

**EFEITOS DINÂMICOS NA MEDIÇÃO: PROBLEMAS EM
METROLOGIA DINÂMICA E MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

ÂNGELA MARIA NOGUEIRA DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EFEITOS DINÂMICOS NA MEDIÇÃO: PROBLEMAS EM
METROLOGIA DINÂMICA E MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

ÂNGELA MARIA NOGUEIRA DOS SANTOS

ORIENTADOR: PROF. DR. ALBERTO CARLOS G. CASTRO DINIZ

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. ANTÔNIO PIRATELLI FILHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 171A / 2012

BRASÍLIA-DF: ABRIL / 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**EFEITOS DINÂMICOS NA MEDIÇÃO: PROBLEMAS EM
METROLOGIA DINÂMICA E MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

ÂNGELA MARIA NOGUEIRA DOS SANTOS

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADO POR:

**Prof. Dr. Alberto Carlos G. C. Diniz (Departamento de Engenharia Mecânica/UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dr. Antonio Piratelli Filho (Departamento de Engenharia Mecânica/UnB)
(Co-Orientador)**

**Prof^ª. Dra. Rosenda Valdés Arencibia (Faculdade de Engenharia Mecânica/UFU)
(Examinador Externo)**

Brasília-DF, 16 de Abril de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, ÂNGELA MARIA NOGUEIRA

Efeitos Dinâmicos na Medição: Problemas em Metrologia Dinâmica e Medição por Coordenadas [Distrito Federal] 2012. xv, 110p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica

1. Medição Dinâmica

2. Medição por Coordenadas

3. Efeitos Dinâmicos

4. Sonda de Gatilhamento

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, ÂNGELA MARIA NOGUEIRA (2012). Efeitos Dinâmicos na Medição: Problemas em Metrologia Dinâmica e Medição por Coordenadas. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 110p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Ângela Maria Nogueira dos Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Efeitos Dinâmicos na Medição: Problemas em Metrologia Dinâmica e Medição por Coordenadas.

GRAU: Mestre

ANO: 2012.

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ângela Maria Nogueira dos Santos

Dedico tudo que esse título possa representar à minha filha Amanda, meu presente de Deus e meu maior desafio, cujo apoio, fez toda diferença na superação dos obstáculos no decorrer deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus que tem dirigido meus passos e me feito vencedora desde o início de minha existência e que sem sua intervenção, a realização deste projeto jamais teria sido possível.

Ao Prof. Alberto Diniz, que além de orientador, demonstrou ser um verdadeiro amigo, me oferecendo, a sensibilidade e o apoio que fizeram a diferença na superação das dificuldades. Por todas as qualidades deste profissional, modelo de simplicidade, que me servirão como exemplo, pela oportunidade, incentivo, dedicação e disponibilidade na orientação deste trabalho, por ter entendido meus limites e minhas dificuldades, meu muito obrigada.

Ao Prof. Antonio Piratelli Filho, cujo exemplo de profissional e ser humano não serão por mim jamais esquecidos. Por todo seu empenho, atenção e confiança e por me acolher no Laboratório de Metrologia onde seu apoio e orientação, foram fundamentais. Por sua disponibilidade, amizade e por me incentivar a continuar e a melhorar sempre, minha sincera gratidão.

Ao Corpo Docente e Administrativo do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. Menção especial deve ser feita aos técnicos dos Laboratórios de Metrologia e Metrologia Dinâmica da UnB, Tarsis e José Filipe e à secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas Isabel Rodrigues, pela paciência, boa vontade e atenção com que me atenderam. A estes exemplos de profissionais, cujo carinho e incentivo me foram vitais para superação dos obstáculos no curso da execução de todo o trabalho, o meu respeito e gratidão.

Aos meus familiares, especialmente minha filha Amanda que soube compreender a minha ausência, à minha mãe e às minhas irmãs Lúcia e Léia fontes de apoio e incentivo que me ajudaram a vencer os obstáculos.

A minha amiga Carly, que mesmo distante sempre me apoiou e se orgulhou de minhas conquistas e aos colegas que tive o prazer de conhecer através do mestrado, Gabriella Campos, Rosineide Miranda, Luciana Braga, Sumaya Gonçalves, Igor Gomes, Jenny Rangel e José Gustavo Gontijo, pelo suporte, companheirismo, motivação e amizade nos momentos bons e difíceis durante o curso. Agradeço ainda aos colegas do IFRR Jaci e Jamil Lima, Daygles Souza, Ademar Araújo, Djair Melo e a todos que me apoiaram e incentivam nesta conquista.

Que Deus abençoe a vida de todos vocês e que me ajude a expressar toda minha gratidão e amizade a cada um.

Quando você pode medir o que está falando a respeito, e expressá-lo em números, você sabe alguma coisa a seu respeito: mas quando você não pode medi-lo, quando você não pode expressá-lo em números, seu conhecimento é de uma natureza escassa e insatisfatória; pode ser o início do conhecimento, mas você dificilmente terá, em seus pensamentos, avançado no campo da Ciência, qualquer que seja a matéria.

(Lord Kelvin)

RESUMO

Atualmente, um dos desafios que se impõe à metrologia científica está relacionado com os efeitos dinâmicos nos processos de medição, considerando sistemas de medição e controle cada vez menores e mais rápidos. Estes efeitos estão associados com a velocidade e a forma de variação do mensurando, e das grandezas de influência, bem como com a dinâmica do processo de medição, considerando o mecanismo do instrumento de medição, como por exemplo, a movimentação de apalpadores em Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs). A demanda para a metrologia industrial moderna aponta para necessidade de se aumentar a eficiência dos processos de medição, levando-se em conta aspectos dinâmicos associados ao mensurando e às grandezas de influência.

A proposta desta dissertação de mestrado é fazer uma análise dos avanços mais recentes da metrologia envolvendo as questões dinâmicas na medição. Apresenta-se o estado da arte de pesquisas voltadas para a metrologia dinâmica e para a dinâmica no processo de medição em Máquinas de Medir por Coordenadas. Foi feita uma avaliação crítica dos métodos de calibração dinâmica de sensores de pressão e temperatura usados na UnB. Um estudo das principais variáveis envolvidas no processo de medição usando Máquinas de Medir por Coordenadas foi realizado. Estas máquinas geralmente usam sondas de gatilhamento para capturar as coordenadas de pontos na superfície das peças, sendo que a dinâmica do processo de medição influencia os erros e o tempo total de operação.

Este trabalho apresenta os princípios de funcionamento das Máquinas de Medir por Coordenadas e um estudo das fontes de erros dinâmicos em sondas de gatilhamento dessas máquinas. Investigou-se, através de técnicas de planejamento de experimento, o comportamento dessas variáveis no processo de medida. A análise de variância foi aplicada para melhorar a avaliação dos resultados, que mostraram ser a velocidade o quesito que mais influencia os erros de medição nesse processo, seguida pela quantidade de pontos escolhida para a apalpação do artefato a ser medido.

ABSTRACT

Nowadays, considering control and measurement systems increasingly smaller and faster, one of the challenges imposed on the scientific metrology is related to the dynamic effects in the measurement processes. These effects are associated with the form and speed of measurand variation and the influence quantities, as well as the dynamics of the measurement process, considering the mechanism of the measuring instrument, for example the movement of the touch probes on Coordinate Measuring Machine (CMM). The demand for modern industrial metrology indicates the need to increase the efficiency of measurement procedures, taking into account dynamic aspects associated with the measurands and the quantities of influence.

The purpose of this dissertation is to analyze the latest developments involving the issues of metrology in the dynamic measurements. It presents the state of the art of researches for metrology dynamic and for the dynamics in the process of measurement in Coordinate Measuring Machines. We conducted a critical evaluation of the methods of dynamic calibration of pressure and temperature, used at UnB. A study of the main variables involved in the measurement process using Coordinate Measuring Machine was performed together. These machines typically use triggering probes to capture the coordinates of points on the surface of the pieces, where the dynamics of the measurement is influenced by the errors and the total time of operation.

This dissertation presents the principles of operation of Coordinate Measuring Machines and a study of sources of dynamic errors in triggering probes of these machines. Techniques of planning of experiments were used to investigate the behavior of these variables, in the measurement process. Analysis of variance was applied to improve the assessment of the results which showed that the displacement speed of the probe is the question that most influences the measurement errors in the process, followed by the quantity of chosen points for probing the artifact to be measured.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - CARACTERIZANDO METROLOGIA ESTÁTICA E DINÂMICA.....	4
2.2 - METROLOGIA DINÂMICA: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES.....	7
2.3 - DINÂMICA NA MEDIÇÃO E MEDIÇÃO POR COORDENADAS	11
2.3.1 - Máquinas de Medir por Coordenadas: princípio de funcionamento.....	12
2.3.2 - Fontes de erro em medições por coordenadas	16
2.3.3 - Sistema de apalpação em Máquinas de Medir por Coordenadas.....	19
3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO E PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	22
3.1 - ERROS E INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	22
3.1.1 - Erros de medição.....	23
3.1.2 - Incerteza padrão, incerteza padrão combinada e expandida: definições ...	24
3.2 - CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES	28
3.2.1 - Características estáticas.....	29
3.2.2 - Características dinâmicas	30
3.3 - CALIBRAÇÃO	35
3.3.1 - Calibração estática e calibração dinâmica	35
3.3.2 - Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas.....	35
3.4 - PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	41
3.4.1 - Planejamentos fatoriais e fatoriais fracionários	43

3.4.2 - Análise de variância	47
4. ESTUDO DE CASOS EM CALIBRAÇÃO DINÂMICA E CALIBRAÇÃO DE MMC.....	51
4.1 - ESTUDO DE CASOS EM CALIBRAÇÃO DINÂMICA.....	51
4.1.1 - Calibração dinâmica de sensores de temperatura	52
4.1.2 - Quantificação de incertezas na calibração de sensores de temperatura	54
4.1.3 - Calibração dinâmica de sensores de pressão.....	57
4.1.4 - Avaliação crítica do LMD.....	67
4.2 - CALIBRAÇÃO E TESTES DE DESEMPENHO DE MMC	68
4.2.1 - Padrões para calibração de MMC	68
4.2.2 - Teste de desempenho em MMC braço articulado.....	72
4.2.3 - Avaliação crítica do LM	76
5. EFEITOS DINÂMICOS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	78
5.1 - AVALIAÇÃO DINÂMICA DE SONDA DE GATILHAMENTO EM MMC.....	78
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICES	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplos de aplicação da metrologia dinâmica.....	8
Tabela 3.1 – Quadro de análise de variância.....	49
Tabela 4.1 – Grandezas de influências e incerteza associada à tensão do termopar.....	56
Tabela 4.2 – Incerteza de medição do Tubo de Choque do LMD-UnB.....	62
Tabela 4.3 – Características dos geradores de pressão do LMD-UnB.....	66
Tabela 4.4 – Incerteza no Gerador Periódico de Coluna de Líquido e Tubo de Choque...	67
Tabela 4.5 – Comparação dos resultados da ASME e teste de desempenho com a PEV...	75
Tabela 4.6 – Comparação dos resultados da norma ASME com o teste proposto.....	75
Tabela 5.1 – Planejamento fatorial 2^4	82
Tabela 5.2 – Resultado dos erros de medição.....	84
Tabela 5.3 – Análise de variância.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sinais que caracterizam um fenômeno físico na dependência do tempo	6
Figura 2.2 – Representação de um sinal senoidal.....	6
Figura 2.3 – Máquinas de medir por coordenadas e seus subsistemas.....	13
Figura 2.4 – Representação dos componentes de uma MMC	14
Figura 2.5 – Esquema de uma AACMM.....	15
Figura 2.6 – Diagrama de Ishikawa: fontes de incerteza na medição por coordenadas. ...	16
Figura 2.7 – Influência relativa na propagação da incerteza na medição.....	17
Figura 2.8 – Exemplos de apalpadores.....	20
Figura 3.1 – Resposta em frequência típica de sensores de primeira e segunda ordem. ...	31
Figura 3.2 – Resposta de um transdutor a um degrau.	33
Figura 3.3 – Respostas típicas de alguns transdutores.	34
Figura 3.4 – Medição de padrão escalonado e posição nos eixos e diagonais em MMC...37	
Figura 3.5 – Padrão barra de esferas virtuais	38
Figura 3.6 – Placa de esferas 5x5 e o alojamento da esfera na placa.....	39
Figura 3.7 – Anel e esfera padrão usados nos ensaios da incerteza de apalpadores	40
Figura 3.8 – Padrão cubo com esferas de cerâmica.....	40
Figura 3.9 – Avaliação da incerteza usando MMC virtual.....	41
Figura 3.10 – Representação da interação entre duas variáveis	43
Figura 3.11 – Curva de distribuição normal de probabilidade.	46
Figura 3.12 – Gráfico de probabilidade normal para pequenas amostras	47
Figura 4.1 – Esquema da Cuba Rotativa do LMD-UnB.	53
Figura 4.2 – Dispositivo de desmascaramento	54
Figura 4.3 – Resposta dinâmica média do termopar..	57
Figura 4.4 – Dispositivo de Abertura Rápida (DAR).....	59
Figura 4.5 – Degrau de pressão para calibração de sensores.....	59

Figura 4.6 – Magnitude da função resposta em frequência do DAR	60
Figura 4.7 – Dimensões do Tubo de Choque do LMD-UnB	61
Figura 4.8 – Degrau de pressão gerado pelo Tubo de Choque do LM-UnB.....	61
Figura 4.9 – Esquema do Gerador Periódico de Coluna de Líquido do LMD-UnB.....	63
Figura 4.10 – Função resposta em frequência do Gerador de Coluna de Líquido	64
Figura 4.11 – Campo de uso dos geradores de pressão do LMD-UnB	66
Figura 4.12 – Esfera virtual gerada a partir de quatro furos.....	70
Figura 4.13 – Esfera virtual determinada de pontos correspondentes aos furos cônicos	71
Figura 4.14 – Placa de Esferas Virtuais (PEV) desenvolvidas no LM-UnB.....	72
Figura 4.15 – AACMM e as posições selecionadas para medições na PEV.....	73
Figura 4.16 – Representação das 20 posições das barras no volume da AACMM.....	74
Figura 4.21 – Influência relativa das fontes de erros na MMC	71
Figura 5.1 – MMC QM - 353 do LM-UnB.	79
Figura 5.2 – Sistema de apalpação da MMC do LM-UnB.....	80
Figura 5.3 – Tela de calibração do apalpador.....	80
Figura 5.4 – Pontos capturados ao medir a esfera de referência.	83
Figura 5.5 – Pontos capturados na medição da esfera de referência.	83
Figura 5.6 – Análise dos efeitos pelo gráfico de probabilidade normal.....	86
Figura 5.7 – Probabilidade normal de resíduo.....	86
Figura 5.8 – Efeito da velocidade e do número de pontos sobre os erros de medição.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AACMM	Articulated Arm Coordinate Measuring Machines
ANOVA	Analysis of Variance (Análise de Variância)
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
CAA	Computer Aided Accuracy
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DAR	Dispositivo de Abertura Rápida
DOE	Design of Experiments (Análise de Experimentos)
E A	European Cooperation for Accrediation
ECL	Excitador de Coluna de Líquido
ENSAM	École Nationale Supérieure D'arts et Métiers
GDS	Grupo de Dinâmica de Sistemas
GUM	Guide to Expression of Uncertainty in Measurement
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO	International Organization for Standardization
JCGM	Joint Committee for Guides in Metrology
LM	Laboratório de Metrologia
LMD	Laboratório de Metrologia Dinâmica
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas (Coordinate Measuring Machine)
NO	Monóxido de Nitrogênio
NPL	National Physical Laboratory
PDF	Probability Density Function (Função Densidade de Probabilidade)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PDMS	Polidimetilsiloxano
RMS	Root Mean Square (Raiz media quadrada)
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia
UnB	Universidade de Brasília

1. INTRODUÇÃO

A metrologia, definida como a “ciência da medição e suas aplicações” abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência ou da tecnologia (INMETRO, 2009). Segundo Quelhas, Valle e Lazari (2004) e Réche e Assis (2010), a aplicação da metrologia pode ser dividida em três segmentos: Industrial, Legal e Científica.

A Metrologia Industrial garante a confiabilidade e qualidade no adequado funcionamento dos instrumentos de medição usados na produção, nos ensaios e na indústria em geral. O ramo da Metrologia Legal trabalha pela garantia metrológica, através de regulamentos, meios técnicos e operações necessárias para garantir a credibilidade dos resultados das medições. A Metrologia Científica, por sua vez, atua no campo livre da metrologia, sendo responsável pelos padrões de referência do país, bem como pelo desenvolvimento de padrões de medida e sua manutenção nos níveis mais elevados e pela disseminação das unidades de medida, por intermédio da prestação dos serviços de calibração. O foco principal deste campo da metrologia é o resultado da medição, sendo necessárias pesquisas de alto teor científico para se fazer frente aos novos desafios científicos e tecnológicos da atualidade.

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 moderno que se encaminha para atender as demandas por processos cada vez mais automatizados. Assim, a necessidade de medições cada vez mais sofisticadas direciona a metrologia a se apoiar em bases científicas sólidas para garantir a confiabilidade e qualidade metrológica requeridas atualmente. Isto é imprescindível para se obter sistemáticas que contemplem além de agilidade e confiabilidade, o conhecimento dos fenômenos relacionados com o ramo da metrologia envolvida em um processo, para então fazer uso da instrumentação e estratégia adequadas para a medição.

Diante da necessidade de acompanhamento da evolução tecnológica e atendimento da crescente demanda por automação, tornou-se imperativo aumentar a rapidez dos processos produtivos industriais, implicando na exigência de resposta e atuação rápidas dos sistemas metrológicos, onde desenvolvimentos recentes implicam na necessidade de sistemas cada vez menores e mais rápidos, sendo que as variáveis dinâmicas nos processos de medição passam a ser importantes, bem como sistemas que

respondam a sinais que variam rapidamente no tempo, caracterizando as medições dinâmicas. Desta forma, as características dinâmicas de processos de medição estão sendo gradativamente mais consideradas, na medida em que os processos de produção automatizados proporcionam a redução do tempo gasto na fabricação de peças. Isto demanda novos métodos de medição e de calibração para correção da resposta de sensores e para avaliação da incerteza da medição.

Considerando-se a abrangência das medições dinâmicas nas diversas áreas da ciência e da tecnologia e conseqüentemente o aumento dos níveis de exigência para a qualidade metrológica, surge a necessidade do desenvolvimento de mecanismos nos quais os sistemas de medição sejam capazes de definir as características dinâmicas nos processos de medidas, demandados por sistemas automatizados, proporcionando assim maior confiabilidade nos resultados das medições.

As técnicas de medição por coordenadas estão se tornando imprescindíveis no controle dimensional de peças complexas, para a garantia da qualidade e confiabilidade metrológica exigidas atualmente nos processos industriais, uma vez que associam flexibilidade e redução do tempo de medição e da incerteza das medidas efetuadas. Estas máquinas geralmente usam sondas de gatilhamento para capturar as coordenadas de pontos na superfície das peças, sendo que a dinâmica do processo de medição influencia os erros e o tempo total de operação. Atualmente os problemas das “medições dinâmicas” e da “dinâmica na medição” têm ocupado os pesquisadores. Esforços têm sido destinados em busca de estratégias que venham aumentar a confiabilidade e qualidade metrológica nos processos produtivos.

Nesse contexto se insere esta dissertação, cujo objetivo principal é apresentar, de forma condensada, alguns dos problemas da metrologia dinâmica e suas soluções, destacando a experiência da Universidade de Brasília, que nas últimas duas décadas tem se dedicado às pesquisas em metrologia dinâmica e, mais recentemente, à dinâmica na medição, considerando as Máquinas de Medir por Coordenadas. Esta dissertação apresenta também os princípios de funcionamento das MMCs e um estudo das fontes de erros dinâmicos em sondas de gatilhamento dessas máquinas. As principais variáveis envolvidas na medição dinâmica com estas sondas foram investigadas através de técnicas de planejamento de experimentos e a análise da variância possibilitou determinar as que mais contribuíram para os erros na medição. Este trabalho viabiliza ainda o uso da terminologia

e dos conceitos básicos ligados a essas áreas de forma a contribuir com os desenvolvimentos futuros e aumentar a competência nacional nesses campos.

Para assegurar uma melhor compreensão, o conteúdo apresentado, está dividido em 6 capítulos. Além deste capítulo, onde é mostrado o contexto no qual as tendências e os desafios da metrologia e este trabalho estão inseridos, o capítulo 2 contempla uma revisão bibliográfica onde é apresentada uma visão geral do cenário atual da metrologia científica e os desafios encontrados para aplicações atuais.

O capítulo 3 é designado à definição de erros e à apresentação dos critérios de determinação da incerteza de medição. São apresentadas também considerações para caracterização de sensores e princípios básicos envolvendo calibração. É também designado ao embasamento teórico para fundamentação da avaliação experimental apresentada no capítulo 5. São expostos conceitos utilizados em planejamento de experimentos e análise de variância.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos estudos realizados onde nos referimos à experiência da Universidade de Brasília - UnB, mostrando alguns dos resultados obtidos no desenvolvimento de métodos e meios para calibração dinâmica de sensores, bem como estudo do desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas.

O capítulo 5 contempla um procedimento experimental para quantificação de grandezas de influência que variam dinamicamente afetando as calibrações, num esforço para solucionar problemas que se constituíram verdadeiros desafios nesse ramo da metrologia. As conclusões deste trabalho e algumas recomendações para futuros trabalhos estão apresentadas no capítulo 6.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão explicitando atualidades da metrologia científica onde as questões dinâmicas passam a ser importantes e representam verdadeiros desafios que exigem esforços voltados para o desenvolvimento de sistemas cada vez menores e mais rápidos. Nesses sistemas, velocidade e tempo são dois quesitos importantes abordados pela metrologia dinâmica, uma vez que trata de sistemas cujas características se referem a sinais que variam rapidamente no tempo.

2.1 - CARACTERIZANDO METROLOGIA ESTÁTICA E DINÂMICA

Os parâmetros envolvidos em uma medição são definidos em função do tipo de fenômeno estudado. Alguns fenômenos físicos variam lentamente ou não variam ao longo do tempo, enquanto outros variam rapidamente. A forma de variação da grandeza medida é uma informação significativa em muitos dos processos de medição.

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 todas as partes construtivas que atuam na aquisição, transformação e apresentação do resultado (Santos, Diniz e Piratelli-Filho, 2011). Dessa forma, tão importante quanto medir "o valor" da grandeza, é necessário que o sensor, ou sistema de medição, seja capaz de fornecer, como saída, um sinal que reproduza fielmente a variação no tempo da grandeza em questão. Assim, para cada caso deve-se utilizar um sensor ou sistema de medição com características que sejam capazes de perceber essas variações. Essas características estão relacionadas com as propriedades de funcionamento do sensor ou transdutor e dizem respeito aos aspectos estáticos e dinâmicos das medições (Diniz et al., 2004).

As características estáticas de um sensor, transdutor ou sistema de medição estão relacionadas ao seu desempenho quando submetido a um sinal de entrada constante ou que varie lentamente ao longo do tempo e as características dinâmicas dizem respeito ao desempenho do sensor, transdutor ou sistema de medição quando sujeito a um sinal de entrada que varia rapidamente no tempo. Assim, o sistema de medição como um todo precisa estar adequado ao fenômeno que se está analisando, pois as características relacionadas com o seu funcionamento, quando submetido a um sinal de entrada, definem o tipo de medição. 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 de resposta dos sistemas de medição em comparação com a velocidade com que o mensurando está mudando, que caracteriza a diferença da medição estática para a dinâmica (Esward, Elster e Hessling, 2009).

A variabilidade das grandezas físicas, ao longo do tempo, normalmente pequena para fenômenos em regime permanente, é considerada pelo GUM como uma fonte de incerteza atribuída à medição. Quando um fenômeno físico é naturalmente dependente do tempo, não se pode assumir que a variabilidade da grandeza representativa desse fenômeno seja uma fonte de incerteza. Neste caso, o conhecimento da natureza transiente do fenômeno é importante para distinguir se a variabilidade define um comportamento característico das medições dinâmicas ou uma fonte de incerteza (Ferreira, 2003). Para isto, uma visão da natureza dos sinais que caracterizam um fenômeno físico é necessária.

O sinal associado a um fenômeno físico pode ser classificado, segundo sua natureza, em: sinais estocásticos, sinais determinísticos e sinais mistos. Sinais estocásticos são aqueles oriundos de medições, nas quais não é possível prever, exatamente, quais serão seus valores num futuro instante de tempo (nesse caso, as informações possíveis só podem ser obtidas através de análises estatísticas em um longo período de tempo). Sinais determinísticos são aqueles que podem ser previstos (e medidos) com razoável exatidão, havendo, naturalmente, uma incerteza no resultado. Um fenômeno físico determinístico é representado por uma função onde todas as principais variáveis de influência são conhecidas, enquanto que um fenômeno estocástico não possui uma função definida e não se conhece, a priori, as principais variáveis nem a relação entre elas. Um sinal misto combina uma situação em que coexiste uma parcela determinística e outra estocástica (Ferreira, 2003).

Outra classificação para os sinais que caracterizam um fenômeno físico qualquer $f(t)$, de acordo com a dependência do tempo, é mostrada no diagrama representado na figura 2.1. Esse diagrama mostra que os fenômenos físicos dependentes do tempo classificam-se em estacionários e não estacionários. Os estacionários podem ser periódicos, constantes ou aleatórios. As grandezas que caracterizam os fenômenos constantes representam um sinal que não varia com o tempo (Ferreira, 2003).

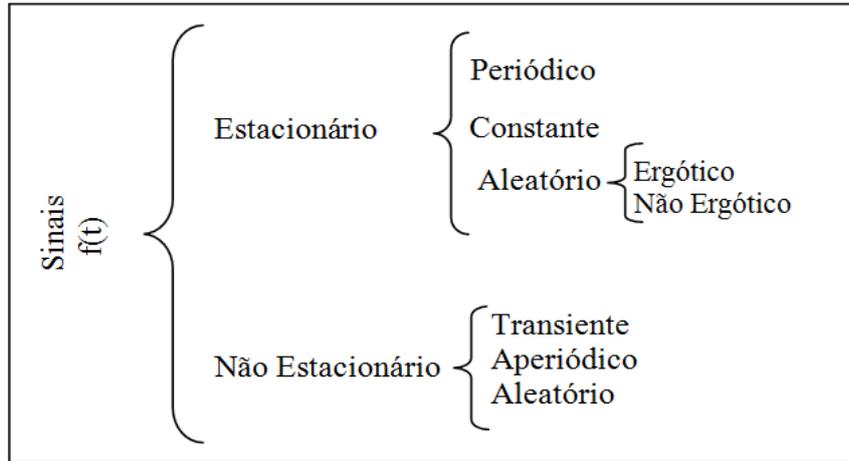


Figura 2.1 – Diagrama com sinais que caracterizam um fenômeno físico na dependência do tempo (Ferreira, 2003)

Como exemplo para caracterizar um fenômeno, seja considerado um sinal alternado proveniente da rede elétrica (127 Volts ou 220 Volts), medido com um instrumento adequado (multímetro). Este é um sinal estacionário. Este sinal em sua essência é periódico. Embora um único valor (constante) seja indicado pelo instrumento de medição, ele representa o valor médio quadrático (RMS) medido ao longo do tempo. O valor instantâneo da tensão elétrica varia de acordo com uma curva senoidal com frequência da ordem de 60 Hz. Este mesmo sinal medido em um osciloscópio, mostra sua natureza oscilatória conforme figura 2.2 e é representado pela equação 2.1, onde A é a amplitude do sinal, f é a frequência e θ o ângulo de fase inicial do sinal (Ferreira, 2003).

$$x(t) = A \text{sen}(2\pi ft + \theta) \quad (2.1)$$

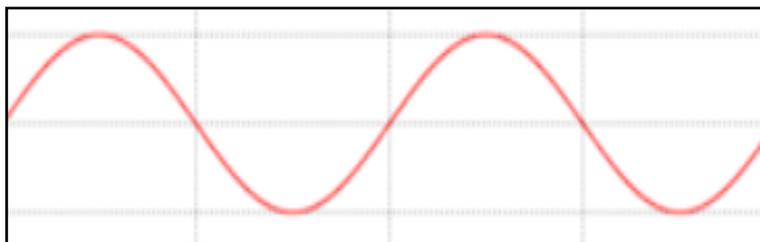


Figura 2.2 – Representação de um sinal senoidal

O sinal que representa um fenômeno aleatório pode ser também estacionário. Isto acontece quando a média temporal não varia em um grande intervalo. Um sinal estacionário aleatório é denominado de ergótico (quando as médias temporais de cada

experimento não variam com o tempo) ou não ergótico (quando as médias temporais de cada experimento variam com o tempo) (Ferreira, 2003).

