliar a capacidade e a tolerância do equipamento. Os valores analisados são apresentados na Tabela 23:

Tabela 23 – Resultados do dispositivo, balança.

Resultados avaliados	Valor obtido
Tolerância (g)	$TOL = 0,62$
Resolução	$RE = 0,3\%$
Incerteza padrão combinada (g)	$u_{MS} = 0,00466$
Incerteza expandida de medição (g)	$U_{MS} = 0,00932$
Quociente limite de capacidade	$Q_{MS-máx} = 15\%$
Quociente de capacidade	$Q_{MS} = 3,01\%$

Fonte: Autor (2017).

5.2.12 Incerteza combinada do sistema de medição:

Da mesma forma, a incerteza do sistema de medição será apresentada a seguir na Tabela 24:

Tabela 24 – Incertezas padrão do sistema de medição, balança.

Fonte de incerteza	Símbolo	Incerteza (g)
Resolução do equipamento	u_{RE}	0,00058
Incerteza de calibração	u_{CAL}	0,001
Repetitividade	u_{EVR}	0,00127
Linearidade	u_{LIN}	
Tendência	u_{BI}	0,00437
Repetitividade na peça	u_{EVO}	0,00108
Reprodutibilidade dos operadores	u_{AV}	0,00014
Incerteza por interações	u_{IA}	
Incerteza por não homogeneidade	u_{OBJ}	
Temperatura	u_T	
Outros componentes	u_{REST}	0,00231
Incerteza combinada do sistema	u_{MP}	0,00520

Fonte: Autor (2017).

Com esses valores, então é possível obter a capacidade do sistema de medição. Os valores resultantes estão relacionados na Tabela 25:

Tabela 25 – Resultados do sistema de medição, balança.

Resultados avaliados	Valor obtido
Incerteza padrão combinada (g)	0,00520
Incerteza padrão expandida (g)	0,0104
Quociente de capacidade limite	30%
Quociente de capacidade	3,36 %

Fonte: Autor (2017).

Novamente é possível observar que o sistema é capaz de atender às necessidades de medição. Se todo o estudo não tivesse sido feito, o sistema teria sido rejeitado só por causa de sua linearidade, quando na verdade seus valores de R&R foram muito bons, devido à alta repetitividade da balança.

6 CONCLUSÕES

Os dois manuais são eficazes na avaliação dos sistemas de medição e por isso são aplicados inclusive fora do setor automotivo. Talvez seja possível que o ambiente industrial contribua significativamente para a melhoria dos métodos, apresentando problemas específicos enfrentados em seus sistemas de medição, que, se ouvidos pelos editores dos manuais, podem reduzir os problemas de não conformidade tão comuns no setor produtivo.

A metodologia integrada é plausível e aparenta ser promissora. Juntando as recomendações do MSA e do VDA 5, a base de dados levantada para validar o sistema de medição se torna mais sólida. Ao fazer duas avaliações simultâneas, maiores evidências do real comportamento do sistema de medição são obtidas e a capacidade do mesmo pode ser definida com propriedade.

É interessante observar que os critérios do MSA são rígidos e, na ausência de outras avaliações, rejeita sistemas que poderiam ser capazes de atender satisfatoriamente as necessidades da produção. Utilizando a análise do VDA 5 como um complemento, é possível demonstrar estatisticamente que esses sistemas rejeitados são aceitáveis, como se observa no estudo de caso apresentado. Nos casos em que o cliente escolhe se aprova ou não um sistema de medição, por exemplo, R&R entre 10% e 30%, apresentar a análise do VDA 5 como um argumento pode transmitir confiabilidade e compromisso real com a qualidade, fazer com que o cliente perceba que o sistema é aceitável, mesmo não cumprindo um critério de avaliação.

O objetivo dos usuários é certificar aos clientes de que seus sistemas de medição são capazes de atender aos requisitos, mas o uso combinado dos manuais pode ser também uma maneira de certificar a rejeição de um sistema de medição. Quando um resultado é ruim, realizar uma segunda avaliação pode ser a melhor maneira de comprovar a ineficácia do sistema de medição.

Mesmo em face dos bons resultados obtidos, alguns pontos deveriam ser revisados pelos autores dos manuais, como o ndc para o MSA e a avaliação de linearidade para o VDA 5 num sistema não corrigido.

REFERÊNCIAS

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Análise dos Sistemas de Medição, MSA.** Manual de Referência, 4ª ed. AIAG, 2010.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Controle Estatístico do Processo, CEP.** Manual de Referência, 2ª ed. AIAG, 2005.

VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE. **VDA 5, Capacidade dos Processos de Medição.** 2ª ed. VDA, Berlim, 2011.

PANDIRIPALLI, B. **Repeatability and reproducibility studies: a comparison of techniques.** 49 p. Degree of Master of Science Thesis – Department of Industrial and Manufacturing Engineering, School of Wichita State University, 2010.

HOYLE, D. **Automotive Quality Systems Handbook.** 2ª ed. Elsevier, set. 2005.

DIETRICH, E. Vergleich von MSA und VDA Band 5: Wo liegen die Unterschiede? **QZ** v. 56, p 30-34, 2011, traduzido em inglês.

GARCÍA, A. C.; DEL RÍO, A. G. Number of distinct data categories and gage repeatability and reproducibility. A double (but single) requirement. **Measurement.** Elsevier, v. 46, 8ª ed, p. 2514-2518, out. 2013.

DRÉGELYI-KISS, A.; CZIFRA, A. Measurement uncertainty and gauge capability of surface roughness measurements in the automotive industry: a case study. **Surface Topography: Metrology and Properties.** IOPscience, v. 2, n. 3, jul./set. 2014.

SANTOS, C. M.; CAMARGO, L. G.; DRECHSLER, M. F. **Estudo de caso: Aplicação de MSA e CEP para balança de precisão.** 1º semestre 2016. 14 p. Trabalho acadêmico avaliativo – Disciplina EMB 5311 Controle Estatístico da Qualidade, ministrada pela Professora Sueli Fischer Beckert, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/DIS 22514-7 2011 Statistical methods in process management – Capability and performance – Part 7: Capability of measurement processes.** ISO, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9001:2015 Quality management systems - Requirements.** 5ª ed. ISO, set. 2015.

INTERNATIONAL AUTOMOTIVE TASK FORCE. **IATF 16949:2016 Norma de Sistema de Gestão da Qualidade Automotiva.** 1ª ed. AIAG, ANFIA, FIEV, SMMT e VDA, out. 2016.

