



METROLOGIA DINÂMICA – A EXPERIÊNCIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA.

*Ângela M. N. dos Santos*¹, *Alberto C. G. C. Diniz*², *Antonio Piratelli Filho*³

¹ Instituto Federal de Roraima, Boa Vista, Brasil, e-mail: angela@ifrr.edu.br

² Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Depto. Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, e-mail: adiniz@unb.br

³ Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Depto. Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, e-mail: pirateli@unb.br

Resumo: O inegável crescimento do uso da metrologia como item indispensável para a garantia da qualidade e da confiabilidade técnica dos produtos e serviços disponibilizados a sociedade tem trazido novos desafios para a pesquisa nessa área. Atualmente os problemas da “metrologia dinâmica”, da “metrologia de forma de onda”, da “dinâmica da metrologia”, têm ocupado os pesquisadores e industriais brasileiros. Nesse trabalho apresenta-se a experiência da Universidade de Brasília, que nas últimas duas décadas tem se dedicado à pesquisas em metrologia dinâmica e, mais recentemente, à dinâmica da medição; considerando máquinas de medição de coordenadas. São apresentados alguns dos resultados obtidos no desenvolvimento de métodos e meios para calibração dinâmica de sensores, bem como estudos sobre fontes de erros dinâmicos em sondas de gatilhamento. Discute-se também a terminologia e os conceitos básicos ligados a essas áreas de forma a contribuir com os desenvolvimentos futuros e aumentar a competência nacional nesses campos.

Palavras chave: metrologia dinâmica, calibração dinâmica, incerteza de medição, confiabilidade, qualidade metrológica.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da competitividade e do desenvolvimento industrial e tecnológico no mercado crescentemente globalizado tem levado o Brasil a se preocupar cada vez mais com a qualidade de seus produtos e serviços. Dessa maneira, esforços têm sido destinados em busca de estratégias que venham aumentar a confiabilidade e qualidade metrológica dos processos produtivos. Isto é fundamental para o desenvolvimento dos setores estratégicos do país.

A busca pela excelência da qualidade vem promovendo a sinergia entre ciência e tecnologia. Isto favorece a abrangência da metrologia na promoção do desenvolvimento científico e industrial. As aplicações industriais caminham para atender a crescente demanda por sistemas automatizados de controle. Esses dispositivos exigem rápida resposta e atuação surgindo assim a necessidade de se explorar cada vez mais as medições dinâmicas.

Ao contrário das medições estáticas que estão atualmente com seus parâmetros metrológicos bem consolidados, as medições dinâmicas, cujas características se referem a sinais que variam rapidamente no tempo, ainda

representam um desafio para a metrologia no que diz respeito à caracterização do comportamento dinâmico dos componentes do sistema de medição.

É neste contexto que se insere este trabalho, cujo objetivo é apresentar resultados das pesquisas voltadas para as medições dinâmicas, onde se destacam as experiências desenvolvidas no Laboratório de Metrologia (LM) e Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília.

2. METROLOGIA ESTÁTICA E DINÂMICA

Para se efetuar medições confiáveis, é necessário não só o conhecimento das características da grandeza física que se deseja medir (mensurando), como também as características do sistema de medição, constituído pelos sensores, transdutores e todos os demais instrumentos usados na aquisição, transformação e apresentação do resultado.

O sistema de medição como um todo precisa estar adequado ao fenômeno que está sendo analisado, pois as características relacionadas com o seu funcionamento, quando submetido a um sinal de entrada, definem o tipo de medição.

Esward, Elster e Hessling definem medição dinâmica, de maneira geral, como aquela em que a grandeza física que está sendo medida varia com o tempo e onde essa variação pode afetar significativamente o resultado da medição e a incerteza associada [1]. Essa é uma definição qualitativa e que não utiliza parâmetros mensuráveis para caracterizar, de forma confiável, se uma medição é estática ou dinâmica.

Por ser quantitativa (e metrologicamente quantificável) é preferível a definição de Clark, de que a medição dinâmica se ocupa da medição de sinais cuja componente variável apresenta constante de tempo menor que um segundo, isto é, que apresenta variações relativas superiores a 63% em menos de um segundo [2].

Desta forma a calibração dinâmica envolve a determinação das características dinâmicas dos sensores e transdutores em regime de calibração transiente ou onde a componente variável do sinal padrão de calibração varia mais de 63% em menos de um segundo.