A metrologia dinâmica se ocupa da determinação da história temporal de sinais em regimes transientes, onde 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. Saber distinguir uma experiência dinâmica da estática é fundamental para a quantificação da incerteza e para a calibração dos instrumentos de medição.

2.2 - METROLOGIA DINÂMICA: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

As medições cujas características se referem a sinais que variam rapidamente no tempo, são tratadas pela metrologia dinâmica. Esward, Elster e Hessling (2009), definiram medição dinâmica, 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. Essa é uma definição qualitativa e que não utiliza parâmetros mensuráveis para caracterizar, de forma objetiva, se uma medição é estática ou dinâmica.

Clark (1989) definiu medição dinâmica como sendo a que 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. Esta é uma definição quantitativa (e metrologicamente quantificável). 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.

O conhecimento da metrologia dinâmica é multidisciplinar. Envolve uma variedade de técnicas matemáticas e estatísticas relacionadas com processamento de sinais, amostragem, teoria de informação, projeto de filtros digitais, identificação de sistemas, análise de correlação e engenharia de controle, necessitando assim combinar métodos de várias áreas do conhecimento.

Os conceitos envolvidos na metrologia dinâmica estão relacionados com métodos e meios de transferir resultados das calibrações dinâmicas para as medições de interesse; métodos de calibração dinâmica para vários sistemas de medição e diferentes grandezas; análise de sistemas complexos de medição; otimização de sistemas de medição; avaliação

da incerteza de medição dependente do tempo, entre outros (Esward, Elster e Hessling, 2009). Para esses autores, as grandezas de interesse da metrologia dinâmica são principalmente, mas não exclusivamente, aplicações envolvendo grandezas mecânicas tais como pressão, temperatura, torque, aceleração e também grandezas elétricas de alta e baixa potência.

A aplicação crescente da metrologia dinâmica pode ser verificada em sistemas de controle e de comando, nos ensaios de confiabilidade e de segurança de sistemas e equipamentos, nos ensaios de influência da rápida variação de pressão sobre componentes eletrônicos (como os usados nos sistemas de controle e segurança de foguetes). Níveis de pressão variáveis no tempo são estudados no comportamento de turbinas a gás, em motores de combustão interna, no comportamento de aeronaves e em vários dispositivos biomédicos, como por exemplo, os utilizados para diagnóstico de doenças cardiovasculares (Diniz et al., 2004). A tabela 2.1 exemplifica o uso da metrologia dinâmica na medicina e em diferentes áreas da engenharia.

Tabela 2.1 – Exemplos de aplicação da metrologia dinâmica (Diniz et al., 2004)

Área de Aplicação	Exemplo
Medicina	Equipamentos de diagnósticos, monitoramento e controle de instrumentos cirúrgicos auxiliares.
Engenharia Automotiva	Medições em motores de combustão interna e em sistemas de injeção, admissão e escapamento.
Engenharia Aeroespacial	Medição de pressão em sistemas de propulsão, em turbinas e em rotores.
Engenharia Nuclear	Monitoração do sistema de fusão e fissão nuclear, controle do sistema de segurança dos reatores.
Engenharia Militar	Controle de sistemas de propulsão, explosões e balística.
Engenharia Mecânica	Monitoração de turbinas hidráulicas, caldeiras, usinas termoelétricas, sistemas de automatização hidráulicos e pneumáticos, bombas, compressores, sistemas de refrigeração, trocadores de calor.

Os regimes dinâmicos de interesse vão desde processos de choques e impactos até processos repetitivos cíclicos ou contínuos. Em cada uma dessas áreas surgem novos desafios no que diz respeito ao projeto de sensores e sistemas de medição, ao desenvolvimento de padrões e procedimentos de calibração confiáveis e adaptados às

condições dinâmicas, bem como na correta avaliação da incerteza e na rastreabilidade das calibrações.

Um importante exemplo de aplicação da metrologia dinâmica a ser considerado, é a medição de pressão no interior dos cilindros dos motores de combustão interna, empregado pelo NPL (National Physical Laboratory) da Inglaterra e pelo PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) da Alemanha (Esward, Elster e Hessling, 2009). Os motores de combustão interna apresentam condições de operação extremas de altas frequências e altas amplitudes, no que diz respeito à confiabilidade de operação de sensores. Por exemplo, estudos de detonação em motores de combustão interna exigem medição de flutuações de pressão com duração de 0,05ms (correspondendo a uma faixa de frequência da ordem de 20 kHz). Para a otimização do consumo e diminuição das emissões de poluentes dos motores de combustão interna estão sendo feitos estudos do sistema de injeção direta de combustível que envolve medição de pressão superiores a 200 kPa (Esward, Elster e Hessling, 2009).

No Brasil estudos dessa natureza vêm sendo realizados nos últimos 20 anos pelo Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília (LMD - UnB) no sentido de propor soluções para aumentar a eficiência dos motores de combustão interna, reduzir a emissão de poluentes e os danos ambientais. Nestes estudos a metrologia dinâmica foi aplicada nas medições de pressão, temperatura e velocidade no interior da câmara de combustão a fim de controlar os parâmetros de combustão para diminuir a formação de poluentes sem reduzir a performance destes motores (Vianna, Damion e Carvalho, 1994; Oliveira, Sousa e Vianna, 1998; Vianna et al., 2002).

No trabalho de Cruz, Vianna e Moreira (2003), por exemplo, o efeito da turboalimentação sobre o escoamento no coletor de admissão e no interior do cilindro de um motor foi avaliado com relação à intensidade da turbulência da mistura ar-combustível, desempenho, consumo e emissões de gases. Os resultados demonstraram que a turboalimentação promoveu o aumento da intensidade de turbulência no interior do motor nos processos de admissão e compressão. Consequentemente a combustão na versão turboalimentada se deu de maneira mais eficiente, o que foi constatado sob a forma de ganhos de potência, redução do consumo específico de combustível, e redução das emissões de gases poluentes como o CO e CO₂. Outro exemplo foi a verificação do desempenho de um motor a gasolina utilizando a combinação de recirculação dos gases de

escape (técnica que reduz as emissões de NO) com turbo compressor que melhorou a relação entre o desempenho do motor e as emissões de NO (Vianna et al., 2002).

No tocante à rastreabilidade e às calibrações, os fabricantes de sensores, na melhor das hipóteses, fornecem resultados onde esses dispositivos foram submetidos a sinais transientes idealizados e distantes da realidade das condições de operação (Esward, Elster e Hessling, 2009). Porém, para o desenvolvimento de motores é necessário estar seguro de que os sensores reproduzem de forma exata e confiável os picos de pressão (especificamente no interior dos cilindros) em uma faixa de frequência que seja significativamente maior que o pulso de frequência (normalmente da ordem de 5 kHz) e tenham um tempo de resposta suficientemente curto para distinguir os detalhes do comportamento dos injetores de combustível. Para atingir essas exigências novos padrões de calibração e novas maneiras de calcular a incerteza de medição são necessários (Esward, Elster e Hessling, 2009).

A sensibilidade nominal de cada sensor é fornecida pelo fabricante, no entanto essas sensibilidades podem mudar com cada aplicação particular. Sobre este assunto, o trabalho de Garland e Rogers (2008), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de New Brunswick Canadá, faz uma abordagem onde apresenta formas estudadas para calibração de sensores.

A simulação de Monte Carlo vem sendo aplicada para análise de erros e avaliação da incerteza em sistemas de medição dinâmica (Esward, Elster e Hessling, 2009). Métodos utilizando filtros digitais para avaliação de incerteza e correção de erros em sistemas dinâmicos têm sido propostos (Hessling, 2008; Elster, Eichstädt e Link, 2009; Eichstädt, Link e Elster, 2010).

Recentemente, um projeto de metrologia interdisciplinar intitulado “desenvolvimento de métodos para a avaliação de incerteza em medições dinâmicas” foi lançado pelo EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) com o objetivo de desenvolver métodos para a avaliação da incerteza de medição e aspectos relacionados em medições dinâmicas alinhados com o GUM. Este projeto deverá fornecer procedimentos para melhorar a análise das medições dinâmicas demonstrados por meio de aplicações (Esward, Elster e Hessling, 2009).

Os trabalhos de pesquisa em metrologia dinâmica procuram sistematizar métodos e meios para a caracterização dinâmica de sensores, transdutores e sistemas de medição.

Embora isto seja alvo de muitos estudos, ainda 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. Segundo Elster, Link e Bruns, (2007), esta prática negligencia os erros dinâmicos e não garante a confiabilidade na determinação das características dinâmicas do processo de medição. Calibrar dinamicamente um sensor ou sistema de medição significa determinar suas características dinâmicas.

2.3 - DINÂMICA NA MEDIÇÃO E MEDIÇÃO POR COORDENADAS

O desenvolvimento industrial e tecnológico da fabricação mecânica moderna tem provocado transformações no processo de industrialização, implicando em necessidade de ferramentas que venham contribuir com a melhoria da qualidade dos produtos e serviços. Considerando-se o aumento dos níveis de exigência para a qualidade metrológica, surge a necessidade do desenvolvimento de métodos nos quais os sistemas de medição sejam capazes de definir as características dinâmicas nos processos de medidas demandados. Diante disto, os recursos da medição por coordenadas são cada vez mais imprescindíveis no controle dimensional de peças complexas para a garantia da qualidade e confiabilidade metrológicas exigidas atualmente nos processos industriais, uma vez que associam flexibilidade, automatização, redução do tempo de medição e da incerteza das medidas efetuadas.

A medição por coordenadas tem como principal função avaliar as propriedades geométricas de peças. Este processo de avaliação baseia-se na medição de coordenadas cartesianas de pontos sobre a superfície da peça a ser medida e no posterior tratamento dessas coordenadas, no sentido de extrair toda a informação necessária à determinação das características geométricas. Assim, podemos distinguir três ações essenciais no processo de medição por coordenadas: aquisição das coordenadas dos elementos geométricos representativos do objeto medido, utilização de algoritmos numéricos adequado para a determinação da forma e dimensões da peça (*software* de medição) e determinação do desvio desta em relação à peça projetada.

A tecnologia de medição por coordenadas desempenha papel importante no cenário atual da metrologia, isto porque os benefícios oferecidos por este recurso estão diretamente relacionados com o sucesso da produtividade nas empresas. Alguns setores industriais como da construção naval, aeronáutica, metal-mecânica e principalmente a

indústria automobilística, têm explicitado a urgência por processos automatizados e assim mais velozes, como forma de aumentar a produtividade. Isto tem implicado no emprego de sistemas de medição automatizados como forma de acelerar o processo de inspeção. Nestas indústrias, o uso de Máquinas de Medir por Coordenadas tem encontrado grande aceitação. Embora o uso de técnicas de visão por câmeras e varredura laser seja moderno, conduzindo a tecnologia de medição por coordenadas à medição de peças deformáveis, a medição com contato usando sondas de gatilhamento ainda tem sido bastante utilizada.

Com a automação e velocidade requerida nos processos de medição modernos, surge a preocupação relacionada com a dinâmica na medição, que constitui uma fonte de erros e incertezas e afeta os resultados das medições. O comportamento dinâmico desses sistemas tem sido investigado por pesquisadores no âmbito mundial, que procuram propor soluções para compensação dos erros dinâmicos e seus efeitos nos resultados das medições (Chensong, Guoxiong e Yuhai, 1998; Mu e Ngoi, 1999; Peng e Shuwen, 2001; Yetai et al., 2004; Pereira e Hocken, 2007). O Brasil está inserido nesse contexto onde a Universidade de Brasília - UnB vem realizando estudos das fontes de erros dinâmicos em sondas de gatilhamento nas Máquinas de Medir por Coordenadas (Santos, Piratelli-Filho e Diniz, 2011). Os efeitos dinâmicos presentes nestas medições incluem as distorções estruturais e de funcionamento do sistema de sondagem.

2.3.1 - Máquinas de Medir por Coordenadas: princípios de funcionamento

As Máquinas de Medir por Coordenadas são sistemas complexos de medição que têm a capacidade de medir coordenadas cartesianas em um determinado volume de trabalho. Assim como qualquer outro sistema de medição dimensional, a medição por coordenadas viabiliza os dados da forma real de um objeto em comparação com a forma nominal e a avaliação de informações metrológicas como tamanho, forma, localização e orientação, sendo para isso, necessário realizar a apalpação de pontos na peça física e definir suas coordenadas segundo um sistema de coordenadas espacial. Além da medição ponto a ponto, há o modo scanning onde o apalpador permanece em contato com a superfície da peça enquanto se desloca em torno da mesma, sendo que os dados que descrevem a geometria da peça são seqüencialmente coletados na forma de coordenadas cartesianas (X, Y e Z). As características geométricas dimensionais são calculadas através de programas computacionais.

As MMCs são utilizadas tanto para inspeção em processos de produção como para medições de apoio à pesquisa e calibração de artefatos e padrões (Donatelli et al., 2005).

Sua principal característica consiste na capacidade de medir uma variedade de formas geométricas de modo flexível e com relativa automatização. As principais vantagens das MMCs são sua ampla faixa de aplicação, flexibilidade e universalidade, potencialidades geométricas, baixa incerteza de medição, automatização, integração ao ambiente de produção, informatização e medição orientada ao elemento (Humieny et al., 2001). A atuação do computador com capacidade de processamento cada vez maior aumenta a potencialidade e os recursos da tecnologia de medição por coordenadas.

A figura 2.3 apresenta um sistema de medição por coordenadas moderno que é composto por vários subsistemas interagindo entre si para realizar as medições. A determinação dos elementos geométricos é feita a partir de pontos capturados por uma sonda que pode ser com ou sem contato com a peça (Bosch, 1995).

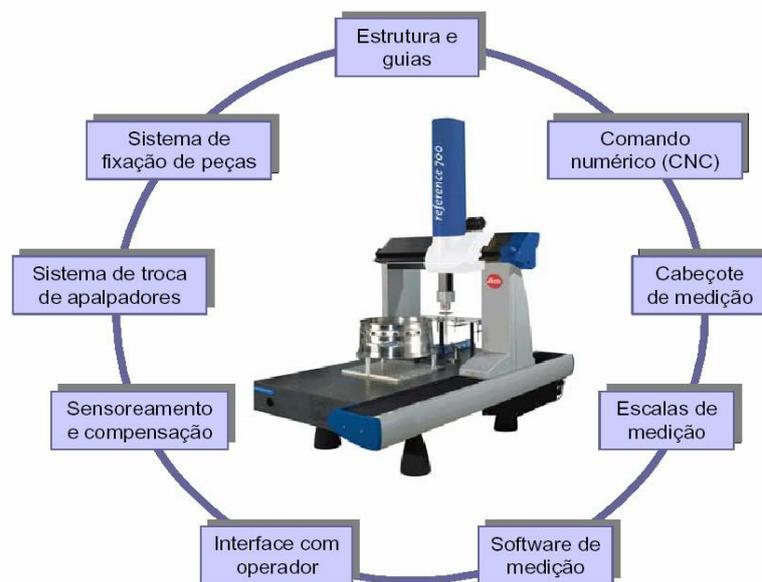


Figura 2.3 – A máquina de medir por coordenadas e os seus subsistemas (Donatelli et al., 2005)

Para medir um objeto com a MMC, é necessário realizar a apalpação de pontos nas superfícies da peça física, cujas coordenadas são definidas segundo escalas acopladas ao instrumento. Os pontos com coordenadas X, Y e Z são tratados através de *software* dedicado para determinação da geometria e dimensões das peças.

A estrutura física das MMCs é formada basicamente por três eixos perpendiculares entre si, formando um sistema de coordenadas cartesiano. Consiste de uma base de referência rigorosamente plana, sobre a qual desliza horizontalmente um corpo

guiado na direção Y. Esse corpo por sua vez, possui outro corpo que desliza horizontalmente e é perpendicular ao anterior, na direção X. Há um terceiro corpo que se movimenta verticalmente, e é perpendicular aos anteriores, na direção Z. É acoplado ao lado externo inferior do eixo vertical Z, um sensor especial (mecânico, eletrônico ou óptico) que entrará em contato com a peça que será medida, movimentando-se de acordo com a capacidade da máquina (Piratelli-Filho e Moraes, 2009). A figura 2.4 ilustra alguns dos elementos construtivos de uma MMC com mecanismos envolvidos na medição por coordenadas.

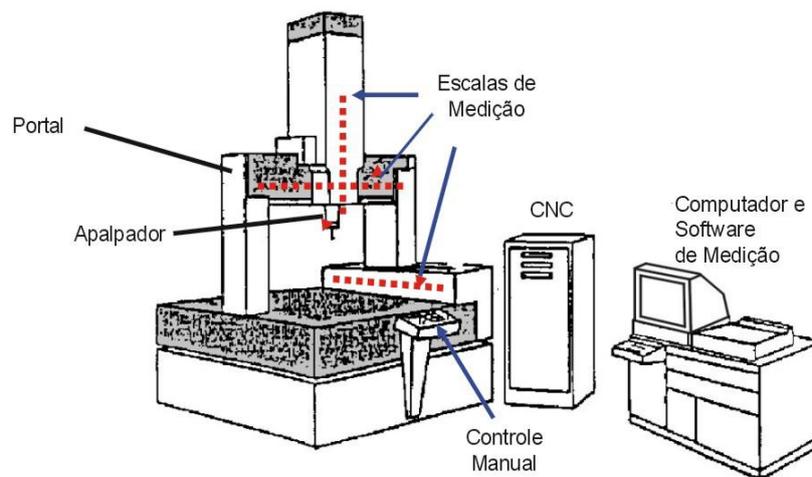


Figura 2.4 – Representação dos componentes de uma MMC (adaptado de Bosch, 1995)

A estrutura mais comum das MMCs é do tipo Ponte Móvel formada por três eixos perpendiculares entre si, em forma de ponte. A presença de escalas lineares em cada eixo serve para determinar a localização espacial da ponta de um sistema de apalpação, constituindo um sistema de coordenadas cartesiano. Eixos com mancais aerostáticos são usados para deslizamento da estrutura da ponte móvel (eixo Y), sobre o qual desliza outro corpo na direção horizontal e perpendicular a este primeiro (eixo X). Um terceiro corpo tem movimento vertical, numa direção perpendicular aos eixos X e Y (eixo Z). Um sistema de apalpação é acoplado à extremidade do eixo Z, na parte inferior, consistindo de uma sonda e apalpador (dispositivo mecânico, eletrônico ou óptico), para localizar a posição (X,Y,Z) de um ponto. Outros tipos construtivos de MMCs são as que apresentam estrutura em forma de ponte fixa (Gantry), Cantilever e Braço Articulado.

As MMCs podem ainda ser utilizadas para executar medições contínuas, através de um processo de escaneamento. Nesse caso, o uso no modo scanning implica na manutenção do apalpador em contato com a superfície da peça durante o deslocamento ao

longo de uma trajetória predefinida. O processo de escaneamento pode ser realizado com o uso de sondas sem contato, como aquelas baseadas em emissão de feixe laser.

Considerando a estrutura, existem variações na construção mecânica, as quais podem dividir as MMCs em 4 grupos, relacionando-as através de alguns parâmetros como o volume de trabalho, a incerteza de medição, a área de acesso e as particularidades da própria tecnologia, sendo eles: tipo coluna, tipo portal, tipo braço horizontal e tipo ponte, (Bosch, 1995).

Um outro modelo de MMC é conhecido como Braço Articulado, derivada do inglês *Articulated Arm Coordinate Measuring Machines* (Máquinas de Medir por Coordenadas tipo Braço Articulado ou AACMM). Devido sua flexibilidade à superfície das peças, este modelo tem sido muito utilizado em aplicações que envolvem geometria complexa, pela facilidade de acessar pontos em qualquer posição desejável nessas superfícies (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011). A figura 2.6 apresenta uma visão esquemática da construção mecânica de uma AACMM com seu braço contraído e estendido.

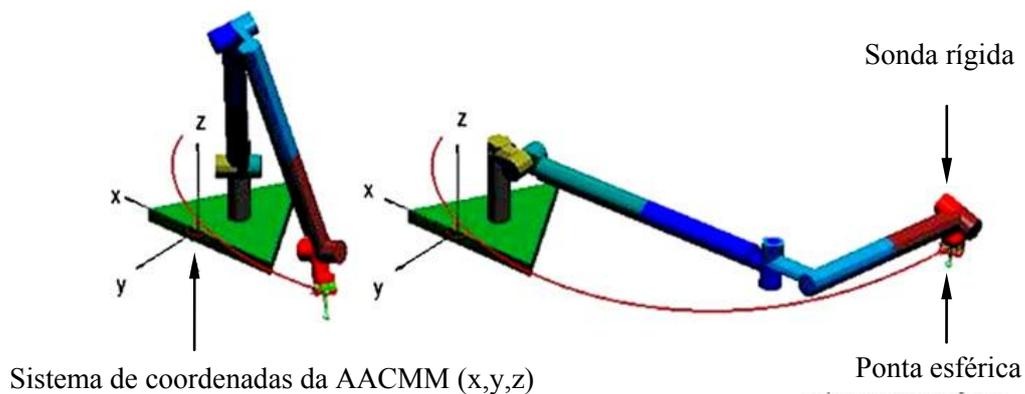


Figura 2.5 – Esquema de uma AACMM (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011)

Nos modelos AACMM, as coordenadas dos pontos medidos são determinadas de modo similar às demais MMCs, porém a referência da posição relativa do apalpador é dada por medidores angulares (encoders) localizados nas articulações do braço. Os encoders são transdutores de deslocamento angular, formados por um dispositivo opto-eletrônico com escalas graticuladas em placas de vidro. Vantagens como facilidade e rapidez ao atingir pontos em superfícies de difícil acesso, portabilidade e menor custo, são garantidas com o uso das AACMMs (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011).

2.3.2 - Fontes de erro em medição por coordenadas

Assim como em todo processo de medição, na medição por coordenadas há erros que originam incertezas no resultado das medições. Na literatura, esses erros geralmente são agrupados de acordo com suas fontes e a diversidade dessas fontes tem levado autores a sugerir classificações diferentes para as mesmas (Salsbury, 1995; Trapet, et al., 1999; Orrego, Giacomo e Abackerli, 2000; Wilhelm, Hocken e Schwenke, 2001; Weckmann, Knauer e Killmaier, 2001; Oliveira e Souza, 2003).

As principais fontes de erros que atuam no processo de medição por coordenadas estão arranjadas em quatro grupos: máquina, peça, ambiente e operador, conforme mostra o diagrama de Ishikawa na figura 2.7, que é uma das representações mais utilizadas nesse contexto. Através desse diagrama, é possível observar que cada um dos grupos do arranjo constitui várias fontes de erros que são responsáveis pela incerteza do resultado dessa medição.

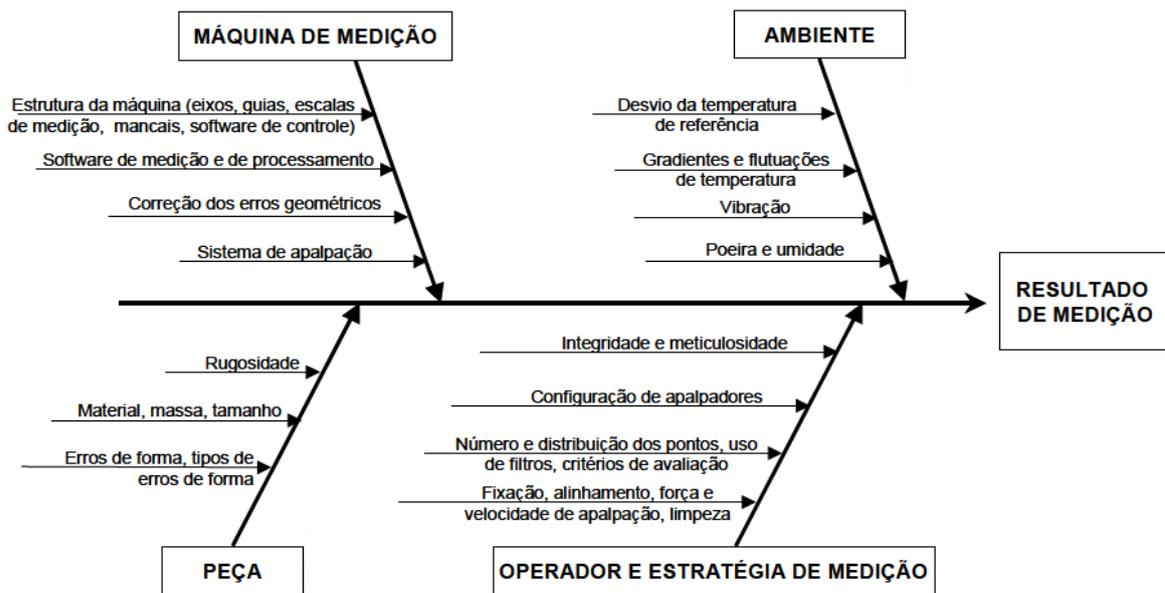


Figura 2.6 – Diagrama de Ishikawa: principais fontes de incerteza na medição por coordenadas (adaptado de Oliveira e Souza, 2003)

Os erros oriundos da peça estão relacionados, sobretudo com o material utilizado para sua construção. Dentre os efeitos ambientais, destacam-se variações relacionadas com a temperatura de referência e com vibrações no local onde está instalada a máquina. A influência relativa da máquina, do ambiente e do operador na incerteza de medição pode ser vista na figura 2.8, onde se percebe que o grupo representado pelo operador e estratégia de medição é o que mais contribui com os erros, seguido pelo ambiente. Estas fontes de

erros são controladas nos processos de calibração e medição, de forma a ter efeitos reduzidos nos resultados.

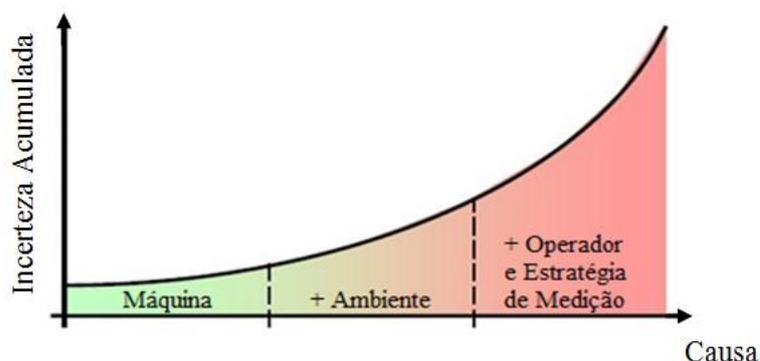


Figura 2.7 – Influência relativa das fontes de erros na propagação da incerteza de medição (adaptado de Donatelli et al., 2005)

É conveniente esclarecer que como “operador”, neste trabalho, caracteriza-se a pessoa responsável pela análise dos requisitos metrológicos e definição da estratégia de medição, efetuando-a e processando os resultados.