ANEXO A

Valores associados com a Distribuição da Amplitude das Médias

Número de Subgrupos (g)	Tamanho do Subgrupo (m)																			
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	1.0	2.0	2.9	3.8	4.7	5.5	6.3	7.0	7.7	8.3	9.0	9.6	10.2	10.8	11.3	11.9	12.4	12.9	13.4	
1.41421	1.91155	2.23887	2.48124	2.67253	2.820981	2.93888	3.03009	3.10794	3.17505	3.23378	3.28463	3.32816	3.36486	3.39533	3.42011	3.44077	3.45791	3.47198	3.48357	
2	1.9	3.8	5.7	7.5	9.2	10.8	12.3	13.8	15.1	16.5	17.8	19.0	20.2	21.3	22.4	23.5	24.5	25.5	26.5	
1.27931	1.80538	2.15069	2.40484	2.60438	2.76779	2.90562	3.02446	3.12869	3.22134	3.30463	3.38017	3.44922	3.51287	3.57156	3.62625	3.67734	3.72524	3.77032	3.81302	
3	2.8	5.7	8.4	11.1	13.6	16.0	18.3	20.5	22.6	24.6	26.5	28.4	30.1	31.9	33.5	35.1	36.7	38.2	39.7	
1.23105	1.76858	2.12049	2.37883	2.58127	2.74681	2.88628	3.00643	3.11173	3.20526	3.28931	3.36550	3.43512	3.49927	3.55842	3.61351	3.66495	3.71319	3.75857	3.80187	
4	3.7	7.5	11.2	14.7	18.1	21.3	24.4	27.3	30.1	32.7	35.3	37.7	40.1	42.4	44.6	46.7	48.8	50.8	52.8	
1.20621	1.74989	2.10522	2.36571	2.56964	2.73626	2.87656	2.99737	3.10321	3.19720	3.28163	3.35815	3.42805	3.49246	3.55183	3.60712	3.65875	3.70715	3.75268	3.79688	
5	4.6	9.3	13.9	18.4	22.6	26.6	30.4	34.0	37.5	40.8	44.0	47.1	50.1	52.9	55.7	58.4	61.0	63.5	65.9	
1.19105	1.73857	2.09601	2.35781	2.56263	2.72991	2.87071	2.99192	3.09808	3.19235	3.27501	3.34836	3.41428	3.47381	3.52806	3.57811	3.62496	3.66871	3.70946	3.74721	
6	5.5	11.1	16.7	22.0	27.0	31.8	36.4	40.8	45.0	49.0	52.8	56.5	60.1	63.5	66.8	70.0	73.1	76.1	79.1	
1.18083	1.73099	2.08985	2.35253	2.55795	2.72667	2.86680	2.98829	3.09467	3.18911	3.27392	3.35077	3.42097	3.48563	3.54522	3.60072	3.65253	3.70109	3.74678	3.78988	
7	6.4	12.9	19.4	25.6	31.5	37.1	42.5	47.6	52.4	57.1	61.6	65.9	70.0	74.0	77.9	81.6	85.3	88.8	92.2	
1.17348	1.72555	2.08543	2.34875	2.55460	2.72263	2.86401	2.98568	3.09222	3.18679	3.27172	3.34866	3.41894	3.48368	3.54333	3.59888	3.65075	3.69936	3.74509	3.78859	
8	7.2	14.8	22.1	29.2	36.0	42.4	48.5	54.3	59.9	65.2	70.3	75.2	80.0	84.6	89.0	93.3	97.4	101.4	105.3	
1.16794	1.72147	2.08212	2.34591	2.55208	2.72036	2.86192	2.98373	3.09039	3.18506	3.27006	3.34708	3.41742	3.48221	3.54192	3.59751	3.64941	3.69806	3.74382	3.78682	
9	8.1	16.6	24.9	32.9	40.4	47.7	54.5	61.1	67.3	73.3	79.1	84.6	90.0	95.1	100.1	104.9	109.5	114.1	118.5	
1.16361	1.71828	2.07953	2.34370	2.55013	2.71858	2.86028	2.98221	3.08896	3.18370	3.26878	3.34585	3.41624	3.48107	3.54081	3.59644	3.64838	3.69705	3.74284	3.78684	
10	9.0	18.4	27.6	36.5	44.9	52.9	60.6	67.8	74.8	81.5	87.9	94.0	99.9	105.6	111.2	116.5	121.7	126.7	131.6	
1.16014	1.71573	2.07746	2.34192	2.54856	2.71717	2.85898	2.98100	3.08781	3.18262	3.26775	3.34486	3.41529	3.48016	3.53993	3.59559	3.64755	3.69625	3.74205	3.78625	
11	9.9	20.2	30.4	40.1	49.4	58.2	66.6	74.6	82.2	89.6	96.6	103.4	109.9	116.2	122.3	128.1	133.8	139.4	144.7	
1.15729	1.71363	2.07577	2.34048	2.54728	2.71600	2.85791	2.98000	3.08688	3.18174	3.26690	3.34406	3.41452	3.47941	3.53921	3.59489	3.64687	3.69558	3.74141	3.78541	
12	10.7	22.0	33.1	43.7	53.8	63.5	72.6	81.3	89.7	97.7	105.4	112.7	119.9	126.7	133.3	139.8	146.0	152.0	157.9	
1.15490	1.71189	2.07436	2.33927	2.54621	2.71504	2.85702	2.97917	3.08610	3.18100	3.26620	3.34339	3.41387	3.47879	3.53861	3.59430	3.64630	3.69503	3.74087	3.78487	
13	11.6	23.8	35.8	47.3	58.3	68.7	78.6	88.1	97.1	105.8	114.1	122.1	129.8	137.3	144.4	151.4	158.1	164.7	171.0	
1.15289	1.71041	2.07316	2.33824	2.54530	2.71422	2.85627	2.97847	3.08544	3.18037	3.26561	3.34282	3.41333	3.47826	3.53810	3.59381	3.64582	3.69457	3.74041	3.78441	
14	12.5	25.7	38.6	51.0	62.8	74.0	84.7	94.9	104.6	113.9	122.9	131.5	140.9	149.8	158.3	166.6	174.6	182.4	190.7	
1.15115	1.70914	2.07213	2.33737	2.54452	2.71351	2.85562	2.97787	3.08487	3.17984	3.26510	3.34233	3.41286	3.47781	3.53766	3.59339	3.64541	3.69417	3.74002	3.78402	
15	13.4	27.5	41.3	54.6	67.2	79.3	90.7	101.6	112.1	122.1	131.7	140.9	149.8	158.3	166.6	174.6	182.4	190.7	197.3	
1.14965	1.70804	2.07125	2.33661	2.54385	2.71290	2.85506	2.97735	3.08438	3.17938	3.26465	3.34191	3.41245	3.47742	3.53728	3.59302	3.64505	3.69382	3.73969	3.78369	
16	14.3	29.3	44.1	58.2	71.7	84.5	96.7	108.4	119.5	130.2	140.4	150.2	159.7	168.9	177.7	186.3	194.6	202.6	210.4	
1.14833	1.70708	2.07047	2.33594	2.54326	2.71237	2.85457	2.97689	3.08395	3.17897	3.26427	3.34154	3.41210	3.47707	3.53695	3.59270	3.64474	3.69351	3.73939	3.78339	
17	15.1	31.1	46.8	61.8	76.2	89.8	102.8	115.1	127.0	138.3	149.2	159.6	169.7	179.4	188.8	197.9	206.7	215.2	223.6	
1.14717	1.70623	2.06978	2.33535	2.54274	2.71190	2.85413	2.97649	3.08358	3.17861	3.26393	3.34121	3.41178	3.47677	3.53666	3.59242	3.64447	3.69325	3.73913	3.78313	
18	16.0	32.9	49.5	65.5	80.6	95.1	108.8	121.9	134.4	146.4	157.9	169.0	179.7	190.0	199.9	209.5	218.8	227.9	236.7	
1.14613	1.70547	2.06917	2.33483	2.54228	2.71148	2.85375	2.97613	3.08324	3.17829	3.26362	3.34092	3.41150	3.47650	3.53640	3.59216	3.64422	3.69301	3.73890	3.78290	
19	16.9	34.7	52.3	69.1	85.1	100.3	114.8	128.7	141.9	154.5	166.7	178.4	189.6	200.5	211.0	221.1	231.0	240.5	249.8	
1.14520	1.70480	2.06862	2.33436	2.54187	2.71111	2.85341	2.97581	3.08294	3.17801	3.26335	3.34066	3.41125	3.47626	3.53617	3.59194	3.64400	3.69280	3.73869	3.78269	
20	17.8	36.5	55.0	72.7	89.6	105.6	120.9	135.4	149.3	162.7	175.5	187.8	199.6	211.0	222.1	232.8	243.1	253.2	263.0	
1.14437	1.70419	2.06813	2.33394	2.54149	2.71077	2.85310	2.97552	3.08267	3.17775	3.26311	3.34042	3.41103	3.47605	3.53596	3.59174	3.64380	3.69260	3.73850	3.78250	
d ₂	1.12838	1.69257	2.05875	2.32593	2.53441	2.70436	2.8472	2.97003	3.07751	3.17287	3.25846	3.33598	3.40676	3.47193	3.53198	3.58788	3.64006	3.68896	3.735	
cd	0.876	1.815	2.7378	3.623	4.4658	5.2673	6.0305	6.7582	7.4539	8.1207	8.7602	9.3751	9.9679	10.5396	11.0913	11.6259	12.144	12.6468	13.1362	

