

- METROLOGIA

# UMA AVALIAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DOS ESTUDOS DE BRYAN SOBRE O PRINCÍPIO DE ABBÈ

**Benedito Di Giacomo**

**Alessandro Marques**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, CEP:13560-250, São Carlos, SP, Brasil.

E-mail: [amarques@sc.usp.br](mailto:amarques@sc.usp.br)

## **Resumo**

Fabricantes e usuários de Máquinas de Medir à Três Coordenadas têm grande interesse em desenvolver metodologias que permitam determinar e melhorar o desempenho destas máquinas. Este desempenho está relacionado com a capacidade de medição peças com a acuracidade requerida ou desejada. Como todo instrumento de medição, essas máquinas possuem erros que afetam a medição gerando o que convencionalmente se chama erro volumétrico. Atualmente, adota-se por hipótese a independência entre os erros individuais, de uma máquina durante o modelamento, através dos estudos de BRYAN, 1979 que reavaliou e propôs um novo enunciado para o princípio de ABBÈ para a medição de retilineidade de guias e da análise da geometria estrutural da máquina, verificou-se a dependência entre os erros de retilineidade e os angulares. Face ao exposto acima é o objetivo deste trabalho é expressar os erros angulares em função dos erros de retilineidade. Tal formulação permite minimizar o número de calibrações necessárias para o levantamento do erro volumétrico e, conseqüentemente, o tempo de máquina parada requerido para o levantamento de seu comportamento metrológico.

**Palavras-chave:** Máquina de medir a três coordenadas, Erro de retilineidade, Erro angular e Princípio de Abbè.

## **1. INTRODUÇÃO**

Na competição por maiores parcelas de mercado e com o advento do processo de globalização, as empresas tem procurado cruzar fronteiras com seus produtos. Tais produtos devem ter preços competitivos, promoções de vendas e sobretudo qualidade competitiva em mercados internacionais. Dentre muitos aspectos da qualidade um dos mais importantes é o produto estar de acordo com as especificações técnicas, o que garante a intercambiabilidade e a funcionalidade do mesmo. As especificações técnicas e as normas nacionais e internacionais existem para garantir a precisão durante a fabricação.

As Máquinas de Medir a Três Coordenadas (MM3Cs) neste novo contexto, tornam-se necessárias ao ambiente das indústrias que procuram sistemas de medição flexíveis, rápidos e confiáveis, para a execução do controle dimensional de peças manufaturadas (Sosa Cardoza, 1995).

Entretanto, estas máquinas são instrumentos fundamentalmente mecânicos, e estão sujeitas a erros (Hocken, 1980; Di Giacomo, 1986). Estes erros são inerentes à sua estrutura e nas Máquinas de Medir a Três Coordenadas afetam a qualidade da medição. Os movimentos indesejáveis de cada um dos componentes da máquina são conhecidos como erros geométricos.

Os erros geométricos são divididos em dois grupos, os erros de translação e os erros de rotação de corpo rígido. São considerados erros de translação os erros de posicionamento propriamente dito e de retilineidade, os erros de rotação são os erros conhecidos como *pitch*, *yaw* e *roll*. Se esses erros forem medidos, pode-se, através de um modelo matemático prever o erro total da máquina em todo o seu volume de trabalho (Donmez, 1986; Viera Sato, 1998).

Para determinar o comportamento metrológico de uma máquina é necessário que ela esteja inativa durante o período de calibração. Desta forma, o tempo de calibração requerido é um fator extremamente importante para as indústrias que buscam qualidade competitiva de seus produtos nacional e internacionalmente.

Um outro fator importante que afeta o tempo de máquina parada é o número de calibrações a realizar. Na modelagem das componentes dos erros volumétricos de máquinas adota-se a independência entre os erros de retilineidade e os angulares. Através dos estudos de J.B. BRYAN, 1979 que reavaliou e propôs um novo enunciado para o princípio de ABBÈ e da análise da geometria estrutural da máquina verificou-se a existência de uma dependência entre esse dois erros. Conhecida essa correlação, o número de calibrações necessárias para levantar o comportamento metrológico da máquina pode ser minimizado.

Face ao exposto acima é objetivo deste trabalho é apresentar uma formulação matemática para determinar a correlação entre o erro de retilineidade e o erro angular correspondente.

Para alcançar o objetivo proposto foram calibrados os erros de retilineidade na direção do eixo “X” devido ao movimento do eixo “Y” e o erro angular *yaw* “Y” de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas do tipo Ponte Móvel do Laboratório de Metrologia do LAMAFE - USP – São Carlos.

## 2. O PRINCÍPIO DE ABBÈ

O Professor Abbè em 1890 publicou no “Journal for Instrumental Information”, a primeira concepção a respeito do uso de escalas graduadas como sistema de medição de comprimentos e os benefícios obtidos caso estas escalas estivessem alinhadas com o comprimento a ser medido (BRYAN, 1979).

O primeiro e único princípio de projeto de máquinas ferramentas e da metrologia dimensional consiste na concepção de máquinas com o sistemas de medição colineares com os deslocamentos a serem medidos. Neste caso, diz-se que há concordância com o Princípio de Abbè. No entanto, a concepção de tais máquinas é praticamente impossível.

BRYAN, J.B., 1979 reavaliou e propôs um novo enunciado para o princípio de Abbè para situações em que o projeto de máquinas com o sistema de medição do deslocamento alinhado ao eixo de medição não era possível.

BRYAN estendeu o Princípio de Abbè para medição de retilineidade de guias. O Princípio de Bryan, diz o seguinte :

“Um sistema de medição de retilineidade deve estar em linha com o ponto funcional no qual a retilineidade é medida. Se isto não for possível, todas as guias que transferem a medição devem estar livres de movimento angular ou os dados do movimento angular devem ser usados nas compensações dos possíveis desvios.”

Nas Figuras de 1 a 3 pode ser observado o sistema interferométrico laser, fazendo a medição do erro de retilineidade e um nível eletrônico medindo o erro angular, e ainda, a

ilustração de alguns dos movimentos que podem ocorrer nas guias, mostrado em exagero para um melhor entendimento.

A Figura 1 mostra o movimento ao longo de uma guia que tem um desenho senoidal. A distância entre os dois pontos de contato do carro na guia, tem um espaçamento igual ao número inteiro de comprimentos de onda.

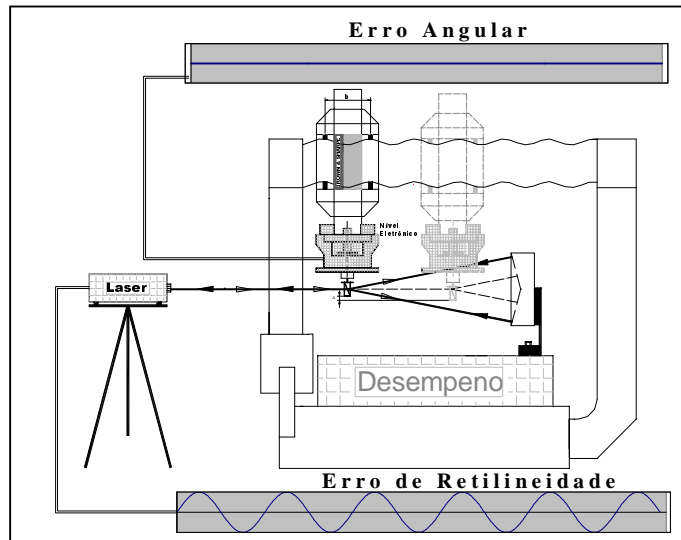


Figura 1 – Erro de retilidade e angular de uma guia ondulada e distâncias dos mancais “b” igual a um comprimento de onda.

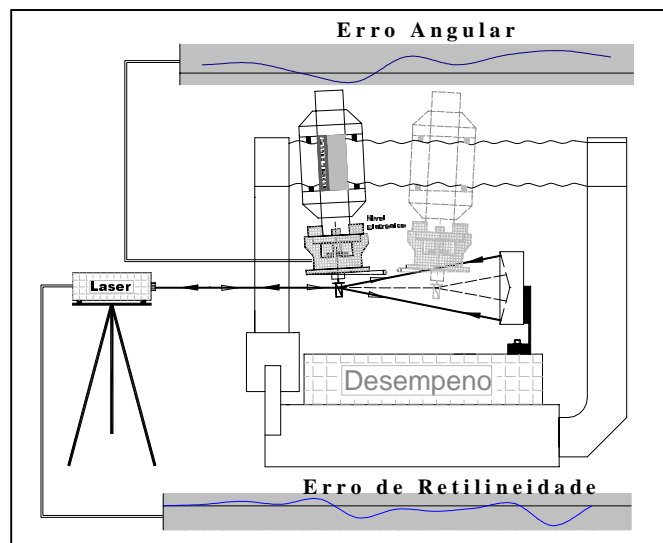


Figura 2 – Erro de retilidade e angular de uma guia em forma senoidal e distâncias dos mancais **b** igual a metade de um comprimento de onda

Pode-se afirmar que o movimento do carro é livre do movimento angular, mas não é retilíneo, ou seja, o erro de retilidade é o movimento sentido pelo Sistema Interferométrico Laser e o erro angular é zero pois não há nenhuma inclinação do carro em relação ao eixo de movimentação, o carro sempre permanece paralelo a este eixo. Isto mostra que se o erro de retilidade e a distância entre os pontos de contato forem conhecidos o erro angular, pode ser facilmente determinado. Neste caso particular é nulo. (BRYAN, 1979).

Na Figura 2 pode-se observar movimentos angulares sofridos pelo carro e o erro de retilidade. Este caso é o mais geral e o mais provável.

A Figura 3 mostra a guia em um movimento angular uniforme, ou seja, uma guia circular de raio  $R$ . O carro se movimenta e o sistema interferométrico laser mostra o erro de retilidade de grandeza igual a  $S$  de uma das cordas do círculo de raio  $R$ . Esta corda deve ser pelo menos 10 vezes menor que o raio para que o método seja utilizado.

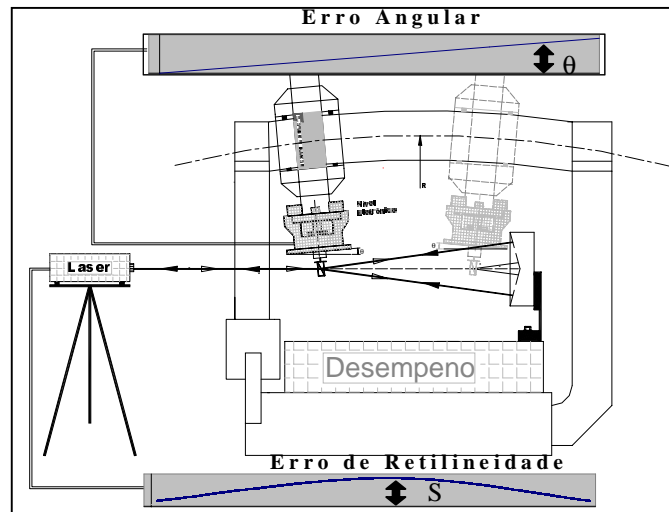


Figura 3 – Erro de retilidade e angular de uma guia em forma circular e distâncias dos mancais “b” conhecida

O erro de retilidade mostrado pode ser visualizado como um arco de circunferência, pode-se então dizer que o ângulo formado pelo carro ao longo do deslocamento é um ângulo constante. Para que o erro angular seja determinado deve-se calcular o primeiro ângulo  $\theta_0$  e considera-lo como referência e a cada novo  $\theta_i$  calculado deve-se subtrair o  $\theta_0$  de referência e somá-lo ao  $\theta_i$  anterior. Obtém-se assim o que foi mostrado no gráfico da Figura 3, sendo o erro angular uma reta cuja inclinação é  $\theta$ .

### 3. EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO

Para melhor compreensão do equacionamento matemático a ser proposto, considere como exemplo, o gráfico da Figura 4 como sendo o resultado da calibração obtido a partir dos dados coletados durante a calibração de um erro de retilidade com o carro movendo-se ao longo do eixo “X”. Na Figura 4, pode-se observar o erro de retilidade no sentido de ida e no sentido de volta, ainda os desvios padrões do sentido de ida. Os desvios padrões para o sentido de volta não estão apresentados para evitar a presença de muitas curvas, que podem dificultar a interpretação dos resultados.

A formulação para o cálculo do erro angular a partir do erro de retilidade será realizada para os dados do erro no sentido de ida, apresentado agora de maneira individual na Figura 5.

Seja também,  $b$  a distância conhecida entre os mancais da máquina. Com esses dados, pode-se escrever a diferença  $f_2$  sendo as distâncias entre mancais e entre os pontos de apoio na guia. A equação (2), onde  $(x_0, y_0)$  são as coordenadas do ponto  $P_0$  pertencente a  $f(x)$  que se encontra a uma distância  $b$  do ponto  $P_0$ .

$$f_1 = y - f(x) \tag{1}$$

$$f_2 = b - \sqrt{(x'_0 - x_0)^2 + (y'_0 - y_0)^2} \tag{2}$$

Na Figura 5 pode ser observado um carro sobre uma curva ajustada do erro de retilidade.

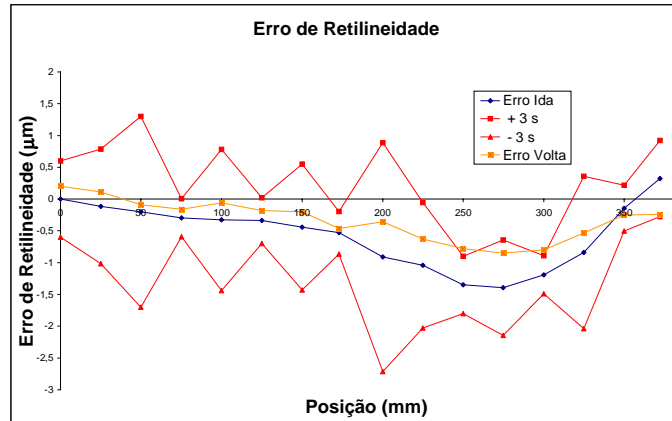


Figura 4 – Curva de um erro de retilidade

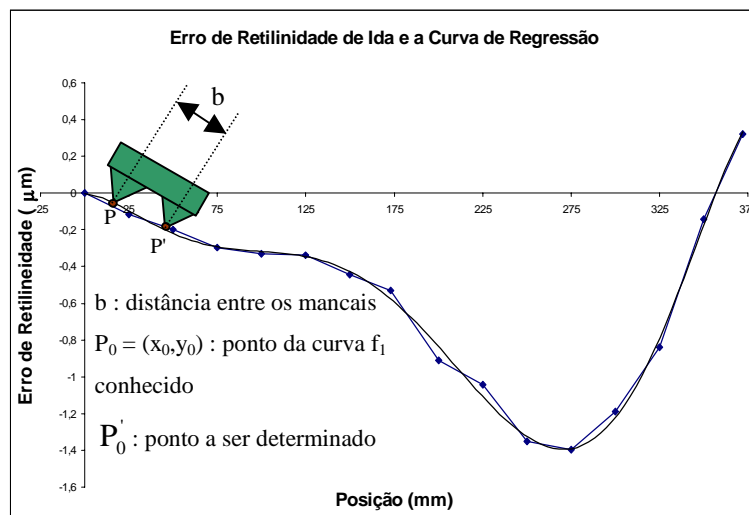


Figura 5 – Erro de retilidade e curva de ajuste de erro, no sentido de ida e representação do carro sobre a curva

Desta forma, as coordenadas do ponto  $P'_0$  são obtidas aplicando o Método de Newton para sistemas não lineares, sistema (3). Um programa computacional foi preparado para executar o método.

$$\begin{cases} f_1(x_0, y_0) = 0 \\ f_2(x_0, y_0) = 0 \end{cases} \tag{3}$$

Conhecidos os pontos  $P_0$  e  $P'_0$ , determina-se a reta que representa a posição e a inclinação do carro no momento que se encontra na posição inicial,  $P_0$ . Através da equação (4) é possível então determinar a tangente do ângulo formado pelo carro com relação ao eixo de movimento

da máquina. Tal coeficiente é muito pequeno e portanto pode-se considerar que a  $\text{tg}\theta$  é igual ao valor do ângulo  $\theta$ .

$$m = \text{tg}\theta = \frac{y_0' - y_0}{x_0' - x_0} = \theta_M = \theta_r \quad (4)$$

Calculado o primeiro ângulo  $\theta$ , denominado  $\theta_r$ , e considerado o ângulo de referência para os cálculos. Pode-se utilizando o mesmo procedimento determinar os ângulos  $\theta_{Mi}$  para os  $n$  pontos  $P_i$ , coletados durante a calibração do erro de retilidade.

A Figura 6 mostra o carro em duas posições distintas: a primeira na posição de referência e, a segunda, em uma posição qualquer ao longo do eixo de medição.

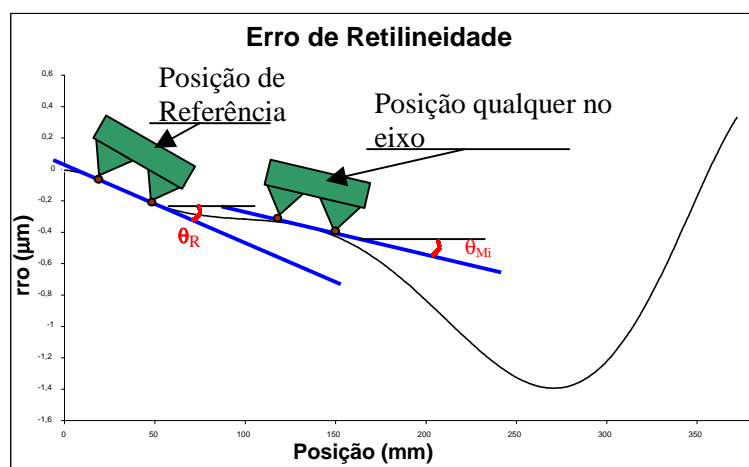


Figura 6 – Esquema para encontrar o erro angular

O erro angular obtido a partir da curva de retilidade é dado pela equação (5), onde:  $n$  é o número de pontos avaliados durante a calibração do erro de retilidade,  $\theta_{Mi}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) é o ângulo  $\theta$  calculado no ponto  $P_i$ ,  $\theta_r$  ( $i = 1, \dots, n$ ) é o erro angular calculado no ponto  $P_i$ .

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_r - \theta_r \\ \theta_2 &= \theta_1 + (\theta_{M2} - \theta_r) \\ &\dots \\ \theta_n &= \theta_{n-1} + (\theta_{Mn} - \theta_r) \end{aligned} \quad (5)$$

#### 4. CALIBRAÇÃO DO ERRO DE RETILIDADE NA DIREÇÃO “X” DEVIDO AO MOVIMENTO “Y” E O ERRO ANGULAR YAW “Y”

A calibração do erro de retilidade na direção “X” ao longo do eixo “Y” e do erro angular yaw “Y” foi executada utilizando-se um interferômetro laser. Para a realização das medições observou-se: o alinhamento do sistema laser acima de 90%, tempo de equilíbrio térmico do conjunto de  $12 \pm 0,5$  horas, as condições do meio ambiente permaneceram em  $20 \pm 1^\circ \text{C}$ , umidade relativa do ar em  $40 \pm 10\%$  e pressão atmosférica em  $693 \pm 3 \text{ mmHg}$  (Marques, 1999).

A calibração, de cada erro, foi efetuada passo a passo, sendo o erro coletado a cada 25 mm no eixo “Y” de medição. Foram realizados 5 (cinco) ciclos de medição, sendo cinco

trajetos no sentido de ida e cinco trajetos no sentido de volta. Para determinar a interferência dos erros de folga e histerese, antes da inversão do sentido de deslocamento, foi realizado o que na literatura é conhecido como “correção de *backlash*”, isto é, avança-se com o carro pouco além da última posição de leitura no sentido da medição e retorna-se a ela novamente iniciando a leitura no sentido contrário (French & Humphries, 1967).

#### 4.1 Erro de retilidade na direção “X” devido ao movimento ao longo do eixo “Y”

Foi utilizado para a medição do erro de retilidade o Sistema Interferométrico Laser, o qual contém um “Prisma de Wollaston”, que é fixado na parte móvel da máquina entre o canhão laser e os espelhos refletores que estão fixos à mesa da máquina.

Os valores indicados pelo mostrador do laser não correspondem aos valores reais do erro de retilidade. Tais valores tem neles incluídos o desalinhamento entre o feixe de luz laser e a direção de movimentação. Através do método dos mínimos quadrados, ajusta-se uma curva, que é denominada como equação do desalinhamento. Assim, o erro de retilidade é calculado utilizando a equação dada em (6).

$$\text{Erro de Retilidade} = \left( \text{valor encontrado através da} \right) - \left( \text{Valor indicado} \right) \quad (6)$$

$$\text{equação do desalinhamento} \quad \left( \text{na instrumentação} \right)$$

#### 4.2 Calibração do erro de yaw do eixo “Y”

O erro de rotação em torno do eixo “Z” devido ao movimento ao longo do eixo “Y”, *yaw* “Y”, foi medido na mesma posição de calibração do erro de retilidade. A calibração foi efetuada posicionando o carro “Y” no intervalo de 0 mm a 350 mm para *yaw* “Y”.

### 5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

O erro de retilidade na direção “X” devido ao movimento em “Y”, foi medido utilizando o interferômetro laser, coletado no eixo Y no intervalo de 25mm a 375mm. O gráfico da Figura 7 mostra o comportamento deste erro, onde as parcelas devido ao desalinhamento foram eliminadas. Este gráfico apresenta nas abscissas as posições do carro de movimentação Y, em milímetros (mm), onde os valores dos erros foram lidos. Na ordenada estão os valores dos erros, em micrometro ( $\mu\text{m}$ ), para os sentidos de ida e de volta e os desvios padrões do sentido de ida.

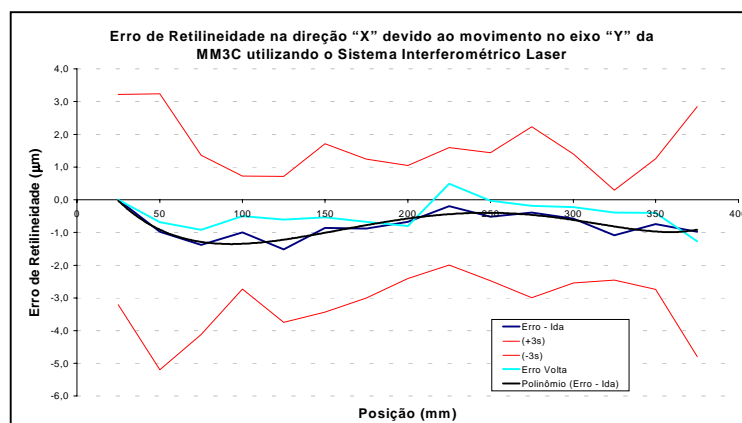


Figura 7 – Erro de retilidade em “X” devido ao movimento no eixo “Y”



Analisando o gráfico da Figura 7 se pode observar que os erros médios de reticidade no sentido de ida e de volta são extremamente pequenos. O erro aleatório comparado com os valores médios é relativamente grande. A curva ajustada ao conjunto de dados para o sentido de ida, também pode ser visualizada neste gráfico. Esta curva, obtida a partir da análise de regressão, apresenta um coeficiente de correlação de 85 %, e pode ser considerada adequada devido a amplitude do erro de reticidade ser muito pequena.

A expressão obtida, através da análise de regressão, é dada na equação (7).

$$\delta x(y) = 2*10^{-14} * x^6 - 3*10^{-11} * x^5 + 10^{-8} * x^4 - 5*10^{-6} * x^3 + 0,0009 * x^2 - 0,0867 * x + 1,6317 \quad (7)$$

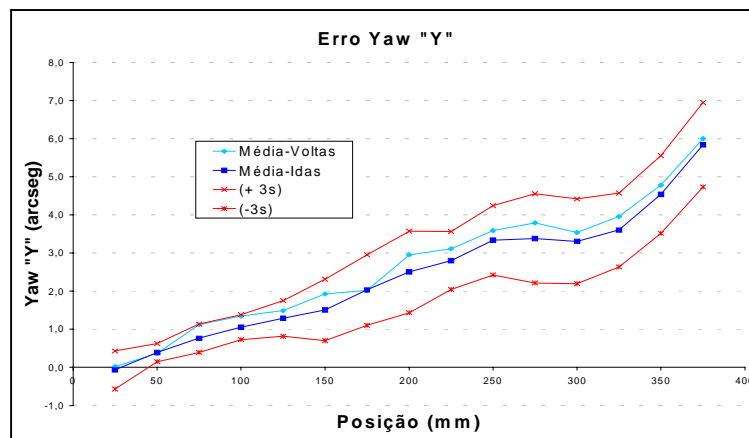


Figura 8 – Erro yaw do eixo “Y”

O gráfico da Figura 8 apresenta o comportamento do erro yaw “Y” da MM3C. Analisando esse gráfico pode-se notar que os valores dos erros são pequenos para os dois sentidos de medição.

A histerese também é pequena alcançando um valor máximo de aproximadamente 2 arcsegundos. Além disso, a curva que representa o comportamento do erro no sentido de volta está contida entre as curvas que representam os erros aleatórios de ida. Desta forma, o comportamento do erro yaw do eixo “Y” pode ser descrito a partir do comportamento do erro em um dos sentidos de medição.

O erro angular yaw “Y” foi calculado utilizando os valores obtidos a partir da calibração do erro de reticidade do eixo “Y” na direção “X”.

Para utilizar o método proposto é necessário analisar a guia “Y” da MM3C e a posição dos mancais aerostáticos. Foi observado que quando a régua móvel está na posição 0, o primeiro mancal está na posição -150 mm, isto é, até que este mancal não alcance a posição 0 não é possível utilizar o método, pois não se conhece os valores do erro de reticidade nos dois pontos de contato dos mancais na guia.

Se executados todos os passos da formulação matemática anteriormente descritos, obtém-se a curva que representa o erro angular yaw “Y”, calculado.

O gráfico da Figura 9 apresenta duas curvas de erros de yaw “Y”. Uma é a curva obtida através do método proposto. A curva foi zerada no primeiro ponto calculado, isto é, o ponto 150 mm. A outra é a curva obtida a partir da calibração do erro, ou seja, a curva de ida mostrada na Figura 8. Como pode ser visualizado, na Figura 9, as duas curvas tem a mesma

tendência e são extremamente parecidas, mostrando que é possível calcular com acuracidade o erro angular *yaw* “Y” a partir do erro de retilidade.

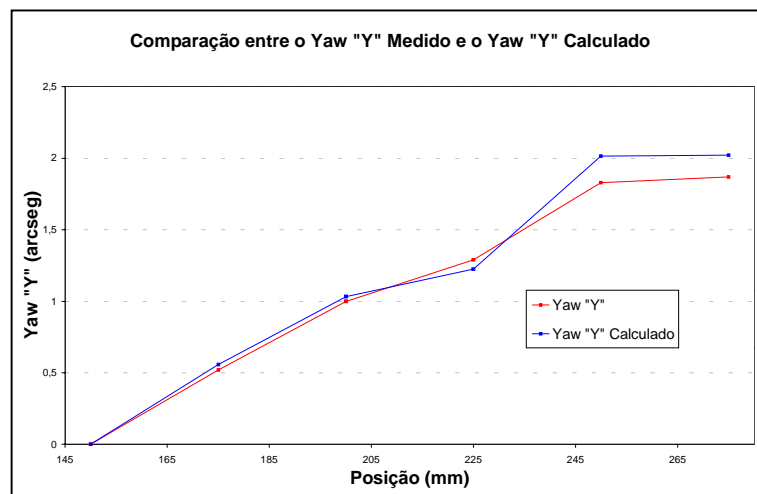


Figura 9 – Comparação dos resultados obtidos através da calibração do erro angular *yaw* “Y” e do calculado através do método proposto

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada uma formulação matemática para determinar a correlação existente entre os erros de retilidade e os erros angulares.

Para concretização da metodologia proposta, foi necessário, construir as curvas dos erros de retilidade, estudar a estrutura da máquina, desenvolver programas computacionais para a execução de algoritmos e utilizar ferramentas estatísticas para a análise dos erros.

A calibração dos erros de retilidade, da MM3C do Tipo Ponte Móvel, foi realizada com o Sistema Interferométrico Laser. O estudo da estrutura da máquina serviu para localização e análise dos mancais aerostáticos, verificando a distância entre eles e seu comportamento sobre as guias.

Os resultados obtidos através da formulação proposta foram comparados com os levantados durante a calibração do erro angular *yaw* “Y”, apresentando uma correlação média de 94,7%. Mostrando assim, que é viável utilizar a formulação matemática apresentada.

A equação de correlação entre o erro de retilidade encontrado durante a calibração e o polinômio ajustado para esse erro, pode ser considerada adequada devido à dimensão do erro de retilidade ser extremamente pequena, onde este coeficiente foi de 85%.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRYAN, J.B. (1979) “The Abbè principle revisited: an updated interpretation”. Precision Engineering, vol.1, No 1, Jul.: 129-132.
- DI GIACOMO, B. (1986). “Computer aided calibration and hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines”. MANCHESTER. 418p. PhD Thesis - THE VICTORIA UNIVERSITY OF MANCHESTER.
- DONMEZ, M. A. et al. (1986). “A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation”. Precision Engineering, v.8 n.4 p.187-196

- EVANS, C.J.; HOCKEN, R.J.; ESTLER, W.T. (1996) “Self-Calibration: reversal, redundancy, error separation, and “absolute testing””, CIRP Annals, Vol 45/2.
- FRENCH, D. & HUMPHRIES, S. H.. (1967) “Compensation for the backlash and alignment errors in a numerically controlled machine tool by a digital computer programme”. Proceedings of 8th MTDR Conference, p. 707-726.
- HOCKEN,R.J. & MACHINE TOOL TASK FORCE (1980). “Machine tool accuracy. Technology of Machine Tools”, vol. 5, Oct.
- MARQUES, A. (1999). “A correlação entre os erros de retilidade e angulares nas Máquina de Medir a Três Coordenadas”. São Carlos. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- SOSA CARDOZA, J.A. (1995). “Máquinas virtuais de medir a três coordenadas”. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado) - EESC – USP.
- VIERA SATO, D. P. (1998). “Uma contribuição ao modelo de sintetização de erros em máquinas ferramentas”. São Carlos. 200p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

# **SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE INFORMAÇÕES PARA LABORATÓRIO DE METROLOGIA**

**Alysson Andrade Amorim**

**Luiz Soares Júnior**

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: lsj@dem.ufc.br

## **Resumo**

A opção por um sistema informatizado para gerenciar informações em laboratório de metrologia é de fundamental importância frente ao cenário de competitividade que ora se forma entre os laboratórios prestadores de serviços metrológicos. A adoção de um sistema informatizado promove um substancial aumento na agilidade e confiabilidade no processamento de informações. Este artigo apresenta a estrutura geral de um sistema informatizado para gerenciar informações no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Ceará. O sistema está sendo desenvolvido totalmente com o aplicativo Excel® e rotinas específicas em Visual Basic®. São apresentados alguns resultados parciais de uma avaliação prévia do sistema, indicando ser este uma alternativa confiável. Adicionalmente, o desenvolvimento do sistema é uma excelente oportunidade para alunos da Engenharia sedimentarem conceitos sobre Metrologia e Sistemas da Qualidade.