Erros das Máquinas de Medir por Coordenadas

Os efeitos dinâmicos que influenciam os erros de medição provenientes da MMC podem ser originados por diferentes partes da máquina, principalmente em sua estrutura (eixos, guias, escalas de medição e mancais), no sistema de apalpação e no *software* de medição. Erros inerentes à construção da máquina são denominados erros geométricos e são determinados considerando a posição de um corpo rígido no espaço que é definida através dos seis graus de liberdade correspondentes aos deslocamentos nos três eixos ortogonais e aos movimentos angulares em torno desses eixos. Assim, 18 graus de liberdade estão associados a esses eixos e, portanto 18 erros geométricos, uma vez que as MMCs apresentam três eixos ortogonais de translação. A estes se somam os três erros de ortogonalidade entre os eixos da MMC, totalizando 21 erros geométricos (Piratelli-Filho, 1997).

Os erros da estrutura da MMC combinados aos erros das escalas são divididos em três grupos: rotação, translação e perpendicularidade. Os erros de rotação se dividem em erros de rolamento (roll), guinamento (pitch) e tombamento (yaw), enquanto que os erros de translação estão divididos em erros de posicionamento e retitude. Os erros associados aos componentes individuais são chamados erros paramétricos.

Os erros dinâmicos relacionados ao sistema de apalpação são provenientes das suas características elétricas, cinemáticas e mecânicas. A deflexão da haste do apalpador da sonda, causada pelo esforço no instante do contato com a peça, é uma fonte de erro que afeta o resultado da medição (Piratelli-Filho, 1997) e pode depender de fatores como velocidade de sondagem, direção e distancia de aproximação da sonda em relação à peça, bem como a magnitude da força de contato (Bosch, 1995).

Avaliação de erros em MMC

As técnicas de avaliação dos erros de medição por coordenadas podem ser classificadas, de acordo com o modo de execução, em métodos diretos que envolvem a determinação dos erros elementares da máquina empregando instrumentos de menor incerteza de medição, ou métodos indiretos que compreendem a medição de padrões de dimensões conhecidas na própria máquina (Piratelli-Filho, 1997).

A avaliação dos erros e a determinação da incerteza de medição em MMCs são tratados por Sartori e Zhang (1995) que abordam esse assunto em revisão publicada sobre medição e compensação de erros em MMCs e mais recentemente atualizada no trabalho de Schwenke et al. (2008) onde estes autores apresentam uma discussão sobre erros e incertezas associadas às medições geométricas. Os procedimentos para avaliação de erros em MMCs são comumente denominados “ensaios”, sendo que os mais utilizados são: aceitação, verificação e calibração (Klen, 2000).

A aceitação trata de uma relação contratual entre fornecedor e comprador estabelecida no ato da aquisição da MMC ou no momento de requerer nova avaliação metrológica. Consiste em ensaios específicos indicados em normas e diretrizes como testes de posicionamento, retitude, perpendicularidade e inclinações, bem como medição de blocos padrão ou padrões escalonados. Trata-se de uma avaliação periódica para assegurar as especificações fornecidas pelo fabricante (Veiga, 1997). A verificação é um teste simples para averiguação geral das condições de medição da MMC. É recomendado para ser executado entre períodos de ensaios mais detalhados como as calibrações. Na calibração considera-se o rigor para garantir a qualidade e confiabilidade das medições, estabelecendo-se para isto, a relação entre os valores e as incertezas nos resultados.

O processo de calibração envolve além da medição, a compensação dos erros nas medições. Normalmente esses erros são compensados através de ajustes diretamente na máquina como tornar uma das partes móveis da MMC menos rugosa e mais retilínea, por

exemplo, seria compensar um erro de retitude. Neste caso são empregados modelos matemáticos que descrevem o comportamento dos erros geométricos da MMC, possibilitando que o *software* da MMC compense o erro em tempo real para as demais medições. Calibração de MMCs é assunto tratado no item 3.3.2 desta dissertação.

2.3.3 - Sistema de apalpação em Máquinas de Medir por Coordenadas

Na medição por coordenadas, a geometria do artefato a ser medido pode ser obtida através da apalpação de pontos discretos sobre a superfície e cada ponto medido é expresso na forma de coordenadas. Um programa computacional com algoritmos matemáticos apropriados faz o ajuste dos pontos coordenados às geometrias. O sistema de apalpação das MMCs é constituído pela sonda e pelo apalpador, sendo responsável pela coleta de dados das coordenadas durante o processo de medição. A sonda é um sensor responsável pela localização de pontos na superfície da peça a ser medida, para que a MMC determine a posição dos mesmos no volume de trabalho. Esse processo se dá com ou sem o contato da sonda com a peça, classificando-as como sondas com ou sem contato. As sondas com contato podem ser do tipo rígido ou tipo gatilhamento, enquanto que as sondas sem contato podem ser tipo laser ou do tipo sistemas de visão. As sondas mais comuns são as sondas de gatilhamento, onde o contato de uma esfera padrão calibrada com a superfície da peça sob medição dispara um sinal elétrico para o *software* de controle da MMC determinar as coordenadas X, Y e Z das escalas da máquina (Bosch, 1995).

Há basicamente dois tipos de apalpadores: apalpador medidor e apalpador comutador. O apalpador medidor fornece um sinal proporcional ao deslocamento do sensor após contato com o artefato medido e este sinal pode ser usado para controlar o posicionamento, para uma leitura ou para se obter o valor do deslocamento resultando nas coordenadas do ponto medido. O apalpador comutador fornece um sinal de comutação (liga/desliga) após um deslocamento pré definido do sensor. A calibração inicial do apalpador se faz necessário para determinar o diâmetro da esfera virtual que utiliza o raio e a deflexão para emissão do sinal. O raio é utilizado para corrigir as coordenadas e os parâmetros geométricos do objeto medido (Bosch, 1995). Alguns modelos de apalpadores são mostrados na figura 2.9 (a), (b) e (c).

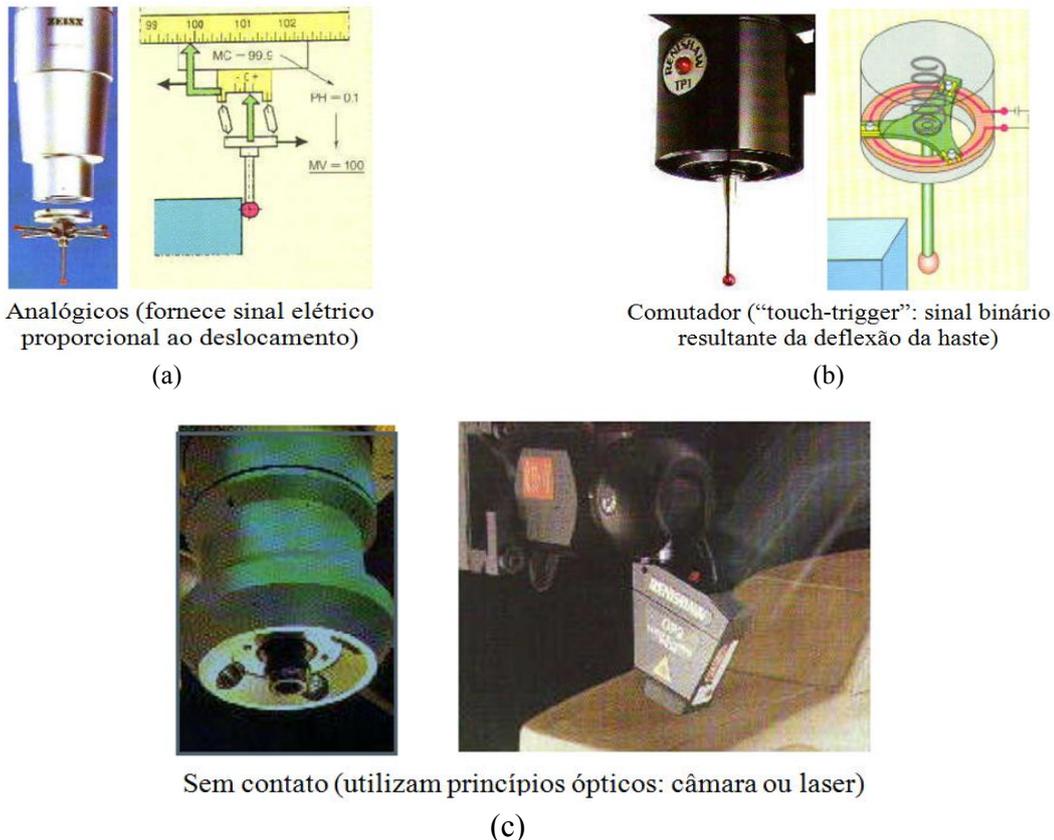


Figura 2.8 – Exemplos de apalpadores (Klen, 2000)

Uma configuração muito comum de apalpador comutador emprega chaves de contato ou cristais piezoelétricos, que são acionados no momento em que a esfera da haste entra em contato com a superfície, enviando um sinal para o controle da MMC que captura as coordenadas do ponto. No entanto é necessário um torque para o envio do sinal e isto causa um deslocamento da haste do sistema de apalpação, em relação ao verdadeiro ponto de contato que corresponde ao ponto da superfície da peça. O *software* de medição ajusta automaticamente as leituras para compensar o diâmetro da ponta do apalpador da sonda, porém este deslocamento indesejável que ocorre no contato somente pode ser compensado se os erros associados forem conhecidos.

Para operação de apalpadores quando sem contato com a peça, são posicionados manualmente e identificam o ponto através de um sistema óptico que atualmente têm sido substituídos por câmeras digitais e processamento computadorizado de imagens.

Na medição com sondas de gatilhamento, o contato da esfera com a superfície da peça é feito com a sonda em movimento e as características dinâmicas da medição influenciam os erros na determinação dos pontos. Pesquisas têm sido realizadas para

investigar as variáveis dinâmicas de MMCs e de sondas de gatilhamento, visando conhecer seu efeito nos erros e na incerteza de medição e avaliar a possibilidade de executar as medições usando maiores velocidades de operação.

Piratelli-Filho e Giacomo (2003) apresentaram um estudo envolvendo o uso de técnicas de planejamento de experimentos para investigar os erros e incerteza das medições de MMCs com sondas de gatilhamento. A dinâmica de funcionamento das MMCs tem sido investigada e a determinação dos erros dinâmicos e da incerteza de medição tem sido estudada (Dong et al., 2003; Perreira e Hocken, 2003). Uma publicação recente mostra o resultado da análise do desempenho dinâmico dessas máquinas, considerando seis variáveis do processo de sondagem: velocidade de aproximação do apalpador, força da mola (pré-carga), comprimento da agulha do apalpador, orientação do apalpador da sonda e número de pontos determinados. Os autores observaram que a variável velocidade de aproximação foi a que mais influenciou nos resultados da medição de uma esfera (Wang, Luo, 2009).

3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO E PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Neste capítulo, os fundamentos básicos importantes para a análise da incerteza de medição são apresentados de acordo com os princípios do GUM, bem como considerações para caracterização de sensores. Ênfase especial é dada aos métodos usados na calibração de máquinas de medir por coordenadas. São apresentados também conceitos relacionados com as técnicas de planejamento e análise de experimentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 - ERROS E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Ao relatar o resultado da medição de uma grandeza física, é imperativo que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado que venha expressar sua confiabilidade metrológica, assim como possibilitar sua comparação com valores de referência de uma especificação, padrão ou norma. O resultado da medição de uma grandeza física deve expressar além do valor numérico e da unidade, a incerteza associada a essa medição. Dessa forma, os Institutos de Normalização no âmbito mundial têm se preocupado em estabelecer critérios para determinação do valor que representa a incerteza de medição, uma vez que esta indica o desempenho dos instrumentos de medição.

O conceito de erro é a muito conhecido e sua análise é prática antiga em metrologia, no entanto o conceito de incerteza como um atributo de confiabilidade é mais recente. De acordo com a atualização de 2008 do VIM, lançado no Brasil em 2009 (INMETRO, 2009), a incerteza de medição é definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Na prática, existem várias fontes possíveis de incertezas em uma medição, incluindo: a definição incompleta do mensurando; uma amostragem não-representativa; o conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais; o erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos; a resolução finita do instrumento; os valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência; os valores inexatos de constante e de outros parâmetros obtidos de fontes externas; as aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição; as variações nas observações repetidas do

mensurando sob condições aparentemente idênticas (INMETRO, 2003). Segundo o GUM (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição), toda medição é afetada por erros que podem ser provenientes do mensurado, do instrumento de medição e de grandezas de influência externa (INMETRO, 2003).

3.1.1 - Erros de medição

De acordo com o VIM, os erros de medição são conceituados como sendo a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência (INMETRO, 2009). Segundo este documento, esse conceito pode ser utilizado quando existe um único valor de referência, o que ocorre se uma calibração for realizada por meio de um padrão com um valor medido cuja incerteza de medição é desprezível ou se um valor convencional for fornecido (nestes casos, o erro de medição é conhecido) e quando se supõe que um mensurando é representado por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezível (neste caso, o erro de medição é desconhecido).

Erro sistemático e erro aleatório

O componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível, é denominado pelo VIM, de erro sistemático (INMETRO, 2009). Um valor de referência para um erro sistemático é um valor verdadeiro, ou um valor medido de um padrão com incerteza de medição desprezível, ou um valor convencional. O erro sistemático e suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. É possível se aplicar uma correção para compensar um erro sistemático conhecido. O erro sistemático é igual à diferença entre o erro de medição e o erro aleatório. Sua estimativa é denominada de tendência.

Erro aleatório é o componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas do mesmo mensurando. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida por sua esperança matemática ou valor esperado, o qual é geralmente assumido como sendo zero, e por sua variância. Segundo o VIM, o erro aleatório é igual à diferença entre o erro de medição e o erro sistemático (INMETRO, 2009).

A incerteza de medição deve ser avaliada de acordo com o GUM - Guide to Expression of Uncertainty in Measurement (JCGM, 2008), 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 do GUM (GUM S1) (JCGM, 2008), 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 Simulação de Monte Carlo (JCGM, 2008).

Esses documentos da 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. Destaca-se, por exemplo, o trabalho de Elster, Eichstädt e Link (2009), 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 à metrologia dinâmica, ainda não existe uma regulamentação da ISO, ou mesmo recomendações que permitam determinar as incertezas de medição.

Os procedimentos estabelecidos pelo GUM e seu suplemento são aplicados em calibrações de padrões e instrumentos, ensaios, análise teórica de experimentos de medição e sistemas complexos, bem como servem de referência para comparação de resultados de medição no âmbito internacional.

3.1.2 - Incerteza padrão, incerteza padrão combinada e expandida: definições

De acordo com o GUM, a incerteza padrão é a incerteza do resultado expressa como um desvio padrão. A incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio de várias outras grandezas é denominada incerteza padrão combinada. A incerteza expandida é a grandeza que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração de distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando e é

obtida por meio de um fator numérico usado como um multiplicador da incerteza padrão combinada.

Avaliação do tipo A e avaliação do tipo B da incerteza padrão

Se todas as grandezas que afetam o resultado de uma medição forem variadas, sua incerteza poderá ser calculada por meios estatísticos. Como isto na prática, normalmente, não é possível devido à restrição de recursos, a incerteza de um resultado de medição é, geralmente, avaliada utilizando-se um modelo matemático de medição e a lei de propagação de incerteza. Dessa maneira, uma medição pode ser modelada matematicamente até o grau imposto pela exatidão requerida na medição. A incerteza de medição pode ser avaliada, conforme diretrizes do GUM, através de dois métodos: avaliação do Tipo A, que consiste na avaliação da incerteza através da análise estatística de séries de observações e avaliação do Tipo B, consistindo na avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de séries de observação, neste caso a incerteza padrão é avaliada pelo julgamento científico com base nas informações disponíveis.

Na maioria dos casos o mensurando (aqui definido por Y) é determinado a partir de N outras grandezas X_1, X_2, \dots, X_N através de uma relação funcional f expressa pela equação 3.1.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (3.1)$$

Uma estimativa do mensurando Y , designada por y , é obtida da equação 3.1 usando entradas estimadas x_1, x_2, \dots, x_N . Assim, a estimativa de saída y , que é o resultado da medição, é obtida pela expressão 3.2.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3.2)$$

A incerteza padrão combinada associada a y , designada como $u_c(y)$, é o desvio padrão de Y , determinada a partir das estimativas x_i das grandezas de entrada X_i e suas incertezas padrão $u(x_i)$. A expressão matemática pode ter um grau de complexidade que depende da exatidão requerida pelo resultado da medição. Deve incluir as correções, fatores de correção para efeitos sistemáticos e conter todas as grandezas que contribuem com componentes significativos na incerteza de medição (Lira, 2001).

A avaliação do tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada em uma série de n observações independentes, para uma das grandezas de entrada X_i e nas mesmas condições

de medição. A melhor estimativa para a grandeza Q medida n vezes é a sua média aritmética \bar{q} obtida através da equação 3.3.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (3.3)$$

As observações individuais q_i diferem em valor por causa de variações aleatórias nas grandezas de influência, ou dos efeitos aleatórios. A variância estimada (experimental) das observações é dada pela equação 3.4. Esta estimativa da variância e sua raiz quadrada positiva $s(q)$, denominada desvio padrão experimental, caracteriza a variabilidade dos valores q observados ou, mais especificamente, sua dispersão em torno de sua média \bar{q} . A variância da média é dada pela equação 3.5. A raiz quadrada positiva de $s^2(\bar{q})$ é o desvio padrão experimental da média, obtida pela equação 3.6.

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (3.4)$$

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (3.5)$$

$$s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

Conforme dito, a avaliação do tipo B da incerteza padrão se aplica quando uma quantidade de entrada X_i não for obtida a partir de uma série de observações. Neste caso a variância estimada $u_c^2(x_i)$ ou a incerteza padrão $u_c(x_i)$ são avaliadas por julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis da variável X_i , como: medições anteriores, experiência ou conhecimento do comportamento e propriedades dos materiais e instrumentos, especificações fornecidas pelo fabricante, dados de calibração e certificados, incerteza obtida de manuais, etc. (Lira, 2001).

Determinando a incerteza padrão combinada da estimativa de saída

A incerteza padrão da estimativa de saída para grandezas de entrada não correlacionadas é a raiz quadrada positiva da variância $u_c^2(y)$ dada pela equação 3.7.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (3.7)$$

Onde:

$y = f(x_1, x_2 \dots x_N)$ e $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ é o coeficiente de sensibilidade.

$u(x_i)$ é igual a avaliação (do tipo A ou do tipo B) da incerteza padrão.

As grandezas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N são independentes.

Quando as grandezas de entradas são correlatas ou com dependência significativa, a expressão para a variância $u_c^2(y)$ associada com o resultado da medida é representada pela equação 3.8, em que x_i e x_j são estimativas de X_i e X_j e $u(x_i, x_j)$ é a covariância estimada associada com x_i e x_j .

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (3.8)$$

O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado $r(x_i, x_j)$ e obtido através da equação 3.9. Quando x_i e x_j são independentes, $r(x_i, x_j) = 0$. Quando nas mesmas condições para n pares independentes de observações simultâneas obtiverem-se as médias \bar{q} e \bar{r} , então a covariância de \bar{q} e \bar{r} será dada pela equação 3.10.

$$r(x_i, x_j) = \frac{U_{(x_i, x_j)}}{u(x_i)u(x_j)} \quad (3.9)$$

$$s(\bar{q}, \bar{r}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q}) \cdot (r_k - \bar{r}) \quad (3.10)$$

Determinando a incerteza de medição expandida

A incerteza de medição expandida é obtida através da multiplicação da incerteza padrão combinada $u_c(y)$ da estimativa de saída y por um fator de abrangência k , representada pela expressão 3.11.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3.11)$$

O fator de abrangência k é calculado a partir dos graus de liberdade efetivos. Para estimativa do seu valor, é necessário considerar a confiabilidade da incerteza padrão $u(y)$ da estimativa de saída y .

Os graus de liberdade são estimados através da fórmula de Welch-Satterhwaite, apresentada na equação 3.12, onde $u_i(y)$ ($i=1,2,\dots,N$) são as contribuições para a incerteza padrão associada à estimativa de saída y e v_i são os graus de liberdade efetivos da incerteza padrão $u_i(y)$.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i^4}{v_i}} \quad (3.12)$$

Incerteza e simulação de Monte Carlo

Os desafios encontrados na metrologia dinâmica para correção de erros e avaliação de incertezas se deparam com problemas complexos cujas soluções requerem métodos para modelagem com ampla aplicabilidade. Atualmente, o método de Monte Carlo vem sendo utilizado em sistemas de medição dinâmica para avaliação da incerteza. Um exemplo de aplicação que podemos citar é o recém publicado trabalho de Wübbeler, Krystek e Elster (2008), onde esses autores analisaram a incerteza de medição através do método de Monte Carlo, compararam os resultados com a abordagem convencional do GUM e concluíram que este método é adequado para estimar incerteza e deve ser empregado quando as proposições feitas no método convencional do GUM não se aplicam.

O método de Monte Carlo é um importante reforço para a análise de sistema de medição dinâmica e para as incertezas associadas a estes sistemas, porém uma limitação deste método é que não é adequado para aplicações em tempo real (on line). Este método constitui uma poderosa ferramenta para análise de erros e incertezas em sistemas dinâmicos e oferece como vantagem o fato de poder ser aplicado independentemente da natureza do modelo, se linear ou não linear e pode ser aplicado em sistemas complexos. Embora este método seja útil para avaliar a incerteza, ele não fornece meios para correção dinâmica e melhoria do desempenho dos sistemas de medição.

3.2 - CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES

As características de um sensor ou transdutor estão relacionadas com seu funcionamento e com sua interação com o tipo de fenômeno que representa a grandeza a ser medida, além da sua interação com outros dispositivos que fazem parte da cadeia de medição. Não somente o sensor, mas todo o sistema de medição (amplificadores, conversores, indicadores) deve possuir características que não comprometam as medições realizadas. Dessa forma, é importante o conhecimento dessas características para a compatibilização dos componentes do sistema de medição. Essa compatibilização diz respeito à determinação da função de transferência de cada componente do sistema de

medição e da função de transferência do sistema como um todo, para que o mesmo atenda satisfatoriamente às exigências para medição do sinal.

3.2.1 - Características estáticas

As características estáticas de um sensor, transdutor ou sistema de medição, são normalmente contempladas em catálogos fornecidos pelos fabricantes e são determinadas em função de projeto ou através de ensaios experimentais de calibração denominados de calibração estática (Diniz, 1994). Seguem algumas destas características.

Faixa de indicação

A faixa de indicação de entrada é fornecida pela “percepção” do valor mínimo e máximo do sinal de entrada pelo sensor, transdutor ou sistema de medição, sem comprometer a confiabilidade das medidas. A faixa de indicação de saída pode ser definida da mesma forma, em função da grandeza do sinal de saída.

Sensibilidade

De modo geral, desconsiderando-se as variações com o tempo, Sensibilidade $S(I)$ de um transdutor pode ser definida pela expressão 3.13 que relaciona a variação do sinal de saída ΔO de um transdutor em relação à variação do sinal de entrada I de I_0 para I . Assim, a Sensibilidade $S(I)$, que geralmente é uma função da entrada, é dada pela equação 3.14.

$$\Delta O(I) = \int_{I_0}^I S(I) dI \quad (3.13)$$

$$S(I) = \frac{\partial O}{\partial I} \quad (3.14)$$

Considerando-se um transdutor ideal de comportamento linear, sua sensibilidade não varia com o valor da entrada. Nesse caso, está associada à inclinação da reta que caracteriza o comportamento do transdutor. Normalmente a definição dessa reta é baseada nos valores máximos e mínimos da entrada e da saída, dada pela equação 3.15, de modo que a forma linearizada da equação 3.13 é fornecida pela expressão 3.16 (Diniz, 1994).

$$S(I) = \frac{d}{dI} O(I) = C^{te} = S = \frac{O_{max} - O_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (3.15)$$

$$\Delta O(I) = S(I - I_0) \quad (3.16)$$

Resolução

A resolução de um transdutor é a menor mudança que pode ser detectada da variação do fenômeno medido. Pode ser expressa como uma porcentagem da faixa de indicação do transdutor (Diniz, 1994).

3.2.2 - Características dinâmicas

O conhecimento das características dinâmicas é importante para a compatibilização do comportamento dinâmico dos componentes de um sistema utilizado para medição de sinais que variam rapidamente. Diferentemente das estáticas, as características dinâmicas são mais difíceis de serem determinadas, não sendo por isso fornecidas pelos fabricantes, sua determinação se faz necessário através de métodos experimentais. Os parâmetros tais como sensibilidade, repetibilidade, linearidade, faixa de operação, constante de tempo, frequência natural, tempo de permanência e coeficiente de amortecimento que caracterizam bem o transdutor estaticamente, não caracterizam adequadamente seu comportamento dinâmico. Para caracterizar completamente o comportamento dinâmico de um elemento ou sistema de medição é necessário tratá-lo como um sistema dinâmico e fazer a descrição matemática do mesmo (Diniz, 1994).

Segundo Diniz et al. (2004), existem duas formas convencionais para a caracterização dinâmica de um sensor, que se aplicam também para outros elementos de um sistema de medição ou para o sistema como um todo: através da determinação da Resposta em Frequência do transdutor ou elemento e através da determinação da Resposta no Tempo a um sinal de entrada do tipo degrau. Existem outras características como tempo de resposta, frequência natural e tempo de permanência que também são utilizadas para a caracterização dinâmica dos sensores e são determinadas de forma mais simples, no entanto apresentam menos informações.

Resposta em Frequência

Caracterizar um sensor ou transdutor através de sua Função Resposta em Frequência é fornecer uma informação, normalmente em forma gráfica, do comportamento dinâmico do mesmo (Diniz, 1994). Na Resposta em Frequência, um sinal senoidal de amplitude constante é utilizado como entrada e caracteriza o transdutor pela determinação da variação da amplitude e da fase do sinal de saída em função da frequência do sinal de entrada. Para um sensor de “ordem zero” a fase e a amplitude do sinal não variam em

função da frequência, existe apenas a amplificação do valor do sinal de saída em relação ao sinal de entrada em função do ganho do sensor (Diniz et al., 2004).

A figura 3.1 mostra a Resposta em Frequência típica para sensores de primeira e segunda ordem, onde há uma variação da amplitude e da fase do sinal de saída em relação ao sinal de entrada em função da frequência. Em 3.1(a) o comportamento típico de um sensor de primeira ordem é mostrado, onde se pode perceber que a partir de um valor determinado de frequência (frequência de corte) a resposta do sensor começa a decrescer em relação ao sinal de entrada. Isto significa que a partir da frequência de corte o sensor atenua o sinal medido fornecendo uma informação errada. Em 3.1(b) a resposta em frequência dos sensores de segunda ordem é apresentada, onde se observa o fenômeno da ressonância, no qual próximo à frequência natural do sensor, ocorre uma amplificação do sinal de entrada para depois ocorrer uma atenuação acentuada. Deve-se notar que o comportamento dos sensores de ordem dois também é afetado pelo “coeficiente de amortecimento” do mesmo, que modifica o comportamento da resposta em frequência. Na figura 3.1(b) são mostradas as curvas para amortecimento de 0,4% e 1% (amortecimento crítico, a partir do qual não ocorre a amplificação do sinal devido à ressonância).