Quando esse sinal é constante ou varia lentamente no tempo, o sistema tem características estáticas. Quando esse sinal varia rapidamente no tempo, o sistema tem

características dinâmicas. É, portanto, a velocidade que caracteriza a diferença da medição estática para a dinâmica [2].

Na medição dinâmica existe interesse não só na determinação de valores máximos e mínimos para o mensurando, mas também na determinação da história temporal do mensurando quando essa história apresenta variações muito rápidas. A metrologia de forma de onda se ocupa da determinação da história temporal de sinais em regimes permanentes enquanto que a metrologia dinâmica em regimes transientes.

Saber distinguir uma experiência dinâmica da estática é fundamental para definição dos métodos adequados para a qualidade do resultado de uma medição. Um dos procedimentos necessários para isto é a calibração, que consiste em determinar, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões [3].

Em metrologia, a incerteza de medição é avaliada de acordo com o Guide to Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [4], cuja abordagem traduz uma característica chave que é a propagação da incerteza assumindo um modelo que relaciona o mensurando com todas as suas variáveis de influência.

O GUM é um documento mundialmente consolidado para grandezas constantes ou que variam lentamente com o tempo, constituindo o que se chama na literatura de metrologia estática. No entanto, os procedimentos e métodos dinâmicos ainda se encontram em início de estudos para seu desenvolvimento.

Em um recente suplemento ao GUM (GUM S1) [5] a metodologia original do mesmo é estendida para a propagação das distribuições de probabilidade através do modelo de relação entre mensurando e grandezas de influência. Uma vez estabelecido esse modelo, a Função Densidade de Probabilidade (PDF) de todas as grandezas de influência são usadas, seguindo os princípios da teoria da probabilidade e os princípios do GUM para determinar a PDF do mensurando, usando-se para isso uma metodologia de cálculo baseada na técnica de Monte - Carlo [5].

Esses documentos da ISO/JCGM têm sido muito usados nos recentes trabalhos científicos e tecnológicos com o propósito de melhorar o cálculo da incerteza de medição em diversos ramos da metrologia. Como exemplo, podemos citar o trabalho de Elster, Eichstädt e Link [6], onde esses princípios foram usados na calibração de osciloscópios, contribuindo com o avanço de cálculo de incertezas na Metrologia de Forma de Onda. Contudo, no que diz respeito a Metrologia Dinâmica, ainda não existe uma regulamentação da ISO, ou mesmo recomendações que permitam determinar as incertezas de medição no caso da metrologia dinâmica.

3. A EXPERIÊNCIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

As aplicações atuais envolvendo a medição dinâmica exigem procedimentos segundo os quais os sistemas de medição sejam capazes de responder às grandezas que variam rapidamente no tempo. Para isto é necessário o conhecimento das características dinâmicas dos sensores e transdutores que constituem o sistema de medição, o que é viabilizado pela calibração dinâmica.

Embora a calibração dinâmica de sensores seja alvo de muitos estudos, ainda se constitui um grande desafio para a metrologia. A ausência de normas e regulamentações aplicáveis à calibração dinâmica tem levado ao uso de sistemas com sensores calibrados apenas estaticamente. Esta prática negligencia os erros dinâmicos [7] e não garante a confiabilidade na determinação das características dinâmicas do processo de medida.

Os Laboratórios de Metrologia (LM) e Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília têm desenvolvido ações e pesquisas no sentido de aplicar os princípios do GUM [4] na medição dinâmica de grandezas que variam rapidamente no tempo, na calibração de sensores e transdutores para uso em medições dinâmicas, bem como na quantificação de grandezas de influência que variam dinamicamente afetando as calibrações. Alguns resultados dessas ações passam a ser apresentados a seguir:

3.1. Calibração e Incerteza Dinâmicas em Sensores de Temperatura

Para a calibração de sensores de temperatura em regime dinâmico foi desenvolvida uma Cuba Rotativa cuja principal finalidade é excitar sensores de temperatura através da técnica do mergulho ou desmascaramento do sensor em meio líquido com temperatura superior a do sensor a calibrar, possibilitando o controle do coeficiente convectivo do meio e gerando um degrau de temperatura.