**Palavras-chaves:** Metrologia, Qualidade, Automação de dados

## **1. INTRODUÇÃO**

A crescente competição a nível internacional tem forçado as empresas em todo mundo a redefinirem seus conceitos sobre qualidade e redução de custos. Nessa nova ordem, com um mercado não mais protegido, como em passado recente, privilegia-se quem tem eficiência e competitividade. Desse modo, verifica-se que as empresas brasileiras têm adotado uma série de ações estratégicas de ajuste a este ambiente mais aberto e competitivo.

Pode-se destacar, entre essas ações, a disseminação de programas de garantia da qualidade, onde os baseados nas normas da série ISO 9000, os mais difundidos mundialmente, exigem, usualmente, um sistema metrológico formalmente implementado para garantir confiabilidade nas decisões baseadas em resultados de medições.

Nesse contexto, os laboratórios prestadores de serviços metrológicos, que geralmente dão suporte aos sistemas metrológicos das empresas, estão cada vez mais obrigados a implantarem seus sistemas da qualidade. Estes sistemas da qualidade são normalmente baseados no documento ABNT ISO/IEC GUIA 25 (ABNT, 1993) que estabelece requisitos técnicos e gerenciais que o laboratório deve seguir para demonstrar formalmente sua competência técnica. A implantação desses requisitos gera uma grande quantidade de documentos e informações (Fischer, 1997).

Considerando que o laboratório necessita gerar retorno financeiro para sua manutenção e investimentos, uma das ações necessárias atualmente é a substituição dos controles manuais por sistemas informatizados para gerenciar informações. A aplicação de tecnologias de

informação promove uma expressiva agilidade no processamento de dados, com menor possibilidade de erro.

O uso de sistemas informatizados comerciais aplicados à Gestão da Qualidade já é uma realidade a alguns anos, visto a quantidade de *softwares* disponíveis no mercado. Pode-se citar como exemplos, o CELERINA (CELERINA, 2000), o MOL - Metrologia On-Line (M.O.L., 2000) e mais recentemente o AUTOLAB (AutoLab, 2000).

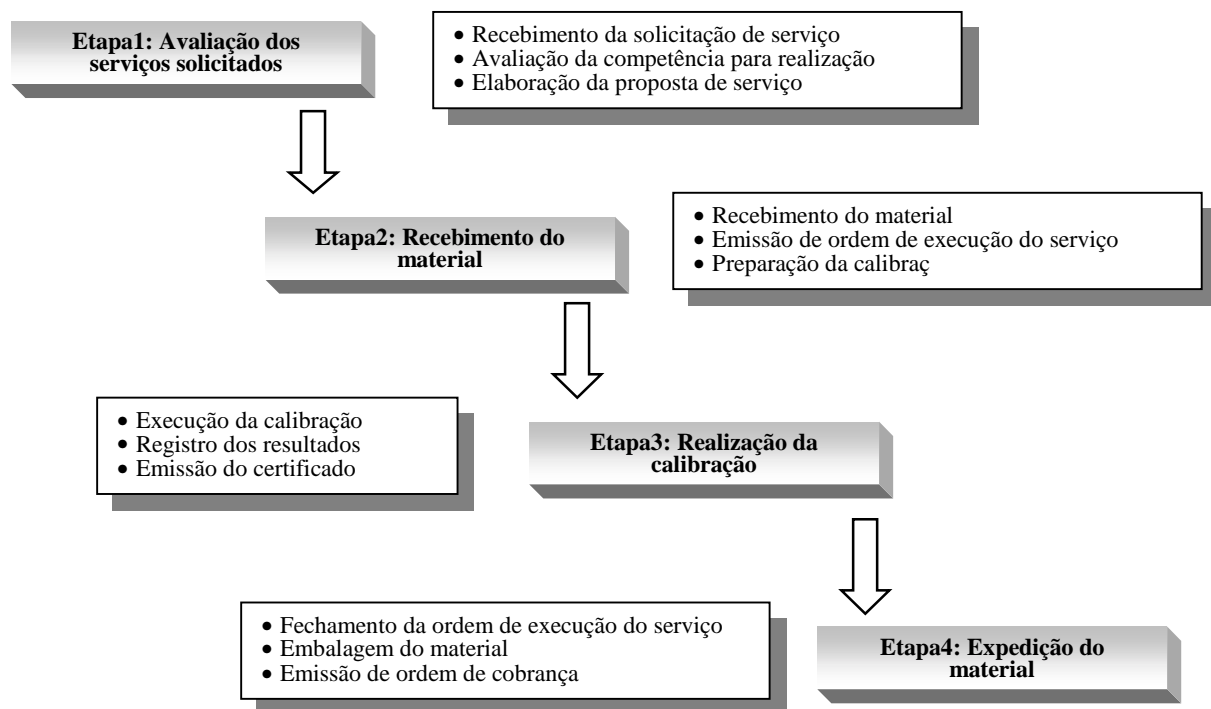
A despeito dessa diversidade de *softwares* disponíveis, constatou-se que a grande maioria não segue os principais documentos de referência para laboratórios de calibração e ensaio, dentre eles o VIM (INMETRO, 1995), ISO GUM (BIPM., *et al.*, 1998) e ISO Guia 25 (ABNT, 1993). Além disso estes *softwares* possuem um custo relativamente elevado.

Diante de tal realidade, decidiu-se desenvolver um sistema próprio que atendesse as necessidades específicas do Laboratório de Metrologia da UFC. O sistema de gerenciamento de informações para laboratório de metrologia proposto neste trabalho, visa auxiliar na diminuição dos prazos e custos das calibrações, sem comprometer a qualidade dos resultados de medição.

## 2. ESTUDO PRELIMINAR

### 2.1 Rotina de um laboratório de Metrologia

De uma forma geral a rotina básica de um laboratório de metrologia (calibração ou ensaio) consiste de quatro etapas distintas conforme apresentadas na Figura 1 (Fischer, 1997).



**Figura 1** – Etapas da rotina básica de um laboratório de calibração

No LAMETRO, Laboratório de Metrologia da Universidade Federal do Ceará - UFC e Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – NUTEC, as etapas mostradas na Figura 1 estão presentes. No entanto, devido a diversidade de serviços distribuídos nas três áreas de atuação do laboratório - dimensional, força e pressão – essa rotina torna-se mais complexa.

Adicionalmente, o LAMETRO está em fase de credenciamento junto ao INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) passando atualmente por uma reestruturação interna para implantação de seu sistema da qualidade segundo o documento ABNT ISO/IEC GUIA 25 (ABNT, 1993). Esse processo tem gerado um aumento significativo do fluxo de informações e registro das mesmas.

## 2.2. Documentos de referência

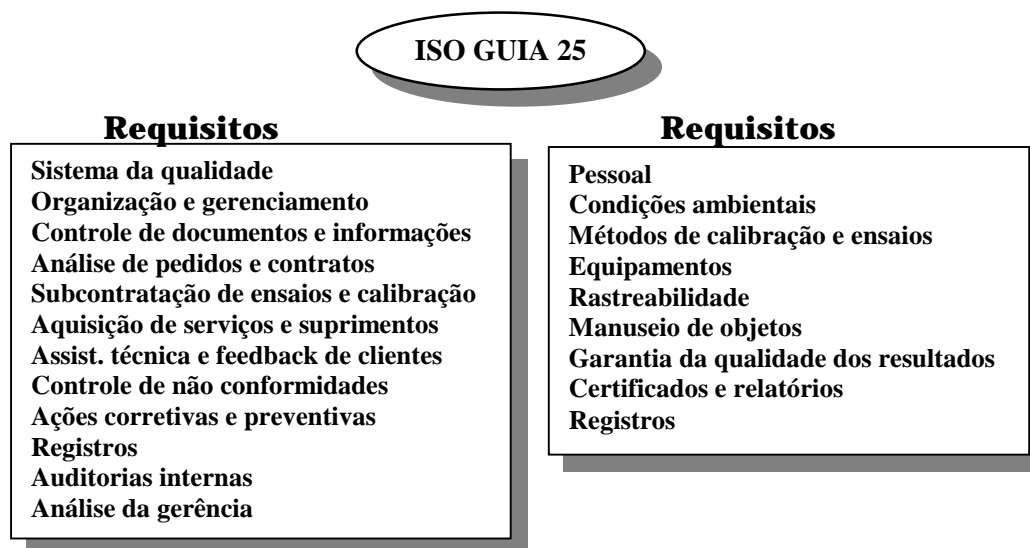
Ao contrário do que foi constatado em alguns *softwares* disponíveis no mercado, o sistema proposto neste trabalho contempla os principais documentos da ISO que relacionam metrologia e garantia da qualidade. Portanto, realizou-se um estudo preliminar dos seguintes documentos:

Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (INMETRO, 1995) - versão brasileira do "*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*". Este documento trata dos conceitos e termos empregados na metrologia. Passou a ser adotado como terminologia oficial brasileira através da portaria 029/95 do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). Tal vocabulário é também conhecido por VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.

ABNT ISO/IEC Guia 25 (ABNT, 1993) - é o principal documento de referência para sistema da qualidade de laboratório de calibração e/ou ensaio. Este documento estabelece os requisitos gerais para capacitação laboratorial, auxiliando na organização dos elementos essenciais de gestão da qualidade e de competência técnica. É o documento utilizado pelo INMETRO para avaliar a competência técnica dos laboratórios de almejam credenciamento.

A forma como estão apresentados os tópicos nesse documento, contribuiu para a estruturação e desenvolvimento do sistema de gerenciamento de informações proposto neste trabalho.

A Figura 2 apresenta os requisitos para implantação de sistema da qualidade para laboratório de calibração e/ou ensaio.



**Figura 2** - Requisitos mínimos exigidos para credenciamento junto ao INMETRO

Guia para expressão da incerteza de medição (BIPM, et al., 1998) - Versão brasileira do ISO GUM(*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*), que traz a metodologia oficial para avaliação e expressão da incerteza do processo de medição na calibração. Verifica-se a importância atual deste documento devido sua exigência pelo

INMETRO (INMETRO, 1995) como um dos documentos de referência na implantação de sistemas da qualidade para laboratórios credenciados.

O acompanhamento na elaboração das planilhas está sendo feito por pessoal qualificado e experiente na área, juntamente com técnicos envolvidos nos serviços de calibração. O bolsista envolvido diretamente na elaboração das planilhas participou de cursos sobre o processo de credenciamento de laboratórios, procedimentos de calibração, avaliação de incertezas de medição entre outros.

Todas as planilhas emitidas estão adequadas ao Sistema da Qualidade em implantação no LAMETRO.

### 3. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE INFORMAÇÕES

O sistema está sendo desenvolvido totalmente com o aplicativo Microsoft Excel<sup>®</sup>. Justifica-se a escolha desse aplicativo devido algumas vantagens (Hallberg, 1994):

- Software popular, de baixo custo e de fácil operação;
- Compatibilidade com outros aplicativos comuns como "word", "access";
- Alto grau de formatação das planilhas;
- Opções de acessibilidade, senhas e travamento de células;
- Grande variedade de funções matemáticas e estatísticas;
- Alto grau de automatização de ações rotineiras (Generini, 1997);
- Possibilidade de formatações complexas.

A estrutura do sistema baseia-se no gerenciamento de 'arquivos modelo', que são planilhas previamente formatadas, vinculadas a um arquivo de planilha que funciona como banco de dados. Esse gerenciamento é possível devido ao desenvolvimento de uma estrutura lógica capaz de intercambiar arquivos de planilhas com endereços eletrônicos pré determinados, realizando o transporte de dados entre elas e automatizando ações rotineiras, de maneira fácil e segura. O sistema de gerenciamento de informações é composto por três bases. A Figura 3, mostra o relacionamento entre as bases, relativo ao fluxo de informações:

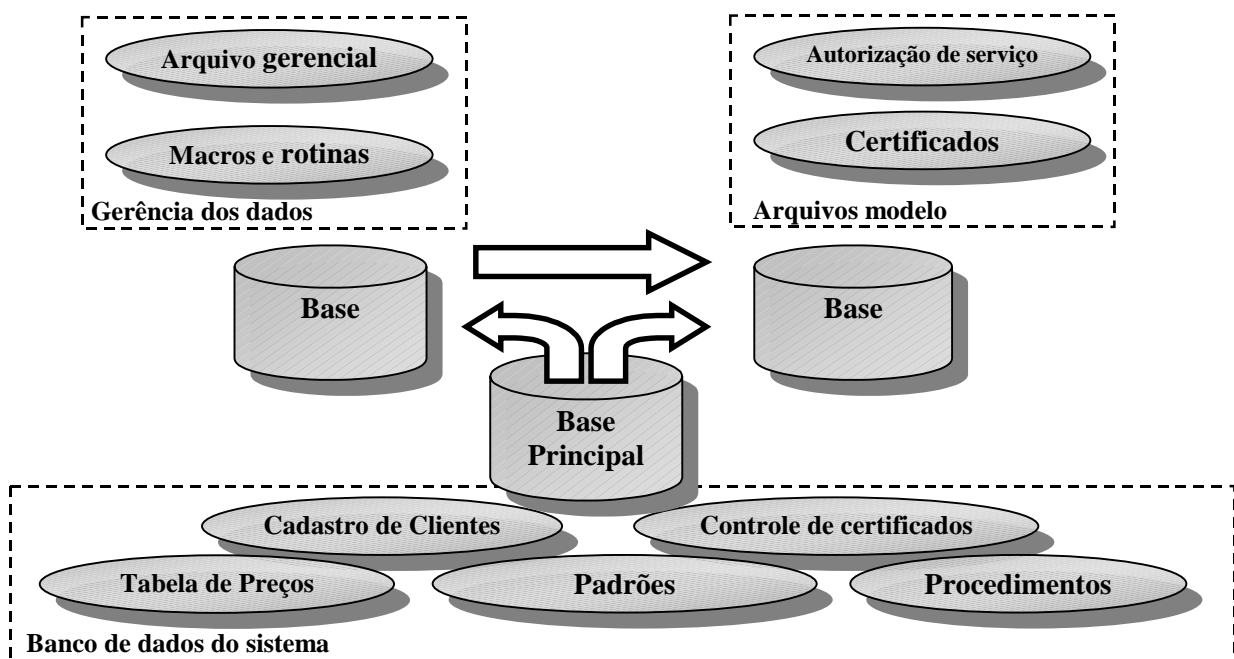


Figura 3 - Estrutura básica do sistema

A seguir apresenta-se o que já foi desenvolvido do sistema, detalhando cada uma das bases evidenciadas na Figura 3.

### 3.1 Base Principal

Responsável pelo armazenamento de dados que são exportados para as demais bases para posterior processamento. Os dados das planilhas da base principal são organizados por registros, controlados por índices, que facilitam o acesso aos dados.

Cadastro de clientes – o laboratório mantém atualizado os registros das instituições que solicitam serviços de calibração. Esses registros possibilitam a diminuição do tempo na identificação dos clientes, no ato da contratação do serviço;

Tabela de preços – esta planilha compõe os preços dos serviços metrológicos oferecidos pelo laboratório, agilizando a emissão de orçamentos e contratações de serviços;

Controle de certificados – a emissão de certificados do laboratório obedece a uma ordem numérica sequencial que deve ser controlada para eventuais auditorias. O estabelecimento automático e sequencial possibilita a eliminação total de números de certificados duplicados;

Funcionários – o laboratório mantém registro do pessoal administrativo e técnico que compõem o quadro funcional. Para os técnicos, são registradas suas qualificações profissionais e habilidades pessoais para execução das calibrações;

Cadastro de equipamentos/padrões – este arquivo contém todos os equipamentos e padrões de medição em uso no laboratório, facilitando o controle dos prazos de calibração dos padrões e suas avaliações periódicas. Requisitos como a rastreabilidade são evidenciados através deste cadastro, contemplando o documento ABNT ISO/IEC GUIA 25.

Procedimentos – segundo o documento ABNT ISO/IEC GUIA 25, o laboratório deve ter registrado todos os procedimentos aprovados para uso nas calibrações. Este arquivo consta, por enquanto, somente com a relação nominal dos procedimentos.

### 3.2 Base gerencial



Figura 4 - Tela principal do sistema ( Base Gerencial)



Esta base é responsável pelo gerenciamento dos “arquivos modelo”. Ela contém uma interface amigável com o operador, através de objetos, tais como formulários, botões, listas com barra de rolagem, entre outros, de modo que se obtém maximização da produtividade das operações rotineiras. Toda a automatização e utilização dos objetos descritos torna-se possível com a utilização de programação em Visual Basic® para Excel®.

### 3.3 Base Operacional

Composta por “arquivos modelo”, esta base é responsável pela formatação e processamento dos dados brutos obtidos por entrada manual ou importados da Base Principal. Após o processamento dos dados obtém-se documentos formais do laboratório, tais como Autorização de Serviços(A.S.), Orçamentos de Serviços, Fax, Recibos e Certificados de Calibração.

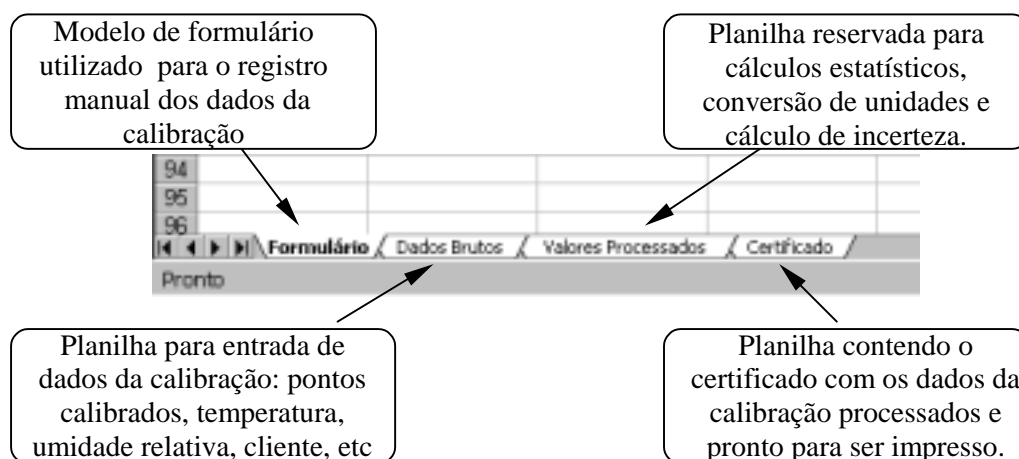
Os “arquivos modelo” são arquivos com planilhas previamente formatadas, vinculadas à Base Principal e controladas pela Base Gerencial.

São algumas de suas características:

- Encontram-se protegidos por senhas, restrita ao gerente técnico do LAMETRO;
- Todas as células são travadas, exceto aquelas destinadas à entrada de dados;
- Contém um grau de formatação bastante elevado reduzindo ações repetitivas e eliminando possíveis erros de digitação do operador;
- São responsáveis pelos cálculos estatísticos e matemáticos do sistema.

Para cada instrumento da relação de serviços do LAMETRO (Laboratório de Metrologia da UFC) existe um “arquivo modelo” específico para processamento de dados e emissão de certificado de calibração. Os certificados emitidos pelo sistema proposto neste trabalho, contemplam todos os requisitos exigidos pelos documentos ABNT ISO/IEC GUIA 25 e pelo “Procedimento para elaboração dos certificados emitidos pelos laboratórios da Rede Brasileira de Calibração - RBC” (DIRCA, 1997).

A Figura 5 apresenta as planilhas contidas nos "arquivos modelo" para emissão de certificados de calibração.



**Figura 5** - Estrutura básica do arquivo modelo de certificado de calibração

Para o cálculo da incerteza do processo de calibração são consideradas as fontes de incertezas que possam afetar significativamente os resultados das medições, tais como dispersão das indicações, resolução do mensurando, incerteza do padrão, desvios da temperatura de referência, entre outras.

Um exemplo típico de planilha de cálculo de incerteza, segundo o ISO GUM (BIPM, *et al.*, 1998), é mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Tabela para cálculo de incerteza do processo de calibração

LAMETRO - ÁREA DIMENSIONAL											
CALIBRAÇÃO DE MICRÔMETRO - 0 a 25 mm											
PLANILHA DE CÁLCULOS - INCERTEZA DE MEDIÇÃO SEGUNDO O ISO-GUM											
	0,00	2,50	5,10	7,70	10,30	12,90	15,00	17,60	20,20	22,80	25,00
<b>FONTES DE INCERTEZAS</b>											
Dispersão da indicações	0,000000	0,001764	0,001764	0,000667	0,000667	0,000000	0,000667	0,001155	0,000667	0,000667	0,000667
Resolução adotada no mensurando	0,002887	0,002887	0,002887	0,002887	0,002887	0,002887	0,002887	0,002887	0,000000	0,000000	0,000000
Incerteza do paralelo ótico	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100	0,000100
Diferença temp. padrão/mensurando	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166	0,000166
Incerteza do padrão de medição	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150	0,000150
<b>INCERTEZA PADRÃO COMBINADA (mm)</b>	<b>0,00289713</b>	<b>0,00339183</b>	<b>0,00339183</b>	<b>0,00297285</b>	<b>0,00297285</b>	<b>0,00289713</b>	<b>0,00297285</b>	<b>0,00311877</b>	<b>0,00071028</b>	<b>0,00071028</b>	<b>0,00071028</b>
<b>GRAUS DE LIBERDADE EFETIVOS</b>	Infinito	68	68	1977	1977	Infinito	1977	266	6	6	6
<b>FATOR DE ABRANGÊNCIA (k)</b>	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,4	2,4	2,4
<b>INCERTEZA EXPANDIDA (95%) (mm)</b>	<b>0,00568</b>	<b>0,00677</b>	<b>0,00677</b>	<b>0,00583</b>	<b>0,00583</b>	<b>0,00568</b>	<b>0,00583</b>	<b>0,00614</b>	<b>0,00174</b>	<b>0,00174</b>	<b>0,00174</b>
Incerteza máxima:	0,007	mm									

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na avaliação preliminar do sistema apresentado neste trabalho, obteve-se os seguintes resultados:

- Redução drástica (em média 70%) do tempo gasto para emissão de documentos. O tempo médio para emissão de um certificado, por exemplo, reduziu para quatro(04) minutos;
- Aumento da confiabilidade na emissão de documentos;
- Maior controle da acessibilidade dos documentos gerados (confidencialidade);
- Transparência nas atividades executadas;
- Maior facilidade de uso;
- A integração das informações permite identificar mais facilmente as deficiências do laboratório.

Também estão sendo verificadas algumas dificuldades no decorrer do desenvolvimento do sistema, dentre as quais pode-se destacar:

- Necessidade contínua de alterações nas bases de dados do sistema, buscando uma maior adequação às necessidades do laboratório e um melhor aproveitamento das informações;
- Volume inicial de cadastro de dados bastante elevado o que demanda intensa dedicação dos bolsistas;
- Tempo considerável para elaboração dos modelos de certificado de calibração, devido complexibilidade das formatações necessárias;
- Treinamento do pessoal com o novo sistema, uma vez que este incorpora funções automáticas e novos conceitos da metrologia;
- Necessidades de mudanças de procedimentos do sistema da qualidade.

Os resultados obtidos com o sistema de planilhas demonstra que ele satisfaz às necessidades do laboratório que se caracteriza como um laboratório de metrologia secundário e de médio porte.

O desenvolvimento de uma sistema similar ao apresentado torna-se atrativo devido a adequação que se pode ter à realidade de cada laboratório, unida a familiarização e facilidade de uso do software empregado. Pelo menos três fatores devem ser considerados ao se decidir pelo desenvolvimento de sistema próprio. São eles: necessidades do laboratório; exigências de normas e limitação de recursos humanos e financeiros.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT., 1993, "ISO/IEC GUIA 25 - Requisitos Gerais para a capacitação de laboratórios de calibração e de ensaios", primeira edição, Rio de Janeiro, RJ.
- BIPM., *et al.*, 1998, "Guia para Expressão da Incerteza de Medição", 2ª edição Brasileira do "*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*", 1998, Rio de Janeiro, RJ.
- DIRCA., 1997, "Procedimentos para elaboração de certificados emitidos pelos laboratórios da RBC" Documento INMETRO número 002, revisão 08, Rio de Janeiro, RJ.
- Fischer, Suely., 1997, "Sistema de gerenciamento de informações em laboratórios de calibração prestador de serviços: Um modelo informatizado", Tese de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- Generini, A., Fraga, S., 1997, "Visual Basic 5" Editora Visual Books, Florianópolis, S.C.
- Hallberg, Bruce *et al.*, 1994, "Excel 5 for Windows – Técnicas Avançadas"; tradução Cláudio Lobo, Rio de Janeiro, Berkeley.
- INMETRO., 1995, "Vocabulário internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia", Versão Brasileira do "*Vocabulary of basic and general terms in metrology*" publicado em 1993 por ISO/IEC/OIML/BIPM, Rio de Janeiro, RJ.
- CELERINA., 2000, "Objetivos do Celerina Série 9000". Artigo extraído da internet na página [www.celerina.com/prod/série.html](http://www.celerina.com/prod/série.html)
- M.O.L., 2000, "Objetivos do M.O.L." Artigo extraído da internet na página [www.sites.uol.com.br/poninformatica.mol.html](http://www.sites.uol.com.br/poninformatica.mol.html)
- AutoLab., 2000 "Sistema de Gestão e Automação de Laboratórios". Encarte divulgado pelo SBMÍDIA

# INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DE TEODOLITOS

**Dário Freire Branco**<sup>1</sup>

**Fabiana Rodrigues Leta**<sup>2</sup>

**Gregório Salcedo Muñoz**<sup>3</sup>

**José Carlos Valente Oliveira**<sup>4</sup>

1. Petrobras Distribuidora S.A., Gerência de Produtos de Aviação, 20.271-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: [dariob@br-petrobras.com.br](mailto:dariob@br-petrobras.com.br)
2. Universidade Federal Fluminense, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, 20.200-200, Niterói, RJ, Brasil. E-mail: [fabiana@ic.uff.br](mailto:fabiana@ic.uff.br)
3. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Instituto Tecnológico da PUC, 22.453-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: [metro@ctc.puc-rio.br](mailto:metro@ctc.puc-rio.br)
4. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Laboratório de Metrologia Dimensional, 25.250-220, Xerém, RJ, Brasil. E-mail: [lamin@inmetro.com.br](mailto:lamin@inmetro.com.br)

## Resumo

Atualmente a metodologia utilizada para a verificação da qualidade de medição dos teodolitos não atende aos requisitos metrológicos recomendados em normas internacionalmente aceitas, tratando-se apenas de uma metodologia de campo. Para a calibração de teodolitos é necessário a utilização de padrões angulares reconhecidos, de modo que seja possível relacionar o instrumento com referências estabelecidas através da Cadeia de Rastreabilidade e assim, determinar a incerteza de medição do teodolito em verificação. Este artigo tem por objetivo apresentar um estudo da propagação das incertezas de medição no resultado da calibração de teodolitos, uma análise crítica das metodologias convencionais, sugerindo-se uma nova metodologia, capaz de atender aos quesitos atualmente aceitos na Metrologia.

**Palavras-chave:** Metrologia, Calibração, Análise de Incertezas, Controle de Qualidade, teodolitos.

## 1. INTRODUÇÃO

Teodolitos são instrumentos usados na medição de ângulos em situações que envolvem distâncias médias e longas e nas quais exige-se um elevado nível de exatidão de medição. A calibração destes instrumentos, segundo procedimentos normalizados e submetidos a uma Cadeia de Rastreabilidade, vem se tornando uma necessidade evidente para assegurar confiabilidade nas medições realizadas.

Constatou-se que alguns laboratórios, que atualmente realizam procedimentos de verificação de teodolitos, não atendem completamente a todos os quesitos aceitos na Metrologia. A calibração de instrumentos pressupõe a comparação dos valores indicados pelo instrumento com aqueles estabelecidos por padrões (VIM, 1995). Verificou-se que procedimentos que vêm sendo utilizados avaliam, de certa forma, a capacidade do instrumento em repetir suas próprias leituras (condição de repetitividade), mas não comparam os valores lidos com uma referência padrão de ângulo.

Segundo a ISO 12857-2, os procedimentos de verificação de teodolitos apresentados são aplicados no local de trabalho pelo próprio usuário, podendo-se concluir que são realizados sob condições de campo que por vezes são adversas. Esta verificação é conhecida por *accuracy-in-use*, e possui a principal vantagem de verificar o instrumento nas condições reais de trabalho. No entanto, este tipo de verificação não permite a conservação das condições do ensaio, pois a influência das condições do ambiente de medição é desprezada. Assim não é possível, a princípio, fazer uma comparação da qualidade de medição em instrumentos distintos, ou de um mesmo instrumento em diferentes épocas.

As normas ISO 8322-4 e ISO 12857-2 versam sobre a verificação de teodolitos em campo. Em sua metodologia, empregam-se alvos, considerados fixos (em número de 4 ou 5), distribuídos sobre um círculo com raio de 200 m. Fazem-se, então, diversas leituras apontando-se com o retículo do teodolito sobre estes alvos, e determina-se a dispersão dos resultados. Na realidade, este ensaio é uma verificação da repetitividade da leitura entre diversas faixas da escala.

Considerando-se os teodolitos em questão, a calibração destes implica em realizar diversas leituras sobre um padrão de ângulo, em diferentes pontos da escala do teodolito e então expressar a sua incerteza de medição. A dificuldade consiste em materializar este procedimento, devido à elevada exatidão de medição dos teodolitos. É notória, então, a necessidade da calibração de teodolitos, seja na condição de recepção quando novos, seja durante a sua vida útil, através de uma verificação periódica. (Branco et al, 1998)

Neste contexto, a elaboração de procedimentos metrológicos para a calibração de teodolitos e sua implementação em um laboratório reconhecido, no caso o Laboratório de Metrologia Dimensional do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) torna-se fundamental para atender às necessidades emergentes, especialmente em processos industriais. Estes procedimentos de calibração vêm sendo desenvolvidos sob uma metodologia de calibração, diferenciada dos métodos convencionais.

Deste modo, pretende-se satisfazer aos atuais conceitos de metrologia, no que tange à rastreabilidade metrológica e à expressão da incerteza nos métodos de calibração. Além disto, visa-se obter um conjunto de procedimentos que possam satisfazer uma necessidade crescente na indústria. Para tanto é necessário, como primeira etapa, identificar e definir os principais desvios de medição na calibração de teodolitos.