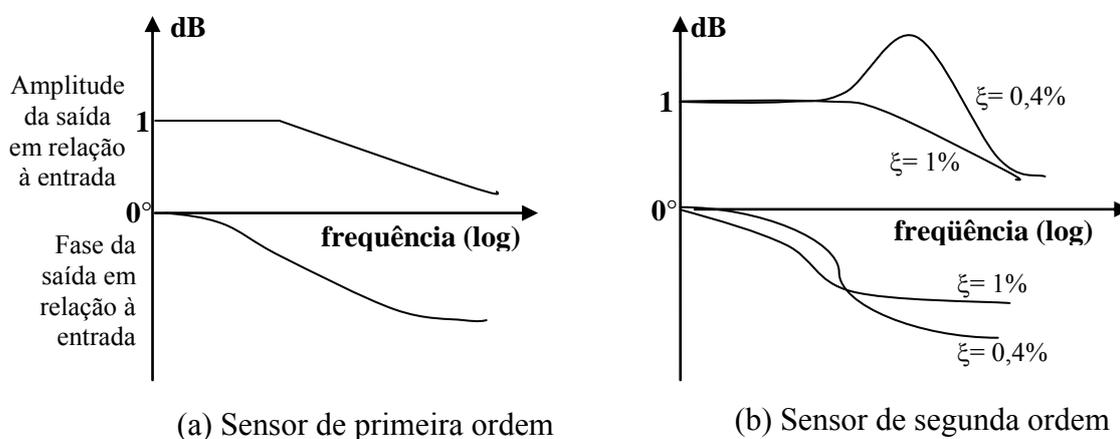


Figura 3.1 – Resposta em frequência típica de sensores de primeira e de segunda ordem (Diniz et al., 2004)

A Resposta em Frequência é particularmente usada para a caracterização de elementos sensíveis a sinais que variem periodicamente com pequenas amplitudes e baixas frequências. Em princípio, se a Resposta em Frequência de um sistema é conhecida, pode-se determinar a resposta deste sistema a qualquer entrada fisicamente realizável usando a Transformação Inversa de Fourier (Diniz et al., 2004).

Resposta ao Degrau

A determinação de um sinal $U(t)$, através da Resposta do Transdutor a um Degrau de entrada, é uma implementação mais simples e prática do conceito da Função Resposta ao Impulso. Trata-se de uma alternativa à Resposta em Frequência, sendo em alguns casos preferível a esta.

A Função Resposta ao Impulso é uma função $U_0(t)$ no tempo, que corresponde à resposta do sensor, transdutor ou outro elemento qualquer, a uma entrada do tipo impulso. Considerando a dificuldade de implementação de um impulso perfeito, ou mesmo de um pulso, utiliza-se a aplicação de um degrau de entrada (Diniz et al., 2004).

A Função Degrau é um sinal não periódico, fisicamente realizável e que por conter uma mudança brusca, e com patamar de longa permanência, permite testar a resposta do sistema de medição tanto com frequências baixas como altas. Se a resposta $U(t)$ de um sistema a um degrau de entrada é conhecida pode-se determinar a resposta do sistema para qualquer entrada não periódica com o uso, relativamente simples, da Integral de Convolução (Diniz et al., 2004).

Outras características dinâmicas de um sensor

Outras características dinâmicas de um sensor ou transdutor são conhecidas através dos chamados Parâmetros de Modelos Dinâmicos. São parâmetros que podem ser definidos a partir dos modelos matemáticos (parâmetros da Função de Transferência ou da Função Resposta em Frequência) que descrevem o comportamento do sensor, transdutor ou sistema e de uma forma mais simples caracterizam alguns aspectos do desempenho dinâmico do sistema considerado (Diniz, 1994).

Tempo de Resposta

Considerando-se que a resposta de um sensor ou sistema apresenta um transiente antes de atingir seu estado permanente, o tempo de resposta pode ser descrito como o tempo necessário para que um sensor ou sistema de medição atinja a resposta permanente quando recebe uma carga do tipo função degrau na entrada. Na prática toma-se o tempo de resposta como sendo o tempo necessário para a resposta do transdutor atingir 63% da resposta permanente esperada. Esse parâmetro indica a capacidade do sensor, transdutor ou sistema de medição em acompanhar mudanças rápidas no nível do sinal medido (Diniz et al., 2004).

Tempo de permanência

Um exemplo da variação da amplitude dos sinais de entrada e de saída para um transdutor é mostrada na figura 3.2. Ao comparar estes sinais, verifica-se que a saída do transdutor demora um tempo maior para atingir o valor máximo do degrau aplicado, voltando a decair após certo tempo. O tempo de permanência (ou de sustentação) é o tempo durante o qual o decaimento no valor medido representa uma pequena fração do valor da resposta permanente esperada. Esta fração é adotada por alguns autores como sendo 10%, de modo que o tempo de permanência é o tempo gasto entre o instante que a resposta do transdutor atinge 90% da resposta ideal até o instante em que, após atingir o valor superior ela volta a cair para 90% novamente (inclui o tempo de armazenamento), conforme ilustrado na figura 3.2 (Diniz et al., 2004).

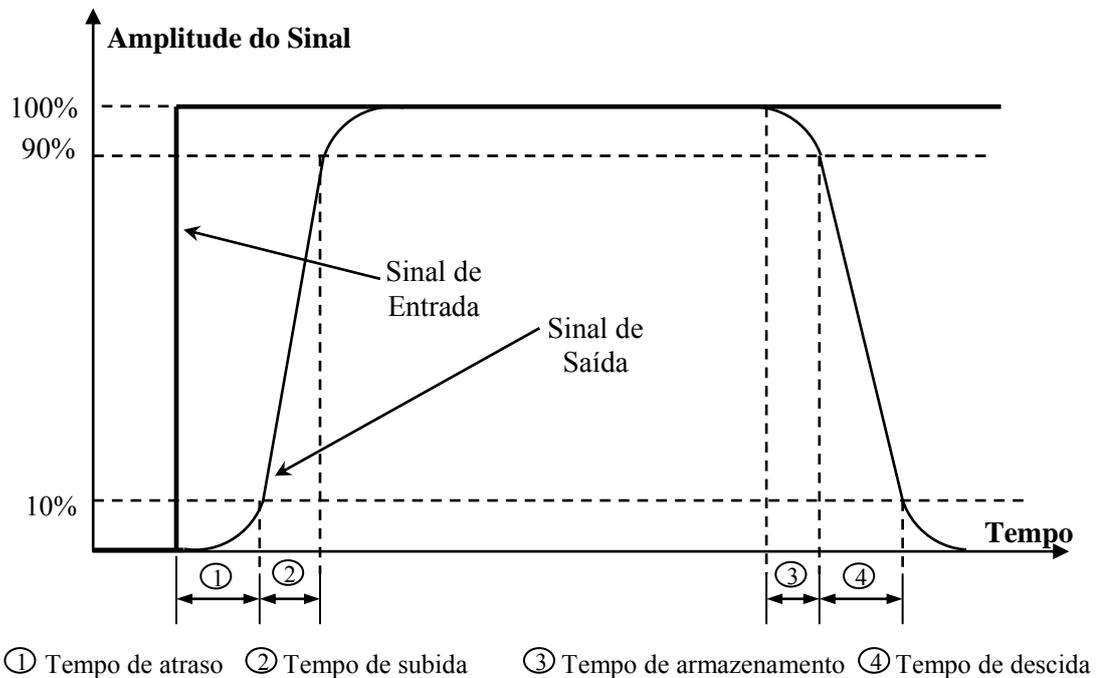


Figura 3.2 – Resposta de um transdutor a um degrau (Diniz et al., 2004)

Frequência de ressonância e frequência natural

A frequência de ressonância corresponde à frequência na qual o gráfico que representa a função resposta em frequência atinge o valor máximo para um dado coeficiente de amortecimento. Normalmente é confundida com a frequência natural do sistema, pois possuem valores próximos geralmente, mas apesar disto, o valor da frequência de ressonância depende do coeficiente de amortecimento do sistema enquanto a frequência natural independe deste (Diniz, 1994).

Para a caracterização de sensor, transdutor ou sistema de medição através da função de transferência onde apresentam comportamento de sistema de segunda ordem, os parâmetros fundamentais são a frequência de ressonância e o coeficiente de amortecimento que estão associados aos pólos da função de transferência (Diniz, 1994). A frequência natural de um sensor é uma informação importante em situações nas quais o sinal a ser medido é periódico, pois se o sinal medido coincide, ou está próximo da frequência natural do sensor, irá ocorrer uma amplificação do sinal medido pelo sensor, devido ao fenômeno da ressonância, levando a resultados errôneos (Diniz et al., 2004).

A escolha das características dinâmicas para caracterização de um sensor está relacionada com seu uso. Isto porque existem diferenças significativas no comportamento dos mesmos. A figura 3.3 apresenta os gráficos correspondentes às respostas para três tipos diferentes de transdutores de pressão quando submetidos a um degrau de entrada e exemplifica a limitação do uso dos parâmetros na caracterização de sensores ou transdutores. A especificação da Frequência Natural, por exemplo, é inútil no caso dos sensores com resposta em frequência do tipo mostrado na figura 3.3 (a), por não apresentar comportamento de sistema de segunda ordem. O Tempo de Resposta que é muito utilizado no caso de sensores com resposta do tipo mostrado em 3.3 (b), é pouco significativo no caso de sensores com resposta do tipo (c), já que a resposta permanente desse tipo de sensor é periódica (Diniz et al., 2004).

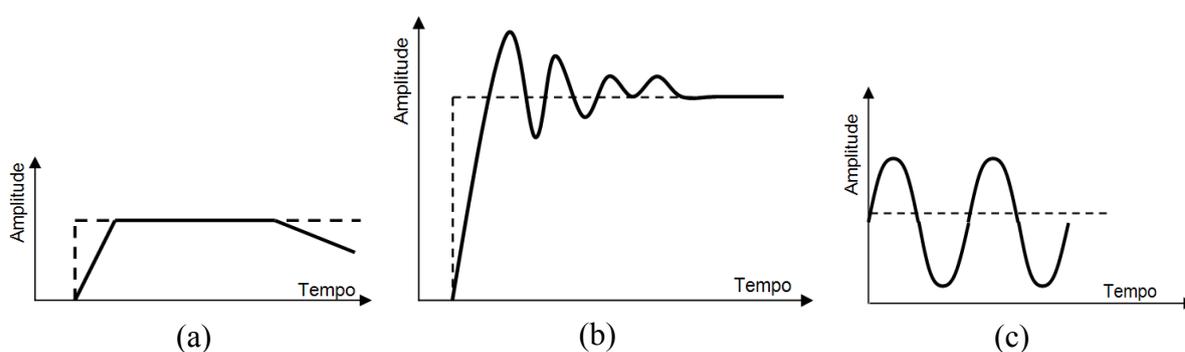


Figura 3.3 – Respostas típicas de alguns transdutores (Diniz et al., 2004)

Para os sensores ou transdutores comercializados, não se encontram expressões gráficas ou analíticas para a Resposta em Frequência ou para a Resposta ao Degrau. São poucos os fabricantes que fornecem especificações quanto ao Tempo de Resposta ou Frequência Natural de seus transdutores, sendo necessário se recorrer à calibração dinâmica desses sensores (Diniz et al., 2004).

3.3 - CALIBRAÇÃO

Os padrões de qualidade, recomendam procedimentos que visam assegurar a confiabilidade nas medições. Surge então a necessidade de calibração dos sistemas de medição como meio de garantir a qualidade exigida para os resultados das medições realizadas.

A calibração consiste numa operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação. Segundo o VIM, a calibração não deve ser confundida com o ajuste de um sistema de medição, freqüentemente denominado de maneira imprópria de “auto-calibração”, nem com a verificação da calibração. Para que a confiabilidade nas medições realizadas seja assegurada, é necessário a qualificação do sensor e do sistema de medição. Isto é garantido através da calibração (INMETRO, 2009).

3.3.1 - Calibração estática e calibração dinâmica

Os sistemas de medição estática são calibrados através de processos tradicionais e universalmente conhecidos, como por exemplo, o “testador de peso morto” conhecido também como “balança de pressão”, usados na calibração estática de manômetros e sensores de pressão desde 1890 (Diniz, 1994). No entanto esses processos não se aplicam à calibração de sistemas usados nas medições dinâmicas onde é necessário o conhecimento das características dinâmicas destes sistemas e não somente sua sensibilidade. Isto é viabilizado através da calibração dinâmica.

A calibração dinâmica envolve a determinação das características dinâmicas dos sensores e transdutores em regime transiente, ou seja, permite a caracterização da capacidade de resposta de um sensor, transdutor ou sistema de medição, em fenômenos de variação rápida no tempo, garantindo a confiabilidade das medições realizadas.

3.3.2 - Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas

A calibração e a determinação da incerteza de medição em Máquinas de Medir por Coordenadas ainda representa um desafio devido à complexibilidade de funcionamento, pois há um número infinito de possibilidades de medir um determinado

objeto baseado na aquisição de pontos no volume de trabalho dessas máquinas (Piratelli-Filho e Lesnau, 2010).

Os métodos atuais de calibração e verificação de MMCs não fornecem informações suficientes para a avaliação de incertezas de medição em tarefas específicas. Para avaliação dos erros nessas máquinas, fabricantes e laboratórios de calibração em geral se baseiam em normas e diretrizes internacionais de aceitação e verificação de máquinas de medir como a ISO 10360-2 (2000). Porém, esta norma e as normas nacionais similares não tratam de calibração, somente de verificação para ensaios bem definidos como erros para medição de comprimentos, posição e forma (Bosch, 1995; Oliveira e Souza, 2003).

Essas normas são utilizadas na comparação entre diferentes máquinas e servem como base para contratos de compra e venda. Por outro lado, os métodos de calibração que possibilitam a avaliação dos erros de uma MMC de forma completa são geralmente complexos. De acordo com Bosch (1995), para lidar com essa complexidade, existem três abordagens principais para avaliação das incertezas associadas às MMCs: o método comparador no qual são utilizados padrões calibrados como referência para comparação de objetos desconhecidos pela máquina; testes de desempenho, onde são utilizados artefatos padrões calibrados para avaliar o comportamento da máquina em medições específicas dentro do seu volume de trabalho; modelagens matemáticas, segundo as quais os erros e a incerteza de medição é determinada por simulação computacional, como a chamada CMM virtual que usa placas de esferas calibradas e uma série de simulações para avaliação de erros de medição.

Devido ao grande número de tarefas de medição possíveis de serem realizadas em uma MMC e às diversas estratégias de medição possíveis para cada tarefa específica, não é praticável a calibração de MMCs para todas as situações. Portanto, as calibrações de MMCs são realizadas para tarefas específicas de medição, onde tanto a tarefa como as estratégias de medição adotadas estão bem definidas. Dessa forma, os riscos de uma avaliação não realista das incertezas de medição são prováveis de ocorrer (Bosch, 1995; Oliveira e Souza, 2003).

Em função da complexidade e do volume de trabalho relativamente grande dos sistemas de medição por coordenadas, diferentes métodos de ensaios para avaliação do desempenho desses sistemas foram desenvolvidos. Estes testes são regidos por normas ou padrões, onde os mais conhecidos são a ISO 10360-2 (2000), o americano ANSI / ASME B89 (2004), o alemão VDI / VDE (1989), o japonês JIS / B7440 (1987) entre outros

(Piratelli-Filho e Giacomo, 2003). Os ensaios e padrões mais difundidos estão apresentados a seguir.

Ensaio geométricos convencionais

Os ensaios geométricos convencionais são realizados pelo fabricante ou pela assistência técnica para determinação das componentes de erros da MMC. Para se obter resultados satisfatórios neste tipo de ensaio, se faz necessário padrões específicos e mão de obra especializada para realização dos testes e interpretação dos resultados. Padrões como laser interferométrico, esquadros, réguas, padrão escalonado, nível eletrônico e auto colimador já estão bem difundidos na indústria para a realização de ensaios do tipo posicionamento, perpendicularidade, retitude e inclinação nas MMCs (Klen, 2000).

Blocos padrão e padrões escalonados

Consiste na medição de blocos padrão de vários comprimentos ou insertos do padrão escalonado em diversas orientações dentro do volume de trabalho da MMC, garantindo-se com isto que a máquina está calibrada para medições de distâncias entre pontos nas disposições ensaiadas para comprimentos limitados ao do padrão de ensaio.

A Figura 3.4 mostra um padrão escalonado sendo medido por uma MMC onde é possível observar as possibilidades de posicionamento do padrão escalonado ou dos blocos padrão dentro do volume de trabalho da máquina, nos eixos e nas suas diagonais planas, para a execução do ensaio (Klen, 2000).

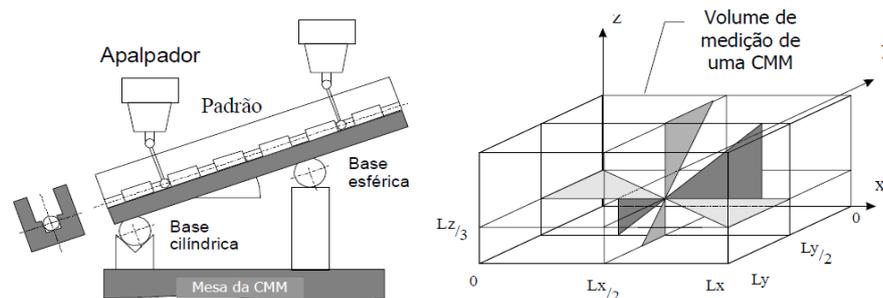


Figura 3.4 – Medição de um padrão escalonado e o posicionamento nos eixos e diagonais planas de uma MMC dentro do volume de medição (Klen, 2000)

O padrão barra de esferas

O padrão barra de esferas consiste na configuração de barra rígida com duas esferas fixadas nas suas extremidades que permite medir pontos do espaço distribuídos de forma esférica (Piratelli-Filho, 1997). As esferas utilizadas nesta construção devem ser

calibradas com erros de esfericidade bem pequenos (próximo a $0,1 \mu\text{m}$). Esta calibração é feita seguindo procedimentos normalizados para garantir a rastreabilidade para a verificação das distâncias entre os centros das esferas. O erro de esfericidade encontrado no ensaio, juntamente com a distância entre centros das esferas, fornece um parâmetro para acompanhamento periódico da MMC (Veiga, 1997). As vantagens de seu uso estão relacionadas a características como a facilidade de manuseio, peso reduzido e baixo custo, permitindo rapidez e simplificação nos procedimentos de calibração (Piratelli-Filho, 1997).

O padrão barra de esferas virtuais

O padrão barra de esferas tem grande aceitação por ser mais fácil de manusear, o que facilita seu emprego em volumes de trabalho onde seria difícil o uso de outros tipos de padrões. Porém, quando comparado com o padrão placa de esferas, este padrão não oferece grande quantidade de dados constituindo uma desvantagem uma vez que a finalidade da tarefa é obter a maior quantidade de informação dos pontos captados pela MMC. Outra desvantagem do padrão barra de esfera se dá devido à necessidade de excelente acabamento superficial das esferas da barra o que faz com que seu custo seja alto, quando comparado com padrões retilíneos. Para suprir essas deficiências foi desenvolvido um padrão não convencional de barra de esferas virtuais cujos benefícios principais estão relacionados ao baixo custo e a inexistência de erro de esfericidade. Para isto foram utilizados furos cônicos não co-planares em uma barra de seção transversal quadrática, onde oito furos (quatro em cada extremidade da barra) geram duas esferas virtuais. Os furos cônicos servem para orientação do apalpador auxiliando-o a não capturar pontos fora da superfície. O padrão barra de esferas virtuais é ilustrado na figura 3.5. Sem o uso de esferas reais, o custo deste padrão é bem menor comparado com o convencional padrão de esferas.

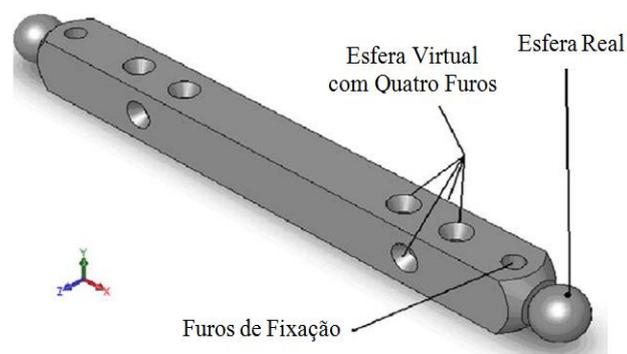


Figura 3.5 – Padrão Barra de Esferas Virtuais (Piratelli-Filho e Lesnau, 2010)

O padrão placa de esferas

O padrão placa de esferas é tridimensional (3D). Isto quer dizer que em uma avaliação metrológica de uma MMC, com um número menor de posicionamentos deste padrão (em relação ao padrão unidimensional) dentro do volume de medição da máquina, consegue-se uma amostragem mais abrangente da MMC. Isto é devido ao maior número de comprimentos medidos, o que representa vantagem em relação aos blocos padrão e padrões escalonados (Klen, 2000). Este padrão tridimensional pode ser empregado em aceitação, verificação e calibração das MMCs. A figura 3.6 ilustra este padrão que é construído, normalmente, por um conjunto de $5 \times 5 = 25$ esferas, cujas posições das coordenadas no plano XY são determinadas através de um processo de calibração.

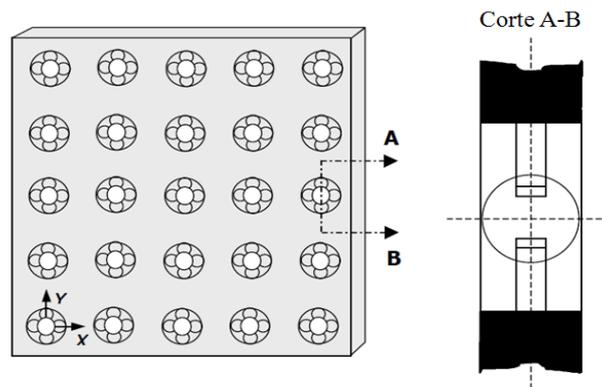


Figura 3.6 – Placa de esferas 5x5 e o alojamento da esfera na placa (Klen, 2000)

Os erros são calculados na medição de distâncias entre os centros das esferas bem como na determinação da posição das esferas. Uma importante vantagem das placas consiste em fornecer uma grande quantidade de informação para uma mesma posição de fixação. Isto é viabilizado pelas várias esferas distribuídas o que permite que o apalpador tenha uma maior área para deslocamento na coleta de dados. A limitação do uso deste padrão está associada ao elevado custo de construção e calibração.

Ensaio da incerteza de apalpação

Ensaio da Incerteza de Apalpação são ensaios realizados com esfera e anel padrão, visando avaliar erros do apalpador assim como os efeitos dinâmicos da medição. Considerando que a esfera padrão tenha um erro desprezível, a incerteza é avaliada pelo erro resultante na medição do conjunto de pontos. A figura 3.7 mostra os sentidos de apalpação em um anel e em uma esfera padrão para ensaio da incerteza de apalpação.

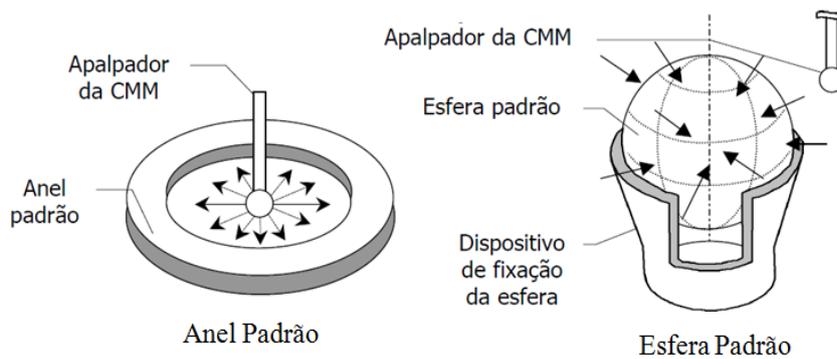


Figura 3.7 – Anel e esfera usados nos ensaios da incerteza de apalpação (Klen, 2000)

Ensaio com outros objetos padrão

Ensaio com objetos padrão de três dimensões podem ser feitos para verificar os erros e o desempenho de uma MMC (Piratelli-Filho, 1997). Para isto estes objetos devem ser calibrados. A figura 3.8 mostra um cubo com esferas, usado neste tipo de ensaio. De acordo com Klen (2000), o uso do cubo é preferível comparado com os objetos de uma ou duas dimensões devido, principalmente, ao fato de que em uma única posição do padrão, é possível uma análise em três dimensões no volume de trabalho da MMC. No entanto, o alto custo envolvido na sua construção e calibração, restringe seu uso à medição de peças de geometria complexa (Piratelli-Filho, 1997).



Figura 3.8 – Padrão cubo com esferas de cerâmica (Klen, 2000)

Método da MMC virtual

O método da MMC virtual consiste basicamente de duas etapas onde a primeira envolve o levantamento dos erros geométricos através de medições e ensaios com o apalpador e a segunda etapa consiste em simulações computacionais das condições nas medições específicas, como por exemplo, configurações de apalpadores, influências do ambiente e estratégias de medição, ou seja, estas simulações estimam os erros que a

máquina comete na execução de uma medição específica (Trapet e Wäldele, 1995). Este é um dos métodos mais modernos utilizado na avaliação de desempenho de MMCs e os passos para sua aplicação estão mostrados na figura 3.9.

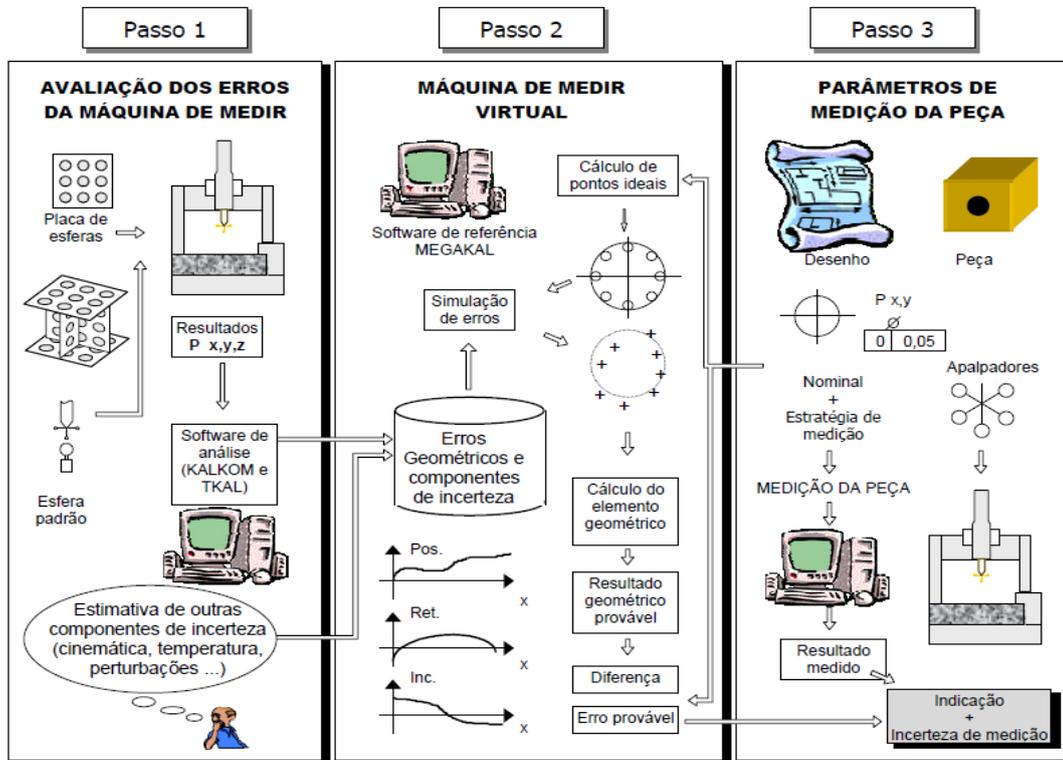


Figura 3.9 – Avaliação da incerteza de medição usando MMC virtual (Klen, 2000)

Considerações sobre calibração de MMCs

Recentemente um trabalho publicado por Piratelli-Fillho e Lesnau (2010) apresentou uma revisão com artefatos desenvolvidos com o objetivo de avaliar o desempenho das MMCs. Atualidades na metrologia científica têm demonstrado crescente preocupação com a confiabilidade nas medições por coordenadas que vêm sendo requeridas cada vez mais pelos processos industriais. Novos desenvolvimentos têm sido frutos de pesquisas visando métodos para avaliar erros nesses sistemas de medição fornecendo assim os parâmetros metrológicos requeridos nas aplicações atuais.