Entradas da Tabela: Na primeira linha de cada célula estão os graus de liberdade (v) e na segunda linha estão os valores de d_2^* ; os valores d_2^* constituem os limites das séries infinitas de d_2^* ; valores adicionais de v podem ser obtidos a partir da diferença constante cd.

Nota: A notação utilizada nesta tabela segue a da Acheson Duncan *Quality Control and Industrial Statistics*, 5a. edição, McGraw-Hill, 1986.

$v \sqrt{(\bar{R} / d_2^*)^2 / \sigma^2}$ está distribuída aproximadamente como a distribuição de χ^2 , com v graus de liberdade e onde R é a média das amplitudes de g subgrupos de tamanho m.

Certificado de calibração n° **DIM-001**

Folha: 01/02

1 – DADOS:

Solicitante: METeQ

Denominação: Micrômetro externo

Faixa Nominal: 0 – 25 mm

Resolução indicada: 0,001 mm

Fabricante: Mitutoyo

N° do instrumento: ME-001

Data de calibração: 19/10/2017

2 - DEFINIÇÕES:

Valor Convencional (VC): valor atribuído ao padrão utilizado.

Erro de indicação: Diferença entre o valor medido no micrômetro e o valor convencional do bloco-padrão.

Erro de paralelismo: Desvio máximo obtido entre as duas faces de medição.

Erro de planeza: Desvio da forma plana, avaliada em cada face de medição.

3 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

PROC-001-01 revisão 01: Calibração de micrômetro – hastes fixas.

Os erros de indicação foram obtidos através da comparação com blocos-padrão, tendo contato total com as faces de medição. Foram realizados dois ciclos de medição.