## **2. CARACTERÍSTICAS DO TEODOLITO**

O funcionamento deste instrumento é relativamente simples, consistindo basicamente de uma luneta, cujo poder de ampliação é, em média, de 30 vezes. Esta luneta permite dois movimentos de rotação, um em torno do eixo vertical e outro em torno do eixo horizontal. A cada um destes eixos encontra-se associado um disco graduado com uma escala. A leitura da escala é realizada através de um microscópio acoplado ao instrumento. Assim, quando gira-se a luneta em torno de um dos eixos deslocando-se de um ponto de observação para outro, faz-se a medição angular, lendo-se os valores inicial e final na escala.

Além do eixo horizontal e vertical, o teodolito possui um terceiro eixo básico denominado eixo de colimação. Os três eixos básicos podem ser observados na Figura 1. Estes eixos devem manter algumas relações entre si, a saber:

- o eixo horizontal deve ser perpendicular ao eixo vertical;
- o eixo de colimação deve ser perpendicular ao eixo horizontal;
- todos os três eixos devem se interseccionar no mesmo ponto.

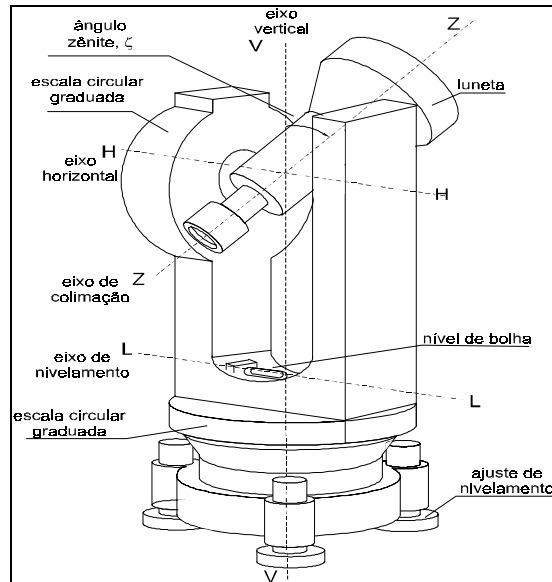


Figura 1 - Desenho esquemático de um teodolito.

### 3. ERROS DE MEDIÇÃO

Durante uma medição vários fatores influenciam a incerteza de medição do teodolito. É importante fazer uma análise sobre estes fatores porque a incerteza de medição é determinada a partir do equacionamento de cada um destes fatores. A seguir os erros de medição são definidos e expressos em equações, de modo que possa ser determinada a incerteza de medição. (Branco et al, 1999) (Branco, 1999)

- **Erro do eixo de colimação** - É o erro ocasionado pela não perpendicularidade do eixo de colimação com o eixo horizontal. Influencia diretamente as leituras no plano horizontal.
- **Erro do eixo horizontal** - Consiste no desvio de perpendicularidade entre os movimentos horizontal e vertical. É uma variação cuja origem dá-se no processo de fabricação do teodolito e interfere no resultado da medição, quando bascula-se a luneta de 180°, ou ainda quando o teodolito é usado para determinação da prumagem de estruturas.
- **Erro de oscilação do eixo vertical** - Ocasionado pelos desvios do sistema óptico-mecânico principalmente devido aos mancais de rolamentos.
- **Erro do eixo vertical** - O correto nivelamento do teodolito implica na correta determinação do plano horizontal de referência, sob o qual são realizadas as medições. Na calibração é necessário verificar a exatidão do nível de bolha. Alguns teodolitos apresentam mecanismo de auto-compensação do erro do eixo vertical.
- **Erro de zero da escala vertical** - É a variação ocorrida na leitura com a mudança do sentido de medição de horário para anti-horário e vice-versa. Usuários de teodolitos realizam a medição em ambos os sentidos e consideram o valor médio.
- **Erros de graduação da escala circular** - A escala circular, tanto horizontal quanto vertical, assim como a escala divisora, devem ser calibradas. É necessário que seja calibrado todo o conjunto mecânico de medição, e não apenas as escalas isoladamente.
- **Erro focal** - Consiste no desvio ocasionado no eixo de colimação devido ao ajuste do foco.
- **Erro de pontaria** - A diferença entre o eixo de colimação do teodolito e o ponto central do alvo gera o erro de pontaria. É causado por variação da acuidade visual de observadores distintos, e desvios no sistema óptico.
- **Variações bruscas das condições do ambiente** - Variações bruscas de temperatura causam distorções da escala circular e dos sistemas ópticos. Normas de verificação

sugerem que sejam anotadas as condições ambientais, tais como, temperatura, pressão e umidade relativa. A calibração deve ser realizada sob condições fixas e determinadas.

Com a existência de tantos fatores que podem influenciar as medições realizadas com um teodolito, a importância da calibração destes instrumentos torna-se relevante, seja na condição de recepção quando novos, seja ao longo da vida útil, através de uma verificação periódica.

#### 4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A análise dos erros de medição com teodolitos mostra as relações entre os desvios geométricos do teodolito e as correspondentes variações no resultado de medição, nos planos horizontal e vertical. (Branco, 1999) As variações no resultado de medição são erros, incluindo os provenientes dos efeitos sistemáticos, que podem ser corrigidos, ou estimados, pelas equações de correção daquelas relações.

As equações de correção aproximam a média dos resultados do valor que pode ser razoavelmente atribuído ao ângulo medido, tornando-se a melhor estimativa. (Branco et al, 1999) Entretanto, introduzem incertezas no resultado da medição, relativas às variáveis de entrada das equações, que se propagam ao longo da cadeia de medição, contribuindo para a dispersão no resultado da medição.

##### 4.1 Modelo matemático da medição no plano horizontal

A equação de propagação da incerteza permite a determinação da influência das variáveis de entrada sobre a incerteza de medição, quando a relação entre as variáveis de entrada e o mensurando pode ser expressa matematicamente. Mesmo quando esta relação só é estabelecida por resultados experimentais, é possível estimar as derivadas parciais e equacionar a propagação da incerteza. A dedução detalhada das equações seguintes pode ser observada em (Branco, 1999).

##### 4.1.1 Fórmula de correção no plano horizontal

O ângulo horizontal corrigido é dado por:

$$\eta'_i = \eta_i - \alpha' - e_h - \alpha_h - \alpha_H - \Delta\eta_g - \Delta f_h - e_p - \theta_T \quad (1)$$

##### 4.1.2 Variâncias contribuintes

##### a) Incerteza devido ao desvio do eixo de colimação - $u(\alpha')$

A incerteza combinada devido ao eixo de colimação é dada por

$$u_c^2(\alpha') = u^2(\alpha) \quad (2)$$

sendo a componente horizontal do erro sistemático dada por,

$$\alpha' = F(\alpha, \beta, \zeta) = \arctan\left(\frac{\tan \alpha}{\sin \zeta - \cos \zeta \cdot \tan \beta}\right) \quad (3)$$

A incerteza combinada de  $\alpha'$ ,  $u_c(\alpha')$ , é determinada através das incertezas das grandezas de entrada  $u(\alpha)$ ,  $u(\beta)$  e  $u(\zeta)$  pela lei de propagação da incerteza, como segue:

$$u_c^2(\alpha') = c_\alpha^2 u^2(\alpha) + c_\beta^2 u^2(\beta) + c_\zeta^2 u^2(\zeta) \quad (4)$$

O ângulo  $\alpha$  indica um desvio horizontal e o ângulo  $\beta$  um desvio vertical da linha atual de mira com o respectivo eixo de colimação e,  $c_\alpha$ ,  $c_\beta$  e  $c_\zeta$  são os coeficientes de sensibilidade das grandezas de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\zeta$ , respectivamente. Para a condição em que  $\zeta = \pi/2$  tem-se:

$$c_\alpha = \frac{\partial F}{\partial \alpha} = 1 \quad (5)$$

$$c_{\beta} = \frac{\partial F}{\partial \beta} = 0 \quad (6)$$

$$c_{\zeta} = \frac{\partial F}{\partial \zeta} = -\text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \beta \cong 0 \quad (7)$$

### b) Incerteza devido ao desvio do eixo horizontal - $u(e_h)$

A incerteza combinada devido ao erro sistemático proveniente do desvio do eixo horizontal é dada por

$$u_c^2(e_h) = i^2 \cdot u^2(\zeta) \quad (8)$$

sendo a componente horizontal do erro sistemático dada por,

$$e_h = G(i, \zeta) = i \cdot \cot \zeta \quad (9)$$

A incerteza combinada de  $e_h$ ,  $u_c(e_h)$ , é determinada através das incertezas das grandezas de entrada  $u(i)$  e  $u(\zeta)$  pela lei de propagação da incerteza, como segue:

$$u_c^2(e_h) = c_i^2 u^2(i) + c_{\zeta}^2 u^2(\zeta) \quad (10)$$

O desvio do eixo horizontal em relação a um plano perpendicular ao eixo vertical é denotado como erro do eixo horizontal  $i$  e,  $c_i$  e  $c_{\zeta}$  são os coeficientes de sensibilidade das grandezas de  $i$  e  $\zeta$ , respectivamente. Para a condição em que  $\zeta = \pi/2$  tem-se:

$$c_i = \frac{\partial G}{\partial i} = 0 \quad (11)$$

$$c_{\zeta} = \frac{\partial G}{\partial \zeta} = -i \quad (12)$$

### c) Incerteza devido ao erro de oscilação do eixo vertical - $u(\alpha_h)$

A incerteza combinada devido ao erro de oscilação do eixo vertical é dada por

$$u_c^2(\alpha_h) = \frac{h^2 \cdot \cos^2 \delta_i}{d^2} \cdot u^2(\delta_i) + \text{sen}^2 \delta_i \cdot \left( u^2(\zeta_i) + \frac{1}{d_i} u^2(h) + \frac{h}{d_i^2} u^2(d_i) \right) \quad (13)$$

sendo a componente horizontal do erro sistemático dada por,

$$\alpha_h = \text{arc cot} \frac{h \cdot \text{sen } \delta_i \cdot \cos \gamma_i + d_i \cdot \text{sen } \zeta_i \cdot (\cos^2 \gamma_i \cos \delta_i + \text{sen}^2 \gamma_i) + d_i \cdot \cos \zeta_i \cdot \cos \gamma_i \text{ sen } \delta_i}{h \cdot \text{sen } \delta_i \cdot \text{sen } \gamma_i + d_i \cdot \text{sen } \zeta_i \cdot \text{sen } \gamma_i \cos \gamma_i (\cos \delta_i - 1) + d_i \cdot \cos \zeta_i \cdot \text{sen } \gamma_i \text{ sen } \delta_i} \quad (14)$$

A determinação de  $\delta_i$  para cada medição só é possível para teodolitos especiais que possuem sistema de correção do desvio do eixo vertical em particular (erro de oscilação e erro do eixo vertical). Além disso, a curva de erros não é estável ao longo do tempo que, ao contrário, varia a cada montagem do teodolito. Isto sugere que este erro seja tratado como um erro aleatório. A consequência disso é o aumento da incerteza final, no entanto, em muitos casos isto pode ser perfeitamente admissível.

Para isto, pode-se considerar  $\gamma_i$  em uma condição bastante desfavorável, como  $\gamma_i = \pi/2$ . Assim,  $\text{sen } \gamma_i = 1$  e  $\cos \gamma_i = 0$ , e a equação 4.21 pode ser simplificada para:

$$\alpha_h = I(\delta_i, \zeta_i, h, d_i) = \arctan \left( \frac{h \cdot \text{sen } \delta_i + d_i \cdot \cos \zeta_i \cdot \text{sen } \delta_i}{d_i \cdot \text{sen } \zeta_i} \right) \quad (15)$$

A incerteza combinada de  $\alpha_h$ ,  $u_c(\alpha_h)$ , é determinada através das incertezas das grandezas de entrada  $u(\delta_i)$ ,  $u(\zeta_i)$ ,  $u(h)$  e  $u(d_i)$  pela lei de propagação da incerteza, como segue:

$$u_c^2(\alpha_h) = c_{\delta_i}^2 u^2(\delta_i) + c_{\zeta_i}^2 u^2(\zeta_i) + c_h^2 u^2(h) + c_{d_i}^2 u^2(d_i) \quad (16)$$

A rotação do teodolito em torno do eixo vertical produz um erro de oscilação, admitindo-se que o eixo vertical encontre-se inclinado de um ângulo  $\delta_i$  e,  $c_{\delta_i}$ ,  $c_{\zeta_i}$ ,  $c_h$  e  $c_{d_i}$  são os



coeficientes de sensibilidade das grandezas de  $\delta_i$ ,  $\zeta_i$ ,  $h$  e  $d_i$ , respectivamente. Para a condição em que  $\zeta = \pi/2$  tem-se:

$$c_{\delta_i} = \frac{\partial I}{\partial \delta_i} = \frac{h \cdot \cos \delta_i}{d_i} \quad (17)$$

$$c_{\zeta_i} = \frac{\partial I}{\partial \zeta_i} = -\operatorname{sen} \delta_i \quad (18)$$

$$c_h = \frac{\partial I}{\partial h} = \frac{\operatorname{sen} \delta_i}{d_i} \quad (19)$$

$$c_{d_i} = \frac{\partial I}{\partial d_i} = \frac{h \cdot \operatorname{sen} \delta_i}{d_i} \quad (20)$$

**d) Incerteza devido ao desvio do eixo vertical -  $u(\alpha_H)$**

A incerteza combinada de  $\alpha_h$ ,  $u_c(\alpha_H)$ , é determinada através das incertezas das grandezas de entrada  $u(\delta)$ ,  $u(\zeta)$ ,  $u(h)$  e  $u(d)$  pela equação 21:

$$u_c^2(\alpha_H) = \frac{h^2 \cdot \cos^2 \delta}{d^2} \cdot u^2(\delta) + \operatorname{sen}^2 \delta \cdot \left( u^2(\zeta) + \frac{1}{d} u^2(h) + \frac{h}{d^2} u^2(d) \right) \quad (21)$$

A componente horizontal do erro proveniente do desvio vertical,  $\alpha_H$ , é dada pela equação 15. Esta incerteza difere da incerteza de oscilação, item c, no valor de entrada de  $\delta$ .

Conforme (Wendt, 1995), a influência da componente horizontal do erro proveniente do desvio vertical é semelhante ao efeito da componente horizontal do erro de oscilação. Entretanto, o desvio do eixo vertical  $\delta$  é independente da direção de observação, sendo constante para qualquer alvo.

**e) Incerteza devido ao erro de graduação da escala horizontal -  $u(\Delta\eta_g)$**

A incerteza combinada de  $\Delta\eta_g$ , é determinada através da incerteza da grandeza de entrada  $\Delta\eta_i$  e da média  $\overline{\Delta\eta}$ , pela equação:

$$u_c^2(\Delta\eta_g) = c_{\Delta\eta_i}^2 u^2(\Delta\eta_i) + c_{\overline{\Delta\eta}}^2 u^2(\overline{\Delta\eta}) \quad (22)$$

O erro de graduação da escala é obtido da comparação do teodolito com a mesa-padrão geradora de ângulos.

O valor do erro é dado por:

$$\Delta\eta_i = (\eta_{\text{mesa}})_i - (\eta_{\text{teod}})_i \quad (23)$$

A soma das diferenças deve ser minimizada, para eliminar o erro sistemático do zero da escala do teodolito, subtraindo-se cada diferença pela média das diferenças  $\overline{\Delta\eta}$ . Assim o resultado corrigido é expresso por:

$$\Delta\eta_g = \Delta\eta_i - \overline{\Delta\eta} \quad (24)$$

**f) Incerteza devido ao erro focal no plano horizontal -  $u(\Delta f_h)$**

A incerteza combinada de  $\Delta f_h$  é determinada, através da incerteza da grandeza de entrada  $f_h$  e da média  $\overline{f_h}$ , pela equação:

$$u_c^2(\Delta f_h) = c_{f_h}^2 u^2(f_h) + c_{\overline{f_h}}^2 u^2(\overline{f_h}) \quad (25)$$

O erro focal,  $f_h$ , é obtido pela comparação do eixo focal do teodolito com o eixo focal do autocolimador.

A soma dos erros focais deve ser minimizada, eliminando-se o erro sistemático residual do alinhamento dos eixos focais, subtraindo-se cada diferença pela média das diferenças  $\overline{f_h}$ . Assim o resultado corrigido é

$$\Delta f_h = f_h - \overline{f_h}. \quad (26)$$

**g) Incerteza devido ao erro de pontaria -  $u(e_p)$**

A incerteza combinada de  $\Delta p$  é determinada pela equação:

$$u_c^2(\Delta p) = u^2(D) + u^2((e_p)_i) + u^2((e_p)_{i+1}) \quad (27)$$

Considerando que:

$$u^2((e_p)_i) \cong u^2((e_p)_{i+1}) \quad (28)$$

e que:

$$u^2(D) \cong 0 \quad (29)$$

A incerteza devido ao erro de pontaria,  $e_p$ , é determinada pela medição em intervalos regulares sobre a graduação da escala no retículo do autocolimador. O ângulo medido em cada intervalo é denominado  $\Delta p$ , que é dado por:

$$\Delta p = D + (e_p)_i + (e_p)_{i+1} \quad (30)$$

onde  $D$  é a distância entre dois traços da escala,  $e$ ,  $(e_p)_i$  e  $(e_p)_{i+1}$  são os erros de pontaria em dois traços consecutivos.

Tem-se que os valores de  $\Delta p$  determinam a dispersão do erro de pontaria duplicado, logo:

$$u_c^2(e_p) = \frac{u^2(\Delta p)}{2} \quad (31)$$

**h) Incerteza devido a variação de temperatura na escala,  $u(\theta_T)$**

A incerteza combinada de  $\theta_T$ , é determinada pela equação:

$$u_c^2(\theta_T) = c_{\Delta T}^2 u^2(\Delta T) + c_{\tau}^2 u^2(\tau) \quad (32)$$

O desvio angular proveniente da variação cíclica de temperatura  $\theta_T$  é uma função de  $\Delta T$  e do coeficiente de dilatação linear da escala,  $\tau$ , como segue:

$$\theta_T = N(\Delta T, \tau) \quad (33)$$

Pode-se ainda, supor que a amplitude de uma variação aproximadamente cíclica, no tempo, da temperatura sobre um sistema termostático produz uma distribuição em forma de U (arco seno) de temperaturas, resultando em uma incerteza padronizada de:

$$u(\Delta T) = \frac{\Delta T}{\sqrt{2}} \quad (34)$$

**4.1.3 Equação da incerteza combinada**

A equação 1 fornece o ângulo horizontal corrigido de todos os erros de medição que podem afetar a medição com o teodolito.

A incerteza combinada do ângulo horizontal  $\eta'$ ,  $u_c(\eta')$  é determinada através da incerteza da grandeza de entrada  $u_c(\eta_i)$ , e, das correções dos erros que são funções de outras variáveis de entrada. (Branco, 1999)

A lei de propagação da incerteza relaciona essas grandezas da seguinte forma:

$$u_c^2(\eta'_i) = u^2(\eta_i) + u^2(\alpha') + u^2(e_h) + u^2(\alpha_h) + u^2(\alpha_H) + u^2(\Delta\eta_g) + u^2(\Delta f_h) + u^2(e_p) + u^2(\theta_T) + 2.u(\alpha', e_h) + 2.u(\alpha', \alpha_h) + 2.u(\alpha', \alpha_H) + 2.u(e_h, \alpha_h) + 2.u(e_h, \alpha_H) + 2.u(\alpha_h, \alpha_H) \quad (35)$$

Considerando-se que todas as incertezas estão expressas com o mesmo nível de confiança, esta equação é simplificada para:

$$u_c^2(\eta'_i) = u^2(\eta_i) + u^2(\alpha') + u^2(e_h) + u^2(\alpha_{h+H}) + u^2(\Delta\eta_g) + u^2(\Delta f_h) + u^2(e_p) + u^2(\theta_T) + 2.u(\alpha'_i, e_h) + 2.u(\alpha'_i, \alpha'_{h+H}) + 2.u(e_h, \alpha'_{h+H}) \quad (36)$$

Tem-se que a covariância entre as grandezas correlacionadas é dada por:

$$u(\alpha'_i, e_h) = r(\alpha'_i, e_h) \cdot u(\alpha'_i) \cdot u(e_h) = 0 \quad (37)$$

$$u(\alpha'_i, \alpha_{h+H}) = r(\alpha'_i, \alpha_{h+H}) \cdot u(\alpha'_i) \cdot u(\alpha_{h+H}) = 0 \quad (38)$$

$$u(e_h, \alpha_{h+H}) = r(e_h, \alpha_{h+H}) \cdot u(e_h) \cdot u(\alpha_{h+H}) = 0 \quad (39)$$

Observando-se a equação 2, tem-se que a  $u(\zeta)$  é muito pouco representativa na determinação de  $u(\alpha')$  sendo considerada igual a zero. Dessa forma, a correlação de  $\alpha'$  com qualquer outra grandeza na dependência de  $\zeta$  é muito fraca podendo ser desprezada. De maneira semelhante ocorre na equação 13. Logo a equação 36, é simplificada para:

$$u_c^2(\eta'_i) = u^2(\eta_i) + u^2(\alpha') + u^2(e_h) + u^2(\alpha_{h+H}) + u^2(\Delta\eta_g) + u^2(\Delta f_h) + u^2(e_p) + u^2(\theta_T) \quad (40)$$

Aplicando-se as incertezas combinadas das variáveis de entrada de cada uma das correções, tem-se a equação de incerteza expandida para:

$$u_c^2(\eta'_i) = u^2(\eta_i) + u^2(\alpha) + i^2 \cdot u^2(\zeta) + \frac{h^2 \cdot \cos^2(\delta_h + \delta_H)}{d^2} u^2(\delta_h + \delta_H) + \\ + \text{sen}^2(\delta_h + \delta_H) \left( u^2(\zeta_i) + \frac{u^2(h)}{d} + \frac{h \cdot u^2(d)}{d^2} \right) + u^2(\Delta\eta_g) + u^2(\Delta f_h) + u^2(e_p) + u^2(\theta_T) \quad (41)$$

## 4.2 Modelo Matemático da Medição no Plano Vertical

Assim como foi utilizada uma formulação matemática para avaliar a influência das variáveis de entrada na determinação da incerteza de medição no plano horizontal, foi desenvolvido especificamente para o plano vertical.

### 4.2.1 Fórmula de correção no plano vertical

O ângulo vertical corrigido é dado por:

$$\zeta'_i = \zeta_i - \beta' - e_v - \overline{\Delta\zeta_i} - \overline{\Delta\zeta_v} - v - \Delta\zeta_g - \Delta f_v - e_p - \theta_T \quad (42)$$

### 4.2.2 Equação da incerteza combinada

A equação 42 fornece o ângulo vertical corrigido de todos os erros de medição que podem afetar a medição com o teodolito.

A incerteza combinada do ângulo horizontal  $\zeta'$ ,  $u_c(\zeta')$  é determinada através da incerteza da grandeza de entrada  $u_c(\zeta_i)$ , e, das correções dos erros que são funções de outras variáveis de entrada. (Branco, 1999)

A lei de propagação da incerteza relaciona essas grandezas da seguinte forma:

$$u_c^2(\zeta'_i) = u^2(\zeta_i) + u^2(\beta) + \left( 8 + \text{sen}^2(\delta_i + \delta_v) \right) \cdot u^2(\zeta) + \frac{h^2}{d^2} \text{sen}^2(\delta_i + \delta_v) u^2(\delta_{i+v}) + \\ + u^2(\Delta\zeta_g) + u^2(\Delta f_v) + u^2(e_p) + u^2(\theta_T) + 4 \cdot u(\zeta) \cdot \sqrt{u^2(\beta) + 4 \cdot u^2(\zeta)} + \\ + \left( 4 u(\zeta) + 2 \cdot \sqrt{u^2(\beta) + 4 u^2(\zeta)} \right) \cdot \sqrt{\frac{h^2}{d^2} \text{sen}^2(\delta_i + \delta_v) \cdot u^2(\delta_{i+v}) + \cos^2(\delta_i + \delta_v) \cdot u^2(\zeta)} \quad (43)$$

## 5. CONCLUSÕES

O estudo dos erros do teodolito mostra que a incerteza de medição é principalmente influenciada por 3 erros, o erro de colimação horizontal, erro de zero da escala vertical  $v$ , simultaneamente com a componente vertical do erro de colimação e o erro do eixo horizontal,  $i$ .

Os erros de colimação horizontal e vertical dependem da distância do alvo devido a divergência entre o eixo de colimação e o eixo óptico. As variações do eixo de colimação no espaço são causadas pelo movimento dos focos das lentes. Como resultado o eixo de

colimação descreve uma curva espacial. A curvatura dos desvios do eixo de colimação é reprodutível por um período de muitos meses. Por outro lado, o eixo se move em toda a sua extensão em um tempo relativamente curto. Por isto, o deslocamento da curva que descreve a relação entre ajuste do foco e direção do eixo de colimação deve de ser verificada antes de iniciar as medições.

Antes de iniciar as medições o erro de zero da escala vertical deve ser avaliado, assim como a correspondente incerteza da correção. Variações do eixo de colimação e do erro de zero da escala vertical, com respeito a distância de focalização são reprodutíveis na faixa de 0,3 seg por mais de um ano. Somando a isto pode ser dito que após todas as correções comuns deve ser introduzido uma incerteza de medição angular global dependendo da reprodutibilidade da pontaria e do erro devido ao movimento de focalização das lentes. Esses erros são estáveis por longo período. Além disso, a incerteza de medição angular é influenciada pela incerteza da colimação, pelas incertezas provenientes do eixo horizontal, da oscilação e inclinação do eixo vertical e pela incerteza da graduação da escala.

Existe um interesse crescente na indústria pela calibração de teodolitos devido à evolução tecnológica oriunda da busca pela competitividade entre as empresas, e pelas exigências dos procedimentos da Qualidade para com os Certificados de Calibração de Instrumentos, buscando-se a confiabilidade dos resultados.

Ainda não foram identificados laboratórios, tanto no Brasil como em países europeus, que fossem credenciados para realizar a calibração de teodolitos. Na realidade, alguns laboratórios prestam serviços de verificação do instrumento segundo normas de verificação em campo mas nenhum deles é capacitado a realizar a calibração segundo os conceitos atualmente aceitos em Metrologia.

O artigo aqui apresentado aborda um estudo sobre os erros de medição com teodolitos que foi desenvolvido para a implementação da calibração de teodolitos que está sendo desenvolvida no Laboratório de Metrologia Dimensional do INMETRO, possibilitando a realização de experimentos e o estudo de sua aplicabilidade na resolução da questão apresentada.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) que através do Laboratório de Metrologia Dimensional vem oferecendo suporte para o desenvolvimento deste trabalho e à Universidade Federal Fluminense pelo apoio científico.

## **7. REFERÊNCIAS**

- Branco, D.F., Muñoz, G.S., Leta, F.R., Oliveira J.C.V, 1998, “Considerações Sobre a Calibração de Teodolitos Segundo Conceitos Atuais de Metrologia”, 8º Congresso Chileno de Ingeniería Mecánica, Concepción, 915 - 919.
- Branco, D.F., Muñoz, G.S., Leta, F.R., Oliveira J.C.V, 1999, “Desvios de Medição na Calibração de Teodolitos”, 5ª Semana de Engenharia, Niterói, Rio de Janeiro.
- Branco, D.F., 1998, “Calibração de Teodolitos”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, R.J., Brasil, 133p.
- INMETRO, 1997, “Guia para Expressão da Incerteza de Medição” Duque de Caxias, Brasil.
- ISO 4463-1, 1979, Measurement methods for building - Setting-out and measurement - Part 1: Planning and organization, measuring procedures, acceptance criteria.

- ISO 7077, 1981, Measurement methods for building - General principles and procedures for the verification of dimensional compliance.
- ISO 7078, 1985, Building construction - Procedures for setting-out, measurement and surveying - Vocabulary and guidance notes.
- ISO 8322-4, 1991, Building construction - Measuring instruments - Procedures for determining accuracy in use - Part 4: Theodolites.
- ISO/CD 12857-2, 1994, Optics and optical instruments - Geodetic instruments - Procedures for determining accuracy in the field - Part 2: Theodolites.
- Wendt K., Zumbrunn R., 1995, "Development of Test and Calibration Procedures for Automated Theodolite Systems in Production Metrology", Final Report.

# **AVALIAÇÃO DA INCERTEZA NA CALIBRAÇÃO DE PADRÃO ESCALONADO EM MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS – MÉTODO DA COMPARAÇÃO**

**José Leonardo Noronha<sup>1</sup>**

**Carlos Alberto Schneider<sup>2</sup>**

**Alexandre Becker de Barros<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Prof. EFEI, Doutorando UFSC, <sup>2</sup> Prof. Doutor em Engenharia, <sup>3</sup> Eng. Mecânico.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica,  
Laboratório de Metrologia e Automação LABMETRO, 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil.  
E-mail: <sup>1</sup> jln@labmetro.ufsc.br <sup>2</sup> cas@certi.ufsc.br

## **Resumo**

As Máquinas de Medir por Coordenadas – CMMs são largamente utilizadas na verificação dimensional de peças, sendo que as CMMs laboratoriais com baixas incertezas de medição podem ser utilizadas também como padrões ou meios para calibração de medidas materializadas e instrumentos de medição. Os padrões escalonados são medidas materializadas, sendo referências para a medição de peças e para a calibração de alguns instrumentos de medição. A sua calibração é realizada normalmente através de métodos convencionais, nem sempre flexíveis e rápidos. Nas CMMs esta calibração pode ser realizada de forma flexível e com um menor custo, através do método da comparação ou substituição, tendo como referência blocos padrão calibrados. Neste artigo, são apresentadas as fontes de incertezas, o procedimento e a avaliação da incerteza na calibração de um padrão escalonado através do método da comparação, utilizando a Máquina de Medir por Coordenadas como meio e blocos padrão como referência para calibração. Os resultados mostraram que as incertezas de medição obtidas na calibração são admissíveis para este tipo de padrão escalonado, com vantagens operacionais significativas em relação aos métodos convencionais.

**Palavras-chave:** Incerteza de Medição, Máquinas de Medir por Coordenadas, Padrão Escalonado, Calibração.

## **1. INTRODUÇÃO**

Existem diversos tipos de padrões escalonados com diferentes faixas de medição e erros admissíveis os quais são utilizados nas indústrias na verificação de máquinas ferramentas e máquinas de medir por coordenadas, nas medições diretas ou por comparação de alturas e nas calibrações de medidores internos com relógio, de micrômetros internos, de micrômetros de profundidade, de paquímetros e traçadores de altura.