Foi desenvolvida uma metodologia para determinação da incerteza de calibração de termopares em regime dinâmico. Essa metodologia considera a resposta dinâmica de um sensor como um conjunto de pontos de medições estáticas, para os quais são aplicadas as normas e determinações dos modelos estáticos a cada tempo da amostragem do processo dinâmico e os procedimentos de cálculo de incerteza para cada um dos pontos no tempo [8].

Na figura 1 é mostrado o esquema do dispositivo usado para calibração dinâmica de termopares. A água da cuba é a fonte térmica. A junta fria é imersa em um banho de gelo fundente, o termopar é alimentado por um amplificador operacional cujo sinal é capturado por um analisador de sinais dinâmicos. Os principais elementos da cadeia de medição dinâmica de temperatura com a cuba rotativa, e os respectivos erros associados são: termopar do tipo K, utilizado na medição da temperatura da água contida na cuba - $\delta T_U = 0,000^\circ\text{C} \pm 0,035^\circ\text{C}$; mostrador digital de temperatura para termopares - $\delta T_K = 0^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$; termopar do tipo K utilizado no dispositivo de desmascaramento, termopar a ser calibrado dinamicamente e seu cabo de extensão - $\delta V_c = 0,000 \text{ mV} \pm 0,005 \text{ mV}$; fonte fria de referência a 0°C - $\delta T_f = 0,0^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$; amplificador operacional de tensão - $V_O = 50,49 \text{ mV} \pm 2,30 \text{ mV}$, $G =$

101,66 mV/mV e $\gamma = 0,005 \text{ mV}/^\circ\text{C}$; analisador de sinais dinâmicos - $\delta V_R = 0,0000 \text{ mV} \pm 0,0427 \text{ mV}$; termômetros de vidro para a temperatura ambiente, onde δT_{amb} é diferença entre a temperatura ambiente média medida durante a calibração do amplificador e a média das temperaturas durante cada ensaio, resolução $\pm 0,05^\circ\text{C}$ [8].

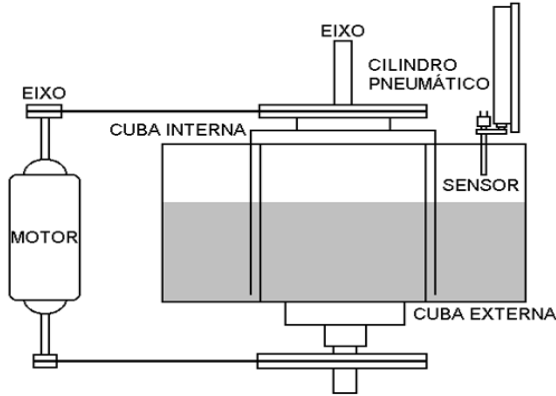


Fig.1. Esquema da Cuba Rotativa do LMD - UnB [8]

A função modelo da medição dinâmica de temperatura na cuba é representada pela equação (1).

$$V_T = \frac{V_L}{G} - V_O + \frac{\delta T_{dif}}{\kappa_q} + \frac{\delta T_U}{\kappa_q} - \frac{\delta T_f}{\kappa_f} + \frac{\delta V_R}{G} - \gamma \cdot \delta T_{amb} \quad (1)$$

onde:

V_T = tensão produzida pelo termopar [mV];

V_L = tensão lida no analisador de sinais dinâmicos [mV];

G = ganho de tensão do amplificador [mV/mV];

V_O = *offset* na tensão de entrada no amplificador [mV];

δT_{dif} = diferença entre a temperatura de um sensor de referência e a temperatura medida, em um dado instante de tempo [$^\circ\text{C}$];

δT_U = erro associado à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa [$^\circ\text{C}$];

δT_f = desvio da temperatura da junta fria em relação ao ponto de referência 0°C [$^\circ\text{C}$];

κ_q = sensibilidade estática do termopar na temperatura da junta quente [$^\circ\text{C}/\text{mV}$];

κ_f = sensibilidade estática do termopar na temperatura da junta fria [$^\circ\text{C}/\text{mV}$];

δV_R = erro devido à resolução limitada do analisador de sinais [mV];

γ = coeficiente de temperatura do amplificador [mV/ $^\circ\text{C}$];

δT_{amb} = erro associado a variações na temperatura ambiente [$^\circ\text{C}$].