O erro de paralelismo foi determinado em quatro posições distintas, deslocadas em aproximadamente ¼ de volta do fuso, através da utilização de paralelos ópticos.

O erro de planeza foi medido em cada face de medição, tendo como referência o plano calibrado de um paralelo óptico.

Não foi realizado ajuste no instrumento de medição.

Condições ambientais: 20°C ± 1°C

4 - PADRÃO UTILIZADO:

Jogo de blocos-padrão (P-101), calibrado em 9 de janeiro de 2016, por *ReferenciaPlus* – Certificado de calibração – RF-001. Próxima calibração: 01/2019.

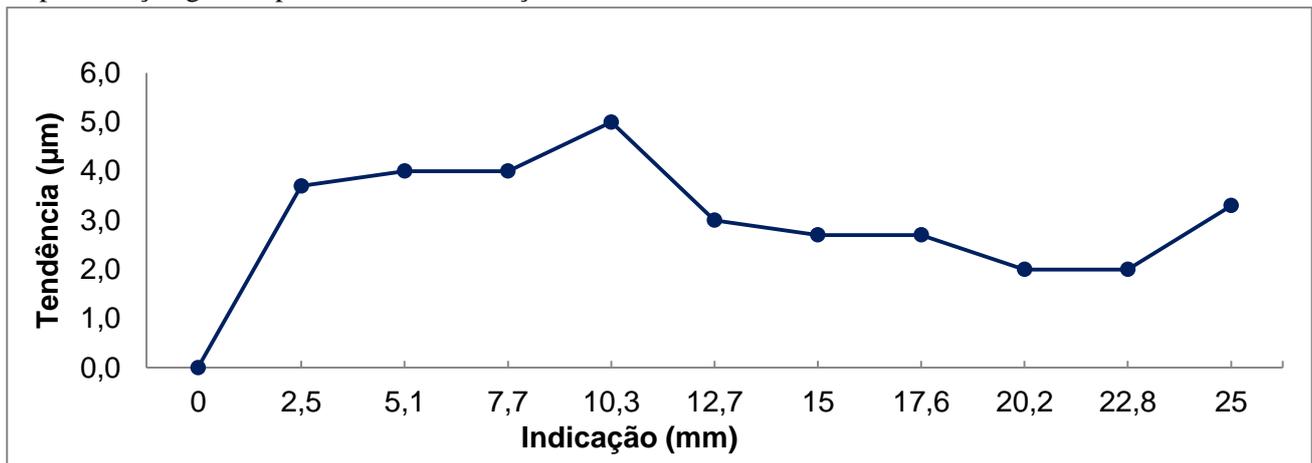
Jogo de paralelos ópticos (P-102), calibrado em 16 de setembro de 2015, por *ReferenciaPlus* – Certificado de calibração – RF-002. Próxima calibração: 09/2018.

Certificado de calibração n° **DIM-001**

5 - RESULTADOS:

Característica	Maior valor medido (μm)	U (μm)	k	v_{eff}
Erro de paralelismo	1,28	0,4	2,00	∞
Erro de planeza	0,3	0,2	2,00	∞
Erro de Indicação (contato total com as faces de medição)	5,0	1,7	2,09	30
Erro de Indicação (contato parcial com as faces de medição)		2,6	2,00	∞

Representação gráfica para o erro de indicação:



6 – OBSERVAÇÕES:

Para o cálculo de incerteza de medição do erro de indicação (contato parcial com as faces de medição) foram incluídas as fontes de incerteza devido ao erro de paralelismo e planeza das faces de medição.

Notas:

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k (apresentado acima), de tal forma que a probabilidade de abrangência corresponda a aproximadamente 95%.
- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.
- Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.

Certificado de calibração n° **DIM-015**

1 – DADOS:

Solicitante: METeQ

Denominação: Balança digital

Faixa Nominal: 50 g

Resolução indicada: 0,001 g

Classe: 2

Fabricante: -

N° do instrumento: BA-001

Data de calibração: 08/11/2017

Valor de divisão de verificação: 0,01 g

2 - DEFINIÇÕES:

Valor Convencional (V.C.): valor atribuído ao padrão utilizado.

Erro de indicação: Diferença entre o valor medido no centro da balança e o valor convencional do peso padrão;

Erro de excentricidade: Erro devido ao posicionamento da carga fora do centro do prato da balança.

3 - PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

PROC-C-006-01 revisão 01: Calibração de Balança Digital.

Os erros de indicação de medição e de excentricidade foram obtidos através da comparação com os pesos padrões.