Nas normas que tratam de requisitos de sistemas da qualidade (NBR ISO 9001, NBR ISO 9002, NBR ISO 9003, NBR ISO 9004, 1994, QS-9000, 1998) o controle de sistemas de medição é um importante elemento do sistema de garantia da qualidade. Como exigência das normas, deve-se estabelecer e manter um sistema efetivo para o controle e calibração dos

padrões e sistemas de medição utilizados para demonstrar a conformidade do produto com os requisitos especificados.

Em alguns métodos os padrões escalonados podem ser calibrados, utilizando:

- comparador eletrônico e blocos padrão (fig. 1.a);
- comparador eletrônico e laser interferométrico (fig. 1.b);
- CMM e laser interferométrico (Valente de Oliveira e Pires Alves, 1997).

Nestes métodos os tempos de preparação e execução são relativamente altos (em torno de 3 horas), devido à montagem, limpeza e posicionamento dos blocos padrão e alinhamento do laser, conseqüentemente aumentando os custos de calibração. Os métodos da comparação utilizando CMM CNC laboratoriais e blocos padrão e o da CMM Virtual (Trapet, 1997, Abackerli e Cauchick Miguel, 1997, PTB et al, 1998) estão sendo pesquisados para calibração, por terem apresentados vantagens em relação à flexibilidade e tempos de preparação e avaliação da incerteza de medição.

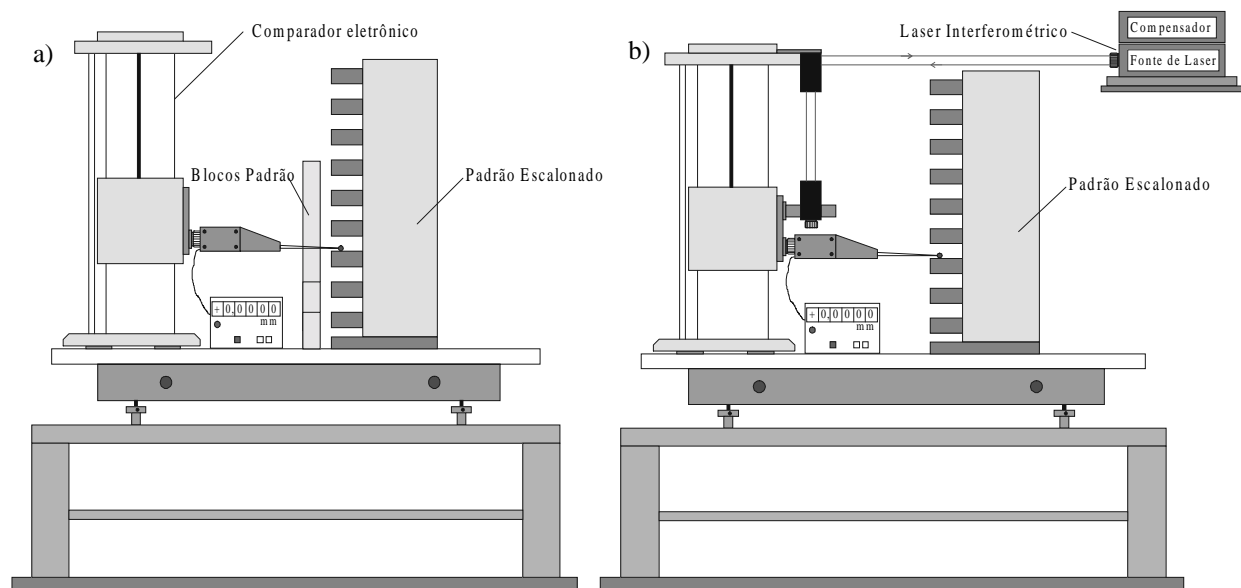


Figura 1 - Calibração de padrão escalonado utilizando comparador eletrônico e tendo como padrão: a) blocos padrão b) laser interferométrico (Link, 1997)

A incerteza de medição é o parâmetro básico para validação do método de calibração e a sua avaliação é complexa. Não existe uma forma única de se chegar à incerteza de medição nas calibrações. Uma proposta de padronização está contida no documento da ISO (ISO, 1993) e será utilizada como referência para a avaliação da incerteza.

Neste trabalho são apresentados o procedimento de calibração utilizando a CMM, o procedimento de avaliação da incerteza de medição, aplicação prática e análise dos resultados, mostrando a viabilidade de se utilizar a CMM na calibração de padrões escalonados.

## 2. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE PADRÕES ESCALONADOS NA CMM

O método da comparação utilizando CMM e blocos padrão para calibração da coluna de ressaltos e do fuso de um padrão escalonado com tambor micrométrico é apresentado. Na figura 2 tem-se as partes principais de um padrão escalonado e os erros admissíveis para a coluna de ressaltos e do fuso micrométrico.

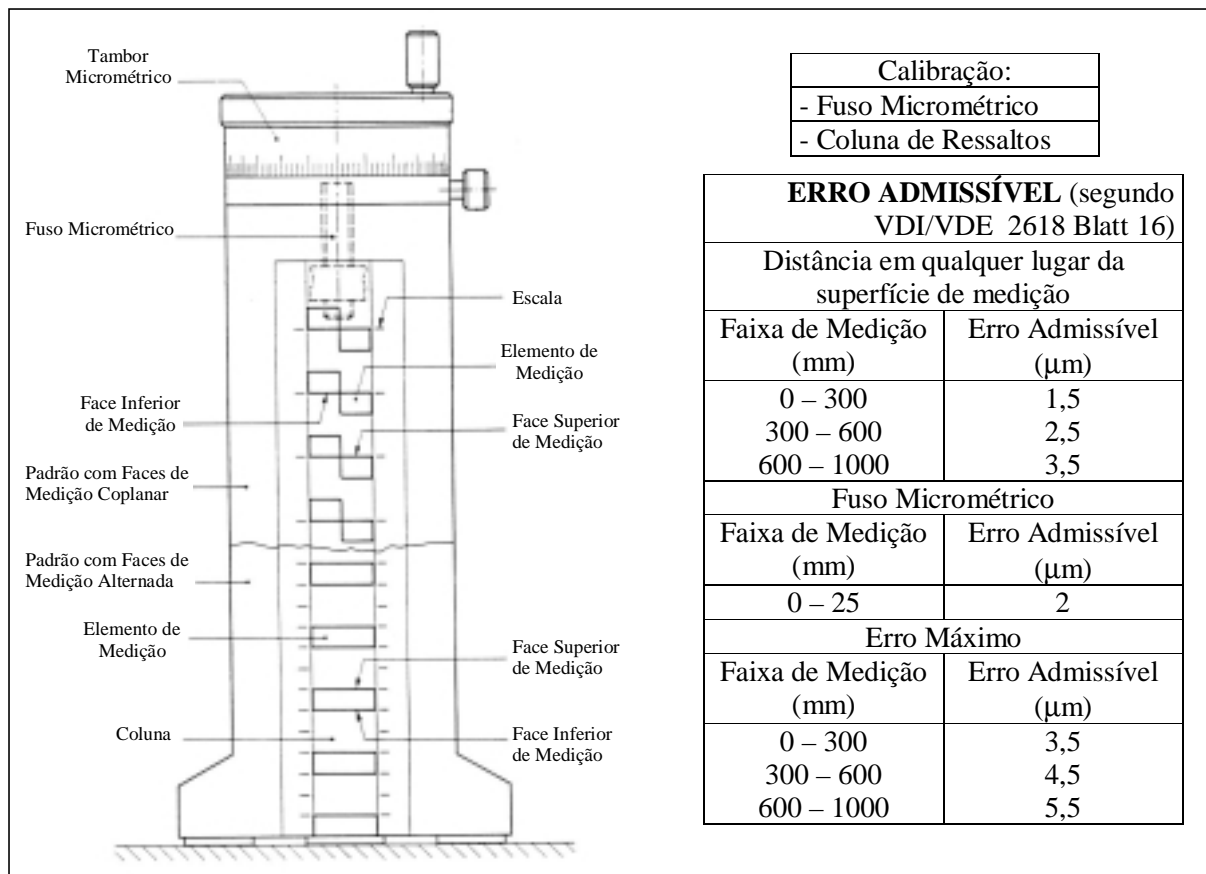


Figura 2 - Partes principais do padrão escalonado com tambor micrométrico e erros admissíveis (ISO 7863, 1984, VDI/VDE/DGQ 2618 – Blatt 16, 1991)

## 2.1 MÉTODO DA COMPARAÇÃO

No método da comparação ou substituição, a avaliação e a correção de erros são feitas com um padrão de referência calibrado com as mesmas características do objeto a ser calibrado. As diferenças entre os resultados de medições sobre o padrão e os valores correspondentes deste são usados para correção da medição sobre o objeto.

Na calibração de padrões escalonados na CMM, os erros podem ser determinados pela medição das distâncias entre os ressaltos do padrão escalonado a calibrar, comparando os resultados com uma medição de referência sobre um padrão de comprimento. A medição do padrão de referência fornece diretamente os erros associados com a tarefa de medição específica. Faz-se a avaliação e correção de erros utilizando blocos padrão de referência calibrados. Com os blocos padrão posicionados paralelamente ao padrão escalonado na CMM (fig.3), alguns erros do processo de medição podem ser determinados e corrigidos/eliminados na calibração do padrão escalonado.

O procedimento inicia-se com a medição de um bloco de aproximadamente 10 mm, onde se compensam os erros sistemáticos advindos da flexão e raio do apalpador da CMM. Após isso um bloco de comprimento aproximadamente igual ao comprimento do padrão escalonado, é medido de modo a compensar os erros devidos à principalmente às escalas da CMM.

Dependendo do tipo de padrão escalonado, o procedimento sofre alterações. Na calibração de padrão escalonado com tambor micrométrico o alinhamento do sistema coordenado é feito em relação ao eixo Z da CMM. Na medição dos ressaltos, um programa CNC executa os seguintes passos: apalpa um ponto sobre a mesa da CMM, apalpa no centro



das faces inferiores dos ressaltos de baixo para cima, as faces superiores de cima para baixo e novamente a mesa da CMM. Para o fuso micrométrico apalpa-se a face superior do último ressalto, sobre a qual define-se o zero. Os pontos de medição dependem do curso do fuso. Posiciona-se o fuso manualmente nas posições de medição, sendo que o sensor continua apalpando o último ressalto durante toda calibração.

Na calibração de padrão escalonado horizontal o alinhamento do sistema coordenado é feito em relação aos eixos X ou Y, através da medição de pontos sobre a superfície de referência e a lateral do primeiro ressalto. Nos ressaltos mede-se um ponto no centro das faces de medição, inclusive no ressalto de referência.

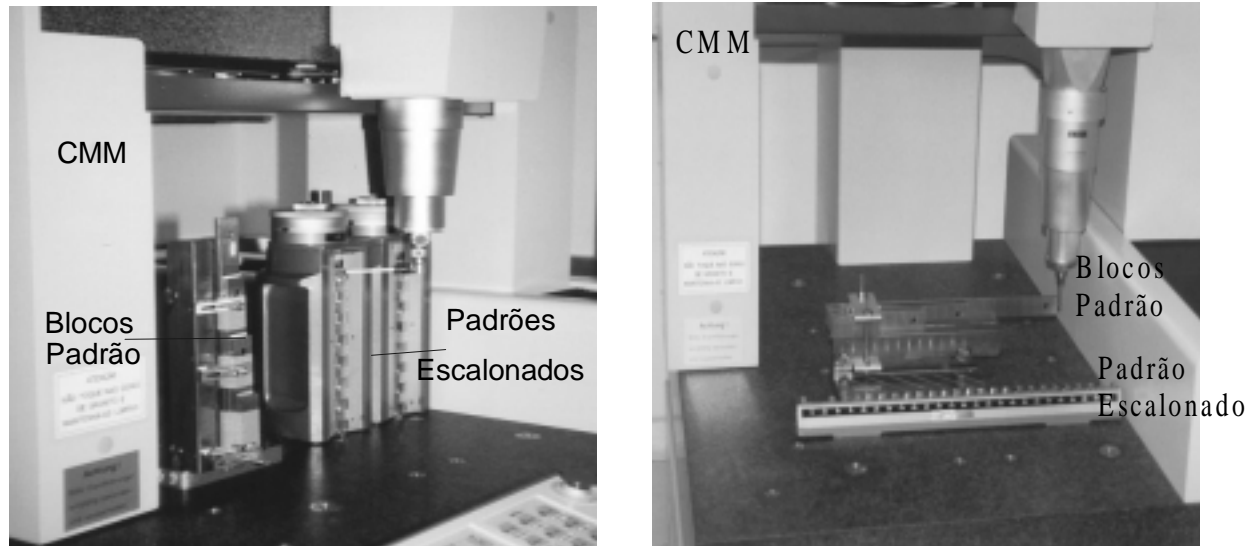


Figura 3 - Calibração de padrões escalonados (com tambor micrométrico e horizontal) utilizando CMM e blocos padrão

### 3. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO - CALIBRAÇÃO DE PADRÃO ESCALONADO COM TAMBOR MICROMÉTRICO NA CMM

Na avaliação da incerteza de medição têm-se as estimativas da incerteza padrão ( $u$ ) por meios estatísticos (avaliação tipo A) e por meio não estatísticos (avaliação tipo B). Na calibração do padrão escalonado com tambor micrométrico devem ser consideradas as seguintes fontes incertezas:

**a) Repetitividade da indicação da CMM (Incerteza padrão tipo A -  $u_A$ )**

A avaliação da incerteza -  $u_A$  fica definida como o desvio padrão experimental da média das indicações da CMM, então:

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

**b) Incerteza da CMM (Avaliação tipo B)**

Os efeitos desta fonte de incerteza são estimados tendo como base dados já existentes de uma calibração previamente realizada e apresentados no respectivo certificado. No método da comparação é considerada apenas a parcela independente do comprimento na incerteza de medição, a parcela relativa ao comprimento é compensada pela medição diferencial com o bloco padrão de referência.

### c) Estabilidade do zero da CMM

Pode ocorrer em função de variação nas condições ambientais e de outros fatores no decorrer do tempo, e se manifesta como alteração do valor inicial da escala (zero) da CMM.

### d) Resolução do tambor micrométrico (Avaliação tipo B)

O valor da incerteza expandida, o tipo de distribuição e o fator de abrangência dependem se o mostrador do padrão escalonado é analógico ou digital. Para calibração com mostrador digital, adota-se como caso geral o valor de incerteza igual à metade do incremento digital.

Para calibração com mostrador analógico, assume-se como valor de incerteza, devida à divisão da escala, a própria resolução adotada e distribuição retangular.

### e) Diferenças de temperatura

Incertezas devido às diferenças de temperatura entre o padrão escalonado, o bloco padrão e a temperatura de referência 20°C ( $U_T$ ).

$$U_T = L_{BP} \cdot \alpha_{BP} \cdot \Delta T_{BP} - L_{PE} \cdot \alpha_{PE} \cdot \Delta T_{PE} \quad (2)$$

Onde:

$L_{BP}$  - Comprimento do bloco padrão

$L_{PE}$  - Comprimento do padrão escalonado

$\alpha_{BP}$  - Coeficiente de expansão térmica do bloco padrão

$\alpha_{PE}$  - Coeficiente de expansão térmica do padrão escalonado

$\Delta T_{BP}$ ,  $\Delta T_{PE}$  - Diferenças de temperaturas do bloco padrão e padrão escalonado em relação à temperatura de referência 20°C.

### f) Estabilidade de fixação do bloco padrão e do padrão escalonado

A incerteza devida à instabilidade da fixação do bloco padrão de referência e o padrão escalonado pode ser estimado por experiência.

A incerteza combinada ( $u_c$ ) da influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (3)$$

A Incerteza expandida ( $U$ ) é obtida multiplicando a incerteza combinada ( $u_c$ ) por um fator de abrangência ( $k$ ):

$$U = k \cdot u_c \quad (4)$$

O fator de abrangência  $k$  deve levar em conta, além do nível de confiança desejado, o número de graus de liberdade efetivos ( $v_{eff}$ ). O número de graus de liberdade efetivo pode ser calculado pela equação de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (5)$$

onde  $v_i$  é o número de graus de liberdade associado à  $i$ -ésima fonte de incerteza.

## 4. APLICAÇÃO - CALIBRAÇÃO DE PADRÃO ESCALONADO COM TAMBOR MICROMÉTRICO NA CMM

Na calibração de um padrão escalonado de 275 mm de comprimento utilizou-se uma CMM tipo portal e os blocos padrão de 10 mm e 350 mm (fig. 4), com as seguintes incertezas expandidas ( $U$ ), para um fator de abrangência  $k=2$  e nível de confiança 95 %:

- CMM,  $U = \pm 1,0 \mu\text{m}$ , considerando o método da comparação;

- Blocos Padrão de 350 e 10 mm, com  $U = \pm 0,09 \mu\text{m}$  e  $\pm 0,06 \mu\text{m}$ , respectivamente;

As condições laboratoriais durante a calibração foram:

Temperatura:  $(20,0 \pm 0,3)^\circ\text{C}$ ;

Umidade relativa do ar:  $(50 \pm 10) \%$ .

#### 4.1 ESTIMATIVA DA INCERTEZA NO FUSO MICROMÉTRICO

O padrão escalonado foi colocado sobre a mesa da CMM na posição vertical. A posição do zero foi definida na face superior do último ressalto, com o mostrador analógico do tambor micrométrico indicando zero. O tambor micrométrico foi posicionado manualmente por valores crescentes e decrescentes a fim de se avaliar a histerese e foram realizados 3 ciclos de medição. A identificação e a contribuição das fontes de incerteza, para 27 mm, estão apresentadas na tabela 1 sendo que  $u$  é a incerteza padrão e  $v_{eff}$  é o grau de liberdade efetivo.



Figura 4 - Calibração de padrão escalonado com tambor micrométrico utilizando Máquina de Medir por Coordenadas, bloco padrão de 350 mm e bloco padrão de 10 mm.

Tabela 1 - Avaliação das incertezas de medição do fuso micrométrico do padrão escalonado na posição 27 mm

Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA		DISTR. DE PROBABILIDADES		C <sub>i</sub>	u <sub>i</sub> ± [ mm ]	v <sub>i</sub> ou v <sub>eff</sub>
	FONTES	VALOR ± [ mm ]	TIPO	DIVISOR			
$U_{CMM}$	Incerteza da CMM	0,0010	Normal	2	1	0,0005	50
$U_{Res}$	Incerteza devida à Resolução do Parafuso	0,0010	Retangular	1,7321	1	0,0006	infinito
$U_{DifTemp}$	Diferença de Temp. entre Paraf. e Escala CMM	****	****	****	****	****	****
$U_{BP10}$	Incerteza do Bloco Padrão de 10 mm	****	****	****	****	****	****
$U_{Flut}$	Flutuação do Zero	0,0002	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de fixação do BP	0,0001	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix}$	Estabilidade da Fixação do Padrão Escalonado	****	****	****	****	****	****
$u_A$	Incerteza Padrão Tipo A	0,0005	Normal	1,000	1	0,0005	2
$u_c$	<b>INCERTEZA COMBINADA</b>		<b>NORMAL</b>			0,00092	22
$U$	<b>INCERTEZA EXPANDIDA</b>		<b>NORMAL K= 2,12</b>			<b>0,0020</b>	

OBSERVAÇÕES:  
A incerteza de medição apresentada é a maior da faixa de medição, calculada no ponto 27 mm.  
\*\*\*\* : Fonte Desprezível.

O valor da flutuação (estabilidade) do zero ( $U_{Flut}$ ) foi estimado experimentalmente em  $\pm 0,2 \mu\text{m}$  e a estabilidade de fixação do bloco padrão ( $U_{Fix.BP}$ ) foi estimado em  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . Portanto, considerando as fontes de incerteza, tem-se a Incerteza Combinada ( $u_c$ ):

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0,92 \mu m$$

E a Incerteza Expandida (U), para 27 mm, sendo  $v_{eff} = 22$ ,  $k = 2,12$ :

$$U = k \cdot u_c = 2 \mu m$$

#### 4.2 ESTIMATIVA DA INCERTEZA NA COLUNA DE RESSALTOS

O fuso micrométrico foi posicionado em 25 mm, de modo que o ressalto inferior ocupasse essa posição. As alturas do padrão escalonado foram medidas em relação à face superior do primeiro ressalto (50 mm, face de referência). A posição de cada face foi determinada pela apalpação de um ponto aproximadamente em seu centro e foram realizados três ciclos de medição. A identificação e a contribuição das fontes de incerteza estão apresentadas na tabela 2 para 250 mm.

Considerando a diferença de temperatura entre o padrão escalonado e o bloco Padrão ( $U_{Dif.Temp.}$ ) de 0,15 K, tem-se:

$$U_{Dif.Temp.} = \Delta L = L \Delta \alpha \Delta T, \text{ para o aço } \Delta \alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Para a maior incerteza da faixa de medição (250 mm):

$$U_{Dif.Temp.} = 0,0004 \text{ mm}$$

Tabela 2 - Avaliação das incertezas de medição da coluna de ressaltos – face superior do padrão escalonado para a posição 250 mm

Símbolo	COMPONENTES DE INCERTEZA		DISTR. DE PROBABILIDADES		C i	u i ± [ mm ]	v i ou v eff
	FONTES	VALOR ± [ mm ]	TIPO	DIVISOR			
$U_{CMM}$	Incerteza da CMM	0,0010	Normal	2	1	0,0005	50
$U_{Dif.Temp.}$	Diferença de Temp. entre BP e Padrão Esc.	0,0004	Retangular	1,7321	1	0,0002	infinito
$U_{BP10}$	Incerteza do Bloco Padrão de 10 mm	****	****	****	****	****	****
$U_{BP}$	Incerteza do Bloco Padrão de 350 mm	****	****	****	****	****	****
$U_{Flut.}$	Flutuação do Zero	0,0002	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix.BP}$	Estabilidade de fixação do BP	0,0001	Retangular	1,7321	1	0,0001	infinito
$U_{Fix}$	Estabilidade da Fixação do Padrão Escalonado	****	****	****	****	****	****
$U_A$	Incerteza Padrão Tipo A	****	****	****	****	****	****
$u_c$	INCERTEZA COMBINADA		NORMAL			0,00057	82
$U$	INCERTEZA EXPANDIDA		NORMAL K= 2,03			0,0012	

OBSERVAÇÕES:  
A incerteza de medição apresentada é a maior da faixa de medição, calculada no ponto 250 mm.  
\*\*\*\* : Fonte Desprezível.

Portanto, considerando as fontes de incerteza, tem-se a Incerteza Combinada ( $u_c$ ) para 250 mm:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} = 0,57 \mu m$$

E a Incerteza Expandida (U) para  $v_{eff} = 82$ ,  $k = 2,03$ :

$$U = k \cdot u_c = 1,2 \mu m$$

A avaliação das fontes de incerteza da coluna de ressaltos – face inferior do padrão escalonado pode ser feita de forma semelhante ao item anterior.

### 4.3 CORREÇÃO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM TODA FAIXA DE MEDIÇÃO

Nas tabelas 3 e 4 tem-se o resultado da calibração do padrão escalonado, apresentando-se as correções das indicações e as incertezas de medição expandidas (U) para os fatores de abrangências (k) associados a toda faixa de medição para a coluna de ressaltos e para o fuso micrométrico. As referências para os ressaltos são 50 mm para a face superior e 25 mm para a face inferior. Um sinal negativo na correção indica que a face de referência (superior ou inferior) da coluna de ressaltos está posicionada abaixo do valor nominal, em relação à base. Um sinal positivo indica o inverso.

Tabela 3 - Correção e incerteza de medição para a coluna de ressaltos

INDICAÇÃO NO SMC [mm]	CORREÇÃO [mm]	U +/- [mm]	k
Coluna de Ressaltos - Face Superior			
50	0,0000	0,0011	2,04
100	-0,0015	0,0011	2,04
150	-0,0040	0,0011	2,04
200	-0,0056	0,0011	2,04
250	-0,0060	0,0012	2,03
Coluna de Ressaltos - Face Inferior			
25	0,0000	0,0011	2,04
75	-0,0013	0,0011	2,04
125	-0,0036	0,0011	2,04
175	-0,0048	0,0011	2,04
225	-0,0055	0,0012	2,04
275	-0,0059	0,0012	2,03

Onde: SMC - Sistema de medição a calibrar - Padrão Escalonado

Tabela 4 - Correção e incerteza de medição para o fuso micrométrico

INDICAÇÃO NO SMC [mm]	MÉDIA DAS INDICAÇÕES NO SMP [mm]	CORREÇÃO [mm]	U +/- [mm]	k
2,0	2,0012	0,0012	0,0016	2,00
4,5	4,5003	0,0003	0,0016	2,00
7,1	7,1042	0,0042	0,0016	2,00
9,6	9,6042	0,0042	0,0016	2,00
12,2	12,1918	-0,0082	0,0016	2,00
14,7	14,6914	-0,0086	0,0016	2,00
17,3	17,2851	-0,0149	0,0017	2,03
19,8	19,7847	-0,0153	0,0017	2,02
22,4	22,3858	-0,0142	0,0017	2,02
24,9	24,8846	-0,0154	0,0017	2,03
27,0	26,9987	-0,0013	0,0020	2,12
27,0	26,9983	-0,0017	0,0016	2,00
24,9	24,8864	-0,0136	0,0016	2,00
22,4	22,3863	-0,0137	0,0016	2,00
19,8	19,7865	-0,0135	0,0016	2,00
17,3	17,2867	-0,0133	0,0016	2,00
14,7	14,6928	-0,0072	0,0016	2,00
12,2	12,1931	-0,0069	0,0016	2,00
9,6	9,6041	0,0041	0,0017	2,02
7,1	7,1044	0,0044	0,0016	2,00
4,5	4,4982	-0,0018	0,0016	2,00
2,0	1,9989	-0,0011	0,0016	2,00

Onde: SMP – Sistema de medição padrão – CMM

## 5. AVALIAÇÃO E CONCLUSÃO

Devido à flexibilidade, a calibração de padrões escalonados na Máquina de Medir por Coordenadas - CMM pode ser executada num menor tempo de preparação, execução e processamento (redução de até uma hora) em relação aos métodos convencionais, tendo como vantagem ainda a calibração simultânea de mais de um padrão escalonado.

A incerteza da CMM, a resolução do fuso micrométrico e as influências de temperatura contribuem de forma significativa para o resultado final da calibração. As influências de temperatura podem comprometer a calibração em situações onde as condições laboratoriais não são adequadas. O controle destas fontes de incerteza é recomendado pois através dele pode-se melhorar a qualidade do resultado da calibração.

O procedimento de avaliação da incerteza de medição adotado seguiu as recomendações do Guia para Expressão da Incerteza de Medição da ISO e através dele obteve-se um resultado confiável possibilitando comparações com valores de referência de normas e especificações. Na calibração do padrão escalonado com CMM pelo método da comparação obteve-se um resultado com incerteza expandida de 1,1 a 1,2  $\mu\text{m}$  para a coluna de ressaltos e de 1,6 a 2,0  $\mu\text{m}$  para o fuso micrométrico, que são admissíveis para este padrão.

O método da comparação nas CMMs é vantajoso pois reduz a incerteza de medição da CMM, possibilitando utilizá-la com vantagens operacionais e econômicas sobre métodos convencionais para a calibração de padrões escalonados.

## 6. REFERÊNCIAS

- Abackerli, A. J.; Cauchick Miguel, P. A., 1997, "Máquina Virtual: boa para estimar as incertezas na medição por coordenadas" - Máquinas e Metais, pp. 78-87.
- ISO, 1993, "Guide to the expression of uncertainty in measurement", First Edition, International Organization for Standardization, Switzerland, 101 pages.
- ISO 7863, 1984, "Height setting micrometers and riser blocks"- International Organization for Standardization.
- Link, W., 1997, "Metrologia Mecânica - Expressão da Incerteza de Medição" - Programa RH - Metrologia e Sociedade Brasileira de Metrologia, 67 p.
- NBR ISO 9001, 1994, "Sistemas da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em projeto, desenvolvimento, produção, instalação e serviços associados".
- NBR ISO 9002, 1994, "Sistema da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em produção, instalação e serviços associados".
- NBR ISO 9003, 1994, "Sistema da qualidade - Modelo para garantia da qualidade em inspeção e ensaios finais".
- NBR ISO 9004-1, 1994, "Gestão da qualidade e elementos do sistema da qualidade" - Parte 1: Diretrizes.
- QS – 9000, 1998, "Requisitos do Sistema da qualidade" - 2ª Edição Brasileira, ANFAVEA.

- PTB; NPL; TU Eindhoven; Feinmess; Brown and Sharp; Zeiss, 1998, "Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of Virtual Measuring Machine" - Proposed Guideline State: August 1997, Part 2 of the Draft Final Report, Project MAT1-CT94-0076, PTB.
- Trapet, E. - "Introduction to Traceability with the Virtual CMM" - Workshop on Traceability of Coordinate Measuring Machines, PTB, October 9-10, 1997.
- Valente de Oliveira, J. C., Pires Alves, J.A., 1997, "INMETRO's Performance in Calibration of Ball Bars", XIV IMEKO World Congress, Volume V, Topic 8, Tampere, Finland, pp. 1-6.
- VDI/VDE/DGQ 2618 - Blatt 16 - "Prüfanweisung für Höhenmessschrauben" - Verein Deutscher Ingenieure; Januar, 1991.

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MASSA MOLECULAR NA CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO EM UM TUBO DE CHOQUE

**Alessandro Borges de Sousa Oliveira**

**Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior**

**João Nildo de Souza Vianna**

Universidade de Brasília - UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail :[borges@enm.unb.br](mailto:borges@enm.unb.br)

## Resumo

Esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo experimental dos fenômenos físicos que ocorrem no tubo de choque na calibração dinâmica de sensores de pressão. A metodologia utilizada permite a verificação da influência da diferença de massa molecular dos gases utilizados sobre o sinal de pressão. Todo o estudo é realizado com base nas curvas de resposta em frequência de um sensor de pressão padrão com relação a um sensor de pressão de trabalho. A utilização de um gás com pequena massa molecular na câmara de alta pressão de um tubo de choque em conjunto com um gás de grande massa molecular na câmara de baixa pressão apresenta um excelente comportamento metrológico para calibração de sensores que operam em elevadas frequências.

**Palavras-chave:** Metrologia Dinâmica, Tubo de Choque, Calibração Dinâmica

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução do conhecimento técnico-científico tem requerido métodos confiáveis de medição de pressão dinâmica em frequências de 0 a 10 MHz. O conhecimento amplo do comportamento dinâmico dos sensores de pressão é de grande importância. Entretanto a caracterização destes sensores é limitada pelos dispositivos de calibração dinâmica existentes.

A calibração dinâmica de um instrumento de medição visa a determinação de seu sinal de saída no tempo por meio de um sinal de entrada conhecido, de modo a se avaliar o seu tempo de resposta. O nível de confiabilidade da calibração depende do profundo conhecimento do sinal de referência e do conjunto de aparelhos utilizados na aquisição deste sinal.