O coeficiente de sensibilidade c associado a cada grandeza de entrada é dado por: para V_L , $c_1=1/G$; para V_O , $c_2=-1$; para δT_{dif} , $c_3=1/\kappa_q$; para δT_U , $c_4=1/\kappa_q$; para δT_f , $c_5=1/\kappa_f$; para δV_R , $c_6=1/G$; para δT_{amb} , $c_7=\gamma$.

A incerteza combinada associada a V_T é calculada pelas contribuições das sete componentes de incerteza associadas às grandezas de entrada. A temperatura usada para a água foi fixada em 60°C em todos os ensaios, assim como a pressão no dispositivo de desmascaramento igual a 5 bar, e a

velocidade de rotação do motor elétrico que aciona a cuba, igual a 250 rpm. A frequência de aquisição do analisador foi de 2,5 kHz.

A Tabela 1 mostra os resultados de todos os cálculos de um ponto da amostragem equivalente ao tempo de 0,55430s, aos quais são associados as incertezas do tipo A e do tipo B, bem como o valor de tensão estimado pela função modelo da Eq. (1).

Tabela 1. Resultado das grandezas de influências e da incerteza associada à tensão do termopar em um ponto no tempo ($t=0,55430\text{s}$)

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Tipo de Avaliação da Incerteza	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$
V_L	196,80945 mV	1,10404 mV	A	0,00985	0,01087
V_O	0,07756 mV	0,00109 mV	B	-1,00000	-0,00109
δT_{dif}	0,15628 $^\circ\text{C}$	0,09975 $^\circ\text{C}$	A	0,04039	0,00403
δT_U	0,02518 $^\circ\text{C}$	0,00450 $^\circ\text{C}$	A	0,04039	0,00018
δT_f	0,00000 $^\circ\text{C}$	0,05774 $^\circ\text{C}$	B	-0,03900	-0,00225
δV_R	0,00000 mV	0,00462 mV	B	0,00985	0,00005
δT_{amb}	0,00000 $^\circ\text{C}$	0,34641 $^\circ\text{C}$	B	-0,00500	-0,00173
V_T	1,86886 mV			$u_c(V_T)$	0,01199 mV
				U	0,02896 mV

A frequência utilizada no analisador dinâmico de sinais foi de 2,5 kHz, na resolução gráfica máxima. Isto equivale a um tempo de aquisição de 0,8s. O valor estimado da voltagem neste ponto é $1,86886 \text{ mV} \pm 0,02896 \text{ mV}$, para um fator de abrangência 2 e um nível de confiança 95% considerando uma distribuição normal. O conjunto de todos os pontos no tempo de 0,8s, gera a resposta dinâmica do termopar com sua incerteza [8].

Essa técnica se mostrou apropriada na determinação das incertezas de medição na fase transiente do processo de calibração de termopares.

3.2. Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão

Desde 1972 foi publicado pela ASME, um guia indicando as propriedades que devem ser incluídas na calibração dinâmica de sensores de pressão [9], porém ele não se constitui uma norma sobre procedimentos de testes ou recomendações para estimativa das incertezas na medição dinâmica de pressão. Posteriormente, foi disponibilizada pela ISA uma versão desse guia com melhor descrição dos métodos usados para calibração dinâmica de transdutores de pressão [10]. Contudo, a maioria das aplicações utiliza os sensores de pressão calibrados estaticamente através de procedimentos padrões, tais como o “equilíbrio de pressão”, a “balança de pressão”. Algumas vezes a confiabilidade da medida fica por conta de estimativas a partir da calibração estática do transdutor e de características dinâmicas teóricas do sistema, assegurando-se que a frequência de ressonância do sensor (normalmente fornecida pelo fabricante) seja bem maior que a frequência do sinal que se deseja medir. Esses procedimentos, no entanto, não fornecem informações para qualificar e quantificar as características dinâmicas do sensor e nem

conduzem à qualidade metrológica exigida atualmente [11 - 12].

Pesquisas no campo da calibração dinâmica de sensores de pressão vêm sendo uma prática no Laboratório de Metrologia Dinâmica da UnB desde 1993 e como resultado, foram desenvolvidos diferentes métodos e meios de calibração de sensores de pressão. Foram construídos geradores de pressão dinâmica capazes de calibrar sensores na faixa de até 10 KHz com amplitude na faixa de até 10 bar, cobrindo praticamente todo o espectro de operação industrial dos sensores de pressão [11 - 12], os quais são apresentados em seqüência:

Dispositivo de Abertura Rápida (DAR): gerador aperiódico no qual duas câmaras de volumes muito diferentes (razões acima de 1/3000) são separadas por uma Válvula de Abertura Rápida. A Figura 2 apresenta este dispositivo, onde sua câmara menor é detalhada.