3.4 - PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O Planejamento de Experimentos (Design of Experiments - DOE, em inglês) em estatística, designa toda uma área de estudos que desenvolve técnicas de realização de ensaios e análise de resultados dos experimentos. O experimento projetado ou planejado é

um teste ou uma série de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de maneira que seja possível observar e identificar as causas das mudanças nas variáveis de saída (respostas).

De acordo com Montgomery (2001), a realização de um planejamento experimental deve ter três princípios básicos: replicação, aleatorização e blocagem que são por ele definidos, como segue.

Replicação

A replicação consiste em repetir um experimento básico visando à estimativa do erro experimental e a precisão do nível de efeito causado por um dado fator. A repetição de cada ensaio é necessária para estimar a variabilidade presente numa mesma condição experimental. Cada fator pode ter um ou mais níveis ou tratamentos e cada nível ou tratamento representa uma configuração específica de um dado fator que é submetida a ensaio.

Aleatorização

Aleatorização significa que tanto a alocação do material experimental quanto a ordem de execução dos testes são aleatoriamente determinadas. Os métodos estatísticos exigem que as observações sejam variáveis aleatórias independentemente distribuídas. A correta aleatorização do experimento permite minimizar o efeito de fatores imprevistos ou condições iniciais.

Blocagem

A blocagem (divisão da unidade experimental em blocos) pode ser entendida como a divisão do conjunto total de ensaios em subgrupos, dentro dos quais as condições experimentais são mais homogêneas que as condições gerais do experimento. É uma técnica de planejamento usada para melhorar a precisão com a qual comparações entre fatores e níveis de interesse são feitas. Frequentemente a blocagem é usada para reduzir ou eliminar a variabilidade transmitida pelos fatores conhecidos e controláveis que podem influenciar o resultado do teste, mas nos quais não se está diretamente interessado. Cabe ressaltar que se a variabilidade entre blocos é a mesma que dentro dos blocos, então a blocagem não deve ser usada porque resulta na diminuição do número de graus de liberdade e conseqüentemente, no alargamento do intervalo de confiança (Montgomery, 2001).

3.4.1 - Planejamentos fatoriais e fatoriais fracionários

Quando em um experimento há vários fatores de interesse, um Planejamento Fatorial deve ser usado. Trata-se de um planejamento nos quais os fatores variam conjuntamente. Especificamente, um experimento fatorial consiste na investigação de todas as possíveis combinações dos níveis dos fatores em cada tentativa ou replicação completa do experimento (Hines et al., 2006). Assim, apesar da vantagem de possibilitar a verificação de efeitos de interação entre as variáveis, pois cada replicação contém todas as possíveis combinações de tratamento, isto torna o número de ensaios muito grande. Para diminuir o número de ensaios em um experimento, surgiu o experimento fatorial fracionado que é uma variação do planejamento fatorial básico e consiste na execução de um número menor de ensaios em relação ao fatorial correspondente, implicando na perda de informações sobre as variáveis devido à presença de efeitos acoplados. A figura 3.10 mostra graficamente a interação entre duas variáveis.

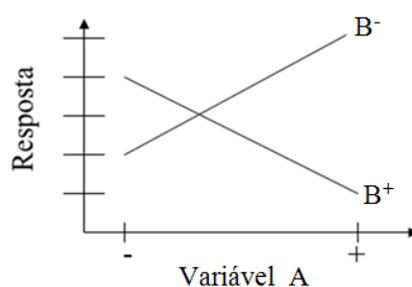


Figura 3.10 – Representação da interação entre as variáveis A e B

Para Montgomery (2001), um processo em análise é uma combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam alguma entrada (normalmente um material) em uma saída com uma ou mais respostas observáveis. Segundo esse autor, algumas variáveis desse processo são controláveis enquanto outras são incontroláveis. Para ele, os objetivos de um experimento podem incluir a determinação das variáveis que mais influenciam a saída e de como controlar essas variáveis. Uma estratégia tradicional de experimentação é a abordagem de um fator de influência por vez, ou seja, variar apenas um dos fatores identificados mantendo todos os outros constantes e os resultados colocados em gráficos da saída em função do fator. Entretanto esse método deixa de considerar uma possível interação entre os fatores.

Montgomery (2001) garantiu ainda que a abordagem correta para lidar com vários fatores é a realização de experimentos fatoriais de forma que os fatores sejam variados juntos ao invés de um por vez. Os resultados, para o caso de dois fatores, por exemplo, são

colocados em gráficos de um fator em função do outro fator e, através de cálculos envolvendo os resultados obtidos em cada configuração, pode-se concluir se um fator é mais importante que outro ou mesmo se há interação entre os dois. De modo geral, para k fatores, cada um com dois níveis possíveis, o projeto fatorial requer 2^k testes (Box, Hunter e Hunter, 1978).

Alguns conceitos básicos, utilizados em planejamento de experimentos e análise de variância, são apresentados na seqüência.

Experimento aleatório

Define-se por experimento qualquer processo de observação. Um experimento é dito aleatório quando seus resultados estão sujeitos unicamente à casualidade. Quando o experimento é executado repetidas vezes, os resultados surgirão seguindo uma configuração definida ou regularidade. É essa regularidade que torna possível construir um modelo matemático preciso com o qual se analisará o processo.

Tratamento, fator e nível

Um tratamento é uma condição imposta ou objeto que se deseja medir ou avaliar em um experimento. Normalmente, em um experimento, é utilizado mais de um tratamento. Cada tipo de tratamento pode ser chamado de um fator e podem ser quantitativos (quando podem ser dispostos em uma ordem) e qualitativos (quando não podem ser dispostos numa ordem). Fator é a variável que pode estar influenciando a característica da qualidade de interesse. Cada um dos diferentes modos de presença de um fator é denominado nível do fator. Quando há somente um fator, os níveis são também denominados tratamentos. A cada tratamento está associada uma população.

Variável aleatória, contínua e distribuição de probabilidade

Variável aleatória é uma variável que tem um valor numérico, determinado por acaso, para cada resultado de um experimento, ou seja, é uma variável quantitativa, cujo resultado (valor) depende de fatores aleatórios. Uma variável aleatória discreta tem uma quantidade enumerável de valores, onde “enumerável” se refere ao fato de que podem existir infinitos valores, mas que podem ser associados a um processo de contagem. Uma variável aleatória contínua tem infinitos valores, e esses valores podem ser associados com medidas em uma escala contínua, interrupções.

O planejamento fatorial 2^k

Certos tipos de planejamentos fatoriais são muito úteis. Um deles é o planejamento fatorial com k fatores, cada um em dois níveis, que foi utilizado para o experimento que será apresentado no capítulo 5 desta dissertação. Neste caso, cada replicação completa do experimento tem 2^k combinações de tratamento formando um arranjo chamado planejamento fatorial 2^k .

A escolha do planejamento experimental e a realização de um experimento implicam numa série de considerações que devem ser feitas a fim de alcançar o objetivo do experimentador. Montgomery (2001) recomendou uma sequência de passos para facilitar o processo:

1. Definição do problema e do objetivo dos ensaios;
2. Escolha dos fatores, de seus níveis (dois é o ideal) e faixas (quanto maior melhor);
3. Seleção da variável de resposta;
4. Escolha do planejamento experimental (tamanho da amostra e número de replicações; ordem dos ensaios; blocagem e aleatorização);
5. Execução dos testes (experimentos);
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Estatística básica

As técnicas estatísticas têm sido muito utilizadas por pesquisadores na avaliação de erros no desempenho das MMCs (Piratelli-Filho e Giacomo, 2003). Para análise de dados experimentais, tradicionalmente se emprega a distribuição normal de probabilidade (também conhecida como distribuição de Gauss ou distribuição Gaussiana) que é amplamente utilizada para descrever erros experimentais.

A Probabilidade trata dos estudos do comportamento dos fenômenos aleatórios ou não-determinísticos. Uma distribuição de probabilidade pode ser apresentada em um gráfico, uma tabela ou uma fórmula, fornecendo a probabilidade para cada valor da variável aleatória considerada. A forma, ou aspecto, da distribuição normal de probabilidade é ilustrado por uma curva em forma de sino. A figura 3.11 mostra esta curva que pode ser descrita matematicamente pela equação 3.17. Nesta expressão, a função $f(y)$

corresponde à função densidade de probabilidade, o valor μ corresponde à média e o valor σ corresponde ao desvio padrão da distribuição.

$$f(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.17)$$

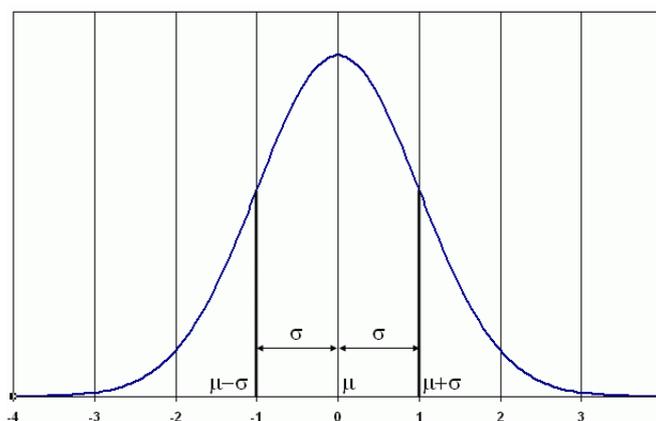


Figura 3.11 – Curva de distribuição normal de probabilidades

A determinação dessa distribuição exige o conhecimento da média e do desvio padrão σ da amostra de tamanho N . Para o caso da amostra ser finita e acessível, estas estatísticas podem ser calculadas pelas expressões 3.18 e 3.19.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (3.18)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \mu_i)^2}{N}} \quad (3.19)$$

Com os parâmetros μ e σ da distribuição conhecidos, a probabilidade de encontrar valores entre dois pontos quaisquer no eixo das abscissas pode ser calculada e corresponde à área sob a curva. A área no intervalo entre $\mu \pm \sigma$ equivale a uma probabilidade de 68%, entre $\mu \pm 2\sigma$ equivale a 95% e entre $\mu \pm 3\sigma$ equivale a 99,7%. Os valores do fator k , adotados para determinar a incerteza expandida, estão associados às probabilidades destes intervalos.

Para Werkema, Drumond e Aguiar (1996), a maneira mais simples de se verificar a validade da suposição de distribuição normal consiste na construção de um histograma dos dados da amostra e verificar, visualmente, se a figura tem a forma de sino da distribuição normal. Esta análise gráfica inicial fornece evidências sobre o comportamento dos resultados, como a forma da distribuição, a localização da média, a dispersão e as

tendências verificadas em torno do valor médio. Este método, no entanto, tem a forte restrição de ser válido apenas para amostras grandes (número de amostra ≥ 30). Deste modo, situações onde o tamanho da amostra é pequeno requerem métodos alternativos para verificação da suposição da normalidade. Dentre esses métodos destaca-se o gráfico de probabilidade normal onde são grafadas nas abcissas os dados da amostra e nas ordenadas, a porcentagem acumulada correspondente à ocorrência na amostra de valores menores ou iguais a cada resultado. Esta distribuição apresenta média zero e desvio padrão igual a 1. A figura 3.12 mostra esse tipo de gráfico onde os dados vêm de uma distribuição normal quando os pontos colocados no papel de probabilidade normal ajustam-se aproximadamente a uma linha reta passando pela maioria dos pontos.

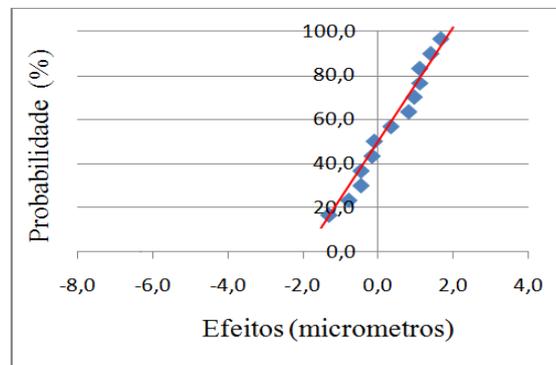


Figura 3.12 – Gráfico de probabilidade normal para pequenas amostras

Gráficos que apresentam fortes desvios do padrão linear indicam que os dados não vêm de uma distribuição normal. Nesse caso, as técnicas estatísticas como a análise de variância podem ser aplicadas desde que os dados da variável medida sejam transformados através de equações matemáticas que levam a uma distribuição normal dos dados transformados (Box, Hunter e Hunter, 1978).

3.4.2 - Análise de variância

A Análise de Variância (Analysis of Variance - ANOVA) é um procedimento utilizado para comparar simultaneamente três ou mais tratamentos. Segundo Werkema, et al. (1996), os dados utilizados na análise devem refletir a influência de mudanças ocorridas nos fatores (causas) de interesse sobre a variável resposta do processo considerado. Sua aplicação envolve o desmembramento da variância dos resultados obtidos (s^2) em estimativas das variâncias entre amostras (s^2_{entre}) e dentro das amostras (s^2_{dentro}).

A expressão matemática para o cálculo da variância de um conjunto de dados experimentais (s^2) abrange a razão entre a soma dos quadrados dos desvios de cada valor em relação à média \bar{y} de todos os dados (SQT) e o número total de graus de liberdade (GLT). As expressões 3.20 e 3.21 determinam a soma de quadrados total e a variância total dos dados, respectivamente.

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (3.20)$$

$$s^2 = \frac{SQT}{GLT} \quad (3.21)$$

É possível desmembrar a variância s^2 a partir da soma de quadrados total (SQT). Desse modo, adicionando-se e subtraindo-se a média amostral na equação 3.20, pode-se demonstrar que as duas somas de quadrados resultam como nas expressões 3.22 e 3.23 as quais representam os desvios dentro e entre as amostras.

$$SQ_{dentro} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (3.22)$$

$$SQ_{entre} = \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.23)$$

Ao efetuar a divisão das somas de quadrados pelos respectivos números de graus de liberdade, se obtêm as estimativas das variâncias entre e dentro das amostras. Estas estimativas são chamadas de quadrados médios.

O número de graus de liberdade entre as amostras é igual ao número de amostras menos um ($k-1$) e o número de graus de liberdade dentro da amostra é igual ao número de amostras (k) vezes o número de réplicas (r) por amostra menos um [$k(r-1)$]. O número de graus de liberdade dentro das amostras pode ser calculado ainda pela diferença entre o número de graus de liberdade total ($N-1$) e o número de graus de liberdade entre as amostras [$k(r-1)$].

Como a finalidade da análise de variância é comparar as variâncias entre amostras, o quadrado médio que representa a variação dentro das amostras é denominado de erro experimental ou resíduo.

A comparação dos valores de quadrados médios é realizada admitindo-se uma hipótese inicial H_0 de que as médias obtidas nas amostras são iguais ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots \mu_k$). Quando o quadrado médio entre amostras apresenta um valor bem superior ao quadrado

médio dentro das amostras, esta hipótese pode ser rejeitada. Porém, esta decisão deve ser tomada considerando a teoria da probabilidade, e por este motivo envolve a realização do teste F de Snedecor, baseado na distribuição amostral da razão F entre duas variâncias.

O teste F relaciona os dois quadrados médios, conforme a equação 3.24. O valor F obtido através desta equação é comparado com valores de F tabelados em função do número de graus de liberdade das variâncias e do nível de confiança desejado (probabilidade de 95% ou 99%).

$$F_{1,2} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (3.24)$$

O valor de F tabelado é proveniente de uma distribuição de probabilidade da razão entre variâncias de duas amostras, extraídas ao acaso de uma mesma população com distribuição normal de variância σ^2 . Os resultados da análise de variância são apresentados através de um quadro, como mostrado na tabela 3.1. Para que os resultados encontrados sejam válidos, é necessário que os dados apresentem distribuição normal e que as variâncias dentro das amostras sejam aproximadamente iguais.

Tabela 3.1 – Quadro de análise de variância

Fonte de Variação (FV)	Soma de Quadrados (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	Razão entre QM (F)
Entre (Efeito)	SQ_{entre}	(k-1)	QM_{entre}	F = QM_{entre}/QMR
Dentro (Resíduo)	SQ_{dentro}	k*(r-1)	QMR	
Total	SQT	(N-1)		

Uma vez que é possível ajustar um modelo matemático por análise de regressão, estes pré-requisitos podem ser verificados pela análise gráfica dos resíduos. As conclusões extraídas em testes de hipóteses, como o teste F das variâncias amostrais, estão baseadas em curvas de distribuição de probabilidades. Dois erros podem ser cometidos: erro do tipo I e erro do tipo II. O erro do tipo I é o erro que é cometido quando a hipótese inicial H_0 é verdadeira e o teste permite concluir pela sua rejeição. A probabilidade de cometer este tipo de erro pode ser controlada pela seleção da confiança estatística desejada, na realização do teste de hipóteses. Desse modo, se a confiança escolhida for 99%, a probabilidade de rejeitar uma hipótese verdadeira é de 1%. O erro do tipo II é cometido quando a hipótese H_0 é falsa e o teste permite concluir pela sua aceitação. A probabilidade

de se cometer este erro é designada por β e depende do tamanho da amostra, do desvio padrão amostral e da grandeza da diferença entre médias considerada para rejeitar a hipótese de igualdade entre médias.

As componentes de variância podem ser determinadas através da análise de variância, desde que a variável (ou variáveis) seja aleatória. A análise de variância pode ser utilizada para verificar o efeito de uma série de variáveis aleatórias, agindo ao mesmo tempo em um instrumento de medição, e estimar as componentes de variância de cada variável. A análise de variância permite concluir com grau de confiança conhecido, se existem ou não diferenças entre duas ou mais médias amostrais (Box, Hunter e Hunter, 1978; Werkema, et al., 1996 e Montgomery, 2001).

Análise dos resíduos e verificação do modelo

O modelo da análise de variância de um critério, de acordo com Hines et al. (2006), supõe que as observações sejam distribuídas normal e independentemente, com a mesma variância em cada tratamento ou nível do fator. Essas hipóteses devem ser verificadas pelo exame dos resíduos. Um resíduo é definido pela equação 3.25, isto é, a diferença entre uma observação e a média do tratamento correspondente.

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_i \quad (3.25)$$

Em qualquer experimento planejado, é sempre importante examinar os resíduos e verificar violações das hipóteses básicas que possam invalidar os resultados (Box, Hunter e Hunter, 1978; Montgomery, 2001 e Hines et al., 2006).

A ANOVA encontra grande aplicabilidade em metrologia, sendo seu uso ratificado na atualização de 2008 do GUM para identificação e quantificação de efeitos aleatórios individuais em uma medida, para que estes efeitos sejam devidamente considerados na avaliação da incerteza do resultado da medição. Embora a ANOVA seja usada em uma série de procedimentos para calibração, análise de erros e avaliação da incerteza, este método por si só não pode identificar os efeitos sistemáticos que podem estar presentes no processo de medição (JCGM, 2008).

4. ESTUDOS DE CASOS EM CALIBRAÇÃO DINÂMICA E CALIBRAÇÃO DE MMC

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. Diante desta necessidade, os Laboratórios de Metrologia (LM) e Metrologia Dinâmica (LMD) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília têm desenvolvido ações e pesquisas no sentido de aplicar os princípios do GUM (JCGM - ISO, 2008) 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.

Neste capítulo são estudados alguns casos em calibração dinâmica e descritos os equipamentos e metodologias desenvolvidos no LMD, avaliando-se os procedimentos usados no cálculo de incertezas. Apresentam-se também as metodologias de calibração e testes desenvolvidos no LM para o desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas, avaliando-se os aspectos técnicos ligados aos equipamentos e metodologias que afetam as grandezas de influência. Espera-se assim prover um registro que compila as várias realizações destes laboratórios nos últimos anos e contribuir apontando direções para futuros trabalhos.

4.1 - ESTUDOS DE CASOS EM CALIBRAÇÃO DINÂMICA

No intuito de fornecer contribuições para melhorar a qualidade das medições dinâmicas, o Grupo de Dinâmica de Sistemas - GDS desenvolve ações visando a criação de métodos e o desenvolvimento de meios metrologicamente confiáveis para realizar a calibração dinâmica de sensores de pressão e temperatura, bem como técnicas numéricas e experimentais para a análise modal de estruturas complexas.

Como resultados das ações do GDS foram produzidos e publicados mais de 50 trabalhos entre projetos de iniciação científica e graduação, dissertações de mestrado, teses e artigos científicos. Alguns destes trabalhos encontram-se relacionados no apêndice A. As experiências desenvolvidas pelo GDS no Laboratório de Metrologia Dinâmica da

Universidade de Brasília (LMD-UnB) referem-se à calibração dinâmica de sensores de temperatura e sensores de pressão com o objetivo de determinar seu comportamento dinâmico, com níveis de confiabilidade elevados, comparando a resposta dinâmica do sensor a um sinal padrão de referência que varie dinamicamente no tempo, que seja confiável e que permita a repetitividade de experiências.

4.1.1- Calibração dinâmica de sensores de temperatura

Os sensores de temperatura como os termômetros são conhecidos por apresentarem um grande tempo de resposta, pois é necessário uma equalização da temperatura do meio e do elemento sensor. Os termopares, devido suas pequenas dimensões, apresentam um tempo de resposta menor e podem ser utilizados em medições dinâmicas.

A calibração dinâmica de termopares visa a determinação de seu tempo de resposta visto que o modelo dinâmico de seu comportamento físico é dado por uma equação de primeira ordem (caso dos termopares não encapsulados). Assim, uma forma de realizar a calibração dinâmica de termopares é submetendo-os a um degrau de temperatura. Entretanto deve-se garantir que o tempo de subida da temperatura seja bem pequeno, se aproximando de um degrau perfeito, de modo a se cobrir uma faixa maior de frequências de utilização.

Para isso foi desenvolvida no LMD a Cuba Rotativa. Trata-se de um dispositivo experimental que possibilita a realização de ensaios de calibração de sensores de temperatura em regime dinâmico, cujos componentes principais são representados na figura 4.1: o motor, as cubas (interna e externa) e o cilindro pneumático, através do qual o sensor é mergulhado ou desmascarado para exposição à veia líquida. Sua principal finalidade é excitar sensores de temperatura através das técnicas de mergulho e desmascaramento do sensor em meio líquido com temperatura superior a do sensor a calibrar, possibilitando o controle do coeficiente convectivo de transferência de calor por meio do monitoramento da velocidade angular das cubas coaxiais e gerando um degrau de temperatura.

A Cuba Rotativa provoca um aumento do coeficiente convectivo do meio no qual é realizada a calibração dinâmica, possibilitando um eventual desacoplamento entre o sensor e este meio. Assim a resposta dinâmica do sensor de temperatura será influenciada apenas por características inerentes à sua própria construção (Diniz et al., 2004). A análise

da resposta dinâmica foi realizada através do estudo da variação da constante de tempo do sensor provocada pela variação do coeficiente convectivo do meio.

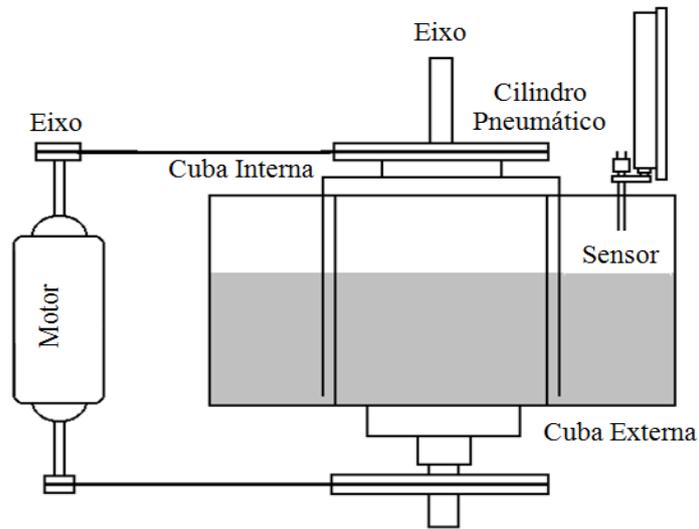


Figura 4.1 – Esquema da Cuba Rotativa do LMD - UnB (Neto, 1995)

Como os sensores, com o elemento sensível exposto, costumam romper-se devido a desaceleração do cilindro pneumático no fim do curso, para preservar a integridade do elemento sensível, a exposição do sensor ao degrau de temperatura é feita por meio do dispositivo de desmascaramento.

A figura 4.2 mostra o desenho esquemático do dispositivo de desmascaramento. Esse dispositivo permite que o sensor seja instalado diretamente dentro da veia líquida da cuba rotativa, evitando assim grandes impactos durante o mergulho e consiste em uma máscara de ar pressurizado, que mantém o sensor na temperatura ambiente isolado do líquido aquecido. Esta máscara está ligada a um cilindro pneumático que permite o desmascaramento do sensor, com grande velocidade, estabelecendo o contato com a veia líquida e possibilitando assim a geração do degrau de temperatura (Diniz et al., 2006).

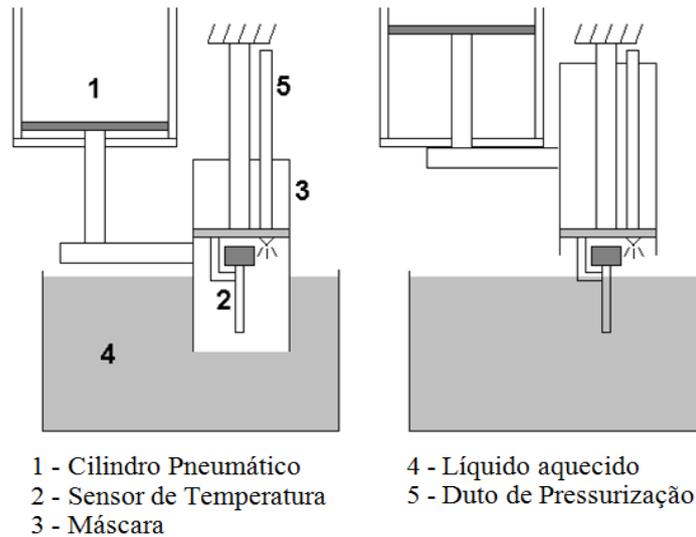


Figura 4.2 – Dispositivo de desmascaramento (Diniz et al., 2006)

Uma particularidade do sistema de cubas rotativas é a relação de velocidades angulares entre as cubas interna e externa. A cuba interna gira a uma velocidade angular ω_1 igual a duas vezes a velocidade angular da cuba externa ω_2 . Esta característica de montagem é decorrente da necessidade de uma mesma velocidade tangencial ao longo da seção de testes, pois o raio da cuba interna ($r_1=150\text{mm}$) é igual à metade do raio da cuba externa ($r_2=300\text{mm}$) (Diniz et al., 2004).

4.1.2 - Quantificação de incertezas na calibração de sensores de temperatura

Para se determinar a Função de Resposta do termopar com confiança metrológica, é necessário aplicar o GUM a cada ponto da curva. Essa necessidade levou o LMD a desenvolver um software para adquirir os pontos (valor medido) e calcular as incertezas, segundo o GUM, para cada ponto adquirido. Nos trabalhos de Vianna e sua equipe, 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.

A função modelo da medição dinâmica de temperatura na cuba é representada pela equação 4.1 e relaciona a tensão produzida nos terminais de um termopar com as demais grandezas de influência da medição (Vianna et al., 2003).

$$V_T = \frac{V_L}{G} - V_O + \frac{\delta T_{dif}}{\kappa_q} + \frac{\delta T_U}{\kappa_q} - \frac{\delta T_f}{\kappa_f} + \frac{\delta V_R}{G} - \gamma \cdot \delta T_{amb} \quad (4.1)$$

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 [°C];

δT_U = erro associado à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa [°C];

δT_f = desvio da temperatura da junta fria em relação ao ponto de referência 0°C [°C];

κ_q = sensibilidade estática do termopar na temperatura da junta quente [°C/mV];

κ_f = sensibilidade estática do termopar na temperatura da junta fria [°C/mV];

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

γ = coeficiente de temperatura do amplificador [mV/°C]; δT_{amb} = erro associado a variações na temperatura ambiente [°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.