Atualmente, dentro da bibliografia especializada (Carvalho, 1995; Damion, 1997; Damion, 1993), o tubo de choque é reconhecido como o instrumento mais indicado para a calibração dinâmica de sensores de pressão de alta frequência. Sua primeira utilização como dispositivo de calibração ocorreu em 1943, por G.T. Reynolds. Desde então o Tubo de Choque tem sido empregado como meio de calibração de instrumentos para estudos experimentais de fenômenos que variam rapidamente.

A qualidade metrológica do degrau de pressão gerado pelo tubo de choque depende do controle de diversas variáveis, tais como geometria e técnicas de construção do tubo, diferença de massa molecular dos gases utilizados e fatores que afastam os processos reais, que ocorrem no interior do tubo, dos ideais. Os eventos que ocorrem no interior de um tubo de choque são extremamente rápidos e de difícil medição.



O trabalho consiste da determinação de forma quantitativa de como as diferentes massas moleculares e propriedades dos gases influenciam na qualidade do degrau de pressão, no fundo de um tubo de choque. Esse estudo é desenvolvido em um tubo de choque metroológico (TCM) do Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília. O tubo de choque metroológico é feito de aço, podendo suportar à pressão máxima de 20 bar. O tubo de choque é instrumentado com sensores de pressão piezelétricos, onde são utilizados com diferentes gases.

## 2. METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

A qualidade do sinal metroológico de um tubo de choque pode ser afetada pelas diferentes massas moleculares e propriedades dos gases utilizados. Então, o objetivo desse estudo está centrado na determinação de metodologias que possam melhorar as qualidades metroológicas desse sinal, fazendo ensaios com diferentes gases, em diversas combinações no interior do tubo. Cada ensaio é feito usando-se apenas um nível de pressão entre as câmaras, que é 3 bar no tubo indutor e 2 bar no tubo induzido. Este nível é escolhido de modo a seguir um padrão utilizado em ensaios, que é adotado pela grande maioria de pesquisadores que trabalham com tubo de choque no mundo (Damion, 1997; Damion, 1993).

**Tabela 2.1:** Combinações dos gases nos ensaios

Ensaio	Tubo Indutor	Tubo Induzido
Ensaio 1	Ar atmosférico	Dióxido de Carbono
Ensaio 2	Dióxido de Carbono	Ar atmosférico
Ensaio 3	Hélio	Ar atmosférico

As combinações de gases que são aqui apresentadas, são assim escolhidas de modo a otimizar o uso dos gases, evitando desperdício e podendo avaliar a interação de gases com pequenas massas moleculares com gases de grandes massas moleculares.

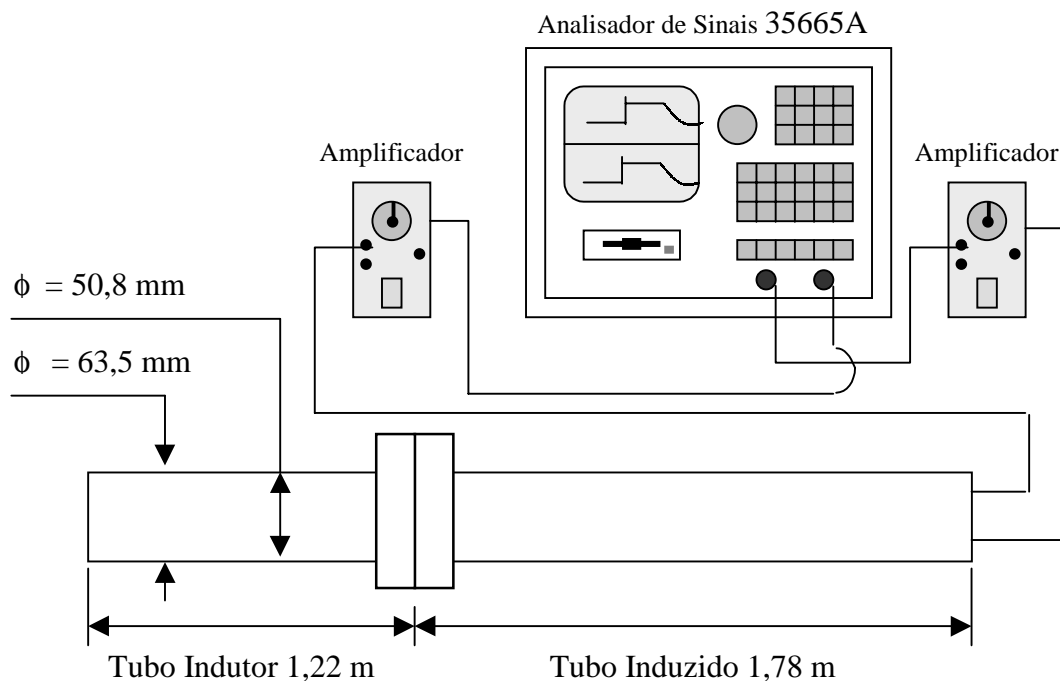


Figura 2.1: Esquema dos instrumentos de medição na bancada de ensaios para realização da medição da resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho.

Os sensores de pressão Padrão e o de Trabalho são posicionados faceando o fundo do tubo induzido. A partir dessa montagem são realizados os ensaios para se observar a curva de resposta de frequência destes sensores. Nesse ensaio não é usada a configuração de gás com ar nas duas câmaras, pois sua curva de resposta de frequência já é bem conhecida.

Para garantir a fidelidade dos resultados obtidos, é realizado um procedimento de limpeza dos tubos indutor e induzido, de forma que garanta, em cada uma das câmaras a pureza dos gases nelas contidos (Guimarães, 1997). Por impurezas entende-se os outros gases presentes na câmara, que sejam diferentes do gás de ensaio. O procedimento de limpeza das câmaras é descrito a seguir.

- 1) Após ou ao se iniciar cada ensaio, faz-se a abertura do tubo colocando-se uma nova membrana.
- 2) Fecha-se o tubo e despressuriza-se as câmaras, com auxílio de uma bomba, até uma pressão cerca de 65 kPa absoluta.
- 3) Depois, pressuriza-se cada câmara, com os respectivos gases. A pressurização é feita ao mesmo tempo nos dois lados do tubo com o objetivo de evitar que a membrana sofra grandes deformações ou que se rompa.

A execução deste trabalho utiliza o seguinte aparato experimental:

- Sensores piezelétrico (KISTLER) Sensor de pressão Padrão (referência) tipo <sup>A</sup>  
Sensor de pressão de Trabalho (calibração) tipo
- Amplificadores de carga (KISTLER; modelo analógico 5007 e modelo digital 5011):

Esses aparelhos amplificam e convertem o sinal de carga em função do tempo em um sinal de diferença de potencial em função do

- Filtros de sinais (DL INSTRUMENTS; modelo: 4213): Esses instrumentos realizam a filtragem dos sinais de diferença potencial no tempo fornecidos pelos amplificadores, utilizando uma faixa operação de 0 a 40kHz. No trabalho experimental realizado é empregado um filtro de sinal para cada

- Analisador de Sinais (Hewlett Packard; modelo: 35665A): Captura o sinal do anemômetro de fio frio e do sensor piezelétrico de pressão. Pode ser operado em altas faixas de frequência, sendo mais que o suficiente para a aquisição de sinais dos sensores

### 3.RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE

A análise dos resultados está centrada na observação dos resultados de resposta em frequência das diferentes combinações de gases utilizadas. Os valores de resposta em frequência obtidos não sofreram nenhum tipo de tratamento especial além do cálculo da média e do desvio padrão (GUM, 1993; Mayer; Siqueira). Isto porque esses valores já são adquiridos em sua forma final, ou seja, os valores de diferença de potencial já possuem uma relação direta com a unidade da grandeza medida.

Tabela 3.1: Valores obtidos para o cálculo de massa residual de ar no tubo de choque metrológico em cada combinação de gás utilizada

	Ensaio		
	Ar – CO2	CO2 - Ar	He – Ar
Massa residual de ar [kg]	0,002736	0,0018598	0,001936
Razão mássica [%]	23,57	15,06	67,05
Razão volumétrica [%]	31,92	21,22	21,94

Comparando-se as curvas de resposta em frequência obtidas para cada configuração de gás utilizada, observa-se que tanto o gráfico de Amplificação como o de Fase possuem melhor comportamento quando utiliza-se a configuração He – Ar. As diferenças entre o sensor Padrão e o de Trabalho utilizando-se a configuração He-Ar ocorrem a partir da frequência de 9kHz. Enquanto que as diferenças para a configuração Ar-CO<sub>2</sub> ocorrem a 3kHz e para a configuração CO<sub>2</sub>-Ar ocorrem a 4kHz.

Gráfico da Magnitude da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração Ar - CO<sub>2</sub>

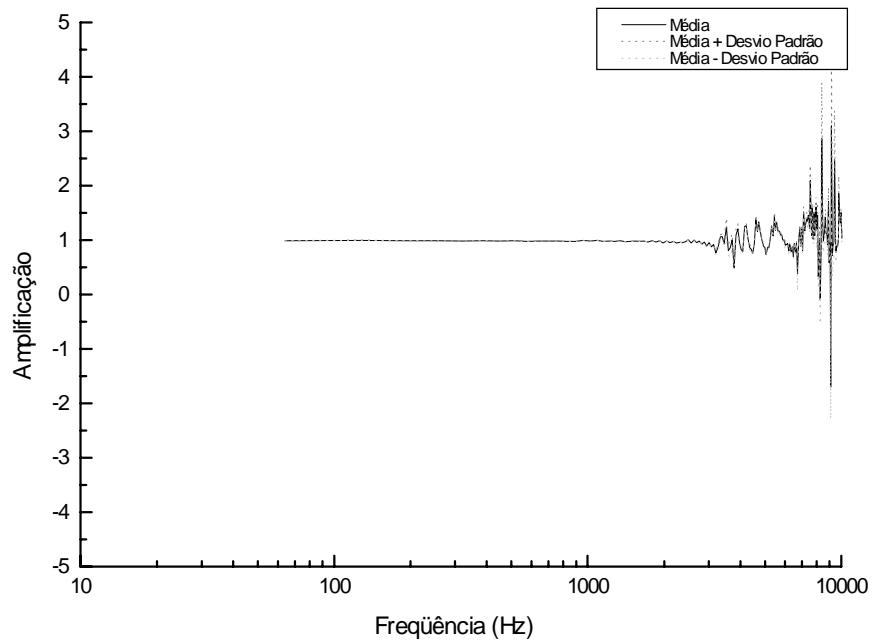


Gráfico da Fase da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração Ar - CO<sub>2</sub>

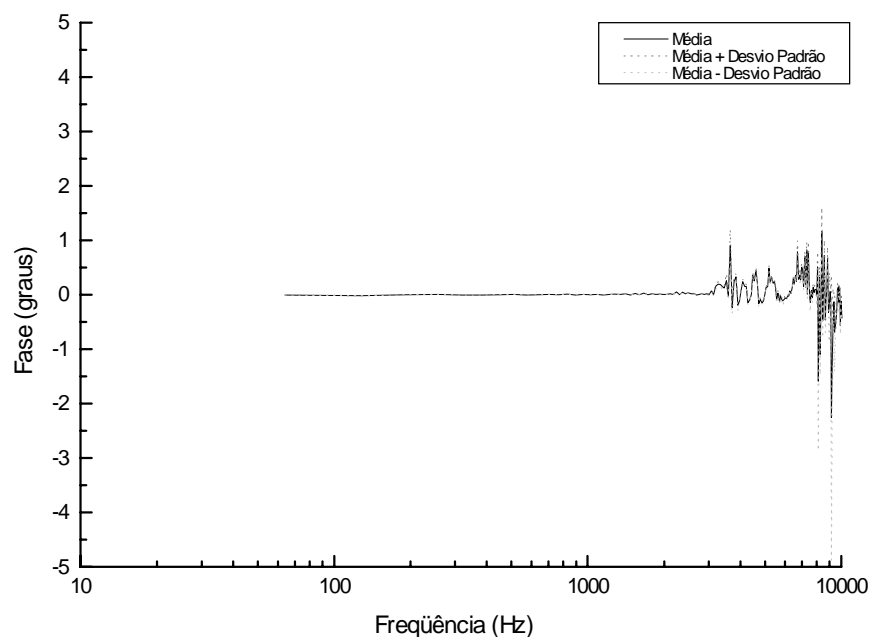


Figura 3.1: Curvas de resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho no fundo do tubo de choque Metrológico na configuração Ar – CO<sub>2</sub>.

No gráfico de Fase da figura 3.3 da configuração He – Ar observa-se que os valores de pressão medidos pelo sensor de Trabalho, a partir de uma alta intensidade de frequência, possuem uma pequena defasagem, cerca de 0,1 graus, em relação aos valores medidos pelo sensor Padrão. Quanto a defasagem para a configuração Ar-CO<sub>2</sub>, esta é de 0,6 graus e para a configuração CO<sub>2</sub>-Ar é de 0,3 graus.

Gráfico da Magnitude da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração CO<sub>2</sub> - Ar

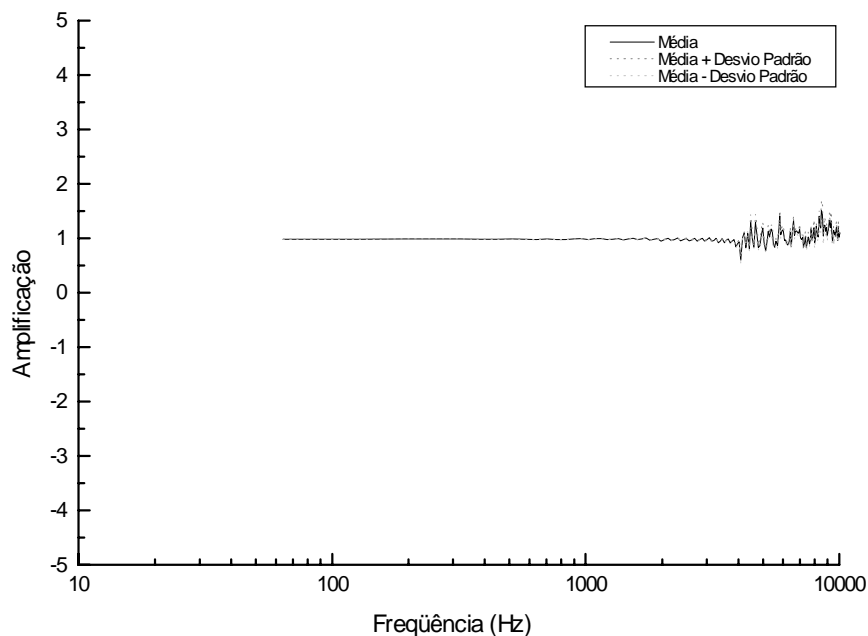


Gráfico da Fase da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração CO<sub>2</sub> - Ar

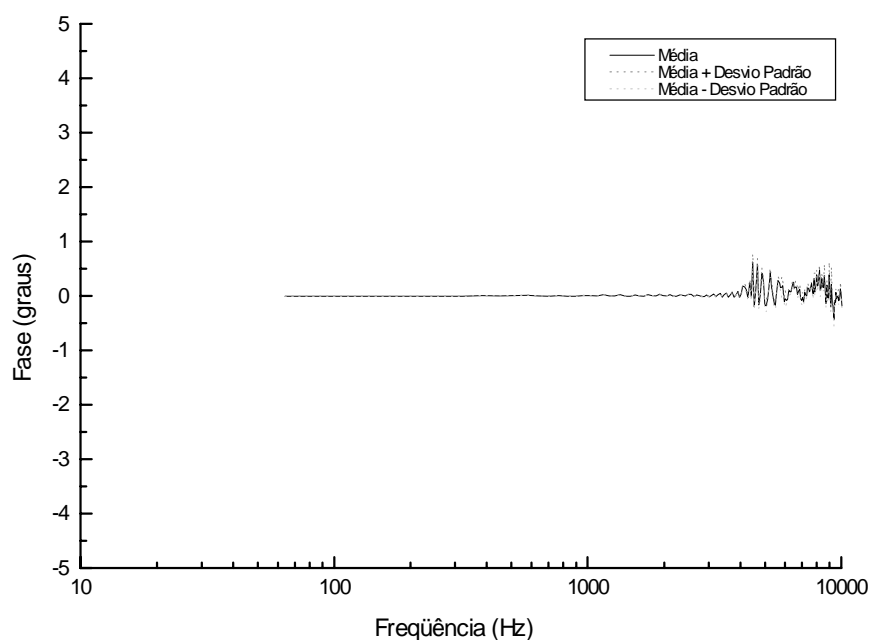


Figura 3.2: Curvas de resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho no fundo do tubo de choque Metrológico na configuração CO<sub>2</sub> – Ar.

Com relação ao gráfico da grandeza Amplificação da figura 3.3 observa-se, também, que a magnitude do sinal de pressão medido pelo sensor de Trabalho difere da magnitude do sinal medido pelo sensor Padrão por uma parcela muito pequena, de cerca de 5%. Já a diferença para a configuração Ar-CO<sub>2</sub> é de 30% e para a configuração CO<sub>2</sub>-Ar é de 15%. Um outro fato que valoriza a configuração He – Ar é a curta duração de tempo do degrau de pressão, indicando esta configuração para trabalhos de calibração com sensores que operam em alta frequência. São esses fatores, aqui destacados, que apresentam a configuração He – Ar como a de melhor comportamento para fins metrológicos utilizando-se o tubo de choque, dentre as observadas.

Gráfico da Magnitude da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração He - Ar

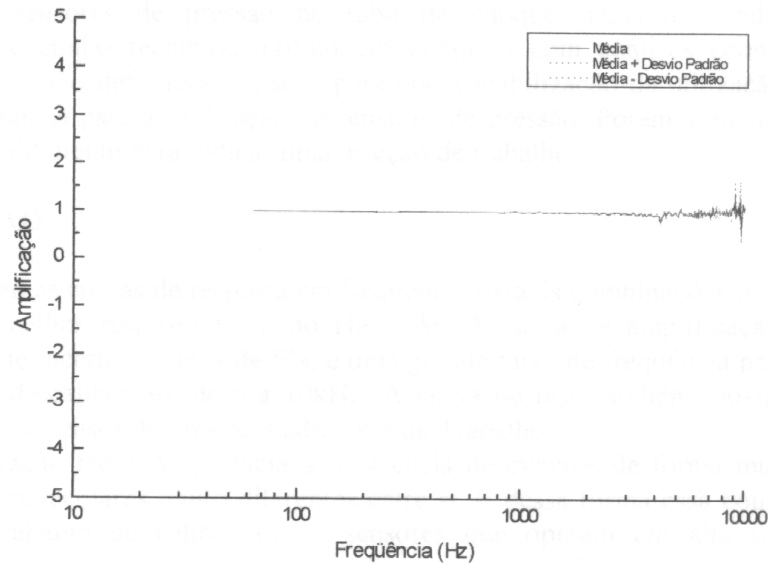


Gráfico da Fase da Resposta em Frequência dos sensores de pressão no fundo do Tubo de Choque Metrológico na configuração He - Ar

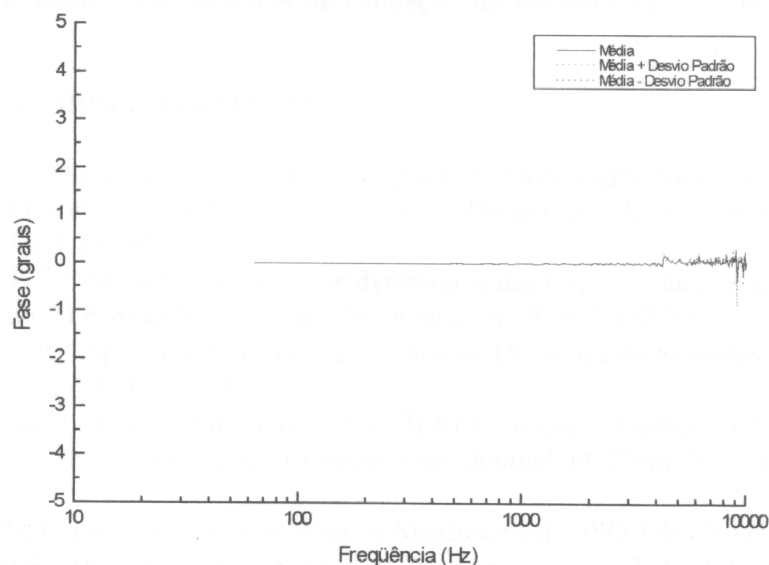


Figura 3.3: Curvas de resposta em frequência dos sensores de pressão Padrão e de Trabalho no fundo do tubo de choque Metrológico na configuração He – Ar.

Depois da configuração He – Ar, a que apresenta melhor comportamento metrológico é a CO<sub>2</sub> – Ar da figura 3.2, e em último lugar tem-se a configuração Ar – CO<sub>2</sub> da figura 3.1. Isto se processa seguindo o que já era esperado pela teoria, ou seja, que quanto maior for a diferença entre as massas moleculares dos gases do tubo, mais rápido se processam os eventos e melhor é o trabalho de calibração em altas frequência. Faz-se necessário ressaltar que a faixa de frequência que se está usando para a comparação das diversas combinações é a faixa de frequência utilizada para calibração de sensores de pressão no tubo de choque, que é de cerca de 10 kHz.

Não se pode dizer, que a análise aqui colocada por si só é o suficiente para se ter um conclusão absoluta para se adotar a configuração He – Ar como a melhor para ser utilizada na calibração de sensores de pressão no tubo de choque. Deve-se, ainda, fazer outras comparações de cunho técnico-científico em conjunto com análises econômicas para se chegar a uma opinião definitiva, ou seja, para que a viabilização da utilização do gás ser de extrema importância para a calibração de sensores de pressão. Porém a análise mostrada por este estudo é o suficiente para indicar uma direção de trabalho.

#### 4. CONCLUSÃO

Com relação as curvas de resposta em frequência para as combinações de gases utilizadas a que obteve melhor resposta foi a do He – Ar. A curva de amplificação apresenta um pequeno valor de incerteza, cerca de 5%, e uma grande faixa de frequência para utilização em procedimentos de calibração, de 0 a 10kHz. A curva de fase também mostra uma pequena defasagem entre o sensor de pressão Padrão e o de Trabalho.

A configuração He – Ar propicia a ocorrência de eventos de forma muito rápida, pois possui massas moleculares muito diferentes entre si. E dessa forma essa configuração tem o potencial de trabalho de calibração de sensores que operam em alta frequência. Mas, entretanto, é importante, ainda, a realização de um trabalho de análise de viabilidade econômica, pois se sabe que o Hélio é muito caro; em conjunto com uma avaliação mais profunda de cunho técnico-científico para dirimir qualquer dúvida sobre a adoção dessa configuração de ensaio nos trabalhos de calibração de sensores de pressão com o tubo de choque.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, Marco A. M. de, “Estudo e Aplicação Metrológica do Tubo de Choque para a Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão – Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica”, UnB, Brasília - DF, 1995.
- DAMION, J. P., “Moyens d’étalonnage dynamique des Capteurs de Pression”, Bulletin d’information du Bureau National de Métrologie, vol. 8, nº 30, (1997).
- DAMION, J. P., “Apostilas do Curso de Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão e Temperatura”, ENM/UnB, 1993.
- DELALE, Can F.; SCHNERR, Günter H. e ZIEREP, Jurgen, “Asymptotic Solution of Shock Tube Flows with Homogeneous Condensation, Journal of Fluid Mechanics, p. 93-118, (1995).
- “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”, ISO TAG/WG3, 1993.
- GUIMARÃES, Antonio M. F., “Análise de Processos em um Tubo Gerador de Ondas de Choque - Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico”, UnB, Brasília - DF, 1997.
- HENRIQUES, Durval S. F., “Aerodinâmica da Asa e Fuselagem - Apostila”, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos - SP, 1994.

- HOLMAN, J. P., "Metodos Experimentales para Ingenieros", Libros McGraw-Hill de Mexico, Mexico, 1977.
- HOUAS, L. e CHEMAOUNI, I., "Experimental Investigation of Richtmyer-Meshkov Instability in Shock Tube", Physics Fluids, vol. 8, nº 2, p. 614-627, (1996).
- JONES, M. A. e JACOBS, J. W., "A Membraneless Experiment for the Study of Richtmyer-Meshkov Instability of a Shock-Accelerated Gas Interface", Physics Fluids, vol. 9, nº 10, p. 3078-3085, (1997).
- KARIMIAN, S. M. H. e SCHNEIDER, G. E., "Application of a Control-Volume-Based Finite-Element Formulation to the Shock Tube Problem", AIAA Journal, vol. 33, nº 1, p. 165-167, 1995.
- KIM, K. -S.; LEE, Y. e SETTLES, G. S., "Laser Interferometer/Preston Tube Skin-Friction Comparison in Shock/Boundary-Layer Interaction", AIAA Journal, vol. 29, p. 1007-1009, (1991).
- MAKAREVICH, G. A. e LISENKOVA, G. S., "Shock-Tube for Calibration of Pressure Detectors", Instruments and Experimental Techniques, vol. 23, p. 811-812, (1980).
- MAYER, Paul L., "Probabilidade: Aplicações a Estatística", Editora Livros Técnicos e Científicos AS, São Paulo - SP.
- ORTEGA, Marcos A., "Dinâmica dos Gases – Apostila do Curso de Escoamentos Copressíveis", ITA - IEA - IEAA, São José dos Campos - SP.
- PAI, Shihi-I, "Introduction to the Theory of Compressible Flow", D. Van Norstrand Company Inc., 1959.
- SCHWEPPE, J.L.; EICHBERGER, L. C.; MUSTER, D. F.; MICHAELS, E. L e PASKUSZ, G. F., "Methods for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers - National Bureau of Standards Monograph 67", U.S. Government Printing Office, Washington - D.C., 1963.
- SHAPIRO, Ascher H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow - Volume I", The Ronald Press Company, New York, 1953.
- SHAPIRO, Ascher H., "The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow - Volume II", The Ronald Press Company, New York, 1953.
- SIQUEIRA, Mário B. B. de, "Incerteza de Medição segundo a ISO TAG4/WG3 - Apostila de Curso", Unb, Brasília - DF.
- STACEY, C. H. B. e SIMMONS, J. M., "Measurement of Shock-Wave/Boundary-Layer Interaction in a Free-Piston Shock Tunnel", AIAA Journal, vol. 30, nº 8, p. 2095-2098, (1992).
- STEIDEL, Robert F. Jr., "An Introduction to Mechanical Vibrations", John Wiley & Sons Inc., New York, 1989.
- TAKANO, Y. e AKAMATSU, T., "A Diaphragmless Shock Tube", Journal of Physics. E: Scientific Instruments, vol. 17, p. 644-646, (1984).

# CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE UM DISPOSITIVO DE ABERTURA RÁPIDA

**Alessandro Borges de Sousa Oliveira**

**Elpídio Quinderé Fritsche**

**Fernando Jorge Rodrigues Neves**

**João Nildo de Souza Vianna**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 70910-900, Brasília, DF, Brasil. E-mail: [borges@enm.unb.br](mailto:borges@enm.unb.br)

## Resumo

Neste trabalho é feita a determinação da faixa de utilização do dispositivo de abertura rápida, utilizado para a calibração dinâmica de sensores de pressão, através da análise da curva de resposta em frequência de um transdutor de pressão. Esta curva é obtida através de um programa que analisa os dados experimentais e gera um degrau teórico. O dispositivo de abertura rápida é descrito detalhadamente, bem como a instrumentação utilizada e a metodologia adotada no experimento. Os resultados obtidos são avaliados graficamente apresentando conclusões referentes a análise dos mesmos.

**Palavras-chave:** Calibração dinâmica, Transdutores de pressão, Metrologia

## 1. INTRODUÇÃO

O transdutor de pressão é o elemento sensível utilizado na medida de pressão variável. Consideram-se aqui situações em que variações significativas ocorrem em pequenos intervalos de tempo, como no caso do monitoramento da pressão no interior de cilindros de motores de combustão interna, na detecção de defeitos em sistemas de bombas hidráulicas ou mesmo em sistemas cardiovasculares (Carvalho, 1995).

O transdutor deve responder com exatidão, ao sinal a que está sendo submetido, reproduzindo com fidelidade variações de pressão, de forma a se ter uma confiabilidade nas leituras feitas. Assim, surge a necessidade de se calibrar os transdutores dinamicamente. Essa calibração consiste na determinação das características dinâmicas do sensor, que em geral se realiza da melhor forma pela determinação de sua Função de Transferência.

A grande diversificação de sensores utilizados atualmente, exige diferentes dispositivos de calibração que possam atuar em diferentes regimes de frequência e de amplitude de sinal.

Com o intuito de permitir a calibração dinâmica, foram desenvolvidos vários dispositivos de calibração dinâmica de transdutores de pressão, sendo que estes, possuem suas faixas de operação muito bem definidas (Diniz, 1994) (Vianna, 2000).

Dentre os dispositivos de calibração, destaca-se o dispositivo de abertura rápida - DAR - que é utilizado para trabalhar com sensores de pressão em baixas frequências (1 Hz à 150 Hz) e, em níveis moderados de amplitude (0.1 bar à 10 bar).

O sinal gerado por um dispositivo de calibração dinâmica deve ser conhecido e bem definido. Este trabalho tem por objetivo determinar as características de operação do dispositivo de abertura rápida através da análise da resposta em frequência de um transdutor de pressão.



A resposta em frequência é obtida, neste trabalho, utilizando o programa RFREQ (Villa, 2000).

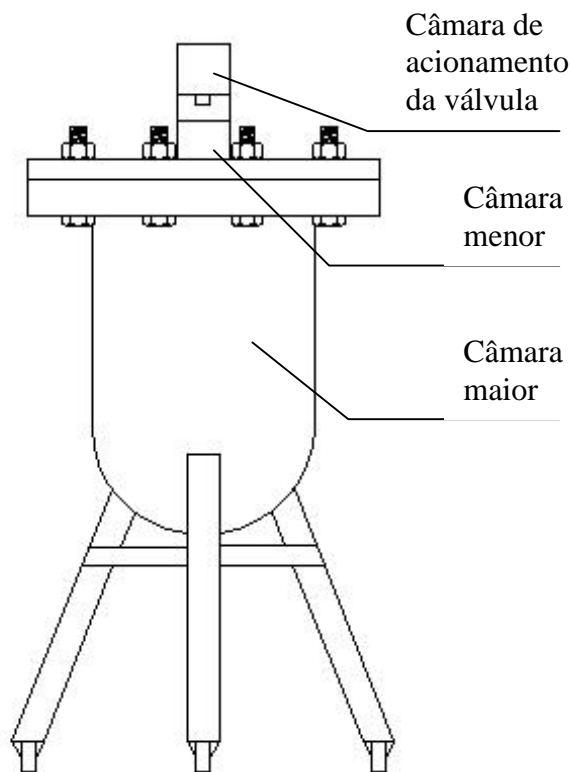
## 2. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO

O dispositivo de abertura rápida é um equipamento gerador de degrau de pressão, utilizado na calibração dinâmica de sensores de pressão.