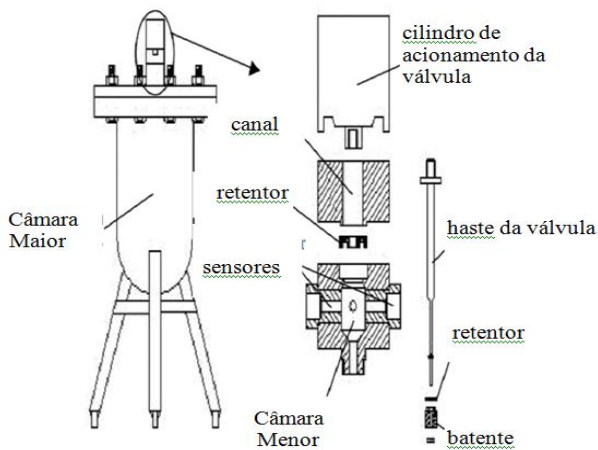


Fig.2. Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) do LMD - UnB [12]

O sensor a ser calibrado é instalado na câmara menor e fica sujeito a uma pressão p_1 . Devido a grande diferença de volume das duas câmaras ao se abrir a válvula de separação o sensor passa para um nível de pressão maior p_2 , que se encontra na câmara maior, num tempo muito pequeno de modo a se ter um degrau de pressão $p_2 - p_1$ quase perfeito, conforme mostrado na figura 3.

Esse dispositivo abrange uma faixa de frequência relativamente ampla que sofre influência direta do gás utilizado no interior das câmaras. Quando se utiliza o Ar como fluido de calibração, essa faixa vai de 0 a 70 Hz. Esse limite é definido considerando a redução máxima para o sinal de pressão da ordem de 1%. Utilizando-se dióxido de carbono como gás de calibração, o limite superior cai para 60 Hz e com o uso de hélio abrange até 100 Hz.

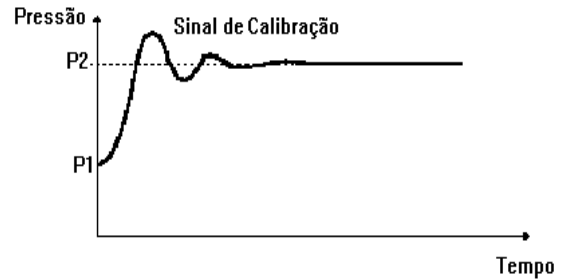


Fig. 3. Degrau de Pressão (teórico) para Calibração de Sensores [12]

Com relação à amplitude do sinal de pressão gerado, o DAR não apresenta grandes limitações, sendo necessário apenas dispositivos adicionais para controle das pressões nas câmaras, isto para o caso de pequenos degraus. É um dispositivo de fácil operação e apresenta boa repetitividade. A incerteza de medição do sinal gerado é inferior a 2,5 % do valor de pressão gerado, para uma confiabilidade de 95 % (considerando-se apenas a magnitude do sinal de pressão) [11-12].

Tubo de Choque: gerador aperiódico que se constitui como excelente dispositivo para a calibração dinâmica de sensores de pressão e temperatura. É formado por duas câmaras com níveis de pressão diferentes, separadas por uma membrana que ao se romper, permite a propagação de uma onda de choque pelo tubo atingindo o sensor a ser calibrado, que é instalado na parede ou no fundo do tubo. Essas duas possibilidades permitem calibrações com degraus de pressão de duração e amplitudes diferentes [11-12].

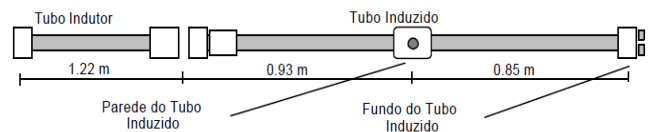


Fig. 3. Dimensões do Tubo de Choque Metrológico do LMD - UnB [12]

A Figuras 3 apresenta as dimensões do Tubo de Choque Metrológico desenvolvido no LMD-UnB. As figuras 4 e 5 mostram exemplo de sinal gerado para calibração obtidos na parede e no fundo do tubo, respectivamente. O degrau gerado é considerado perfeito dentro das condições metrológicas necessárias para a calibração de sensores e transdutores [11-12-13].