Foram realizados cinco ciclos de medição no centro da balança para determinação do erro de indicação.

Para o erro de excentricidade, foi realizada uma medição em cada ponto pré-determinado.

Condições ambientais: 20°C ± 1°C

4 - PADRÃO UTILIZADO:

Jogo de Pesos Padrão (P-112), calibrado em 02 de fevereiro de 2017, por *ReferenciaPlus* – Certificado de calibração – RF-012. Próxima calibração: 01/2019.

Certificado de calibração nº **DIM-014**

Folha: 02/02

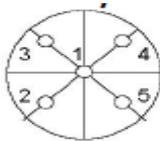
5 – RESULTADOS (g):

Medições Erro de indicação					
V.C. (g)	Média (g)	Erro de indicação (g)	Incerteza de medição (g)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (veff)
0,000	0,0000	-	-	-	-
1,9704	1,9722	-0,0018	0,001	2,06	40
4,9969	4,9960	-0,0009	0,002	2,65	5
6,9673	6,968	-0,0005	0,002	2,43	7
9,9969	9,9948	-0,0021	0,002	2,06	43
25,0050	24,9816	-0,0234	0,002	2,00	∞
35,0020	34,9748	-0,0272	0,002	2,06	43
49,9966	49,9592	-0,0374	0,002	2,06	43

*Os resultados referem-se à média de 5 ciclos de medição

Medições Erro de excentricidade				
Posição *	1-2	1-3	1-4	1-5
Valores (g)	-0,002	0,004	0,000	-0,002
Maior erro de excentricidade =				0,004

*As posições foram definidas de acordo com a figura a seguir



Notas:

- A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos correspondem a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 M:2013.
- Os resultados de (k) e (V_{eff}) estão na tabela de resultados de calibração.
- Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.
- Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.



Histórico	Produtos	Licitações	Mercado	Clube da Medalha	Sobre a CMB
Cédulas	Moedas e Medalhas	Gráfica Geral	Matrizes, Eng. Produtos		

Moedas e Medalhas

O Departamento de Moedas e Medalhas (DEMOM) possui capacidade anual de produção de cerca de 1,2 bilhões de unidades.

Além das moedas de circulação normal, são produzidas moedas numismáticas, com acabamento "proof" e medalhas comemorativas em metais nobres, como ouro, prata e outras ligas.

O parque de equipamentos em operação inclui prensas verticais de grande volume de produção, e horizontais, todas dotadas de controles eletrônicos.

Para a fabricação de moedas numismáticas e medalhas, são utilizadas prensas especiais. Diversos outros equipamentos servem à fabricação de ferramentas de cunhagem e à realização de diversos processos como fundição, laminação, corte e tratamento térmico do material destinado a medalhas e moedas "proof".

As matérias-primas empregadas na fabricação das moedas brasileiras são todas produzidas no país, e atendem às exigências impostas pelo Banco Central.

A Casa da Moeda dispõe agora, de uma moderna planta, recentemente instalada, para revestimento de discos de aço por eletrodeposição, em ligas de cobre e bronze, estando capacitada a realizar as operações finais da fabricação dos discos usados nas novas moedas do país, podendo, eventualmente atender encomendas do exterior. Dispõe, ainda, de modernos equipamentos automatizados para embalar as moedas, reduzindo, assim, ao máximo, as intervenções manuais na fase final do processo produtivo.

Informações Técnicas das Moedas em Circulação no Brasil

1) - Real (Família Original)

R\$	Diâmetro	Espessura	Peso	Material
01 Cent.	20,00 +/- 0,10	1,50 +/- 0,15	2,96 +/- 0,26	Aço Inoxidável
05 Cent.	21,00 +/- 0,10	1,50 +/- 0,15	3,27 +/- 0,28	Aço Inoxidável
10 Cent.	22,00 +/- 0,10	1,50 +/- 0,15	3,59 +/- 0,31	Aço Inoxidável
25 Cent.	23,50 +/- 0,10	1,70 +/- 0,15	4,78 +/- 0,42	Aço Inoxidável
50 Cent.	23,00 +/- 0,10	1,50 +/- 0,15	3,92 +/- 0,33	Aço Inoxidável
1 Real	24,00 +/- 0,10	1,50 +/- 0,15	4,27 +/- 0,36	Aço Inoxidável



Cunhagem de moedas



Desde a pesada fase da fundição de metais até a operação final de cunhagem, a fabricação de moedas e medalhas requer especificações apuradas de suas ligas metálicas e exigentes controles em suas fases operacionais de produção.