Esse dispositivo é considerado aperiódico e é constituído basicamente por duas câmaras. A câmara menor possui o volume de  $12.4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ . O volume da câmara maior é, aproximadamente, 3000 vezes maior que o da primeira. A ligação entre as câmaras é feita por uma válvula de acionamento pneumático. O sensor de pressão é instalado na câmara menor que, portanto, serve como meio de calibração. Normalmente, utiliza-se uma pressão na câmara maior superior à pressão da câmara menor.

Com a abertura da válvula, devido a grande diferença de volume entre as câmaras, a pressão final na câmara menor torna-se igual a própria pressão da câmara maior. Desta forma, o sensor é submetido à um degrau de pressão que corresponde à diferença entre as pressões da câmara maior e menor. Este degrau de pressão é de duração infinita, uma vez que, a pressão final do conjunto é a pressão da câmara maior.

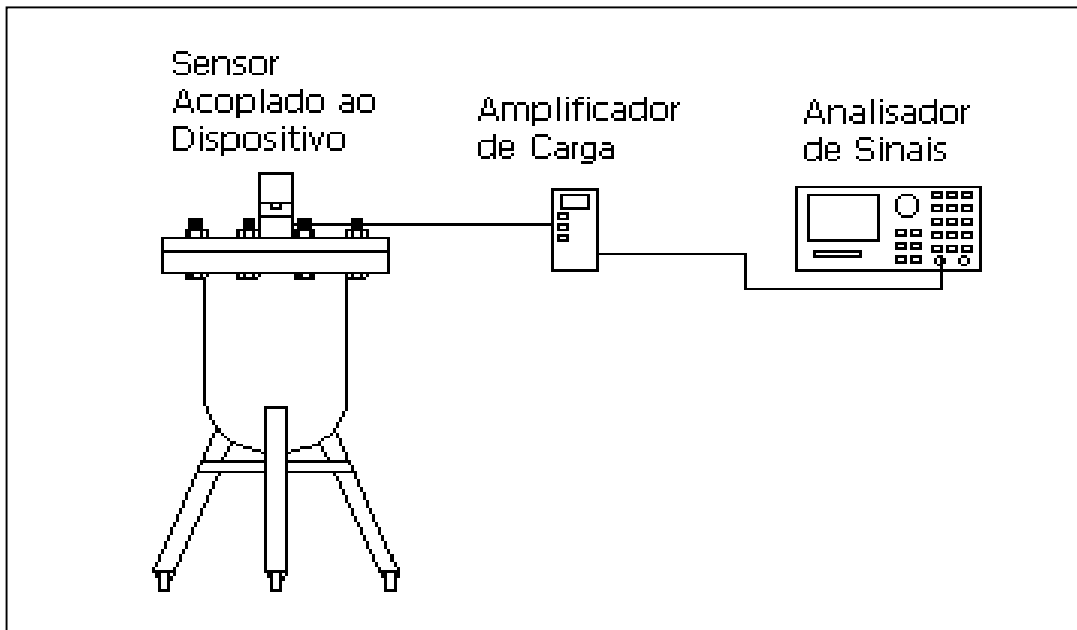
O dispositivo de abertura rápida é mostrado na figura 1:



**Figura 1.** Dispositivo de abertura rápida

O dispositivo de abertura rápida gera um degrau de pressão que excita um sensor piezoelétrico de pressão que está devidamente fixado na câmara menor. Este, por sua vez, transforma a variação de pressão que lhe é imposta em variação de carga elétrica. O sinal de carga gerado é processado por um amplificador de carga. O sinal de tensão elétrica gerado pelo amplificador de carga é transmitido a um analisador de sinais onde é adquirido e processado.

A figura 2 apresenta de forma esquemática a instrumentação do experimento:



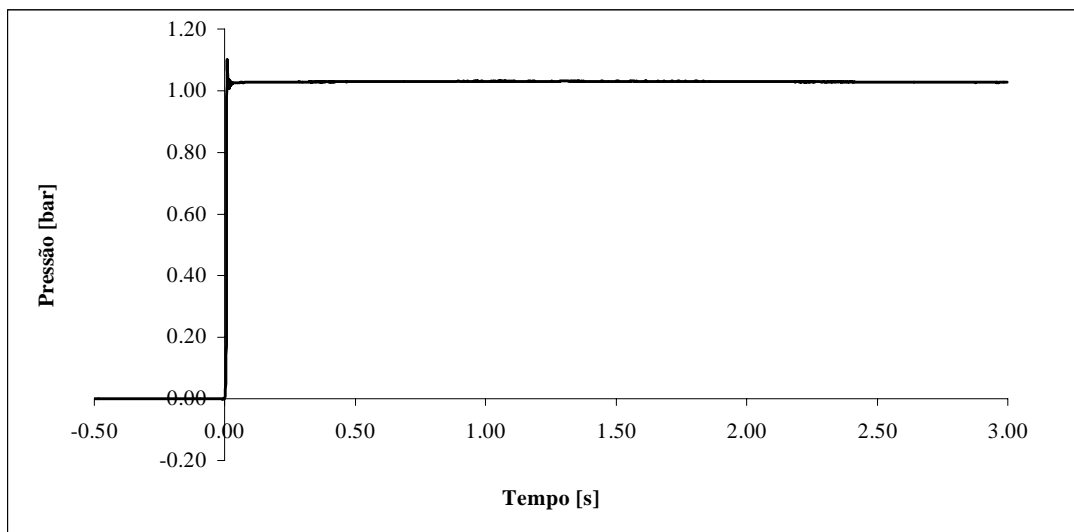
**Figura 2.** Instrumentação

### 3. METODOLOGIA

O dispositivo de abertura rápida é conectado à linha de pressão e, estando a válvula pneumática fechada, a câmara maior é pressurizada com ar até uma pressão de 1.89 bar. A câmara menor é mantida à pressão atmosférica, no caso, de 0.89 bar, obtendo-se portanto, o degrau de 1 bar de pressão. A válvula de acionamento pneumático é pressurizada com 3.89 bar de pressão e, então, através da chave seletora, abre-se a mesma. A válvula só é fechada depois da aquisição completa do sinal pelo analisador.

O ar é então retirado da câmara menor, para que a mesma volte a pressão atmosférica, e para que o dispositivo esteja preparado para nova repetição.

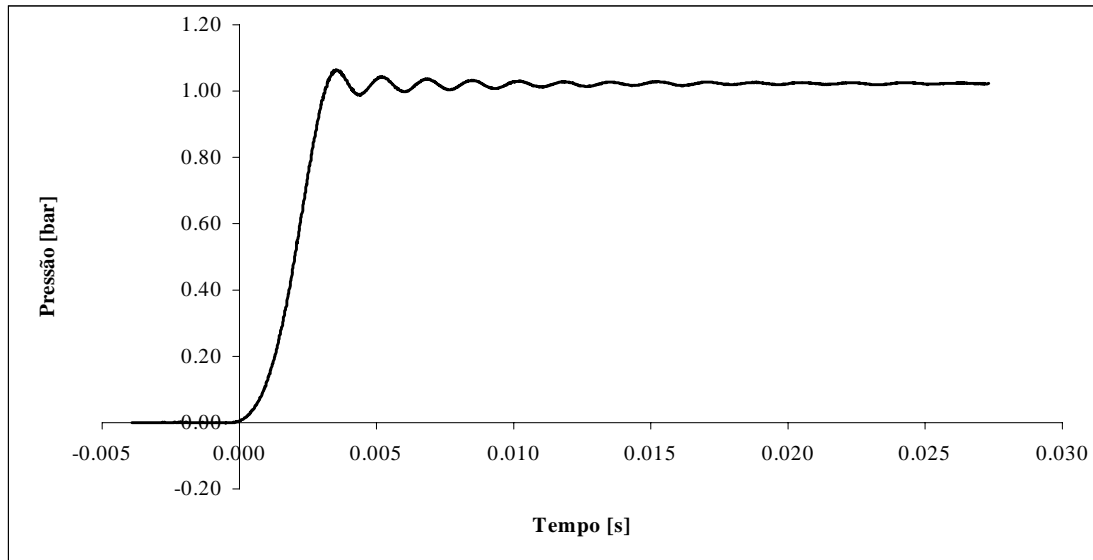
São realizadas 6 repetições mantendo-se todos os parâmetros do processo constantes.



**Figura 3.** Sinal de pressão gerado por este DAR

A figura 3 mostra um sinal obtido pelo dispositivo de abertura rápida com degrau de 1 bar de pressão. O gráfico apresenta um degrau quase perfeito.

O gráfico obtido com o eixo das abcissas expandido (figura 4) demonstra que o degrau real tem um tempo de subida finito, se afastando, como seria de esperar, do comportamento do degrau teórico.



**Figura 4.** Gráfico com eixo das abcissas expandido

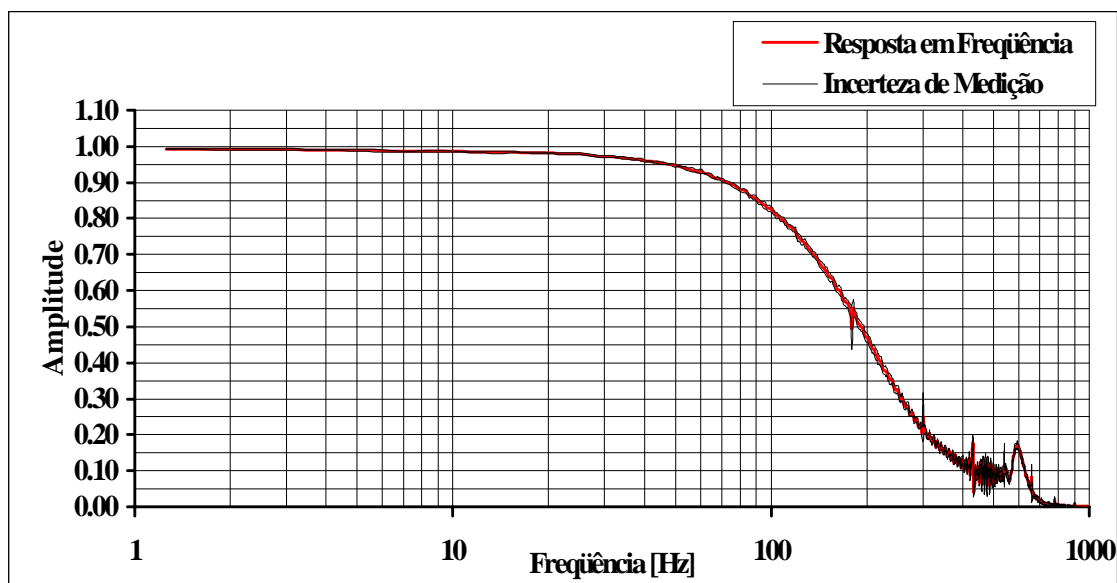
#### 4. RESULTADOS

Usando o programa RFREQ obtém-se a resposta em frequência do dispositivo. Para tal, o programa usa como sinal de referência para o processamento, um degrau teórico (não obtido experimentalmente).

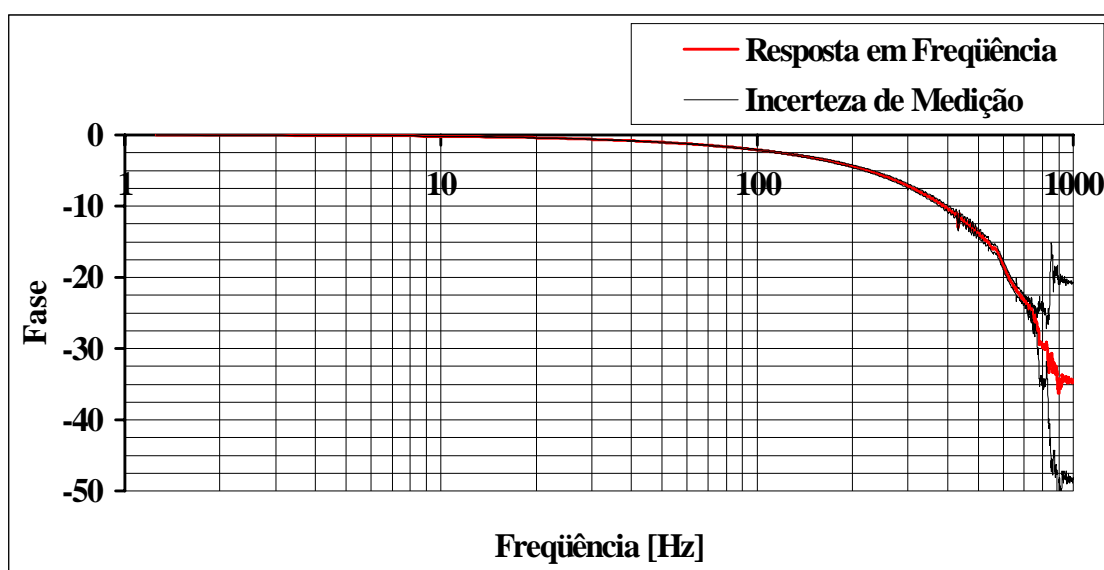
Pressupondo-se que o sensor de pressão utilizado tenha uma curva de resposta em frequência linear (magnitude 1 e fase  $0^\circ$ ) na faixa de frequências a ser analisada, teremos então que a Função de Resposta em Frequência (FRF) obtida é a que corresponde ao comportamento dinâmico do dispositivo de abertura rápida. De fato, foi utilizado um sensor de referência com características dinâmicas conhecidas que atendem à especificação acima.

Deve-se notar que a obtenção da Função de Resposta em Frequência na situação aqui descrita não é trivial, considerando que: a) não está disponível um sinal de referência para cálculo da FRF; b) sendo o sinal um degrau de duração infinita apresentam-se problemas de convergência de cálculo da FRF (estes problemas são resolvidos pelo programa RFREQ).

Utilizando os dados obtidos através do ensaio realizado, determinou-se a resposta em frequência do dispositivo de abertura rápida que está mostrada a seguir, nas figuras 5 e 6. Vale ressaltar que este programa também calculou a incerteza de medição (Oliveira, 1998) para uma confiabilidade de 95% e com 5 graus de liberdade.



**Figura 5.** Gráfico de resposta em frequência (amplitude) utilizando um degrau teórico



**Figura 6.** Gráfico de resposta em frequência (fase) utilizando um degrau teórico

Observando as figuras 5 e 6, pôde-se constatar que as curvas apresentaram um decaimento significativo, a partir da frequência de 70 Hz.

A incerteza de medição foi baixa, mostrando uma boa repetibilidade do sinal gerado pelo dispositivo de abertura rápida.

O gráfico de resposta em frequência apresentado na figura 5 e 6, representa a caracterização dinâmica do dispositivo de abertura rápida podendo-se dizer, portanto, que o dispositivo gera um degrau de pressão próximo do degrau teórico, para uma faixa de frequência de 0 até 70 Hz.

## 5. CONCLUSÃO

Foi desenvolvida uma metodologia para a caracterização dinâmica do dispositivo de abertura rápida. Esta metodologia pode ser estendida à caracterização de outros dispositivos usados para calibração dinâmica de sensores de pressão, ou de outras grandezas (temperatura por exemplo).

A resposta em frequência utilizando um degrau teórico como sinal de entrada, apresentou uma baixa incerteza de medição mostrando, com isso, uma boa repetibilidade do sinal.

O dispositivo foi caracterizado de forma que, o mesmo pode ser utilizado com confiabilidade, em uma faixa de frequência de 0 até 70 Hz.

## 6. REFERÊNCIAS

- Carvalho, M.A.M., 1995, “Estudo e Aplicação Metrológica do Tubo de Choque para a Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, D.F., Brasil, 187p.
- Diniz, A.C.G.C., 1994, “Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, D.F., Brasil, 122p.
- Oliveira, A.B.S., Siqueira, M.B.B. and Vianna, J.N.S., 1998, “Determinação de Incerteza de Medição em Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, ENCIT.98, 7<sup>th</sup> Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.
- Vianna, J.N.S., Oliveira, A.B.S. and Damion, J.P., 2000, “The Influence of the Diaphragm on The Metrological Characteristics of A Shock Tube”, Revista Metrologia, Paris, França.
- Villa, C.V.S., 2000, “RFREQ – Software para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, D.F., Brasil, 132p.

# Uma técnica alternativa para o ensaio geométrico de Centros de Usinagem

André Roberto de Sousa  
ETFSC - Gerência de Metal-Mecânica  
ars@labmetro.ufsc.br

Carlos Alberto Schneider  
Engenharia Mecânica - UFSC  
cas@certi.ufsc.br

## Resumo

Um apalpador de medição é utilizado em um centro de usinagem vertical de 3 eixos para medir uma placa de furos pré-calibrada em uma máquina de medir por coordenadas (CMM). Através da comparação entre as posições medidas e calibradas dos centros dos furos da placa, determinam-se as principais componentes de erros da máquina-ferramenta, possibilitando uma ação preventiva para otimizar sua exatidão, por exemplo, utilizando-se os desvios determinados para uma correção eletrônica de erros pelo CNC da máquina. Este método de ensaio é prático e rápido de utilização, e resultados experimentais indicam que sua incerteza é comparável à de técnicas consagradas, a um custo bem menor.

**Palavras-chave:** Metrologia, Máquina-ferramenta, Ensaio Geométrico

## 1. INTRODUÇÃO

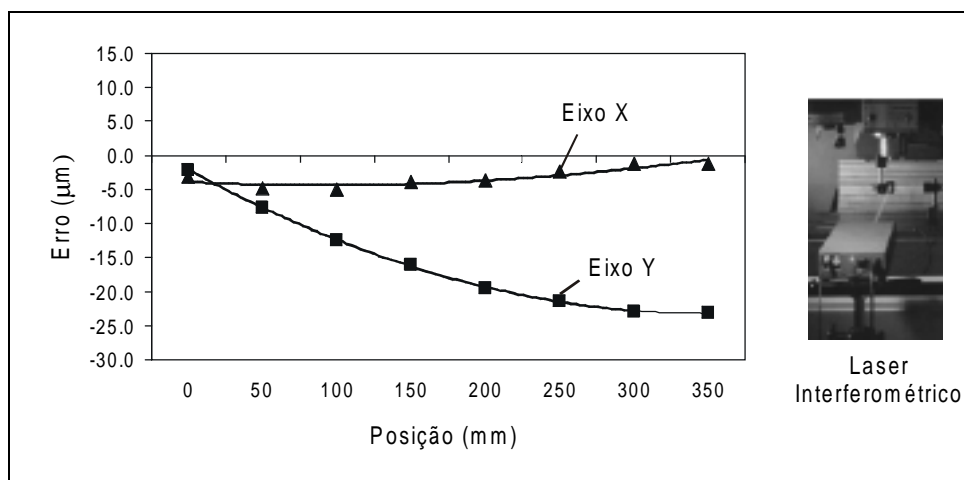
Os erros geométricos das máquinas-ferramenta são transferidos diretamente às peças usinadas, afetando sua exatidão e a produtividade do processo. Com o desenvolvimento do CNC, alguns destes erros mecânicos podem ser compensados eletronicamente, e esta compensação tem permitido a existência de máquinas-ferramenta com exatidão crescente a custos decrescentes. Para obter vantagem destes recursos, os usuários deveriam ensaiar e atualizar a correção periodicamente, já que a exatidão geométrica da máquina varia de acordo com o uso normal e/ou após de uma colisão, por exemplo. No entanto, apesar da maioria dos CNCs terem esses recursos, a maioria dos usuários nunca testa as suas máquinas e muito menos atualiza a tabela de compensação de erros no CNC. Uma das razões encontradas para essa negligência são dificuldades das técnicas de ensaio geométrico empregadas para verificar a exatidão da máquina: as técnicas clássicas normalmente apresentam alto custo e/ou são de aplicação difícil e demorada e, mais ainda, os resultados normalmente não estão com formatação configurada para a compensação de erros via CNC. Nos últimos anos, várias técnicas novas surgiram com a finalidade de superar essas limitações e motivar os usuários de máquinas a ensaios mais frequentes em seus equipamentos (Ziegert, 1994) (Liotto, 1997).

Neste artigo é apresentado uma técnica alternativa para o ensaio de máquinas, desenvolvida no **LABMETRO – UFSC**, em cooperação com a **Fundação CERTI, Diadur Ind. e Com.** e o **Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP – UFSC**. O objetivo deste projeto é criar um método de ensaio geométrico confiável, mas de baixo custo e fácil aplicação, de forma a motivar os usuários de máquinas-ferramenta a realizarem verificações mais frequentes em seus equipamentos.

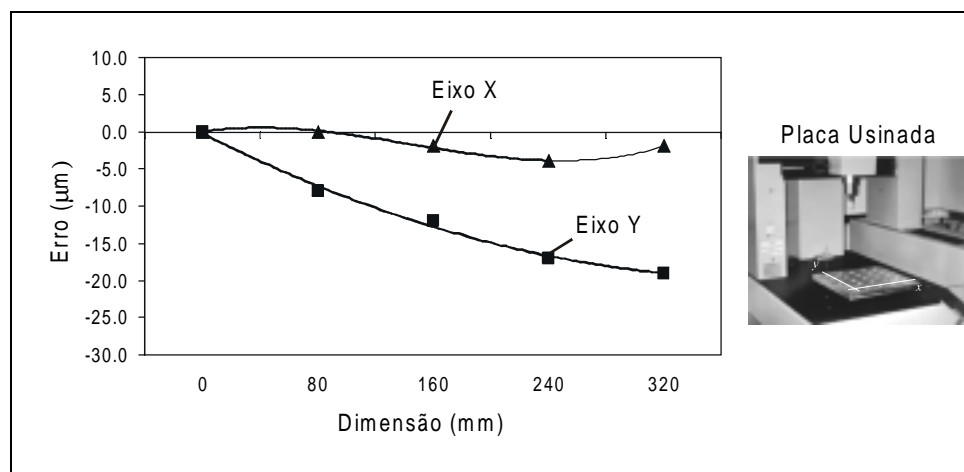
## 2. ERROS DA MÁQUINA-FERRAMENTA: CONSEQÜÊNCIAS

Vários fatores contribuem para que a máquina-ferramenta apresente um comportamento geométrico não ideal (Weck, 1984) (Pfeifer e Schneider, 1978). Efeitos térmicos, rigidez finita, erros na geometria da máquina e deficiências no controle causam alterações indesejáveis nas trajetórias programadas, afetando a geometria da peça usinada, com conseqüências óbvias: peças fora de tolerâncias levando ao refugo e retrabalho. No chão de fábrica, esses problemas são normalmente contornados através de ciclos de try-out, mudando-se o programa CNC por tentativa e erro até que a peça seja fabricada de acordo com as especificações. Essa prática é crítica para peças de alto valor financeiro e se torna problemática para lotes com pequeno número de peças.

Para verificar a influência dos erros da máquina-ferramenta na geometria da peça usinada, um centro de usinagem vertical foi ensaiado com laser interferométrico, para analisar os erros de posicionamento nos dois eixos de movimentação horizontais (x e y). Após este ensaio, foi usinada uma placa de furos, quando se fez o acabamento de 25 furos igualmente espaçados em forma de grid. A posição dos centros desses furos foi medido em uma Máquina de Medir por Coordenadas e o erro encontrado na peça foi comparado com o erro medido pelo laser. As figuras 1 e 2 mostram que os erros presentes na máquina-ferramenta, e medidos com o laser, se transferem diretamente para a peça usinada.



**Figura 1: Erro de posicionamento medido com o laser**



**Figura 2: Erros na posição dos furos, medido na CMM**

### 3. CORREÇÃO ELETRÔNICA DE ERROS

A forma tradicional para melhorar a exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta sempre consistiu em aumentar a precisão de fabricação dos componentes mecânicos da máquina, mas com um aumento de custo considerável do equipamento (Krulwich, 1998). Com o desenvolvimento do CNC, a exatidão mecânica da máquina passou a ser auxiliada pela micro-eletrônica, através da correção de erros geométricos por software (*computer aided accuracy*), elevando a performance geométrica da máquina-ferramenta próximo a suas limitações mecânicas.

A maior parte dos controladores após a década de 80 possui recursos para corrigir algumas limitações mecânicas das máquinas-ferramenta, o que tem agregado exatidão às máquinas sem aumento considerável de custo. O processo de correção eletrônica de erros pode ser visto na figura 3 e ocorre após um ensaio geométrico na máquina-ferramenta, quando são determinados os valores dos erros, que são introduzidos na memória do controlador. Em operação (*on the fly*), o CNC irá utilizar esses erros como fatores de correção, trazendo os eixos da máquina às suas trajetórias corretas.

Para demonstrar a eficiência dessa correção eletrônica de erros para a melhoria de exatidão nas peças usinadas, os erros de posicionamento medidos com o laser (figura 1) foram usados para atualizar a tabela de compensação de erros do CNC da máquina. Após isso, uma outra placa de furos, semelhante à primeira, foi usinada e também medida em uma Máquina de Medir por Coordenadas. O resultado da medição pode ser visto na figura 4, indicando uma melhora significativa na precisão de posicionamento dos furos na direção *y*, em comparação com a primeira placa. Os erros na direção *x* já estavam dentro dos limites de especificação da máquina.

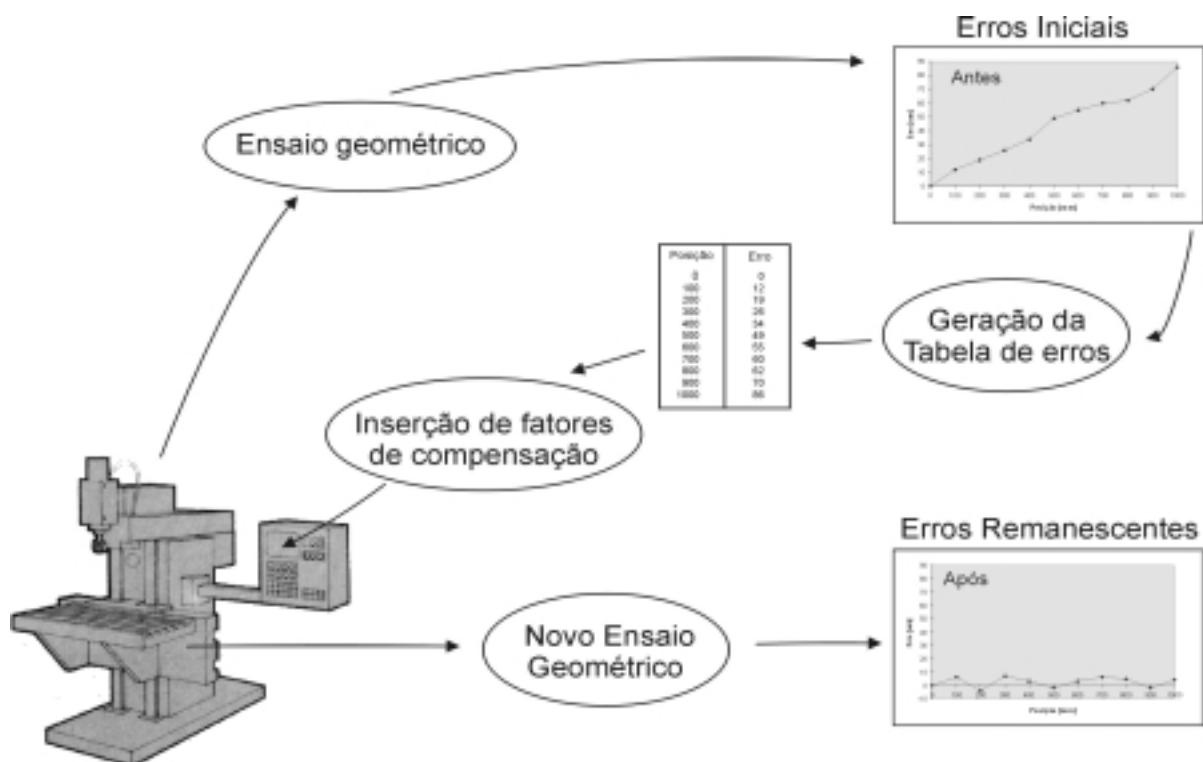
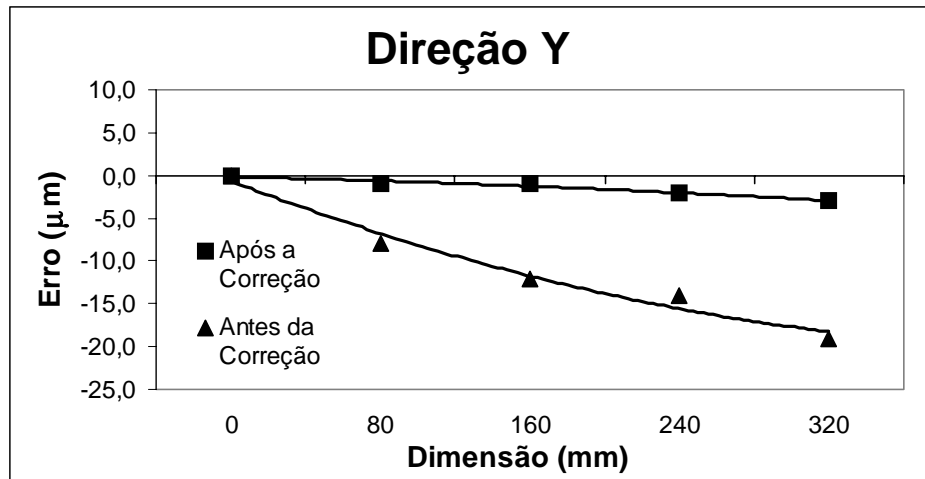


Figura 3: Etapas da correção eletrônica de erros



Atualmente, todos os controladores presentes no mercado apresentam, em maior ou menor grau (Sousa e Schneider, 1997), recursos para a compensação de erros, bastante acessíveis ao usuário mas que permanecem inexplorados pela grande maioria, que não realizam a qualificação geométrica de suas máquinas. Com isso, acabam por subtilizar a exatidão de trabalho de seus equipamentos.



**Figura 4: Melhoria obtida na peça usinada com a correção de erros**

A confiabilidade do processo de compensação de erros reside, fundamentalmente, na confiabilidade dos valores obtidos no ensaio geométrico e, assim, é imperativo que o ensaio forneça valores confiáveis. Mas, além da confiabilidade metrológica, o método de ensaio geométrico deve apresentar, ainda, praticidade em sua execução e custo compensatório. Muitas técnicas surgiram nos últimos 15 anos tentando congrega estas 3 qualidades simultaneamente. Embora avanços significativos tenham ocorrido, permanece o desafio tecnológico de desenvolver uma técnica de ensaio de baixo custo, prática de aplicação e confiável metrologicamente.