O Tubo de Choque permite a calibrar sensores de alta frequência e de amplitudes bastante variadas. Isto porque o limite máximo de pressão é função da resistência mecânica da estrutura do tubo [14].

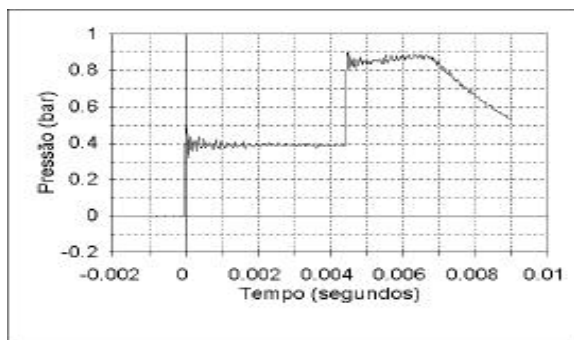


Fig. 4. Degrau de Pressão Obtido na Parede do Tubo de Choque do LMD - UnB [12]

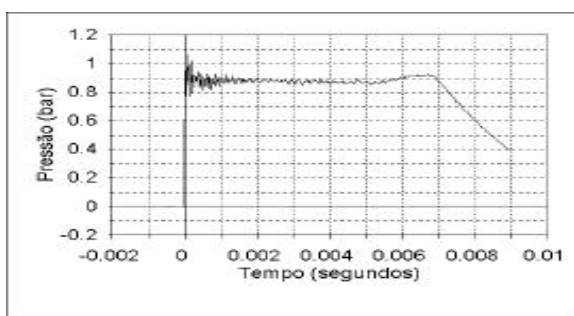


Fig. 5. Degrau de Pressão Obtido no Fundo do Tubo de Choque do LMD - UnB [12]

O Tubo de Choque Metrológico desenvolvido no LMD-UnB possibilita gerar um degrau de pressão no fundo do tubo de duração média de 6,8 ms com pressões variando de 0,1 a 10 bar. As Incertezas estimadas para o sinal gerado para diferentes faixas de frequência são mostradas na tabela 2[11].

Tabela 2. Incerteza de Medição do Tubo de Choque do LMD-UnB

Faixa de Frequência	Incerteza Estimada
200 – 1.000 Hz	1.5 %
1.001 – 3.000 Hz	2.5 %
3.001 – 8.000 Hz	12.5 %
8.001 – 10.000 Hz	30.0 %

Os limites de utilização do tubo de choque, assim como as incertezas do sinal gerado podem sofrer modificações quando se utiliza diferentes gases como meio para propagação da onda de choque. Foi constatado que ao se utilizar o ar, como fluido de calibração, consegue-se faixas de frequências e de incertezas de medição dentro das exigidas pela maioria das aplicações de sensores de pressão em aplicações industriais normais, como por exemplo as medições realizadas em motores de combustão interna [15]. Verificou-se também que a deformação do diafragma, sob pressão, afeta a qualidade do sinal gerado devendo portanto ser considerado dependendo da diferença de pressão entre as duas câmaras [16].

Gerador Periódico de Coluna de Líquido: gerador utilizado nos procedimentos de calibração dinâmica no domínio da frequência para medição de sinais de pressão

com baixa amplitude e baixas frequências. Foi construído usando-se uma coluna cônica com uma cavidade cilíndrica montada sobre um excitador eletromagnético de vibrações. Essa coluna é preenchida com um líquido e acelerada pelo excitador, com uma função seno de frequência e amplitude controlada (medida com um acelerômetro fixado sobre a estrutura da coluna), permitindo se obter um sinal senoidal de pressão. O líquido, neste caso, é o meio de calibração e o sinal do acelerômetro é usado como referência.

A calibração do sensor é feita através da comparação do sinal de pressão medido, com a aceleração imposta a coluna. É possível inserir vários valores para amplitude e frequência do sinal através do excitador de vibrações e esses valores são influenciados também pelas propriedades do líquido utilizado [11-12].