Considerando a calibração dinâmica de um termopar de junta exposta usando a cuba rotativa mostrada na figura 4.1, tem-se que 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 - $V_O = 50,49 \text{ mV} \pm 2,30 \text{ mV}$, $G = 101,66 \text{ mV/mV}$ 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 $\pm 0,05^\circ\text{C}$ (Vianna et al., 2003).

O cálculo da incerteza é feito aplicando os princípios do GUM e considerando o modelo da equação 4.1 para expressão da temperatura em função das grandezas de influência. A Tabela 4.1 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 equação 4.1.

Tabela 4.1 – Resultado das grandezas de influências e da incerteza associada à tensão do termopar em um ponto no tempo ($t=0,55430\text{s}$) (Vianna et al., 2003)

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Tipo de Avaliação da Incerteza	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)[\text{mV}]$
V_L	196,80945 mV	1,10404 mV	A	0,00985	0,01087
V_O	0,07756 mV	0,00109 mV	B	-1,00000 mV	-0,00109
δT_{dif}	0,15628 $^\circ\text{C}$	0,09975 $^\circ\text{C}$	A	0,04039 mV	0,00403
δT_U	0,02518 $^\circ\text{C}$	0,00450 $^\circ\text{C}$	A	0,04039 mV	0,00018
δT_f	0,00000 $^\circ\text{C}$	0,05774 $^\circ\text{C}$	B	-0,03900 mV/ $^\circ\text{C}$	-0,00225
δV_R	0,00000 mV	0,00462 mV	B	0,00985 mV	0,00005
δT_{amb}	0,00000 $^\circ\text{C}$	0,34641 $^\circ\text{C}$	B	-0,00500 mV/ $^\circ\text{C}$	-0,00173
V_T	1,86886 mV			$u_c(V_T)$ U	0,01199 mV 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 intervalo de 0,8 segundos gera a resposta dinâmica do termopar com sua respectiva incerteza. As curvas da resposta dinâmica do sensor e a incerteza de medição representada pelos intervalos de confiança determinados pela incerteza expandida, para um $k=2$, estão apresentadas na figura 4.3 (Vianna et al., 2003).

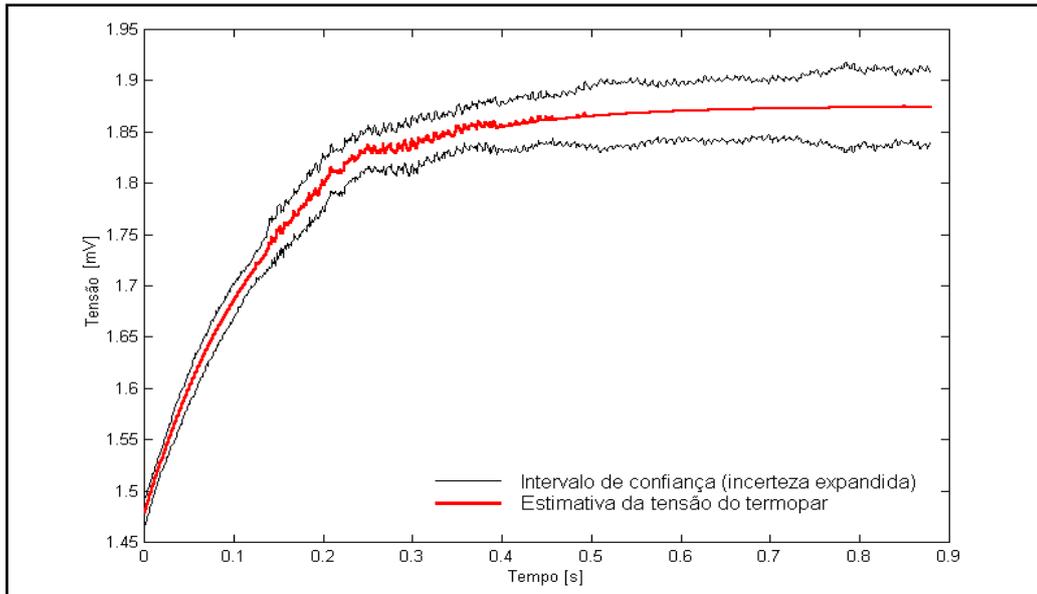


Figura 4.3 – Resposta dinâmica média do termopar (Vianna et al., 2003)

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

4.1.3 - Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão

Em 1972 foi publicado pela ASME, um guia indicando as propriedades que devem ser incluídas na calibração dinâmica de sensores de pressão (ASME, 1995). Posteriormente, foi disponibilizado pela ISA uma versão desse guia com melhor descrição dos métodos usados para calibração dinâmica de transdutores de pressão (Diniz et al., 2006). Contudo, esses documentos, apesar de sua relevância, não representam nenhuma norma sobre procedimentos de testes nem sobre a forma correta para estimativa de incertezas de medição em processos dinâmicos de medição de pressão. Por esse motivo, a maioria das aplicações utiliza os sensores de pressão calibrados estaticamente através de procedimentos padrões, tais como o “equilíbrio de pressão” e a “balança de pressão” (ou calibrador de “peso morto”).

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 (Diniz et al., 2006).

Para calibrar sensores de pressão se faz necessário o uso de um gerador de pressão que seja capaz de produzir um sinal de pressão que atenda às exigências de qualidade e confiabilidade do procedimento de calibração para servir de sinal de referência ou sinal padrão de calibração. Existem diversos dispositivos utilizados na calibração dinâmica apropriados para diferentes faixas de frequências e amplitudes de sinais. Esses dispositivos são divididos em dois grupos: geradores de sinal periódico (utilizados nos métodos de calibração no domínio da frequência) e geradores de sinal aperiódico (utilizados nos métodos de calibração no domínio do tempo).

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 (Diniz et al., 2006), os quais são apresentados na seqüência.

Dispositivo de Abertura Rápida (DAR)

O Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) é um 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 4.4 apresenta este dispositivo, onde sua câmara menor é detalhada.

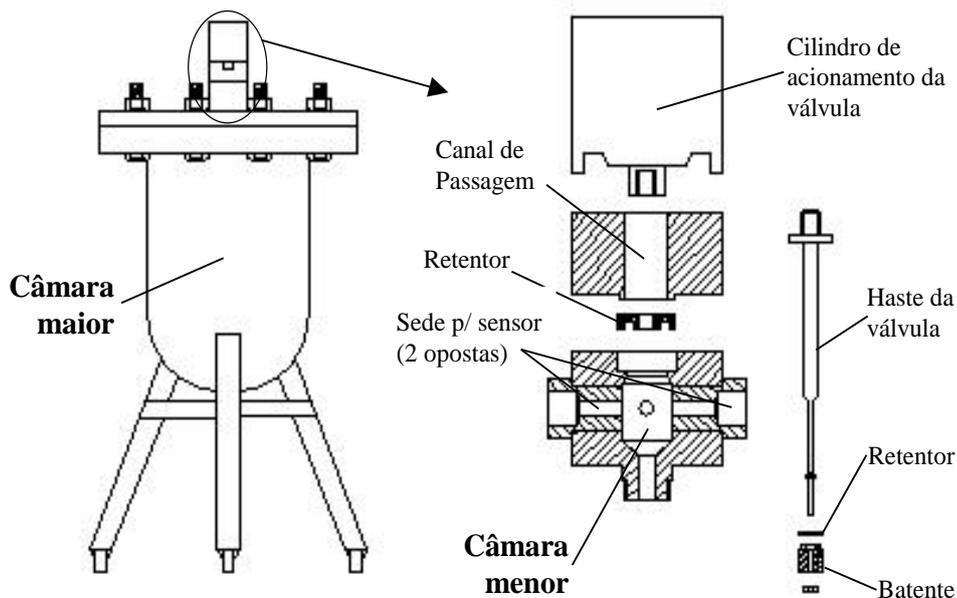


Figura 4.4 – Dispositivo de Abertura Rápida do LMD-UnB (Diniz et al., 2006)

O sensor a ser calibrado é instalado na câmara menor e fica sujeito a uma pressão P_1 . Devido à 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 4.5 (valor teórico).

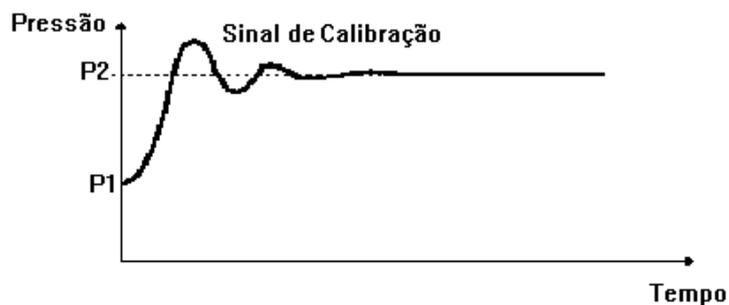


Figura 4.5 – Degrau de pressão para calibração de sensores (Diniz, Vianna e Neves, 2003)

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. A figura 4.6 apresenta o limite superior e inferior da incerteza do sinal gerado usando-se Ar como gás de calibração.

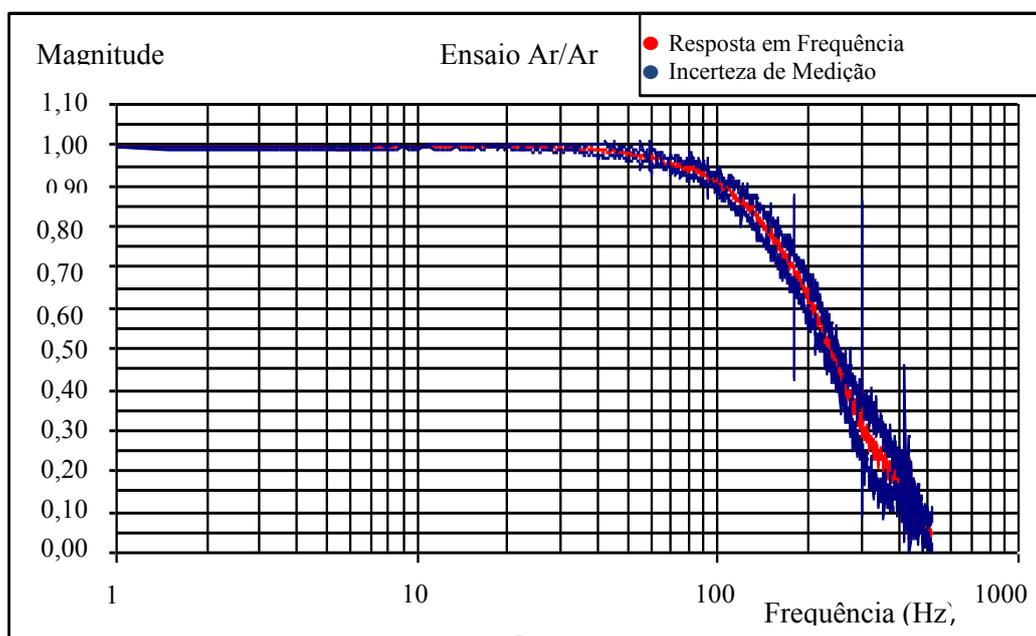


Figura 4.6 – Magnitude da função resposta em frequência do DAR do LMD-UnB (Diniz et al., 2006)

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) (Diniz et al., 2006).

Tubo de Choque:

O Tubo de Choque é um 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. As dimensões do Tubo de Choque Metrológico desenvolvido no LMD-UnB são mostradas na figura 4.7

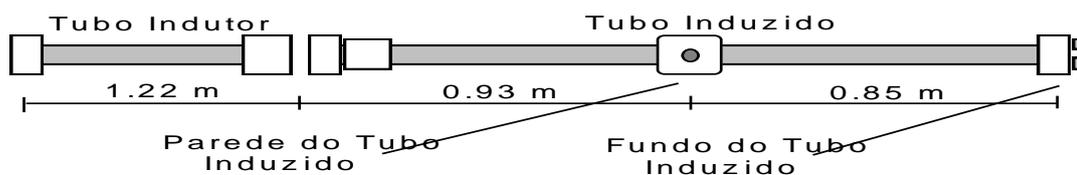


Figura 4.7 – Dimensões do Tubo de Choque do LMD - UnB (Diniz et al., 2006)

O sensor que se deseja calibrar é instalado na parede ou no fundo do tubo, o que permite calibrações com degraus de pressão de duração e amplitudes diferentes, conforme pode ser visto na figura 4.8. O degrau gerado é considerado perfeito dentro das condições metrológicas necessárias para a calibração de sensores e transdutores. A figura 4.8 (a) e (b) mostra exemplo de sinal gerado para calibração obtidos na parede e no fundo do Tubo de Choque, respectivamente. Esse dispositivo 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 e permite a calibração de 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 (Diniz et al., 2004).

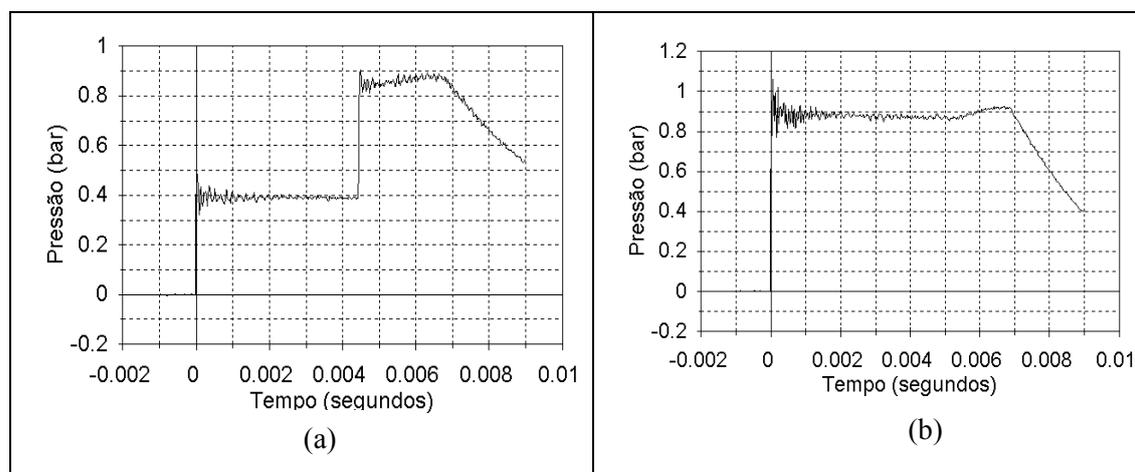


Figura 4.8 – Degrau de pressão gerado pelo Tubo de Choque do LMD-UnB: (a) obtido na parede do tubo e (b) obtido no fundo do tubo (Diniz et al., 2006)

As Incertezas estimadas para o sinal gerado pelo Tubo de Choque Metrológico desenvolvido no LMD-UnB para diferentes faixas de frequência são mostradas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Incertezas de medição do Tubo de Choque do LMD-UnB (Diniz et al., 2006)

Faixa de Frequência	Incerteza Expandida
200 – 1000 Hz	1,5 %
1001 – 3000 Hz	2,5 %
3001 – 8000 Hz	12,5 %
8001 – 10000 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, é possível conseguir 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 (Diniz et al., 2006). 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 (Vianna, Oliveira, Damion, 1999; Diniz et al., 2006).

Gerador Periódico de Coluna de Líquido

O Gerador Periódico de Coluna de Líquido é um gerador capaz de produzir sinais senoidais com amplitudes e frequências controladas, utilizado nos procedimentos de calibração dinâmica no domínio da frequência para medição de sinais de pressão com baixa amplitude e baixas frequências. A figura 4.9 mostra o esquema desse gerador. 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 a obtenção de um sinal senoidal de pressão. O líquido, neste caso, é o meio de calibração e o sinal do acelerômetro é usado como referência.

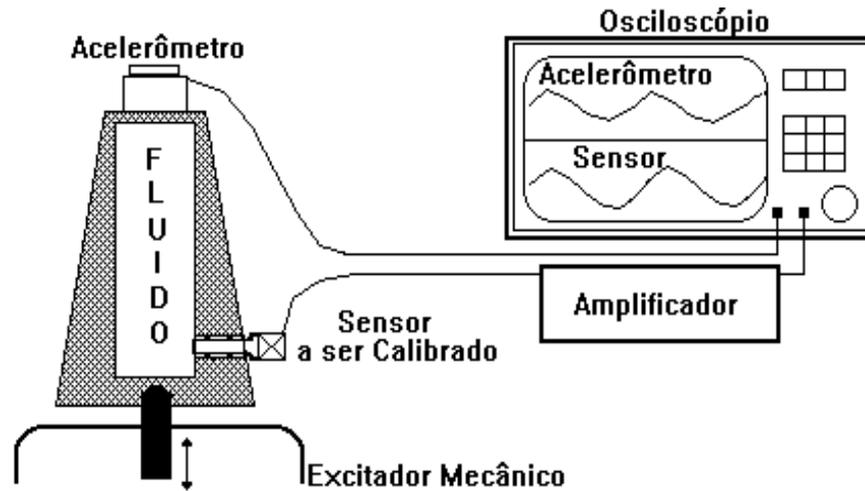


Figura 4.9 – Desenho esquemático do Gerador Periódico de Coluna de Líquido do LMD-UnB (Diniz, Vianna e Neves, 2003)

A calibração do sensor é feita através da comparação do sinal de pressão medido, com a aceleração imposta à 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 (Diniz et al., 2006).

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. Para a caracterização do Excitador de Coluna de Líquido (ECL), foram usados água destilada, glicerina pura, glicerina comercial, óleo SAE-40 e o polidimetilsiloxano (PDMS). O PDMS apresentou melhores resultados e por esse motivo foi adotado como fluido padrão de calibração para o dispositivo do LMD-UnB.

A função resposta, utilizando-se PDMS como líquido de calibração é mostrada na figura 4.10. O PDMS é um polímero orgânico de silicone que apresenta pouca alteração nas propriedades químicas em uma ampla gama de temperaturas, baixa pressão de vapor e alta resistência à oxidação e como é disponível em diferentes viscosidades, nesse caso, foi usado com viscosidade de 1000 centiStokes, que apresenta à 25°C, densidade 0,977 e tensão superficial de 21,5din/cm (Diniz et al., 2006).

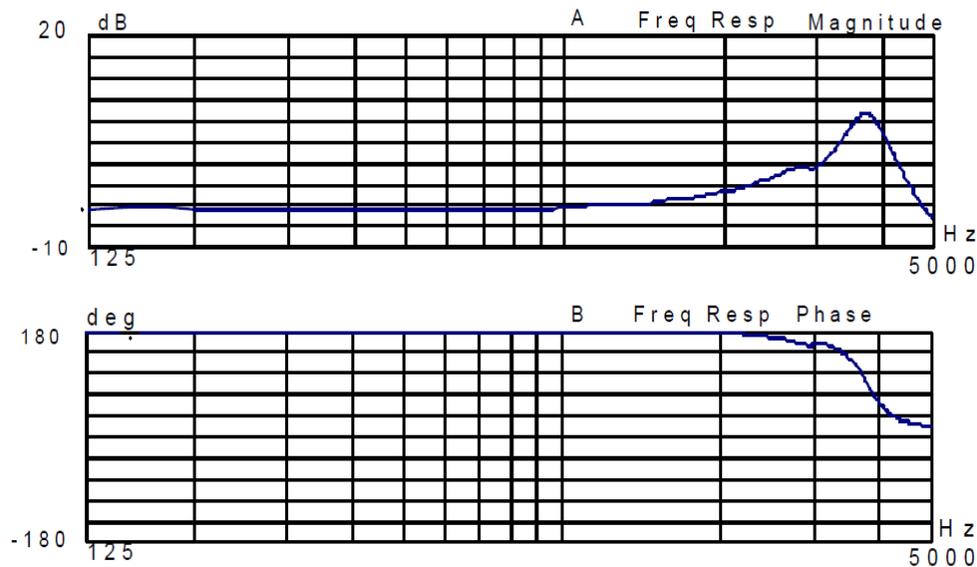


Figura 4.10 – Função resposta em frequência do Gerador de Periódico de Coluna de Líquido do LMD - UnB, (Diniz, et al., 2006)

Incerteza de calibração no Gerador Periódico de Coluna de Líquido

A incerteza de calibração no gerador periódico de coluna de líquido foi avaliada na medição da amplitude e na fase, como mostrado a seguir.

Incerteza de calibração na medição da amplitude

A pressão aplicada ao sensor é determinada em função da altura e da aceleração da coluna de líquido e depende também da massa específica do fluido, conforme mostra a equação 4.2.

$$P = \rho h A \quad (4.2)$$

onde: ρ = massa específica do líquido [kg/m^3], h = altura da coluna de líquido [m] e A = aceleração [m/s^2]. A aceleração é determinada por meio da cadeia de medição formada pelo acelerômetro, amplificador de sinais e analisador de sinais dinâmicos, sendo obtida pela equação 4.3.

$$A = \frac{a_s}{s_a} V \quad (4.3)$$

onde: a_s = amplificação do sinal [pC/V], s_a = sensibilidade do acelerômetro [pC/ms^{-2}] e V = tensão medida no analisador de sinais [Volts]. Então o modelo para determinação da amplitude de pressão aplicada ao sensor é representado pela equação 4.4.

$$P = \rho h \frac{a_s}{s_a} V \quad (4.4)$$

Calculando as derivadas parciais da amplitude da pressão com relação a cada uma das grandezas de influência (que são expressões simples), obtém-se a expressão para a incerteza de medição da amplitude de pressão, segundo o procedimento padrão do ISO GUM. A altura da coluna de líquido “h” é mantida constante durante todo o ensaio no valor de: $h = (74,00 \pm 0,05)$ mm. A massa específica do PDMS foi determinada experimentalmente e é dada por $\rho = (0,972 \pm 0,004)$ g/cm³ (Diniz e Neves, 2003).

Na amplificação, os ajustes do Amplificador de Sinais imediatamente anterior e posterior ao fixado, foram considerados como limites. A variância da sensibilidade do Acelerômetro foi obtida com base no certificado de calibração do INMETRO para uma incerteza de $\pm 2\%$ com um nível de confiança de 95%. Este valor foi assumido como válido para toda a faixa de frequência, sendo razoável para a faixa de frequência de trabalho. A variância na voltagem lida no Analisador de Sinais foi calculada a partir de informações do manual que, para varredura em seno possui incerteza de $\pm 0,04$ dB, também considerado como limites superiores e inferiores (Diniz e Neves, 2003).

Os valores de a_s , s_a e V utilizados no cálculo das derivadas são: $a_s = 3,36$ [pC/Volt], $s_a = 0,3364$ [pC/ms⁻²] e $V = 5$ [Volt]. Assim, as variâncias associadas às derivadas parciais, necessárias para a determinação da incerteza do mensurando, são dadas por: $s_p^2 = 21,33$ [kg/m³]², $s_h^2 = 3,33 \cdot 10^{-9}$ [m]², $s_{a_s}^2 = 1,33 \cdot 10^{-4}$ [pC/Volt]², $s_s^2 = 1,13 \cdot 10^{-5}$ [pC/ms⁻²]², $s_V^2 = 7,10 \cdot 10^{-4}$ [Volt]².

A incerteza combinada da pressão gerada pelo ECL é determinada realizando-se o somatório das incertezas das grandezas de influência, segundo a EA 4/02, e para os valores em questão, tem-se: $s_p = 46$ [Pa] ou $s_p = 0,46$ [mbar]. Com o fator de abrangência para um nível de confiança de 95% obtém-se o valor da incerteza: $u_p = \pm 0,92$ [mbar] ou $u_p = \pm 2,62\%$ ou $u_p = \pm 0,22$ dB. É importante lembrar que esta incerteza deve ser interpretada como limites da pressão aplicada ao transdutor para nível de confiança de 95%. Antes de conhecer a sensibilidade, nada se pode afirmar a priori sobre a incerteza da Curva de Resposta em Frequência de amplitude do transdutor a ser calibrado (Diniz e Neves, 2003).

Incerteza de calibração na medição da fase

Para o cálculo da incerteza de medição da fase do sinal de pressão gerado, considerando que o Acelerômetro e o Amplificador de Sinal não acrescentam erros significativos (o que é particularmente verdadeiro para as frequências envolvidas), a única contribuição para incerteza na medição da fase é proveniente da varredura em seno do

analisador de sinais que, de acordo com o seu manual, é: $u_\phi = \pm 0,5^\circ$. Esse valor fornece a estimativa da incerteza do sinal de pressão padrão de calibração gerado pelo Excitador de Coluna de Líquido (ECL) do LMD-UnB, usando PDMS como líquido de enchimento da coluna na faixa de frequência de 40 – 2200 Hz (Diniz et al., 2004).

Campo de utilização dos geradores de pressão do LMD-UnB

A escolha do dispositivo de calibração dinâmica é definida mediante as condições de uso do sensor a ser calibrado e sua faixa de operação. Os dispositivos desenvolvidos no LMD-UnB para calibração dinâmica de sensores de pressão abrangem praticamente todo o domínio de utilização industrial dos sensores de pressão. A figura 4.11 indica as faixas de pressão e frequência de operação desses dispositivos. 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 (Leodido, Sarraf, Damion, 2009).

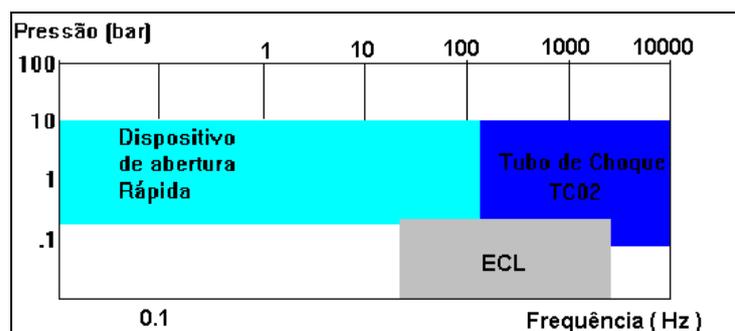


Figura 4.11 – Campo de utilização dos geradores de pressão do LMD-UnB (Diniz et al., 2004)

As características dos diferentes dispositivos para calibração dinâmica de sensores de pressão, existentes no Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB, são apresentadas na tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3 – Características dos geradores de pressão do LMD

Identificação	Faixa de Pressão	Faixa de Frequência	Sinal de Calibração
Dispositivo de Abertura Rápida	0,1 – 100 bar	0,001 – 1000 Hz	Aperiódico
Tubo de Choque	0,1 – 10 bar	200 – 10000 Hz	Aperiódico
Gerador Periódico de Coluna de Líquido	< 35 mbar	40 – 1900 Hz	Periódico

A tabela 4.3 apresenta os limites em pressão e frequência dos geradores de calibração dinâmica desenvolvidos no LMD - UnB. Esses dispositivos 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. Segundo Diniz et al. (2006), as incertezas estimadas para os sinais gerados e os processos de calibração são satisfatórios para as aplicações atuais da metrologia dinâmica, no entanto há necessidade de ampliação da frequência de operação desses dispositivos.

A tabela 4.4 mostra a incerteza de calibração na medição da amplitude e fase para os dispositivos Gerador Periódico de Coluna de Líquido e Tubo de Choque desenvolvidos no LMD-UnB.