#### **4. ENSAIO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA COM ARTEFATOS CALIBRADOS**

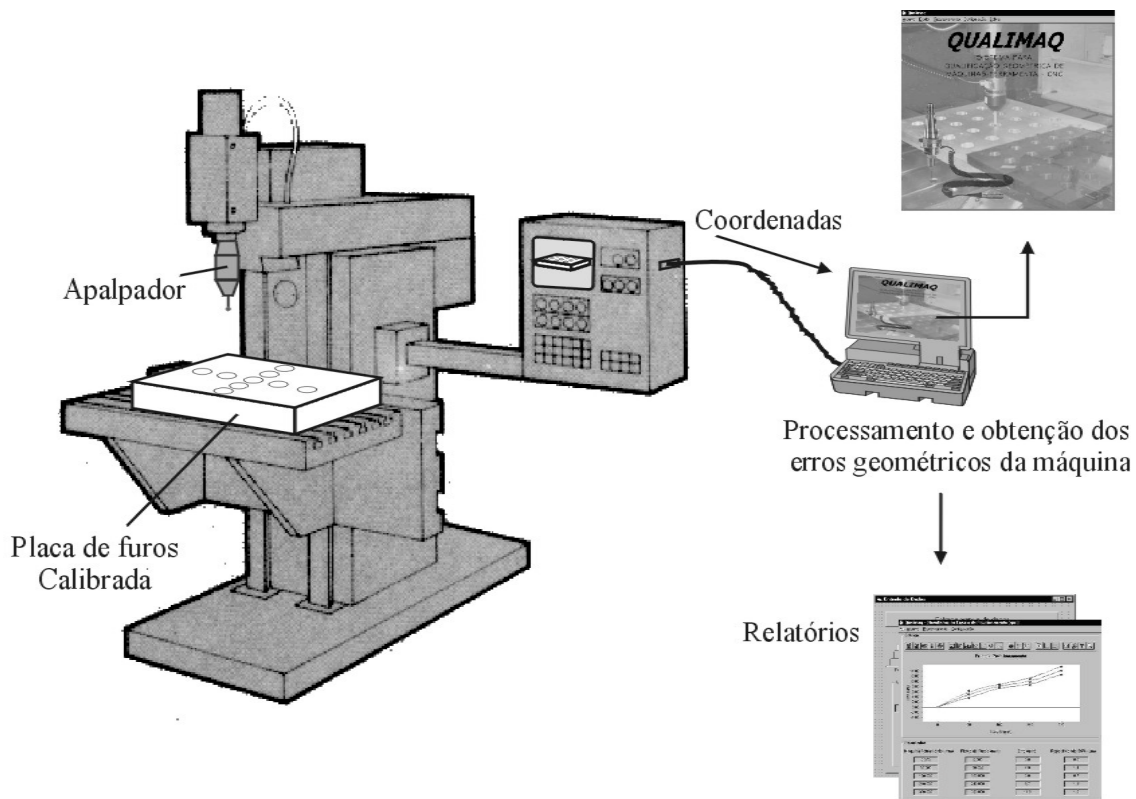
A utilização de apalpadores de medição em máquinas-ferramenta para a localização de peças, medição em processo e digitalização de formas, tem aumentando nos últimos anos, com boas vantagens para os seus usuários. No presente trabalho, o apalpador de medição é usado para uma outra (importante) função: verificar a exatidão de trabalho e atualizar os parâmetros de correção de erros no CNC.

O ensaio fundamenta-se na calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas com padrões corporificados (Trapet e Wäldele, 1991). Uma placa de furos com posições previamente calibradas em uma Máquina de Medir por Coordenadas é medida na própria máquina-ferramenta, que é equipada com um apalpador de medição. As coordenadas dos pontos apalpados são transferidas para um computador portátil, onde um software as adquire e processa, comparando-as com as dimensões calibradas da peça. Da comparação entre os

resultados medidos e calibrados obtêm-se os erros geométricos da máquina-ferramenta. Durante todo o ensaio, as temperaturas do padrão e da máquina-ferramenta são monitorados, para as compensações de dilatação térmica a serem realizadas.

A figura ilustra o sistema experimental desenvolvido para a realização desse ensaio, integrando um apalpador de medição, uma placa de furos calibrada e um computador portátil, com um software que gerencia o ensaio, e processa as coordenadas para a obtenção dos erros geométricos. Para obter os erros de posicionamento, retlineidade e perpendicularidade nos 3 planos de trabalho da máquina, é necessário medir a placa nos 3 planos cartesianos (xy, xz e yz).

O método é uma alternativa para superar aquelas limitações das técnicas clássicas mencionadas anteriormente, configurando-se como uma técnica metrologicamente confiável, mas de baixo custo e fácil aplicação, para a verificação geométrica de máquinas-ferramenta de pequeno e médio portes.

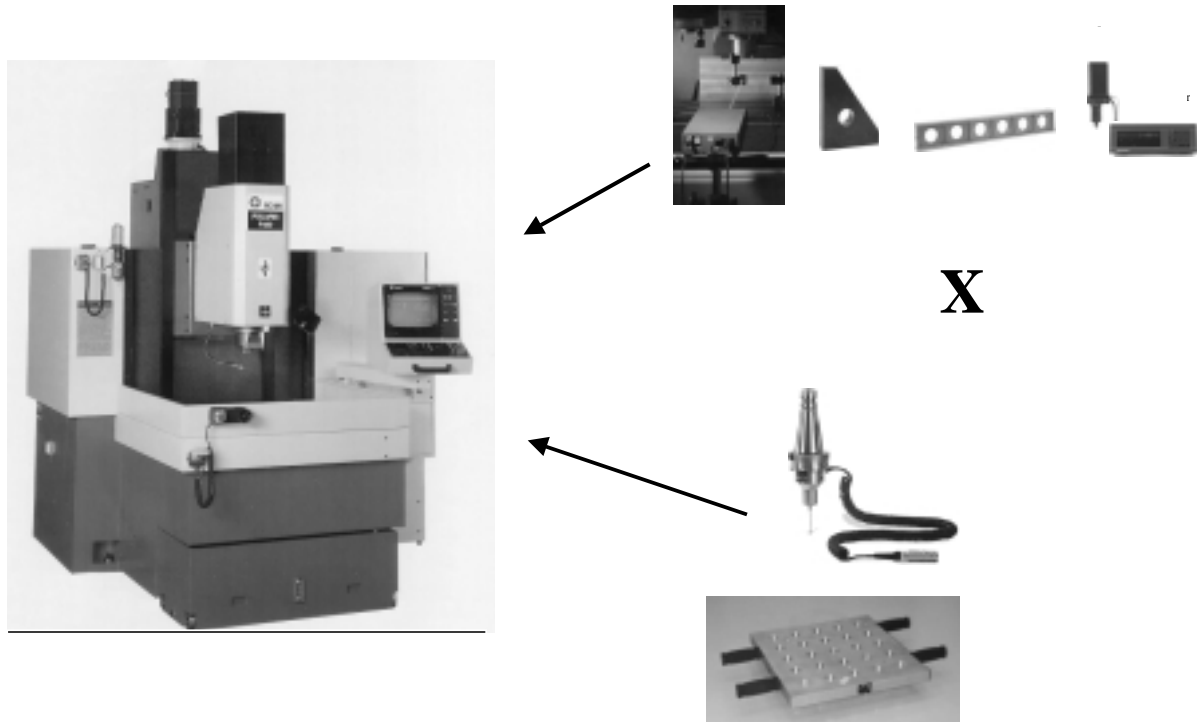


**Figura 5: Ensaio Geométrico utilizando padrões corporificados**

## 5. COMPARAÇÃO METROLÓGICA, ECONÔMICA E OPERACIONAL COM TÉCNICAS CLÁSSICAS

Para verificar se o sistema confirma as expectativas, foram realizados ensaios comparativos, testando-se uma mesma máquina-ferramenta com técnicas clássicas e com o método desenvolvido (figura 6). Foi testada a exatidão de posicionamento linear, retlineidade

de trajetória dos eixos e perpendicularidade entre eixos. Para os ensaios de posicionamento linear foi utilizado um laser interferométrico Renishaw, e para os ensaios de retilidade foram utilizados régua e esquadro de granito. Todos os sistemas de medição são rastreados aos padrões primários.

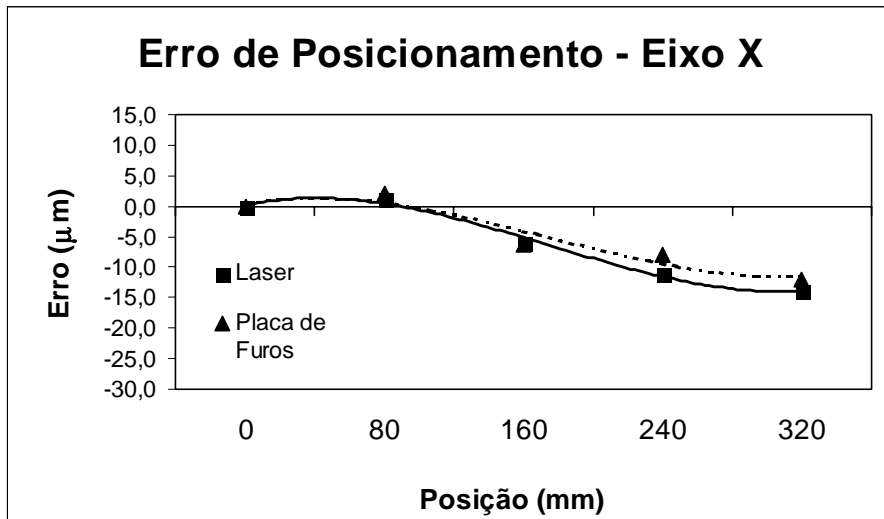


**Figura 6 – Ensaio com técnicas clássicas e com a placa de furos**

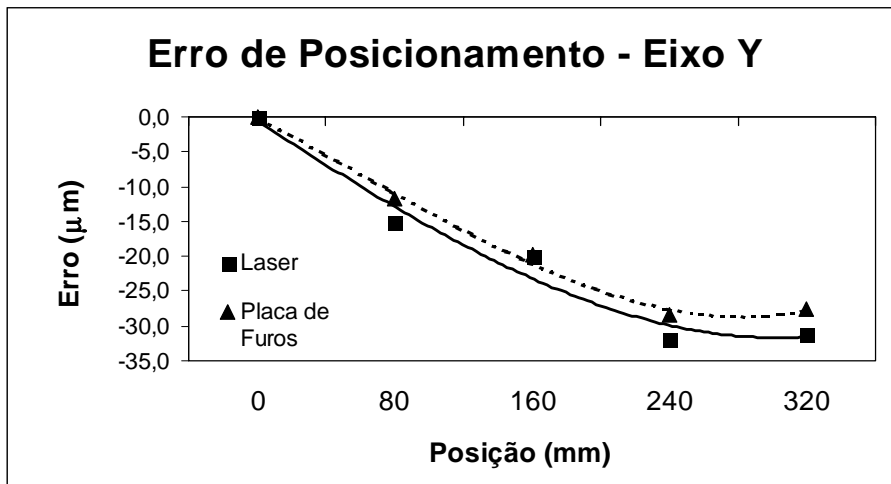
A comparação dos resultados obtidos para os ensaios de posicionamento linear (laser x placa) podem ser vistos nas figuras 7 e 8, para os 2 eixos de movimentação horizontais da máquina (x e y), observando-se uma estreita concordância de resultados entre as técnicas, bem como das respectivas incertezas. Nos resultados para os ensaios de retilidade (régua x placa) e perpendicularidade (esquadro x placa), observa-se também a mesma tendência, bem como incertezas semelhantes (figuras 9 e 10).

Todos esses números indicam que o método proposto apresenta uma confiabilidade metrológica próxima à de técnicas clássicas e, portanto, compatível para o ensaio de máquinas-ferramenta. Quando se comparam outros aspectos igualmente importantes para uma técnica de ensaio, custo e praticidade, os números deixam de ser próximos.

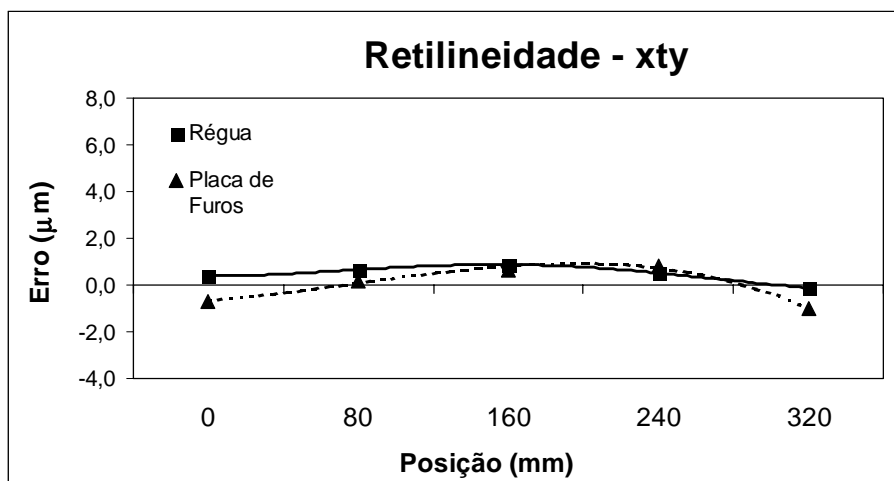
O custo envolvido com a instrumentação empregada para o ensaio com técnicas clássicas é estimado em torno de US\$ 50.000,00, cerca de 10 vezes mais do que o custo estimado com o método proposto. Em relação à praticidade do ensaio, foram necessários 9 horas de trabalho para a realização dos ensaios de posicionamento, retilidade e perpendicularidade com as técnicas clássicas. Os mesmos ensaios foram realizados, por completo, em 1 hora com o método proposto, sendo necessários apenas 14 minutos para a medição da placa.



**Figura 7 - Comparação em ensaio de posicionamento – Eixo x**



**Figura 8 - Comparação em ensaio de posicionamento – Eixo y**



**Figura 9 - Erro de retilneidade em y, ao mover na direção x**

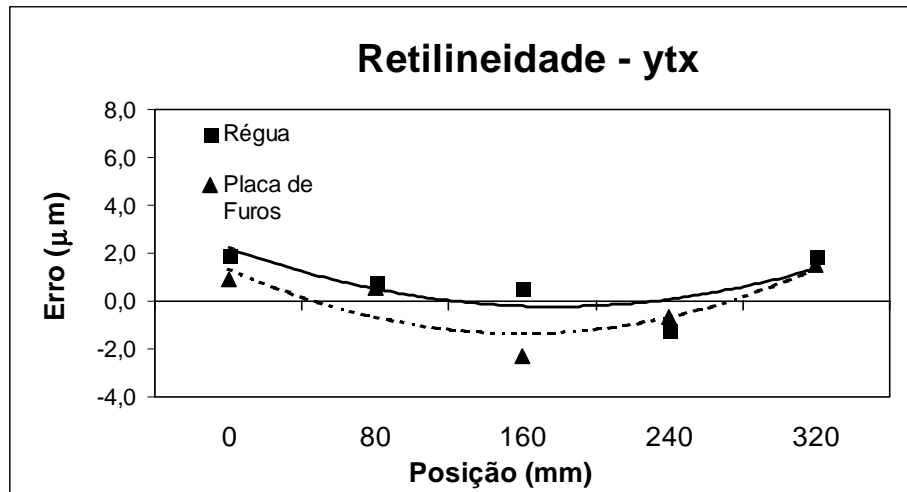


Figura 10 - Erro de retilneidade em x, ao mover na direção y

## 6. Conclusões

A melhoria obtida para as peças usinadas neste trabalho, com a prática de ensaios geométricos em máquinas-ferramenta e compensações de erro via CNC, ilustram de forma prática o potencial da exatidão de trabalho das máquinas CNC que é desperdiçado pelo fato dos usuários não manterem uma prática freqüente de ensaios, às vezes nem no ato da compra da máquina. A possibilidade de diminuir o volume de peças refugadas e retrabalhadas, com a prática destes ensaios, não tem sido observada como deveria pelos usuários nacionais e uma das causas são dificuldades econômicas e operacionais das técnicas de ensaio geométrico classicamente empregadas para o teste de máquinas-ferramenta.

O ensaio geométrico de máquinas-ferramenta com padrões corporificados configura-se como uma alternativa promissora às técnicas clássicas, para o ensaio de máquinas-ferramenta. O baixo custo dos equipamentos, a praticidade e rapidez na condição do ensaio, e a confiabilidade metrológica do método são fatores positivos que podem motivar os usuários de máquinas-ferramenta de pequeno porte a verificações mais freqüentes em seus equipamentos, e atualizarem os parâmetros de correção de erros no CNC.

Neste trabalho, um centro de usinagem com um apalpador foi testado com o método proposto e, para permitir uma comparação, também com técnicas clássicas. Os resultados indicam confiabilidade metrológica semelhante entre os métodos, mas a custo 10 vezes menor e em 1/9 do tempo necessário para o mesmo ensaio com técnicas clássicas.

Em todos os ensaios, a principal fonte de incerteza foi a própria repetitividade da máquina, devido às suas folgas, que causavam histerese em sua movimentação. A variação de temperatura é uma outra fonte de incerteza significativa e, para a sua minimização, quanto mais rápido for realizado o ensaio menores as oscilações de temperatura. Para isso, novos dispositivos de fixação do padrão na mesa foram desenvolvidos, visto que há a necessidade de movimentar a mesa da máquina mais rapidamente, o que pode provocar deslocamentos indesejados do padrão. Outros padrões e estratégias de medição serão testados para tornar o sistema não só mais confiável, mas também ainda mais prático e de baixo custo.

## 7. Referências Bibliográficas

Diadur Ind. E Com.  
www.diadur.com.br

Fundação CERTI - Centro Regional em Tecnologias Inovadoras  
www.certi.ufsc.br

Krulwich, D. *Rapid mapping of volumetric machine errors using distance measurements*. Proceedings of the International Seminar on Improving machine tool performance, vol. 2, p. 487, 1998.

LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização  
www.labmetro.ufsc.br

Liotto, G.; Wang, C.P. *Laser Doppler displacement meter allows new diagonal measurement for large aspect ratio machine tool easily and accurately*. Proceedings of Lamdamap III, Laser Metrology and Machine Performance, 1997.

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão  
www.lmp.ufsc.br

Pfeifer, T.; Schneider, C.A. *Einsatz neuer Laser-Technologien zur Messung der Abweichung von der Geradlinigkeit*. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1978.

Sousa, A.R.; Schneider, C.A.; Scavone, R. *A compensação de erros geométricos via CNC é rápida e eficiente, mas pouco praticada*. Máquinas e Metais, Maio, 1997.

Trapet, E. and Wäldele, F. *A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools*. Measurement, Vol. 9, No 1, pp. 17 - 21, 1991.

Weck, M. Handbook of Machine Tools, Vol. 4 – *Metrological Analysis and Performance Tests*. Jonh Willey and Sons, 1984.

Ziegert, J.; Mize, C. *The laser ball bar: a new instrument for machine tool metrology*. Precision Engineering, vol. 4, N° 16, 1994.

## AGRADECIMENTOS

- DIADUR Ind. e Com. – Subsidiária Brasileira da empresa *Dr. Johannes Heidenhain GmbH*
- Laboratório de Mecânica de Precisão, Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC.
- Est. Eng. Eduardo Weingaertner.

## 5. CONCLUSIONES

Del presente trabajo podemos identificar la existencia de una serie de métodos para determinación de adecuabilidad. De acuerdo al levantamiento de criterios presentados en este trabajo, todas las metodologías presentan diferentes características, quedando en manos de cada empresa la selección que más se acomode a sus necesidades. De esta manera podemos extraer las siguientes conclusiones:

- como criterio general se recomienda la utilización de los métodos más robustos. Métodos más simples podrían ser utilizados en la medida que los criterios de comparación no sean de interés o sean satisfechos con holgura;
- queda en evidencia que los métodos más utilizados, aquellos como la resolución y el error máximo, no consideran una serie de aspectos que pueden ser críticos. Por ejemplo la repetibilidad, variación del proceso y los costos de fallas;
- en la medida que las metodologías aumentan en complejidad, y por consiguiente consideran un mayor número de parámetros, la intercambiabilidad se dificulta. Para los métodos más complejos, no existen 2 instrumentos exactamente iguales que puedan usar indistintamente. Así la posibilidad de intercambiabilidad requiere un estudio más acabado;
- en el caso de utilizar el error máximo, es necesario realizar verificaciones periódicas para evaluar dicho error. El usar simplemente las especificaciones de catálogo que entrega el fabricante podría llevar a invalidar los resultados;
- en el caso de utilizar calibres o materiales de referencia, sólo el método de la incertidumbre de medición y el planteado en la norma ISO 14253 son válidos;
- por último queda demostrado la necesidad de desarrollar una nueva metodología que considere además el criterio de Costos de Fallas.

Quisiera por último agradecer a la Fundación CERTI y a LABMETRO por la oportunidad de realizar este trabajo y a DICTUC S.A. por su apoyo en la realización de este Maestrado.

## 6. REFERENCIAS

- Chrysler, Ford y General Motors, 1997, “Análise dos Sistemas de Medição”, MSA, versión en portugués, 127p.
- INN, 1998, Norma Chilena NCh2450 “Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales de Metrología”. Homologación del documento ISO, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, 41p.
- ISO, 1997, Norma ISO/FDIS 14253-1 “Geometrical Products Specifications (GPS) – Inspection by Measurements of Workpieces and Measuring Equipment – Part 1: Decision Rules for Proving Conformance or non-conformance with Specification”, 14p.
- ISO, 1997, Norma ISO/DTR 14253-2 “Geometrical Products Specifications (GPS) – Inspection by Measurements of Workpieces and Measuring Equipment – Part 2: Guide to the Estimation of Uncertainty in GPS Measurements, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verification”, 72p.
- Schoeler, N. y Donoso, J., 1999, “Gerenciamento de Instrumentos de Medição Segundo a ISO 9000 e QS 9000” Manual del curso CM-113 impartido por la Fundación CERTI pp. 95-129.

#### 4. COMPARACIÓN ENTRE METODOS

A continuación se presenta un análisis comparativo entre los 6 métodos formales presentados con respecto a los diferentes parámetros. Los métodos han sido colocados horizontalmente en orden de complejidad, estos sin embargo, son precisamente aquellos que consideran y respetan, un mayor número de criterios. Para el análisis de los métodos, utilizaremos la siguiente simbología:

- : El método presenta características positivas o muy positivas con respecto a ese parámetro.
- ◐: El método presenta características regulares o limitadas con respecto a ese parámetro.
- : El método presenta características negativas o muy negativas con respecto a ese parámetro.

**Tabla 1.** Comparación entre métodos

Parámetro \ Método	Resolución	Error Máximo	Incertidumbre Calibración	Incertidumbre Medición	ISO 14253	MSA
Rango de medición	●	●	●	●	●	●
Resolución	●	●	●	●	●	●
Tolerancia	●	●	●	●	●	●
Simplicidad	●	◐	◐	○	○	○
Intercambiabilidad	●	◐	◐	○	○	○
Error de medida	○	●	●	●	●	●
Repetibilidad de la calibración	○	○	●	●	●	●
Condiciones de calibración	○	○	●	●	●	◐
Reproducibilidad	○	○	○	●	●	●
Condiciones de medición	○	○	○	●	●	◐
Robustez	○	○	○	◐	●	●
Estabilidad	○	○	○	◐	◐	●
Proceso fabricación	○	○	○	○	◐	●
Costos de la calidad	○	○	○	○	○	○

Ninguna de las metodologías planteadas encima, utiliza todos los criterios de selección planteados. En particular, ninguna de ellas, exceptuando a MSA, toma en cuenta directamente la variabilidad del proceso de fabricación de las piezas que deben ser inspeccionadas. De esta forma, si fijamos un mismo nivel de tolerancia, se estaría tomando una misma decisión, tanto para un proceso con índice de capacidad ( $C_p$  o  $C_{pk}$ ) alta, de otro con índice bajo. De la misma forma, ninguno de ellos es sensible a los costos de falla, es decir, los métodos presentados responden de la misma forma ante piezas de bajo y alto costo.

En la actualidad, a pesar de sus limitaciones, el método de la resolución debe ser el más utilizado universalmente. Este método podría ser considerado como valido en la medida que se cumplan una serie de requisitos. Entre ellos podemos mencionar:

- tolerancias amplias o procesos de fabricación altamente capaces;
- utilización de instrumentos simples como pies de metro o micrómetro, que presenten errores de indicación pequeños con respecto a la resolución, buena repetibilidad, reproducibilidad y estabilidad;
- variación de las condiciones de medición despreciables con respecto a la tolerancia;
- piezas de bajo costo, cuando la clasificación dentro o fuera de tolerancia no es crítica.



### **3.6 Norma ISO 14253:**

Esta metodología se presenta en la norma ISO 14253-1 (1997) donde se establecen criterios para determinar si una pieza cumple o no con las especificaciones de tolerancia, de acuerdo al instrumento y de acuerdo a las condiciones de medición. Este método determina que, los límites de tolerancia deben ser ajustados (apretados), descontando en cada extremo una magnitud equivalente a la incertidumbre de medición.

Por su parte, la norma ISO 14253-2 (1997) presenta un Procedimiento de Análisis de Incertidumbre de Medición (PUMA), que plantea como ajustar las condiciones de medición, de tal forma de satisfacer los requerimientos establecidos.

Este método incorpora un nuevo ángulo al problema, en la medida que los límites de tolerancia son ajustados proporcionalmente al valor de la incertidumbre de medición. Establece una región de piezas conformes, otra de no conformes y una tercera de duda, de esta forma, la incertidumbre de medición, repercute directamente sobre el número de piezas conformes. A mayor incertidumbre de medición, mayor número de piezas originalmente conformes irán a caer dentro de la zona de duda.

#### **a) Ventajas:**

- este método presenta las mismas ventajas del método anterior;
- este método incorpora indirectamente el parámetro de Variación del Proceso de Fabricación. En la medida que las piezas en la zona de duda sean declaradas como no conformes, el número de piezas aceptadas como buenas disminuirá, cuando el proceso de fabricación tenga una mayor variación.

#### **b) Desventajas:**

- no establece una metodología formal para establecer la adecuabilidad del sistema de medición. Cada usuario debe encontrar una solución para cada caso, a partir de la relación entre tolerancia, incertidumbre y capacidad de proceso de fabricación;
- presenta las mismas desventajas del método anterior.

### **3.7 MSA (Análisis de Sistemas de Medición) - QS 9000:**

Esta metodología fue establecida por (Chrysler, Ford y General Motors, 1997) en el marco de las normas QS 9000. Establece una serie de requisitos que deben ser cumplidos por el sistema de medición.

#### **a) Ventajas:**

- método muy robusto, en la medida que toma en cuenta tanto las características del sistema de medición, tolerancias y capacidad del proceso de fabricación.

#### **b) Desventajas:**

- método complejo por los conocimientos necesarios, terminología propia de MSA y por los cálculos matemáticos involucrados;
- requiere satisfacer una serie de condiciones en forma conjunta. De esta forma, un sistema de medición será adecuado solo si satisface cada uno de estas condiciones;
- este método no es tan sensible (no considera) a la variación de las condiciones de calibración.

### **3.4 Incertidumbre de Calibración:**

Considera adecuada la utilización de instrumento, patrón de medición o material de referencia con incertidumbre de la calibración entre un 10% a un 33% de la tolerancia. Esta incertidumbre se obtiene directamente del certificado de calibración respectivo. En el caso de instrumentos de medición, al menos debe considerar la incertidumbre del patrón de calibración, la resolución, la repetibilidad y la corrección de errores sistemáticos.

#### a) Ventajas:

- método valido para ser usado tanto en instrumentos, como en patrones y materiales de referencia;
- además de los criterios considerados en los métodos anteriores, incluye la repetibilidad y considera además aspectos de la calibración como incertidumbre del patrón de calibración, condiciones ambientales en que fue realizada la misma.

#### b) Desventajas:

- método complejo por los conocimientos metrológicos necesarios y por los cálculos matemáticos involucrados;
- debido a que la incertidumbre es propia de cada instrumento, no es posible determinar la adecuabilidad general de una familia de instrumentos;
- es necesario disponer del instrumento ya calibrado para saber si será adecuado o no;
- costos de la calibración previa de cada instrumento.

### **3.5 Incertidumbre de Medición:**

Considera adecuada la utilización de sistemas de medición con incertidumbre de medición entre un 10% a un 33% de la tolerancia. Esta incertidumbre se obtiene a partir del certificado de calibración respectivo, más la participación de las magnitudes de influencia presentes durante la medición.

#### a) Ventajas:

- método robusto en la medida que considera además de los criterios utilizados por el método anterior, las condiciones reales de medición, reproducibilidad y estabilidad. De esta forma, este método mantiene su validez inclusive cuando las condiciones de medición varíen.

#### b) Desventajas:

- este método presenta las mismas desventajas del método anterior;
- método complejo debido a que la incertidumbre debe ser determinada para cada uso diferente;

- b) Desventajas: Dependiente de la persona que posee el conocimiento, poco sistemática y en general no considera todos los criterios formales. Por su falta de sistemática, no será tratado más profundamente ni considerado como una alternativa viable ni recomendable.

### **3.2 Resolución:**

Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con resolución entre un 10% a un 33% de la tolerancia.

a) Ventajas:

- método simple, debe ser uno de los métodos universalmente más utilizados;
- la resolución es una información fácil de encontrar en catálogos o al manipular los propios instrumentos;
- depende sólo de la familia de instrumentos, de esta forma todos los instrumentos de la misma familia, pueden ser asociados a un mismo comportamiento. Esto facilita la determinación de adecuabilidad antes de la compra de los mismos;

b) Desventajas:

- la resolución en general se considera como un método inadecuado, en la medida que considera un número limitado de criterios;
- existen algunos instrumentos (particularmente los digitales) donde la resolución no presenta una relación directa con la calidad metrológica del instrumento, pudiendo este presentar importantes errores de medición;
- método no válido para ser usado en patrones y materiales de referencia;

### **3.3 Error Máximo Permitido:**

Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con error máximo admisible, dentro del rango de medición de un 25% de la tolerancia. Este criterio puede ser un poco vago en cuanto a la interpretación de error máximo, ya que no siempre queda claro si este considera o no la incertidumbre del sistema de medición empleado en la determinación de dicho error. En la mayoría de los casos, la incertidumbre no es considerada y se utiliza entonces la tendencia como estimador del error.

a) Ventajas:

- método relativamente simple;
- a menudo, dentro de las especificaciones de los instrumentos aparece esta información, típicamente en inglés bajo el término *accuracy*. Esto facilita la determinación de adecuabilidad de los instrumentos antes de la compra de los mismos;
- éste método es más completo que el de resolución, en la medida que considera los posibles errores de las indicaciones del mismo.

b) Desventajas:

- método ambiguo en cuanto a la forma de determinar el error máximo, normalmente se utiliza la tendencia, es decir, sin considerar la incertidumbre de la calibración;
- en el caso de instrumentos que no sean nuevos, muchas veces se utiliza el error máximo admisible declarado por el fabricante y no se determinan regularmente los errores de dicho instrumento bajo condiciones reales de medición;
- método no válido para ser usado en patrones y materiales de referencia.