As aplicações metrológicas do Gerador de Coluna de Líquido estão limitadas a pressões inferiores a 35 milibar em uma faixa de frequência de 40 a 1900 Hz, cuja função resposta, utilizando-se Polidimetilsiloxano (PDMS) como líquido de calibração é mostrada na figura 6. Como o PDMS é um polímero orgânico de silicone disponível em diferentes viscosidades, nesse caso, foi usado com viscosidade de 1000 centiStokea, que apresenta à 25°C, densidade 0,977 e tensão superficial de 21,5din/cm [11-12].

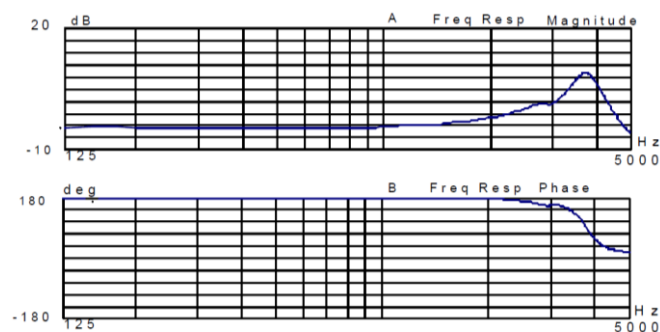


Fig. 6. Função Resposta em Frequência do Gerador de Pressão de Coluna de Líquido do LMD - UnB [11-12]

A escolha do dispositivo de calibração dinâmica é definida mediante as condições de uso do sensor e sua faixa de operação. Atualmente o LMD trabalha para ampliar essa faixa de calibração, a partir de dispositivos pneumáticos através da interface de uma membrana entre os meios líquido e gasoso [17].

3.3. Avaliação Dinâmica de Variáveis Envolvidas em Medição por Coordenadas com Sondas de Gatilhamento

Considerando as Máquinas de Medição por Coordenadas, foram realizados estudos para quantificar dinamicamente as grandezas que influenciam as medições realizadas nessas máquinas, de forma a melhor estimar as incertezas de medição. Variáveis associadas às sondas de gatilhamento usadas nestas máquinas tem sido investigadas, visando conhecer seu efeito nos erros e na incerteza de medição.

Foram realizados experimentos em uma Máquina de Medição por Coordenadas, modelo Cantilever QM-353,

fabricada pela Mitutoyo Sulamericana Ltda. A incerteza de medição declarada em certificado de calibração é de $(1,2 + L/600)$ mm, onde L é o comprimento medido em mm. Uma sonda de gatilhamento fabricada pela Renishaw, modelo MH20, foi usada acoplada à MMC. Durante as medições, a temperatura foi mantida em 20 ± 1 °C. Para executar as medições, utilizou-se como referência, uma esfera de cerâmica de diâmetro nominal (calibrado) de 19,9834 mm, incerteza $\pm 0.3\mu\text{m}$.

Foram consideradas no estudo quatro variáveis: velocidade de aproximação do apalpador (A), direção de aproximação (B), orientação do apalpador (C) e número de pontos medidos (D). Estas variáveis foram investigadas em dois níveis ou dois valores cada uma, codificados em -1 ou +1 e suas interações. Para realização das medições, estas variáveis e níveis foram alteradas conforme um Planejamento Fatorial (Factorial Design 2^4) com 4 variáveis em 2 níveis cada. Os erros de medição foram determinados após subtrair o valor calibrado do diâmetro da esfera e usados para realizar uma análise de variância (ANOVA). Assim foi investigado o efeito das variáveis, e verificado que a velocidade seguida de número de pontos medidos foram as mais significativas para o resultado [18].

4. CONCLUSÃO

É evidente que o investimento em pesquisas voltados para metrologia vem contribuindo substancialmente para o desenvolvimento científico e tecnológico no Brasil. Juntando-se a esse esforço nacional os Laboratórios de Metrologia e Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília tem desenvolvido métodos e meios para a calibração dinâmica de sensores de pressão e temperatura e sondas de máquinas de medição por coordenadas. Este trabalho apresenta os resultados obtidos, aliando os conceitos básicos da metrologia dinâmica usando princípios metrológicos e em concordância com o VIM e o GUM.