Tabela 4.4 – Incerteza de calibração do Gerador Periódico de Coluna de Líquido e Tubo de Choque do LMD

Dispositivo	Faixa de Frequência	Incerteza na Amplitude	Incerteza na Defasagem
Gerador Periódico de Coluna de Líquido	1900 – 2200 Hz	$\pm 0,92 \text{ mbar} \pm 2,62 \%$	$\pm 0,5^\circ$
Tubo de Choque	5 – 1200 Hz	$\pm 0,15 \text{ bar} \pm 1,5 \%$	$\pm 1,5^\circ$
	1200 – 1600 Hz	$\pm 0,25 \text{ bar} \pm 2,5 \%$	$\pm 3,0^\circ$
	1600 – 3500 Hz	$\pm 0,50 \text{ bar} \pm 5,0 \%$	$\pm 3,0^\circ$
	3500 – 7000 Hz	$\pm 1,0 \text{ bar} \pm 10,0 \%$	$\pm 5,0^\circ$

É importante frisar que o aumento da frequência implica em um aumento na incerteza, como é possível observar na tabela 4.4, e isto deve ser considerado na calibração.

4.1.4 - Avaliação crítica do LMD

O método proposto pelo LMD para a calibração dinâmica de sensores de temperatura bem como os dispositivos desenvolvidos utilizados na calibração de sensores de pressão são metrologicamente consistente e universalmente válidos, uma vez que estão fundamentados em recomendações diretivas de órgãos regulamentadores como o INMETRO, ISO e EA. A metodologia utilizada para o cálculo da incerteza usando a Cuba Rotativa foi bem elaborada, fundamentada nos princípios do GUM e permitiu encontrar as curvas da resposta dinâmica do sensor. A observação das curvas obtidas permite verificar a qualidade do sinal com os limites superior e inferior.

Os cálculos de incertezas do Dispositivo de Abertura Rápida e do Tubo de Choque precisam ser refeitos e atualizados considerando os novos dispositivos de medição usados e o novo Tubo de Choque do LMD. Isto porque no procedimento de cálculo de incerteza nº 03 de 19/08/98 usado no LMD, a incerteza de calibração é determinada a partir do certificado de calibração do Tubo de Choque da ENSAM.

A avaliação da incerteza do Gerador Periódico de Coluna de Líquido foi realizada de acordo com recomendações do GUM e procedimento EA - 4/02 para amplitude e defasagem do sinal gerado. Contudo não existe procedimento para determinação da incerteza da função resposta do sensor. Isto não foi realizado considerando a pouca utilização do dispositivo devido às baixas amplitudes geradas.

Caso o Gerador Periódico de Coluna de Líquido venha ser utilizado na determinação da Curva de Resposta de sensores de pressão, é necessário seguir um procedimento semelhante ao usado na Cuba Rotativa.

4.2 - CALIBRAÇÃO E TESTES DE DESEMPENHO DE MMCs

Com a necessidade de calibração de sistemas de medição como forma de garantir confiabilidade nos resultados das medições realizadas, o Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (LM-UnB) tem destinado esforços no desenvolvimento de métodos para calibração de MMCs bem como nos estudos para quantificação de grandezas de influência que variam dinamicamente afetando as calibrações. Como resultados dessas ações foram produzidos e publicados mais de 20 trabalhos, dos quais alguns se encontram no apêndice B.

O LM-UnB desenvolveu também dispositivos para testes de desempenho de MMCs, além de um *Software* para Análise de Desempenho de AACMM com a Placa de Esferas Virtuais desenvolvida. Estas ações conduziram a solicitação de patenteamento: Padrão Barra de Esferas Virtuais (INPI nº 0803145-2, 05/junho/08), Padrão Placa de Esferas Virtuais (INPI nº PI1001161-7 2010) e um Software de Análise de Desempenho AACMM-PEV (INPI nº 012110000095, registrado em 15/02/2011). Os principais dispositivos desenvolvidos são descritos na sequência.

4.2.1 - Padrões para calibração de MMC

Existem duas abordagens bastante utilizadas atualmente na calibração de MMCs: o método da MMC virtual, através do qual a incerteza de medição é determinada por uma

simulação computacional, em função dos erros geométricos da MMC e demais fontes de erros e os testes de desempenho que utilizam artefatos padrões calibrados para verificar o comportamento da MMC quando executando tarefas específicas.

A metodologia existente mais difundida para verificação de MMCs está fundamentada na medição de padrões como blocos padrão e padrões escalonados, dispostos em diversas orientações dentro do volume de medição da MMC (Bosch, 1995; Piratelli-Filho, 1997). Esta sistemática, porém, possibilita somente o conhecimento de uma pequena amostra dos erros cometidos pela MMC. O conhecimento de forma abrangente desses erros é necessário para estratégias mais eficientes de medição com MMC, o que pode ser viabilizado pelo uso de padrões como a placa de esferas.

Padrão Barra de Esferas Virtuais

O Laboratório de Metrologia da UnB desenvolveu um padrão com elementos geométricos virtuais para determinar o desempenho de AACMM, elaborado por Piratelli-Filho e equipe. Trata-se de um modelo de barra de esferas construído com ferro fundido formando dois grupos de quatro furos cada um, cujas coordenadas são utilizadas para determinar os pontos de duas superfícies esféricas. Os centros das esferas foram determinados através de um algoritmo computacional, assim como a distância entre as duas esferas virtuais (Piratelli-Filho et al., 2007).

Este padrão foi denominado Barra de Esferas Virtuais e é utilizado para testar o desempenho de uma MMC de braço articulado, usando como referência a norma ANSI / ASME B89 (1994) e ASME B89.4.22 (2004). Os resultados foram comparados com a aplicação destas normas usando para isto uma barra de esferas convencionais e um experimento com planejamento fatorial (Piratelli-Filho e Lesnau, 2010).

As características especiais das esferas virtuais requerem o uso de apalpadores de pontas esféricas e com sondas rígidas para acessar os furos cônicos. A MMC tipo braço articulado tem facilidade para acessar os furos, devido sua flexibilidade na medição. A figura 4.12 mostra esferas virtuais determinadas a partir dos quatro furos no padrão.

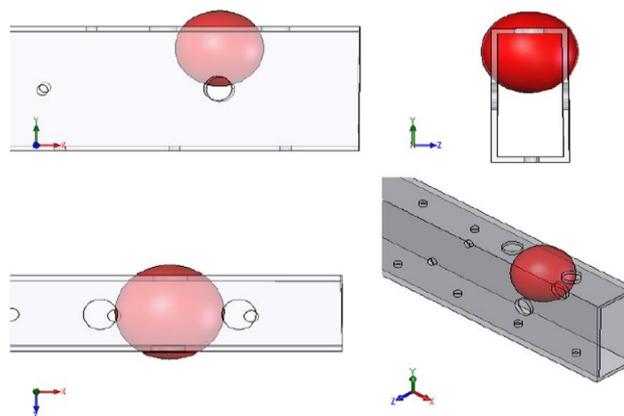


Figura 4.12 – Esfera virtual gerada a partir dos quatro furos (Piratelli-Filho e Lesnau, 2010)

O LM-UnB utiliza o software GPad da MMC Braço Articulado para adquirir os dados, realizar os cálculos e armazená-los em arquivo para processamento posterior. O centro das esferas é determinado usando uma rotina Matlab. Esta rotina permite também determinar a distância entre duas esferas virtuais. Um programa desenvolvido no software Matlab foi comparado aos resultados obtidos com o GPad usando um arquivo teste com um grupo de coordenadas de pontos e os resultados foram similares. A abordagem experimental envolveu dois tipos de testes. O primeiro usando o padrão de barra de esferas e esferas virtuais, aplicado de acordo com recomendações da norma ASME B89 (2004). O segundo, aplicado usando um planejamento fatorial fracionário 3^{4-2} para reduzir o número de medições. Todas as medições são realizadas em temperaturas de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e a análise dos resultados mostraram uma semelhança entre o padrão barra de esfera e o modelo proposto.

Apesar da barra de esferas ser considerado um padrão de baixo custo comparado com outros padrões, as esferas de precisão com pequenos erros de esfericidade (em torno de $0,1 \mu\text{m}$) tem custo elevado. O modelo Barra de Esferas Virtuais proposto por Piratelli-Filho et al. (2007), desenvolvido e usado no LM tem o custo reduzido pela ausência de esferas reais, sendo por isto menos propenso a erros que o padrão convencional correspondente. Isto porque erros associados à esfericidade não existem no modelo virtual, o que o torna uma opção para a análise de desempenho de AACMM.

Padrão de Placa de Esferas Virtuais

Um modelo padrão de Placa de Esferas Virtuais (PEV) foi construído para aplicação em testes de desempenho e calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas

através de geometrias virtuais. Este modelo tem como vantagem, principalmente, o fato de não ocorrer erros de esfericidade como ocorre nos Padrões de Placas de Esferas convencionais, devido à substituição das esferas reais pelas virtuais, determinadas a partir de pontos, além da diminuição de custos do padrão.

A PEV apresenta dois grupos de quatro furos cônicos não coplanares, usados para determinar pontos de duas superfícies esféricas. O projeto, elaborado com base nos padrões de placas de esferas comerciais, consiste na formação de uma esfera imaginária através de quatro pontos medidos no espaço. Estes pontos são usados para se determinar as esferas e para determinar a distância entre os centros das esferas através de algoritmos computacionais. Uma vez que os pontos estão à mesma posição relativa entre si, a esfera virtual determinada pode ser reproduzida sempre que necessário.

O padrão foi desenvolvido com 16 grupos de quatro furos cônicos feitos em blocos piramidais (ou pirâmides simples) de alumínio que foram colocados em placa de alumínio de 300 mm × 300 mm × 20 mm. A pirâmide de três faces triangulares com os furos cônicos localizados no centro das faces e na parte superior das pirâmides é mostrada na figura 4.13.

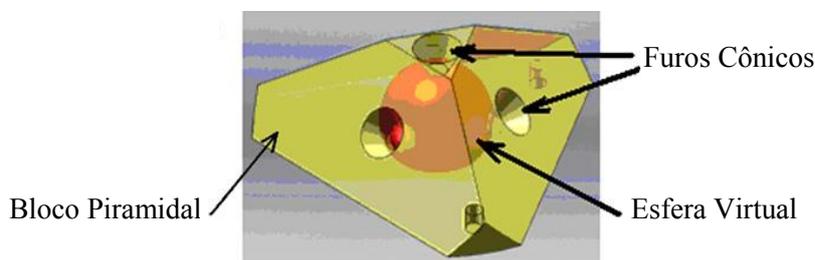


Figura 4.13 – Esfera virtual determinada a partir de pontos correspondentes aos furos cônicos (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011)

Cada pirâmide admite a determinação de uma única esfera virtual depois da aquisição dos pontos em cada furo cônico usando a AACMM, sendo então determinadas 16 esferas virtuais. Ao ser efetuada a leitura das coordenadas desses pontos pela máquina, é possível o cálculo do centro da esfera formada e, havendo outras esferas próximas, a distância entre as mesmas, através do software da AACMM (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011). A PEV construída é mostrada na figura 4.14. Sendo o custo de aproximadamente R\$ 800,00, constitui grande vantagem quando comparada ao padrão convencional.

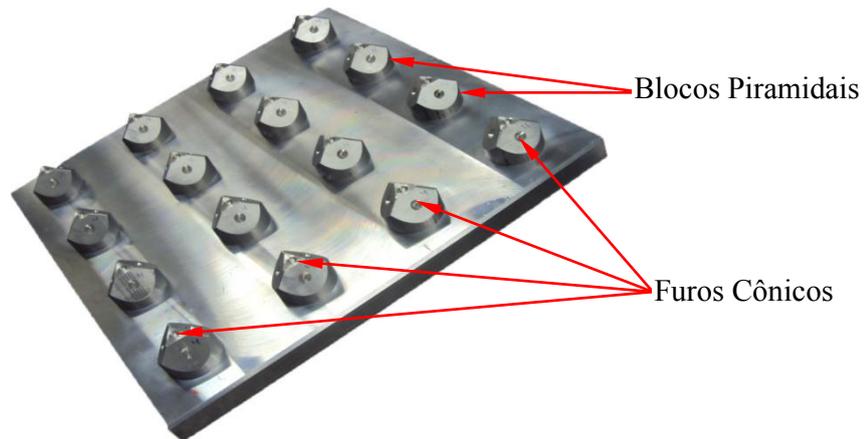


Figura 4.14 – Placa de Esferas Virtuais desenvolvida pelo LM - UnB (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011)

A PEV foi aplicada para efetuar um teste de desempenho de uma MMC braço articulado, utilizando como referência a norma ANSI / ASME B89 (2004), obtendo resultados satisfatórios. Com a repetição do procedimento, é possível verificar os erros da máquina, possibilitando o cálculo da incerteza de medição.

4.2.2 -Teste de desempenho em MMC braço articulado

Com base na norma ASME B89.4.22 (2004), foram realizados testes de desempenho em uma Máquina de Medir por Coordenadas tipo Braço Articulado (AACMM) do LM - UnB, com o propósito de avaliar os erros volumétricos, bem como verificar a viabilidade de uma metodologia de fácil aplicação e menor custo, comparado com os testes propostos pela norma. A proposta consistiu na utilização das características construtivas da Placa de Esferas Virtuais (PEV) desenvolvida, empregando as orientações da norma.

O padrão recomendado por esta norma foi usado em uma primeira etapa, seguindo-se da calibração da PEV, a qual serviu de referência para a análise. Neste caso, a calibração envolveu basicamente o diâmetro das esferas virtuais e as distâncias entre os seus centros. Essa calibração requer uma máquina de medir por coordenadas com resolução e incerteza menor ou igual a 20% dos valores da AACMM. Assim, a calibração da PEV foi feita na MMC tipo cantilever ilustrada na figura 5.1, cujas características foram descritas no capítulo 5, sendo que o apalpador foi substituído por uma sonda rígida com ponta esférica de rubi, com 6 mm de diâmetro, adequada para acessar os furos cônicos e adquirir as coordenadas do ponto correspondente. Uma série de testes foram realizados com o intuito de comparar os resultados obtidos com os testes da ASME. Estes testes estão

relacionados com as posições em volume de trabalho da máquina (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011).

A máquina AACMM utilizada para executar os testes tem as seguintes especificações: modelo ARM 100-C, fabricante ITG ROMMER, com 6 graus de liberdade, resolução de 0,01 mm e volume de trabalho com alcance do braço de 2,5m de diâmetro. A incerteza expandida de medição volumétrica é de 0,06 mm (95%) e incerteza de medição expandida de sondagem de 0,016 mm (95%) declarada no certificado de calibração fornecido pelo fabricante (Piratelli-Filho e Lesnau, 2010; Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011). Este modelo é ilustrado na figura 4.15 onde são mostradas algumas das posições utilizadas para medição da PEV. A placa foi posicionada em tres locais dentro do volume de trabalho da AACMM com inclinações em relação à base horizontal a fim de usar configurações extremas de articulações do braço da máquina (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011).

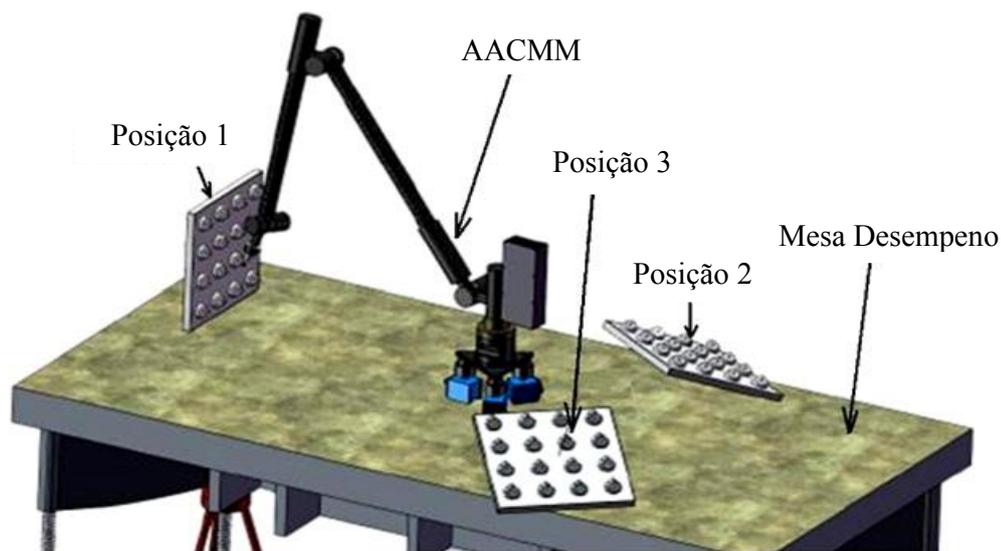


Figura 4.15 – AACMM e as posições selecionadas para medições na PEV (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011)

O teste de desempenho proposto aconteceu em duas etapas, com a AACMM posicionada sobre uma mesa de desempenho e usando na extremidade do braço, a mesma sonda calibrada com ponta esférica utilizada para calibração da PEV. Essa sonda tem flexibilidade para acessar os furos cônicos em qualquer direção viabilizando diferentes combinações de articulações e posições de escalas da máquina. O software GPad foi utilizado para fornecer as coordenadas dos pontos, armazená-las em arquivos que

posteriormente foram importados através de algoritmo em Matlab para determinar o centro das esferas virtuais, bem como a distância entre as mesmas.

A recomendação da norma ASME B89.4.22 (2004), foi aplicada, executando o teste de desempenho do diâmetro efetivo, o teste de desempenho da articulação de um único ponto e o teste de desempenho volumétrico (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011). Para o teste de desempenho de um único ponto foi usado o mesmo padrão esférico utilizado no teste de desempenho do diâmetro efetivo. As distâncias entre a base da AACMM e o padrão foram de 300 mm, 500 mm e 1125 mm, escolhidas conforme recomendações da norma.

Para o teste de desempenho volumétrico, a norma ASME B89 (2004) requer o uso de duas barras de esferas calibradas. Foram utilizadas com comprimento de 817,970 e 1711,468 mm e incerteza de medição expandida de 0,032 mm e 0,043 mm (95%) para as distâncias entre os centros das esferas que podem ser construídas em aço inoxidável e com o auxílio das recomendações constantes no apêndice F da norma (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011). A calibração das barras foi realizada pela empresa SOMMA Diagnósticos Dimensionais. A figura 4.16 mostra a recomendação do posicionamento das barras pela norma (a) e a solução implementada usando o suporte (b) onde as barras de esferas foram posicionadas em 20 posições dentro do volume de trabalho da AACMM.

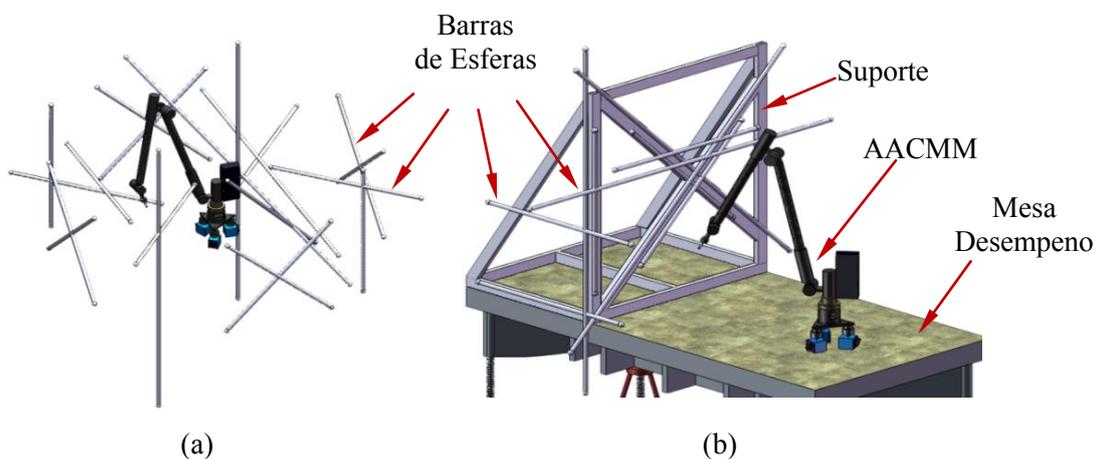


Figura 4.16 – (a) Representação das 20 posições das barras no volume da AACMM recomendadas pela ASME B89.4.22-2004 e (b) reprodução das 20 posições usando o suporte de apoio para as barras (adaptado de Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011)

Os resultados dos testes realizados, para o desempenho da AACMM são apresentados na tabela 4.5 que mostra uma comparação entre a ASME B89.4.22 (2004) e o teste de desempenho com a PEV. A análise dos resultados permitiu determinar o desvio

padrão e a gama de erros que foram utilizados como parâmetros para caracterizar o desempenho da AACMM. A partir destes resultados o parâmetro 2RMS foi determinado com base nas recomendações da ASME B89 (2004), bem como o parâmetro $2S_{SPAT}$ que representa a repetibilidade e a reprodutibilidade das medidas.

Tabela 4.5 – Comparação do resultado da ASME B89 (2004) e teste de desempenho com a PEV (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011)

Teste de Desempenho (mm)	ASME B89			PEV		
	Desv Padrão	Amplitude	2RMS	Desv Padrão	Amplitude	2RMS
	0,097	0,350	0,270	0,052	0,259	0,160
Teste da Articulação de um Único Ponto (mm)	$2S_{SPAT}$ (300)	$2S_{SPAT}$ (500)	$2S_{SPAT}$ (1125)	$2S_{SPAT}$ (Posição 1)	$2S_{SPAT}$ (Posição 2)	$2S_{SPAT}$ (Posição 3)
	0,461	0,281	0,338	0,524	0,255	0,368

Na valiação da incerteza foi observado que a contribuição principal para os erros foi a repetibilidade no volume de trabalho da máquina. Assim, os erros de retitude e perpendicularidade tiveram pronunciado efeito sobre a incerteza determinada.

No teste de desempenho usando a PEV, os erros de diâmetro das esferas virtuais foram determinados para as três posições escolhidas e foi constatado que a variabilidade dos diâmetros determinados com a AACMM foi quase constante para cada diâmetro da esfera virtual, sendo a média de erros – 0,023 mm e o desvio padrão 0,039 mm. O resultado desse teste com a AACMM mostrou que as distâncias entre os centros das esferas virtuais foram deteminadas e os desvios em relação aos valores calibrados (erros) foram determinados, sendo o erro médio – 0,061 mm e desvio padrão 0,052 mm. Para as posições 1, 2 e 3 da PEV, os intervalos foram 0,201 mm, 0,208 mm e 0,241 mm com os erros médios – 0,041 mm, – 0,083 mm e – 0,058 mm e os desvios padrão 0,039 mm, 0,052 mm e 0,054 mm, respectivamente. O parâmetro 2RMS para a PEV foi 0,160 mm e o parâmetro $2S_{SPAT}$ 0,524 mm (posição 1), 0,255 mm (posição2) e 0,368 mm (posição 3), como mostrados na tabela 4.5.

Os resultados do teste de desempenho volumétrico usando as duas barras de esfera calibradas e a ACMM mostraram um erro médio de – 0,093 mm e desvio desvio padrão 0,097 mm. O rendimento volumétrico determinado pelo parâmetro 2RMS foi de 0,270 mm. O teste de articulação de um único ponto analisa o desvio em relação à média das coordenadas de um mesmo ponto e resultou no parâmetros $2SPAT$ de 0,461 mm (distância

de 300 mm a partir da origem da AACMM), 0,281 mm (distância 500 mm da origem da máquina) e 0,338 mm (1125 mm a partir da origem da máquina), conforme apresentado na tabela 4.5.

Ao comparar os resultados dos testes de desempenho, observou-se que o teste com a PEV apresentou menor desvio padrão e parâmetro 2RMS que a ASME B89 (2004). Essas diferenças podem estar associadas às diferenças das bitolas utilizadas. Os resultados obtidos com a norma ASME B89 (2004) contêm erros provenientes das barras de esferas e das deformações elásticas de fixação. Essas fontes de erros têm menor influência sobre os resultados com a PEV, uma vez que possui maior rigidez. Com relação ao teste da articulação de um único ponto, os resultados foram semelhantes.

O teste de desempenho volumétrico ASME B89 (2004) foi realizado em 2 horas e o teste de articulação de um único ponto em 30 minutos. A metodologia proposta foi aplicada em menor tempo, em torno de 25 minutos, medindo a PEV nas três posições testadas, gerando uma maior quantidade de dados quando comparado com a ASME B89 (2004). Outra observação está relacionada com as barras de esferas exigidas pela ASME B89 (2004) que requer esferas de precisão, aumentando o custo com o teste (Piratelli-Filho, Fernandes e Arencibia, 2011). Para a coleta de dados, a utilização da PEV demonstra ser mais eficiente do que o uso de barras de esferas, isto se deve à robustez na sua forma construtiva e facilidade de fixação em outros suportes. O uso de barras longas (como recomendado pela ASME no teste volumétrico) propicia facilmente erros na montagem do aparato de teste.

4.2.3 - Avaliação crítica do LM

Os padrões Barra e Placa de Esferas Virtuais para a calibração de MMCs desenvolvidos no LM - UnB são metrologicamente consistentes e universalmente válidos, uma vez que estão fundamentados em recomendações de normas como ISO 10360 (2000) e ANSI / ASME B89 (2004).

Os testes e avaliação de incerteza de medição (incluindo a incerteza de calibração dos padrões) utilizando os padrões construídos no LM - UnB foram realizados para verificar o desempenho de MMC tipo braço articulado e precisam ser implementados para outros modelos de MMCs. Além dos aspectos construtivos e requisitos metrológicos, esses padrões apresentam vantagem, principalmente, pelo fato de não oferecerem erros de

esfericidade como ocorre nos padrões de esferas convencionais, pois as esferas reais são substituídas por esferas virtuais, o que implica na diminuição de custos dos padrões.

Para o teste de desempenho em MMC tipo braço articulado utilizando a PEV, o teste de desempenho volumétrico para avaliar comprimentos no volume de trabalho da AACMM da ASME mostrou resultados semelhantes aos do método proposto pelo LM - UnB apesar da distinção entre os padrões e técnicas usadas no processo de medição. Contudo para o teste do diâmetro efetivo, os resultados foram bem diferentes. Considerando a complexidade das normas internacionais e a ausência de uma sistemática completa aplicável integralmente à medição por coordenadas, a metodologia utilizada pelo LM - UnB é adequada para avaliar o desempenho de AACMM.

5. EFEITOS DINÂMICOS NA MEDIÇÃO POR COORDEMADAS

As Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs) de funcionamento com sonda de gatilhamento foram originalmente concebidas para operação “estática” ou “quase estática” e seu desempenho dinâmico tem sido cada vez mais exigido com a necessidade de automação e rapidez nos processos produtivos. A demanda da metrologia industrial moderna aponta para a necessidade de sondagem em MMC de modo dinâmico. Isto leva a ineficiência das sondagens “quase estáticas” abrirem caminhos para formas mais eficientes de sondagens. Entretanto esta maior eficiência gera conflitos quando se deseja maior velocidade operacional em menor tempo de medição (Wang e Luo, 2009). Dessa forma, os efeitos dinâmicos envolvidos no processo de medição usando MMC tem sido uma preocupação dos pesquisadores, que tem investigado esses efeitos em busca de soluções para melhorar o desempenho dessas máquinas. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de avaliação dinâmica da operação de sondas de gatilhamento em Máquina de Medir por Coordenadas.

5.1 – AVALIAÇÃO DINÂMICA DE SONDA DE GATILHAMENTO EM MMC

Dentro dos objetivos desta dissertação, foi realizado um estudo para quantificação de grandezas de influência que variam dinamicamente afetando as calibrações. As variáveis envolvidas no processo de medição dinâmica usando uma MMC com sonda de gatilhamento foram avaliadas. Os experimentos realizados são descritos. As ferramentas estatísticas de planejamento de experimentos e análise de variância (ANOVA - Analysis of Variance) foram utilizadas para execução dos experimentos e para a análise dos resultados das medições, respectivamente.