- **Condiciones de Medición:** Magnitudes de influencia presentes durante la medición (temperatura, presión, humedad, vibraciones, impurezas, etc.) y repetibilidad de las mediciones. Lo importante es que las diferentes metodologías planteadas sean sensibles a las posibles variaciones que puedan presentar estas condiciones.
- **Robustez:** Este criterio se refiere a la capacidad que tiene cada metodología para entregar soluciones adecuadas, al variar las condiciones de medición, dentro de los límites establecidos.
- **Estabilidad:** Representa la aptitud de un sistema de medición para conservar sus características metrológicas a lo largo del tiempo.
- **Variabilidad del Proceso de Fabricación:** Si bien este criterio esta asociado al proceso de fabricación en sí, se relaciona con la selección del sistema de medición mas adecuado, en la medida que, procesos de fabricación incapaces producen una gran cantidad de piezas en la zona de límites de tolerancia. De esta forma, el proceso de selección se hace más crítico en los casos donde el proceso es altamente incapaz, produciendo muchas piezas en los límites de tolerancia.
- **Costos de la Calidad:** Una empresa que desee tomar la mejor decisión, con respecto a la selección del sistema de medición más adecuado, deberá considerar los 4 tipos de costos asociados, estos son:
  - **Prevención:** Representa todos los costos asociados a las medidas tomadas internamente para evitar otro tipo de costos. Entre estos se puede mencionar costos de entrenamiento del personal, homologación de proveedores y calibración de instrumentos.
  - **Medición (verificación):** Representa todos los costos asociados a la verificación de productos. Entre estos se puede mencionar costos de inspección y ensayos.
  - **Fallas internas:** Representa todos los costos provocados mientras el producto se encuentra en poder del fabricante. Entre estos se puede mencionar los costos de desperdicios y reproceso.
  - **Fallas externas:** Representa todos los costos generados después de que el fabricante entrega el producto. Entre estos se puede mencionar los costos de garantía, perdida de imagen y responsabilidad civil.

### **3 ESTUDIO DE METODOS**

En la actualidad existen una serie de metodologías empleadas para la determinación de la adecuabilidad de los medios de medición, tal como lo plantea (Schoeler, Donoso, 1999). A continuación se presentan aquellos más utilizados, describiendo las ventajas y desventajas más significativas de cada uno de ellos.

#### **3.1 Experiencia:**

En todo ambiente profesional, siempre existen personas que, muchas veces sin un conocimiento teórico, realizan tareas en forma adecuada sin la necesidad aparente de manejar métodos formales.

a) **Ventajas:** Metodología simple y avalada por resultados a lo largo de muchos años.

## 2. PARÁMETROS DE SELECCIÓN

Para la determinación del sistema de medición más adecuado, existe una serie de aspectos que podrían ser tomando en cuenta. A continuación se presentan aquellos que han sido considerados como más relevantes, la terminología esta de acuerdo al Vocabulario Internacional de Metrología (INN, NCh2450):

- **Rango de Medición:** Para la selección de un sistema de medición, en particular cuando se utilizan instrumentos de medición, es necesario verificar que se cubra el rango de medición correspondiente, ya sea con 1 o más instrumentos.
- **Resolución:** El instrumento elegido para una tarea de medición, debe presentar errores de medición compatible con los resultados de medición esperados. La resolución de un instrumento aparece como un parámetro que, en teoría, debería estar relacionado a dicho error.

Existe otro término, que a veces se confunde con el de resolución, este es “valor de una división (de escala)”. En muchos instrumentos, especialmente aquellos digitales, ambos valores coinciden, sin embargo, existen algunos donde la resolución puede tomar un valor menor, por ejemplo, el caso de un micrómetro con valor de una división de escala de 0,01 mm y que sea utilizado con una resolución de 0,002 mm.

- **Tolerancia de Proyecto:** Este criterio esta relacionado al rango de aceptación de los resultados. En la medida que las tolerancias sean más estrechas, aumenta la probabilidad de rechazar piezas y por consiguiente, la selección adecuada de un instrumento de medición se hace más crítica.
- **Simplicidad:** Se refiere a la facilidad para encontrar una solución, considerando tiempos, costos, conocimientos y cálculos matemáticos requeridos. Este criterio es muy importante a la hora de elegir un método. Las empresas normalmente buscan soluciones simples a sus problemas, por lo tanto una buena solución tiene que ser a su vez los más simple posible.
- **Intercambiabilidad:** Caracteriza la similitud del desempeño metrológico entre un instrumento y otro. El disponer de instrumentos de alta intercambiabilidad, permite la utilización indistinta de uno u otro, lo cual facilita la operación.
- **Error de medida:** Diferencia entre lo que indica el instrumento de medición y lo que debería indicar. En la medida que estos errores sean significativos y no puedan ser corregidos, los resultados pueden perder toda validez. En la practica se utiliza la tendencia como estimador del error.
- **Repetibilidad de la calibración:** Representa el grado de concordancia entre los resultados de las diferentes lecturas, realizadas en un corto periodo de tiempo, manteniendo las condiciones de calibración.
- **Condiciones de Calibración:** Este criterio representa al nivel metrológico de la calibración, considerando aspectos como la idoneidad de los metrólogos, calidad de los procedimientos de calibración, incertidumbre de los patrones, condiciones ambientales durante la calibración, etc. En el caso de una calibración externa, valora el nivel técnico del laboratorio que prestador de servicios.
- **Reproducibilidad:** Representa el grado de concordancia entre los resultados de las mediciones, dado por cambio de operador, de método, e inclusive de instrumentos.

# **EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS ACTUALMENTE UTILIZADOS PARA SELECCIONAR SISTEMAS DE MEDICIÓN**

**José Donoso Urrutia**

**Carlos Alberto Schneider**

Universidade Federal de Santa Catarina, LABMETRO, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: jiu@labmetro.ufsc.br

## **Resumen**

En procesos de inspección de partes y piezas, es necesario disponer de un sistema de medición “adecuado” para verificar el cumplimiento de tolerancias. Para que un sistema de medición sea adecuado, este debe permitir medir los parámetros o dimensiones de interés en el rango de medición deseado, con una precisión y exactitud acorde. En la actualidad existen una serie de métodos diferentes que permiten definir un medio o sistema de medición adecuado para una tarea en particular. Este trabajo presenta algunos de los métodos más utilizados, identificando sus características, ventajas y desventajas.

**Palabras-clave:** Metrología, Calidad, Costos, Adecuabilidad

## **1. INTRODUCCIÓN**

La industria de manufactura, especialmente de partes y piezas mecánicas, ha sido afectada fuertemente en los últimos años por un aumento de las exigencias metrológicas. De esta forma, cada día las especificaciones de tolerancias dimensionales y geométricas son más estrechas.

Para satisfacer estos requerimientos, se hace necesario el disponer de sistemas de medición adecuados. El término sistemas de medición, se refiere no sólo a un instrumento de medición, patrón o material de referencia, sino que además, a todos aquellos factores o condiciones que influyen en el resultado de una medición, tales como la capacidad de los operadores, las condiciones ambientales y el procedimiento de medición.

En la actualidad existe una serie de metodologías, las cuales usan diferentes criterios de selección. Ante la falta de una orientación al respecto, surge la necesidad de contar con una herramienta que permita evaluar y comparar las alternativas de solución. Para realizar esta tarea se definirán una serie de parámetros o aspectos de interés y posteriormente se establecerá el nivel de cumplimiento de cada metodología con respecto a cada criterio. Por último se levantarán una serie de conclusiones con respecto a las diferentes alternativas.

Queda en manos de cada empresa, definir sus propias metodologías, para esto deberán definir los criterios que serán considerados y establecer prioridades.

- Cuantificar los costos asociados a errores de clasificación, tanto de rechazar piezas buenas como de aceptar piezas malas.
- Disponer de conocimientos suficientes para determinar la adecuabilidad de los medios de medición.

#### 4. CONCLUSIONES

Del presente trabajo podemos extraer las siguientes conclusiones:

- Es posible seleccionar en forma objetiva el medio de medición mas adecuado, para un uso en particular, en función de las características del proceso de fabricación, de las especificaciones de proyecto y de las características metrológicas del SM utilizado.
- Esta metodología puede ser aplicable en una serie de situaciones, inclusive donde la fabricación o la inspección tengan distribuciones estadísticas diferentes a la normal.
- Queda demostrado que, en el caso de procesos capaces (con un índice de capacidad alto), la selección del SM no es tan critica como en el caso de procesos incapaces.
- En la medida que la caracterización del proceso sea evaluada con el mismo SM que se usa para la inspección, la capacidad real del proceso se encuentra “contaminada” por dicho sistema. Es decir, la capacidad aparente (conocida) del proceso será mayor que la capacidad verdadera. De esta forma seria posible mejorar en parte la capacidad del proceso, en la medida que se disponga de un mejor SM.
- La metodología propuesta se adapta mejor a procesos de fabricación y medición que sean estables en el tiempo y que no presenten tendencias ni errores sistemáticos no corregidos,
- El tomar una correcta decisión con respecto a que SM utilizar, no siempre significa usar un SM mejor o más costoso, en algunos casos la mejor decisión significa utilizar un SM de nivel metrológico inferior ya que la clasificación no es afectada por dicho sistema.

Quisiera por último agradecer a la Fundación CERTI a LABMETRO y a DICTUC S.A. por su apoyo en la realización de este Maestrado, uno de cuyos resultados es este trabajo.

#### 5. REFERENCIAS

- Chrysler, Ford y General Motors, 1997, “Análise dos Sistemas de Medição”, MSA, versión en portugués, 127p.
- INN, 1998, Norma NCh2450 “Vocabulario de Términos Fundamentales y Generales de Metrología”. Homologación del documento ISO, *International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*, 41p.
- ISO, 1997, Norma ISO/FDIS 14253-1 “Geometrical Products Specifications (GPS) – Inspection by Measurements of Workpieces and Measuring Equipment – Part 1”, 14p.
- Johnson, Richard A., 1994, “Miller and Freund’s Probability and Statistics for Engineers”, 5ª edición, Universidad de Wisconsin-Madison, pp. 138-141, 168-173
- Schoeler, N. y Donoso, J., 1999, “Gerenciamento de Instrumentos de Medição Segundo a ISO 9000 e QS 9000” Manual del curso CM-113 impartido por la Fundación CERTI pp. 95-129.

De esta forma, por ejemplo, PDRP considera la probabilidad de que una pieza sea erróneamente clasificada como pequeña, ver ecuación (5). Es decir, la probabilidad de que el resultado de la medición se encuentre entre LI y LIA (pieza tiene una dimensión menor a la mínima requerida para ser aceptada), siendo que en realidad, la pieza se encuentra dentro de tolerancia (considerando un sistema de medición ideal), es decir entre el LIE y el LSE.

El cumplimiento de ambas condiciones se traduce en que:

- La variable “x” que representa al sistema de medición, se encuentra centrada en  $X_{pa} + y$ , con una desviación estándar de  $\sigma_{sm}$  y se obtenga un resultado de medición entre LI y LIA es decir en la zona donde que corresponde a una pieza pequeña.
- Al mismo tiempo, la variable “y” que representa al proceso de fabricación respectivo, se encuentra centrada en  $X_{pv}$ , con una desviación estándar de  $\sigma_{pv}$  y evaluada entre LIE y LSE. Es decir en la zona de especificación de tolerancia.

Para llegar a un valor numérico, es necesario utilizar un software que permita resolver esta integral doble, como se expresa en la ecuación (5) para el caso de PDRP

$$PDRP = \int_{LIE-X_{pv}}^{LSE-X_{pv}} \int_{LI}^{LIA} \frac{e^{\frac{-(y)^2}{2 \cdot (\sigma_{pv})^2}} \cdot e^{\frac{-[x-(X_{pa}+y)]^2}{2 \cdot (\sigma_{sm})^2}}}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pv} \cdot \sigma_{sm})} dx dy \quad (5)$$

### 3.4 Consideraciones económicas

La metodología propuesta es aplicable, en la medida que pueda asociarse un costo directo o indirecto tanto al hecho de rechazar piezas buenas como de aceptar piezas que no cumplen con las tolerancias exigidas. Con respecto a estas últimas, además se pueda plantear una diferenciación entre aquellas piezas que erróneamente se les considera muy grandes de aquellas que se les considera muy pequeñas. Por ejemplo, aquellas grandes podrían eventualmente ser reprocesadas en cambio que las pequeñas serían desechadas. Por otra parte, es necesario definir un lote de piezas sobre el cual calcular los costos.

Existe una serie de otros costos asociados que no han sido tratados en este artículo, pero que por supuesto, deben ser tomados en cuenta a la hora de definir el sistema de medición mas adecuado. Entre estos costos podemos mencionar; compra y mantención de instrumentos, adecuación de condiciones ambientales, entrenamiento de personal, calibración periódica de instrumentos.

### 3.5. Estudio de caso

Actualmente esta metodología se encuentra en fase de validación, para ello se han tomado algunos ejemplos reales de empresas, para evaluar su desempeño. Hasta el momento, las conclusiones más destacadas son, la importancia de:

- Disponer de procesos capaces para evitar problemas de clasificación.
- Disponer de SM adecuados, que no afecten negativamente la capacidad del proceso de fabricación respectivo.



### 3.3 Formulación matemática

Para la determinación de las 4 probabilidades de interés, fue utilizada la definición de la función de distribución de probabilidades normal ( $\mu, \sigma^2$ ):

$$f_{dp}(x) = \frac{e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (3)$$

La ecuación (3) será utilizada tanto para la distribución del proceso de fabricación verdadero ( $X_{pv}, \sigma_{pv}^2$ ), como para la distribución del sistema de medición ( $X_{pa}, \sigma_{sm}^2$ ). Siendo  $X_{pv}$ , la media del proceso verdadero (eliminando los efectos sistemáticos del SM) e  $X_{pa}$  a media aparente obtenida usando el SM. De esta forma, se consigue que la media del SM sea cero. La probabilidad de clasificación queda determinada como:

$$\text{Probabilidad} = \int_{A-X_{pv}}^{B-X_{pv}} \int_C^D \frac{e^{-\frac{(y)^2}{2 \cdot (\sigma_{pv})^2}} \cdot e^{-\frac{[x-(X_{pa}+y)]^2}{2 \cdot (\sigma_{sm})^2}}}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pv} \cdot \sigma_{sm})} dx dy \quad (4)$$

Donde la variable “x” representa al sistema de medición y la variable “y” representa al proceso de fabricación.

Los límites para las 4 probabilidades de interés, se muestran en la Tabla 1, donde:

- LIE: Límite inferior de especificación, dado por a tolerancia de proyecto,
- LSE: Límite superior de especificación de proyecto,
- LIA: Límite inferior de aceptación,
- LSA: Límite superior de aceptación,
- LI: Límite inferior de integración, que teóricamente debiese ser cero, sin embargo, para agilizar el proceso de cálculo, se ha limitado a ser un número menor que LIE o LIA de tal forma que en la integración, no queden eventos sin considerar.
- LS: Límite superior de integración, en forma análoga al caso de LI, debiese tomar un valor infinito, sin embargo ha sido limitado a ser un número mayor que LSE o LSA de tal forma que en la integración, no queden eventos sin considerar. La selección de LI e LS, permite optimizar el tiempo requerido para el cálculo, asegurando un resultado sin errores significativos.

**Tabla 1.** Límites de integración

Evento	Proceso de fabricación		Sistema de medición	
	A	B	C	D
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior
PDRP	LIE	LSE	LI	LIA
PDRG	LIE	LSE	LSA	LS
PFAP	LI	LIE	LIA	LSA
PFAG	LSE	LS	LIA	LSA

El segundo grupo esta compuesta por aquellos eventos que son causados por errores de clasificación, es decir aceptación de piezas que no cumplen con las tolerancias y rechazo de piezas que si cumplían con las especificaciones. En este estudio serán considerados estos 4 eventos.

Por último, el tercer grupo esta formado por aquellos eventos que producen un rechazo cruzado de las piezas, es decir, rechazar una pieza pequeña por ser considerada grande o rechazar una pieza grande por ser considerada pequeña. Este tipo de errores se considera como un error grosero e inaceptable a nivel industrial, de tal forma que, una solución que produzca errores de este tipo, no sería considerada como viable.

De esta forma, la probabilidad de aceptar erróneamente una pieza que no cumpla con las especificaciones de tolerancia esta dado por PFAP + PFAG. Por su parte la probabilidad de rechazar erróneamente una pieza por ser considerada pequeña esta dada por PDRP. Por último, la probabilidad de rechazar erróneamente una pieza por ser considerada grande esta dada por PDRG.

### 3.2 Consideraciones metrológicas

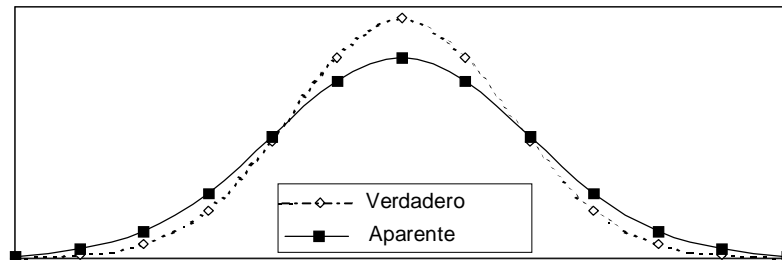
Para una correcta aplicación de la metodología propuesta, se deben respetar y cumplir las siguientes condiciones:

- La incertidumbre del SM debe considerar las condiciones metrológicas reales durante la medición de las piezas, incluyendo además de las influencias dadas por la calibración del instrumento de medición propiamente tal, aquellas provocadas por variaciones de temperatura, preparación de los operadores, etc.
- En el caso de inspecciones realizadas sobre un mismo tipo de piezas con diferentes instrumentos, es necesario que las incertidumbres de los diferentes SM sean lo más similares posibles. De esta forma, el modelo general podrá representar adecuadamente a los diferentes SM, sean ellos formados por instrumentos de medición iguales o diferentes. De lo contrario, sería necesario realizar estudios diferentes para cada tipo de SM.
- Tanto el proceso de fabricación como las indicaciones del SM deben tener distribución normal. Esta misma metodología, con algunas modificaciones podría ser empleada en el estudio de procesos con otras distribuciones desde que ellas sean conocidas, matemáticamente expresables e insesgadas (permitan la corrección de errores sistemáticos)
- Si bien la metodología es aplicable a cualquier tipo de procesos, ciertamente es más interesante para el caso de procesos incapaces. En procesos altamente capaces, la selección del SM no es tan crítica como en el caso de procesos incapaces.
- Para encontrar una solución al problema es necesario determinar la desviación estándar del proceso de fabricación verdadero, sin contaminación por causa del sistema de medición utilizado en la determinación de dicho parámetro (ver Figura 3). De esta forma, la desviación estándar verdadera,  $\sigma_{pv}$ , puede ser determinada a partir de la desviación estándar aparente del proceso de fabricación,  $\sigma_{pa}$ , y la desviación estándar del sistema de medición ( $\sigma_{sm}$ ).

$$\sigma_{pv} = \sqrt{\sigma_{pa}^2 - \sigma_{sm}^2} \quad (2)$$

Esta ecuación es valida en la medida que no exista correlación entre ambas variables. Otro requisito importante es que el proceso de fabricación este sob-controlado estadístico, de modo de asegurar que los valores encontrados son estables

Para esto se define  $f_1(Y)$  como la densidad de probabilidad de una función normal que entrega la probabilidad de que el proceso de fabricación verdadero tome el valor “y”. Proceso de fabricación verdadero se define como aquel proceso controlado por un SM ideal, es decir, con incertidumbre y error sistemático igual a cero (Figura 3).



**Figura 3:** Variación del proceso de fabricación

Por su parte, se define  $f_2(X/Y)$  como la densidad de probabilidad condicional normal, de una función que entrega la probabilidad de que el SM tome el valor X dado que la media del proceso de fabricación verdadero toma el valor Y. De acuerdo a los principios de probabilidad condicional (Johnson, Richard A., 1994), se desprende que, la densidad de probabilidades combinada, queda representada como:

$$f(X \cap Y) = f_1(Y) * f_2(X/Y) \quad (1)$$

Al integrar la ecuación (1), obtenemos la función de distribución respectiva  $F(X \cap Y)$ . Al evaluar la función de distribución entre diferentes límites, obtenemos la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los eventos posibles. Los eventos condicionales posibles son:

- PFPR: Probabilidad de que, piezas estando fuera de especificaciones por ser pequeñas, sean reprobadas,
- PFGR: Probabilidad de que, piezas estando fuera de especificaciones por ser grandes, sean reprobadas,
- PDA: Probabilidad de que, piezas estando dentro de especificaciones, sean aceptadas,
- PDRP: Probabilidad de que, piezas estando dentro de las especificaciones, sean rechazadas por ser consideradas pequeñas,
- PDRG: Probabilidad de que, piezas estando dentro de las especificaciones, sean rechazadas por ser consideradas grandes,
- PFAP: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser pequeñas, sean aceptadas,
- PFAG: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser grandes, sean aceptadas,
- PFPRG: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser pequeñas, sean reprobadas por ser consideradas grandes,
- PFGRP: Probabilidad de que, piezas estando fuera de las especificaciones por ser grandes, sean reprobadas por ser consideradas pequeñas.

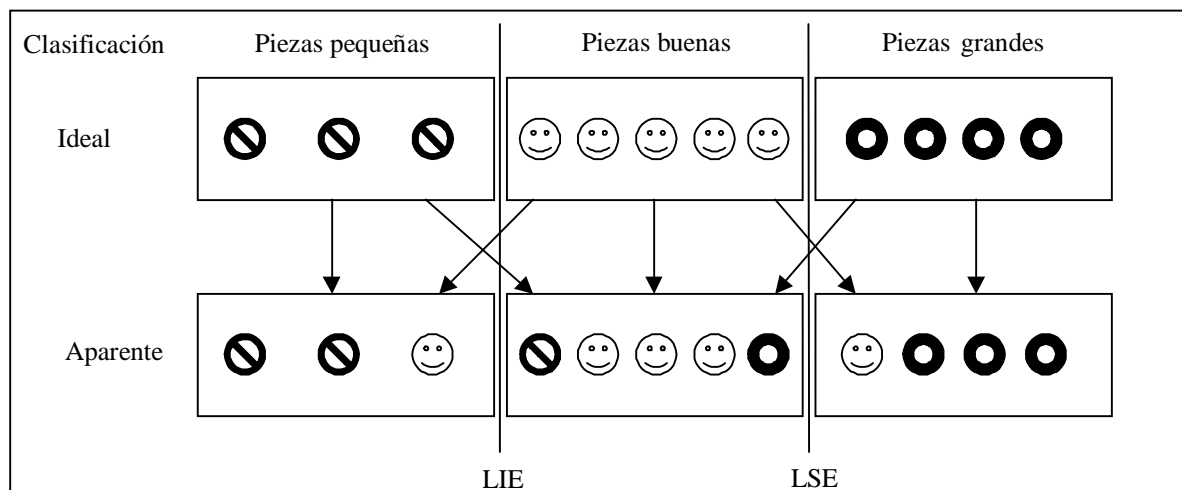
Los 3 primeros eventos corresponden a aquellos que no dependen del SM y sólo dependen de la capacidad del proceso de fabricación verdadero. Es decir aquellos eventos donde el SM no tiene ninguna influencia, incluso en el caso de disponer de un SM ideal.

Para mayor simplicidad, tomaremos como caso general de análisis el estudio de una pieza del tipo cilindro (dimensiones externas) con 1 dimensión crítica y con tolerancias bilaterales. La misma metodología es aplicable a piezas del tipo anillo (dimensiones internas), piezas con más de 1 dimensión crítica y piezas con tolerancias unilaterales, haciendo las adaptaciones correspondientes.

De disponer de un método de control ideal de piezas, podríamos identificar el proceso de fabricación verdadero. De esta forma se podrían distinguir 3 grupos; piezas buenas (se encuentran dentro de tolerancia), piezas malas pequeñas (dimensión crítica con valor menor al límite inferior de especificación) o piezas malas grandes (dimensión crítica con valor mayor al límite superior de especificación).

Para realizar las mediciones, necesariamente debemos utilizar métodos reales, los cuales presentan incertidumbre, esto debido a la imposibilidad de disponer de métodos ideales de control (sin incertidumbre). De esta forma la clasificación real (Figura 2) también está formada por 3 grupos; piezas aparentemente buenas, piezas aparentemente malas por ser consideradas pequeñas y piezas aparentemente malas por ser consideradas grandes:

- Piezas aparentemente buenas: Grupo formado por las piezas buenas (de acuerdo a la clasificación verdadera), piezas malas grandes aceptadas, piezas malas pequeñas aceptadas,
- Piezas aparentemente malas por ser pequeñas: Grupo formado por las piezas malas por ser pequeñas, piezas buenas erróneamente rechazadas, piezas malas por ser grandes mal clasificadas,
- Piezas aparentemente malas por ser grandes: Grupo formado por las piezas malas por ser grandes, piezas buenas erróneamente rechazadas, piezas malas por ser pequeñas mal clasificadas.



**Figura 2.** Clasificación ideal y aparente

### 3.1 Formulación probabilística

Nuestro objetivo será encontrar una función de distribución de probabilidad combinada que represente a la probabilidad de que una pieza sea clasificada como buena o mala, tomando en cuenta las variables establecidas en la Figura 1.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad existen una serie de metodologías empleadas para la determinación de la adecuabilidad de los medios de medición, tal como lo plantea (Schoeler, Donoso, 1999). A continuación se presentan aquellos más utilizados. La terminología esta de acuerdo al Vocabulario Internacional de Metrología (INN, NCh2450):

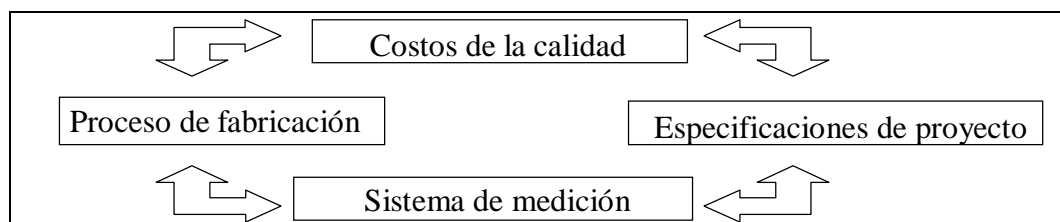
- De acuerdo a la resolución del instrumento: Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con resolución entre un 10% a un 33% de la tolerancia.
- De acuerdo al error máximo del instrumento: Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con error máximo dentro del rango de medición de un 25% de la tolerancia.
- De acuerdo a la incertidumbre del instrumento de medición: Considera adecuada la utilización de instrumentos de medición con incertidumbre entre un 10% a un 33% de la tolerancia.

Existen otros métodos para evaluar la adecuabilidad de un sistema de medición; entre los más modernos, podemos mencionar aquellos establecidos por ISO (norma ISO 14253-1) y por MSA - QS 9000 (Chrysler, Ford y General Motors, 1997).

Ninguna de las metodologías planteadas encima, entrega todas las herramientas para tomar una decisión correcta. En particular, ninguna de ellas, exceptuando a MSA, toma en cuenta directamente la variabilidad del proceso de fabricación de las piezas que deben ser inspeccionadas. De esta forma, se estaría tomando una misma decisión, tanto para un proceso con índice de capacidad ( $C_p$  o  $C_{pk}$ ) alta, de otro con índice bajo. Por último, ninguno de los métodos es sensible a los costos asociados a errores de clasificación, de esta forma, piezas de costos altos y de costos bajos serían igualmente tratadas.

## 3 METODOLOGIA PROPUESTA

Tomando en consideración el estado actual del arte es necesario buscar una nueva forma de atacar dicha problemática. De esta forma, la metodología propuesta pretende encontrar una relación entre los siguientes parámetros de interés: incertidumbre del sistema de medición, variabilidad del proceso de fabricación, tolerancias y costos involucrados.



**Figura 1.** Metodología propuesta

La meta es encontrar una ecuación matemática que permita identificar la probabilidad de ocurrencia de errores de clasificación, debido a la variabilidad del proceso de fabricación de la pieza, de la tolerancia y de la incertidumbre del SM. En la medida que sea posible cuantificar la probabilidad de ocurrencia de cada evento, y asociando un costo a la ocurrencia de cada evento, sería posible determinar el costo asociado a cada posible solución.

## **SELECCIÓN DE SISTEMAS DE MEDICIÓN, UN PROBLEMA DE COSTOS**

**José Donoso Urrutia**

**Carlos Alberto Schneider**

Universidade Federal de Santa Catarina, LABMETRO, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Departamento de Engenharia Mecânica, 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: jiu@labmetro.ufsc.br

### **Resumen**

Históricamente, la tarea de definir el sistema de medición más adecuado para una tarea en particular, se basaba en alguna relación entre Tolerancia de Proyecto e Incertidumbre de Medición. El presente trabajo plantea un criterio de selección de sistemas de medición para tareas de inspección, que toma en cuenta no sólo esos aspectos, sino que, además la capacidad del proceso de fabricación de las piezas en cuestión y los costos asociados a errores de clasificación. De esta forma, la decisión, no sólo depende de la relación entre especificaciones a cumplir y desempeño del sistema de medición, sino que también de la distribución del proceso de fabricación y de los costos asociados a los respectivos errores de clasificación.

**Palabras-claves:** Metrología, Calidad, Costos, Adecuabilidad

### **1. INTRODUCCIÓN**

Para realizar correctamente una tarea de medición, es necesario disponer de un "Sistema de Medición", SM, adecuado. Cuando nos referimos a un SM, nos referimos, no sólo a un patrón o un instrumento de medición, sino que a todos aquellos factores que afectan el resultado de dicha medición. Es decir; capacidad de los operadores, procedimiento y método de medición, condiciones ambientales, algoritmos de cálculo, etc.

Para definir el SM mas adecuado para una tarea de medición en particular, normalmente se emplea una relación entre la Tolerancia de Proyecto, y la Incertidumbre del SM. Sin embargo, existen otras variables que influyen en la pertinencia de la elección de una solución u otra, tales como la variabilidad del proceso de fabricación y los costos asociados a los errores de clasificación.

La variabilidad del proceso de fabricación determina el número de piezas que son producidas fuera de especificación y de aquellas que son producidas en los límites de tolerancia. De esta forma la incertidumbre del SM será más crítica en la medida que existan más piezas producidas entorno a los límites. De la misma forma, los costos totales de errores serán más importantes en la medida que existan más piezas propensas a ser mal clasificadas y en la medida que los costos asociados a errar sean mayores.