Os dispositivos desenvolvidos no LMD-UnB foram amplamente testados e avaliados para garantir os requisitos e confiabilidade metrológicos nas aplicações. Os testes e as avaliações foram realizados de acordo com as normas internacionais, fazendo adaptações para os casos onde ainda não existem regulamentações. As incertezas estimadas para os sinais gerados e os processos de calibração são satisfatórios para as aplicações atuais da metrologia dinâmica [11].

Desta forma, esse artigo traz uma contribuição importante para a metrologia nacional ao divulgar os trabalhos realizados no país, além de servir como um texto de referência sobre os conceitos e terminologias da metrologia dinâmica. Considerando o crescimento da importância dessa área nos trabalhos de pesquisa e nas aplicações no mundo, é importante destacar os avanços brasileiros nessa área.

REFERÊNCIAS

[1] T. J. Esward, C. Elster, J. P. Hessling, Analysis of dynamic measurements: New challenges require new solutions. In

Proceedings of XIX IMEKO World Congress, Lisboa, Portugal, Setembro, 2009.

[2] C. Clark, "The Practice of Dynamic Pressure Measurement. Measurement & Control, vol. 22, nº 10, pag. 258 - 301, 1989

[3] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados*, 1ª edição brasileira do VIM 2008, Rio de Janeiro, Brasil, 2009. 78p.

[4] JCGM - ISO, *Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization ISBN 92-67-10188-9, 1995.

[5] JCGM, *Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. Joint Committee for Guides in Metrology, Bureau International des Poids et Mesures, JCGM 101, 2008.

[6] C. Elster, S. Eichstädt, A. Link, Uncertainty Evaluation of Dynamic Measurements In Line With GUM, In: XIX IMEKO World Congress, Lisboa, Portugal, Setembro, 2009.

[7] C. Elster, A. Link, T. Bruns, Analysis of Dynamic Measurements and Determination of Time-dependent Measurement Uncertainty Using a Second-order Model, In: Meas. Sci. Technol. 18 3682 – 3687, October, 2007.

[8] J. N. S. Vianna, M. E. K. Almeida, A. C. G. C. Diniz, A. B. S. Oliveira, *Incerteza de Medição na Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura*, Anais do Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife - PE, Brasil, Setembro, 2003.

[9] ASME, *A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*, ANSI B88.1 – 1972 (R 1995), USA, 1995.

[10] ISA, *A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*, ISA – 37.1601 – 2002, ISA, 2002.

[11] A. C. G. C. Diniz, A. B. S. Oliveira, J. N. S. Vianna, F. J. R. Neves, *Dynamic Calibration Methods for Pressure Sensors and Development of Standard Devices for Dynamic Pressure*, XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Setembro, 2006.

[12] A. C. G. C. Diniz, J. N. S. Vianna, F. J. R. Neves, *Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão: Métodos e Meios*, Anais do Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife - PE, Brasil, Setembro, 2003.

[13] A. B. S. Oliveira, M. B. B. Siqueira, J. N. S. Vianna, *Determinação da Incerteza de Medição em Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão*, Proceedings of 7th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences - ENCIT 98, Rio de Janeiro, 1998.

[14] J.N.S. Vianna, A.B.S. Oliveira, A.M.F. Guimarães, M.N.D. Barcelos Jr, *Método experimental para avaliação dos processos e propagação das ondas de choque no interior de um tubo de choque*, Proceedings of 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering - COBEM , Uberlândia, 2001.

[15] J. N. S. Vianna, M. N. D. Barcelos Jr., A. B. S.Oliveira, J. P. Damion, *Evaluation of the Influence of the Gases Composition on the Dynamic* 10th International Metrology Congress, Montpellier, France, 2001.

[16] J. N. S. Vianna, A. B. S. Oliveira, J. P. Damion, *Influence of diaphragm on the metrological characteristics of a shock tube*, International Journal of Pure and Applied Metrology - Metrologia, v.36, n.6, p.599-603, France, 1999.

[17] L. M. Leodido, C. Sarraf, J. P. Damion, *Caracteristiques Dynamiques des Capteurs de Pression en Milieu Liquide*. In: 14^o Congrès de Métrologie, Paris, 2009.

[18] A. M. N. Santos, A. Piratelli-Filho, A. C. G. C. Diniz, *Avaliação Dinâmica de Sondas de gatilhamento em Máquinas de Medir por Coordenadas*, VI Congresso Brasileiro de Metrologia (II CIMMEC), Natal-RN, Brasil, Setembro, 2011. A Publicar.