Os experimentos de medição foram realizados em uma Máquina de Medir por Coordenadas, modelo Cantilever QM - Measure 353, fabricada pela Mitutoyo Sulamericana Ltda, com incerteza de medição de $3,0 \mu\text{m}$ e tendência $E = (3 + 4L/1000) \mu\text{m}$. Esta máquina é ilustrada na figura 5.1 com seus principais elementos construtivos e disponível no Laboratório de Metrologia da Universidade de Brasília (LM - UnB).

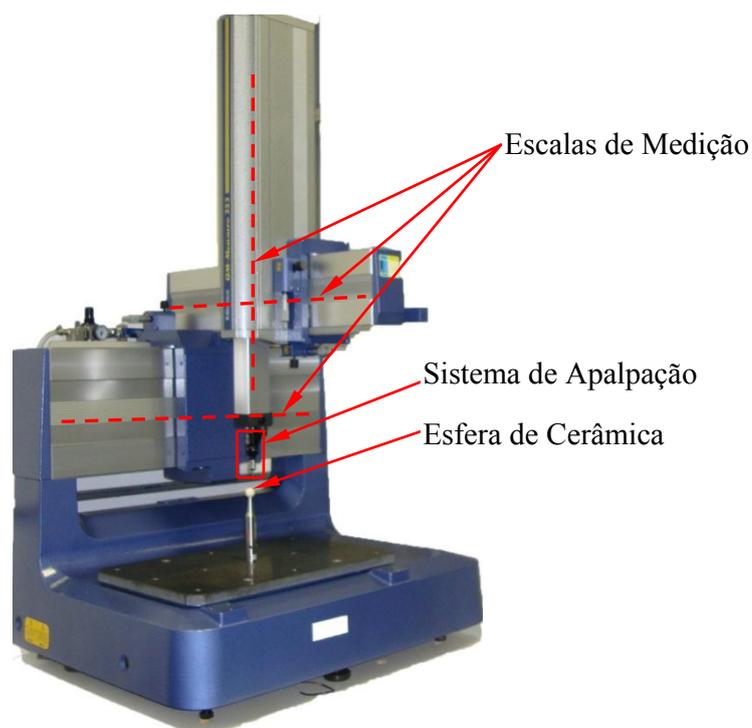


Figura 5.1 – MMC QM-353 do LM-UnB e os elementos básicos da sua construção

Essa máquina apresenta um volume de trabalho de 300 x 400 x 300 mm e uma resolução das escalas de 0,001 mm em cada eixo de coordenadas. A incerteza expandida de medição declarada em certificado de calibração ($1,2 + L/600$) mm, onde L é o comprimento medido em mm e a probabilidade de abrangência é de 95%. Uma sonda de gatilhamento fabricada pela Renishaw, modelo MH20, com uma incerteza expandida de sondagem de 3,2 μm (95%) declarada no certificado fornecido pelo fabricante, foi usada acoplada à MMC como sistema de apalpação.

A figura 5.2 mostra o sistema de apalpação da MMC do LM-UnB usada neste trabalho e a sua estrutura interna. Esta sonda é do tipo gatilhamento (*touch trigger probe*), com características de ser uma sonda de contato sensível ao toque. O contato da extremidade do apalpador com a superfície da peça permite ao *software* da MMC capturar as coordenadas do ponto tocado, através da emissão de sinal elétrico pela sonda.

Uma esfera de cerâmica de diâmetro calibrado igual a 19,9834 mm e com incerteza padrão $\pm 0,3 \mu\text{m}$ foi utilizada para executar as medições. O diâmetro foi determinado e os erros de medição foram calculados pela diferença entre valor medido menos o valor calibrado. Durante as medições, a temperatura foi mantida em $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

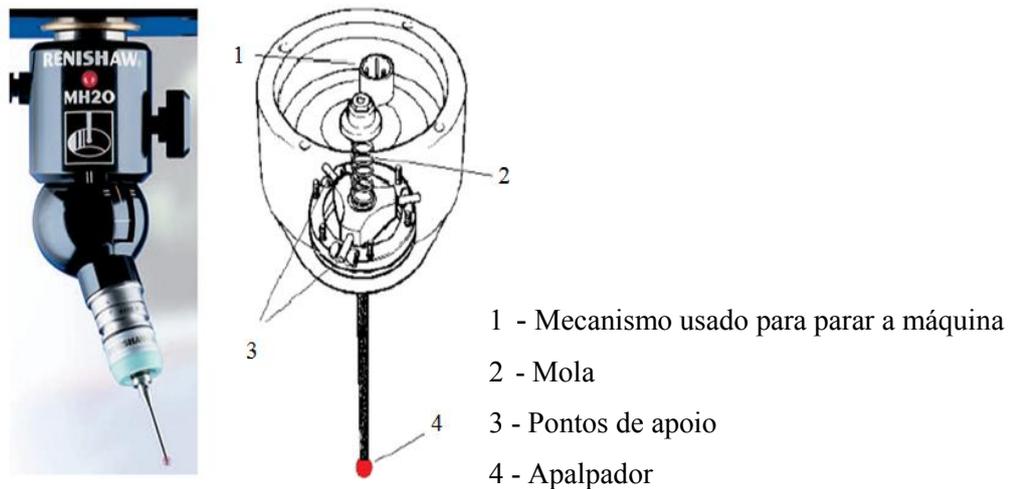


Figura 5.2 – Sistema de apalpação da MMC do LM-UnB: estrutura interna (Renishaw)

Qualificação do apalpador

Antes do início das medições, foi definida a qualificação do sistema de apalpação, através de um processo de calibração da ponta de medição. Isto foi necessário para que o *software* de medição conheça o diâmetro e a posição da ponta da sonda nas configurações que foram utilizadas no processo de medição. Para isso, realizou-se uma seqüência de dez pontos de medição na esfera de cerâmica de alta precisão com diâmetro calibrado e obtido o valor do diâmetro medido. Deste modo, o software de medição armazena as informações da configuração calibrada e efetua as correções necessárias durante a utilização da sonda no processo de medição. A figura 5.3 apresenta uma amostra da calibração da ponta do apalpador. Para a qualificação, deve-se idealmente utilizar a mesma direção e velocidade de apalpação a ser utilizada na medição do artefato (Wilhelm, Hocken e Schwenke, 2001; Flack, 2001).

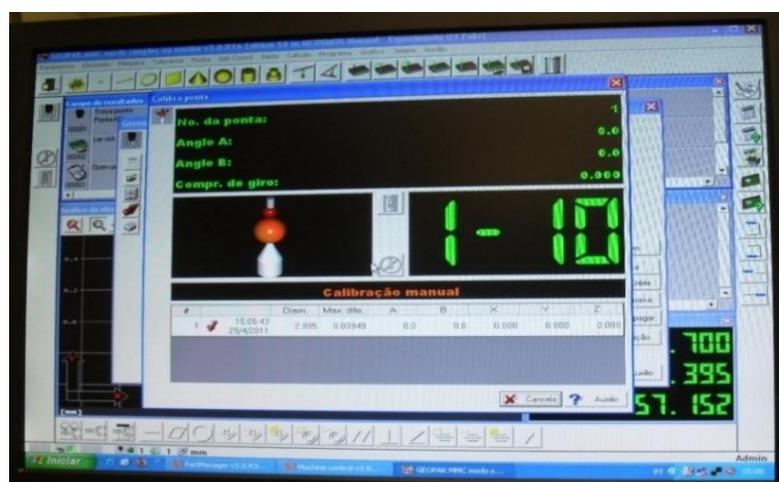


Figura 5.3 – Tela da calibração do apalpador

Procedimento Experimental

Um estudo preliminar para identificar as variáveis que influenciam os erros em MMCs com sondas de gatilhamento foi o ponto de partida. Foi encontrado que os erros produzidos durante a medição estão associados à: velocidade de aproximação da sonda, aceleração da sonda, força de pré-carga da mola interna da sonda, orientação do apalpador da sonda, comprimento da haste do apalpador, posição da sonda no volume de trabalho da MMC (longitude e latitude), distância de aproximação durante a medição, número de pontos determinados durante a medição do elemento geométrico da peça, características da peça medida como rigidez e elementos geométricos, variáveis ambientais como temperatura e umidade.

Após a análise do processo de medição com a sonda de gatilhamento, quatro variáveis operacionais foram selecionadas para o estudo: 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. Um Planejamento ou Projeto Fatorial 2^4 foi escolhido para investigar estas quatro variáveis e suas interações. Segundo Piratelli-Filho e Giacomo (2003), essa técnica pode ser considerada uma poderosa ferramenta na idealização e execução de experimentos. Ela permite estudar o comportamento da máquina onde as variáveis experimentais são investigadas em todas as combinações possíveis de seus níveis ou valores para verificar a variabilidade dos erros de medição. Os resultados foram avaliados por análise estatística de variância (ANOVA).

A velocidade de aproximação do apalpador (A) foi controlada pelo operador da MMC durante os ensaios, de forma a obter uma aproximação lenta (-1) ou rápida (+1). A direção de aproximação (B) foi controlada adotando a direção radial (-1) ou direção dos eixos de coordenadas X, Y ou Z (+1). A orientação do apalpador (C) foi adotada vertical (-1) ou em um ângulo de 45° de inclinação (+1). A variável número de pontos (D) foi estudada com 20 pontos (-1) ou 40 pontos (+1).

Para realização das medições, os valores destas variáveis foram alterados conforme os níveis indicados no Planejamento Fatorial 2^4 . Isto resultou em 16 combinações experimentais (ensaios), cujo arranjo está mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Planejamento fatorial 2⁴

Ensaio	Variáveis				Resultado
	A	B	C	D	
1	-	-	-	-	Erros de Medição
2	+	-	-	-	
3	-	+	-	-	
4	+	+	-	-	
5	-	-	+	-	
6	+	-	+	-	
7	-	+	+	-	
8	+	+	+	-	
9	-	-	-	+	
10	+	-	-	+	
11	-	+	-	+	
12	+	+	-	+	
13	-	-	+	+	
14	+	-	+	+	
15	-	+	+	+	
16	+	+	+	+	

Neste experimento não foi possível quantificar a velocidade de medição (variável A), que deve ser sempre menor que a velocidade de deslocamento (Flack, 2001). Aumentar a velocidade de medição resulta no aumento da força de toque do objeto a ser medido e aumento do deslocamento da haste do apalpador no momento do toque do apalpador e o momento de captura do ponto. Isto conseqüentemente afetará o erro e a incerteza de medição. Quando o apalpador é qualificado com a mesma velocidade usada no processo de medição, esse efeito é minimizado. É necessário estabelecer uma velocidade de medição que não seja tão rápida, pois produz uma força de contato grande, nem tão baixa (Flack, 2001). Outro cuidado extremamente importante nesse processo diz respeito à “distância da apalpação”, pois ocorrerá uma mudança de velocidade, antes do contato com a superfície. A máquina sofre influências causadas pela vibração da aceleração e da desaceleração, necessitando de um período depois dessa mudança para minimizar a influência no resultado. Quanto maior a distâncias de apalpação, menor será a variação da posição do apalpador, possibilitando que o mesmo atinja um estado estável. Na prática, deve-se definir uma relação adequada entre a distância e a precisão requerida nos resultados (Flack, 2001), sendo esta variável mantida constante neste trabalho.

Aquisição dos dados no processo de medição

A esfera da extremidade do apalpador foi qualificada pela determinação do diâmetro, igual a 2,996 mm. Este valor não influenciou os resultados do experimento devido à utilização de um objeto padrão esférico, uma vez que o diâmetro do apalpador é

compensado no cálculo dos resultados. As figuras 5.4 e 5.5 apresentam os pontos capturados pelo sistema de apalpação da MMC neste processo, fornecido pelo *software* da MMC. Na figura 5.4 é possível verificar ao lado direito a medida de número 19 para uma quantidade de 20 pontos. A parte superior da figura 5.5 mostra diversas formas geométricas usadas pelo software de medição, dentre as quais a esfera que foi usada neste trabalho.

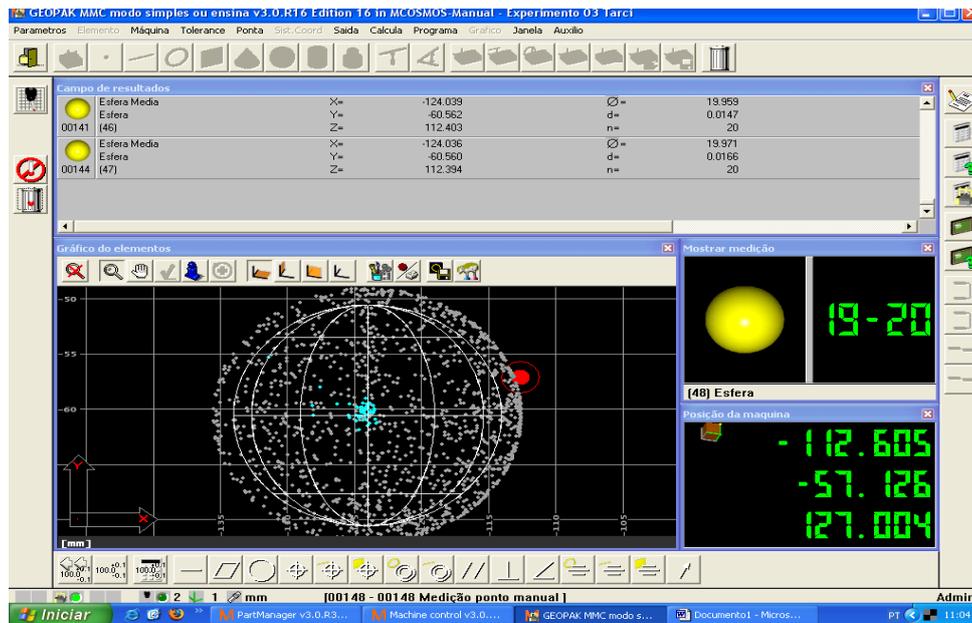


Figura 5.4 – Pontos capturados ao medir a esfera de referência.

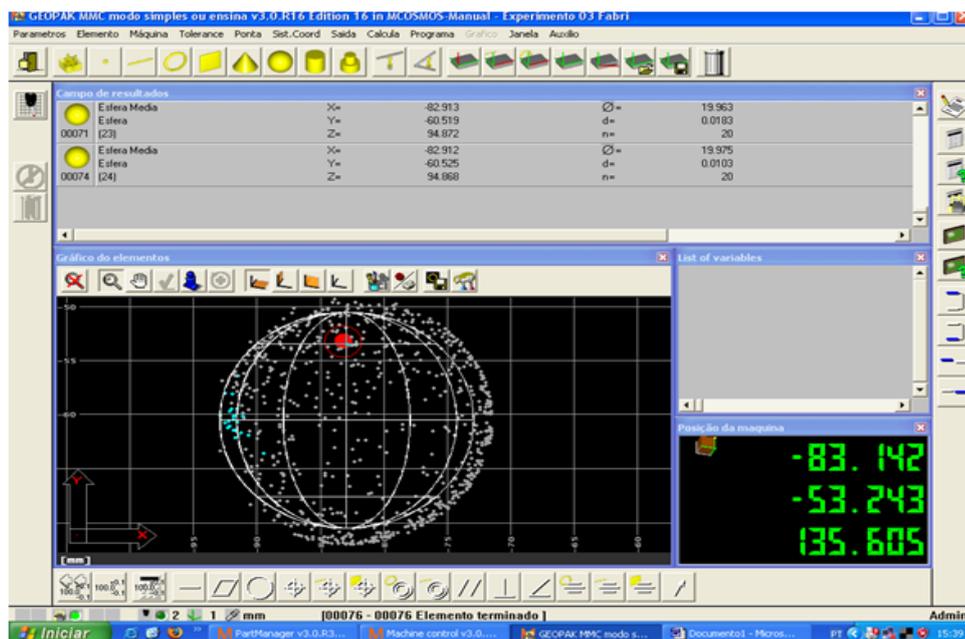


Figura 5.5 – Pontos adquiridos durante a medição da esfera de referência.

Os ensaios do Planejamento Fatorial 2^4 foram realizados em uma seqüência aleatória, definida por um sorteio, para aleatorizar o efeito de qualquer variável não considerada no experimento. A esfera padrão de cerâmica foi medida tomando seis repetições de cada valor de diâmetro, sendo que os erros foram determinados pela diferença em relação ao valor do diâmetro do padrão. Os valores de erros obtidos estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultado dos erros das medições

Ensaio	Erros de Medição (mm)						Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4	5	6		
1	0,0016	-0,0004	-0,0024	0,0006	0,0006	0,0036	0,0006	0,002
2	-0,0054	-0,0084	-0,0054	-0,0004	-0,0004	0,0016	-0,0031	0,00388158
3	0,0016	-0,0004	-0,0024	-0,0004	0,0016	-0,0004	-0,0001	0,001505545
4	-0,0104	-0,0164	-0,0174	0,0026	0,0026	-0,0014	-0,0067	0,009201449
5	0,0026	0,0006	0,0016	0,0006	0,0026	0,0026	0,0016	0,001
6	-0,0094	-0,0124	-0,0134	-0,0004	0,0016	-0,0004	-0,0057	0,006742897
7	-0,0024	-0,0004	-0,0054	0,0016	0,0006	0,0016	-0,0007	0,00273252
8	-0,0104	-0,0124	-0,0144	-0,0004	-0,0004	-0,0004	-0,0064	0,00669328
9	-0,0024	-0,0004	-0,0054	0,0316	0,0006	0,0006	0,0041	0,013663821
10	-0,0224	-0,0234	-0,0214	-0,0024	-0,0094	-0,0094	-0,0147	0,008801515
11	-0,0104	-0,0134	-0,0054	0,0026	0,0006	-0,0004	-0,0044	0,006449806
12	-0,0164	-0,0094	-0,0084	-0,0134	-0,0014	-0,0104	-0,0099	0,005089204
13	-0,0054	-0,0064	-0,0074	0,0006	-0,0014	-0,0024	-0,0037	0,003141125
14	-0,0064	-0,0124	-0,0104	-0,0054	-0,0074	-0,0114	-0,0089	0,002880972
15	-0,0074	-0,0094	-0,0104	0,0006	-0,0034	-0,0004	-0,0051	0,004676181
16	-0,0104	-0,0094	-0,0074	-0,0064	-0,0064	-0,0084	-0,0081	0,001632993

Tratamento dos dados e resultados obtidos

A análise dos resultados foi feita através da técnica da Análise de Variância (ANOVA), aplicada sobre os erros de medição. O programa, em Matlab, utilizado para efetuar esta análise é apresentado no apêndice C. A soma de quadrados (SQ) associada às variáveis foi determinada, sendo que as SQ associadas às interações entre as variáveis foram adicionadas à soma de quadrados do Erro. Assim, a soma de quadrados do Erro apresenta a variabilidade associada às repetições nos resultados e às interações entre variáveis, tendo sido usada como referência para executar a análise pela estatística F de Snedecor.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da análise ANOVA, indicando o número de graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM calculado por SQ dividido pelo respectivo GL), estatística F (razão do QM considerado pelo QM do Erro) e probabilidade

associada ao valor F calculado. A probabilidade do valor F foi determinada da distribuição F de Snedecor, de acordo com o número de graus de liberdade da variável e do erro.

Tabela 5.3 – Análise de variância

Variável	Soma de Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrado Médio	Razão de Variâncias (F)	Probabilidade
A	1176	1	1176	31,17	0
B	51,04	1	51,042	1,35	0,2478
C	2,67	1	2,667	0,07	0,7909
D	345,04	1	345,042	9,15	0,0032
Erro	3433,08	91	37,726		
Total	5007,83	95			

Nesta tabela, pode-se observar que os valores de QM para as variáveis A e D foram maiores que os QM das demais variáveis e do Erro, sendo que os valores de F calculados apresentam esta relação. Da distribuição da estatística F, observa-se que os valores de probabilidade associados a estas variáveis são muito reduzidos, aproximadamente zero (0%) para A e 0,32% para D. Assim, pode-se concluir que as variáveis velocidade de aproximação do apalpador (A) e número de pontos (D) influenciaram os erros de medição do diâmetro da esfera de modo altamente significativo, adotando um nível de confiança ou probabilidade de 99%.

Uma análise através do gráfico de probabilidade normal foi realizada para confirmar os resultados da ANOVA. Os efeitos das variáveis e das interações entre as variáveis foram calculados através da análise de contrastes e, após ordenar os valores em sequência crescente, foram associados a valores de probabilidade esperada. Caso estes efeitos sejam correspondentes à variabilidade aleatória proveniente de uma distribuição normal de probabilidades, o gráfico deve resultar em uma reta. Os efeitos que se desviam desta reta são considerados como efeitos que influenciam significativamente o resultado.

A verificação da validade da análise estatística foi feita através da análise dos resíduos, para verificar as hipóteses de independência e distribuição normal, requisitos para executar as análises estatísticas propostas. Um modelo matemático foi estabelecido para determinar os valores estimados do erro de medição (y_e), considerando os efeitos das variáveis significativas sobre os erros e o valor médio do erro obtido. O modelo determinado com os resultados encontrados está apresentado pela equação (5.1).

$$y_e = - 4,8 + A (- 6,3/2) + D (- 4,5/2) \quad (5.1)$$

A figura 5.6 apresenta o gráfico resultante, onde pode ser observado que as variáveis (A) e (D) influenciam significativamente os erros de medição da esfera. Este resultado foi equivalente ao obtido na ANOVA, servindo para validação da análise anterior.

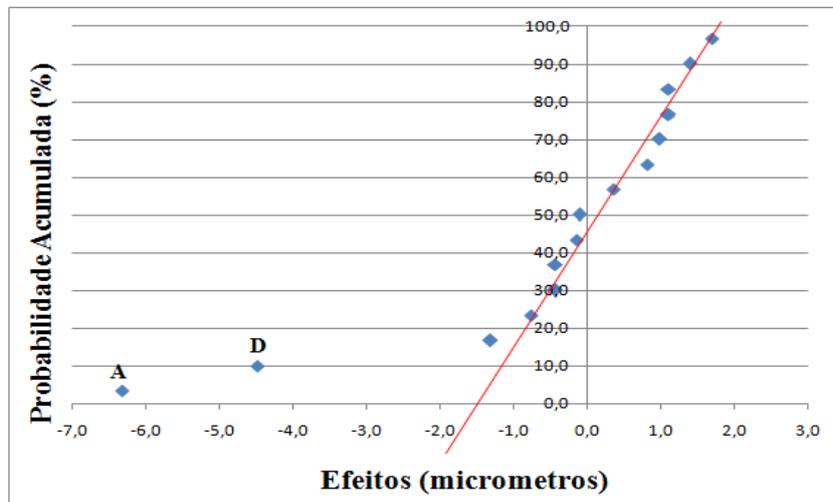


Figura 5.6 – Análise dos efeitos pelo gráfico de probabilidade normal

Os resíduos foram encontrados pela diferença entre os valores determinados experimentalmente para os erros de medição e os valores estimados pelo modelo da equação (5.1). Os resíduos foram inseridos em um gráfico de probabilidade normal, apresentado na figura 5.7. Através do gráfico, pode-se observar que a hipótese da normalidade dos resíduos não pode ser rejeitada.

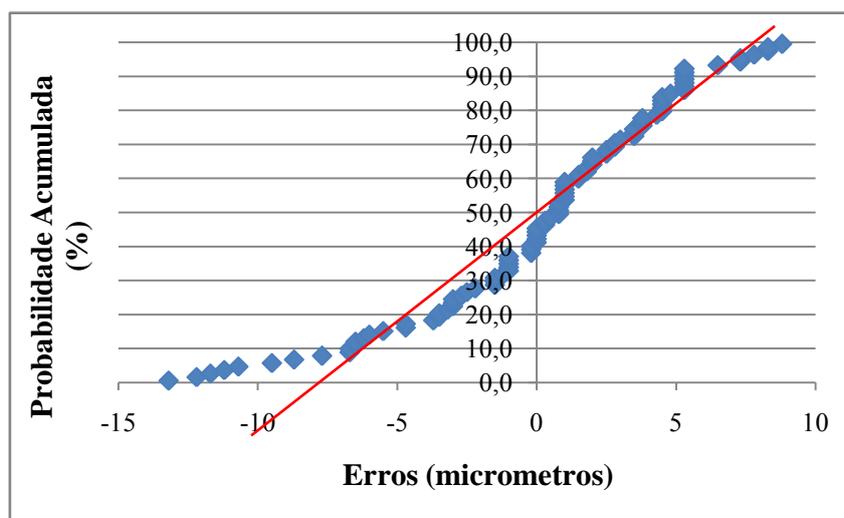


Figura 5.7 – Probabilidade normal de resíduo

O efeito das variáveis Velocidade e Número de Pontos foi analisado separadamente através dos gráficos apresentados na figura 5.8 (a) e (b). Esses gráficos mostram a variação no erro médio do diâmetro medido em função da alteração das variáveis do nível -1 para o nível +1.

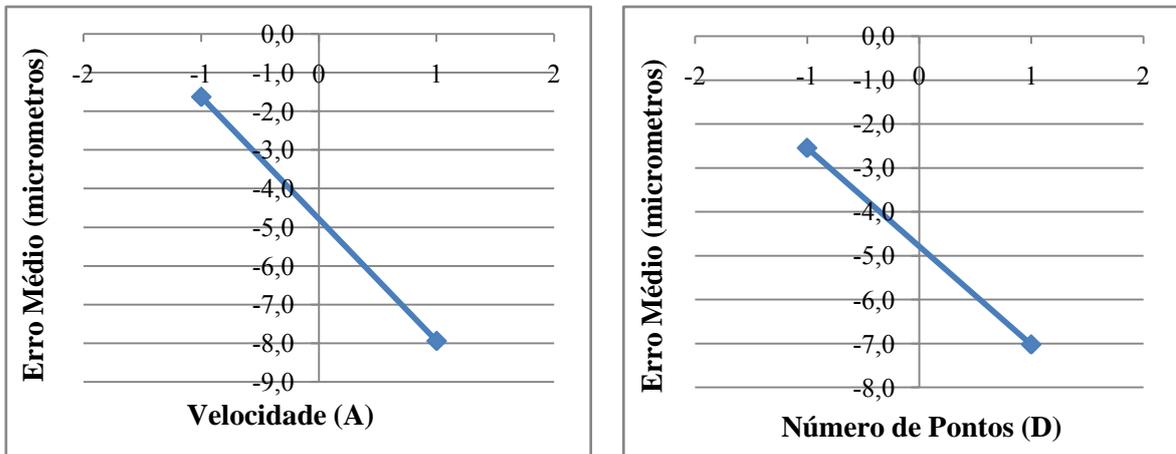


Figura 5.8 – Efeito das variáveis velocidade (A) e número de pontos (D) sobre os erros de medição

Na figura 5.8 (a), observa-se que o emprego de uma velocidade menor (nível -1) na operação da sonda resultou num erro médio de $-1,6 \mu\text{m}$, ao passo que maiores velocidades (+1) resultou em um erro médio de $-7,9 \mu\text{m}$. Na figura 5.8 (b), observa-se que a medição com um número menor de pontos (nível -1) resultou em um erro médio de $-2,5 \mu\text{m}$ no valor do diâmetro, ao passo que um número maior de pontos (+1) resultou em um erro médio de $-7,0 \mu\text{m}$.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É evidente que o investimento em pesquisas voltadas para metrologia vem contribuindo substancialmente para o desenvolvimento científico e tecnológico no Brasil. Juntando-se ao esforço nacional, os Laboratórios de Metrologia (LM) e Metrologia Dinâmica (LMD) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília tem desenvolvido métodos e meios para a calibração dinâmica de sensores de pressão e temperatura bem como estudos sobre fontes de erros dinâmicos em sondas de gatilhamento usadas em Máquinas de Medir por Coordenadas.

Este trabalho compilou os estudos realizados anteriormente no LM e no LMD com o objetivo de resgatar a contribuição dada por esses dois laboratórios à metrologia quando se tem a presença de efeitos dinâmicos. Procurou-se organizar os estudos de forma a categorizá-los em trabalhos de metrologia dinâmica e trabalhos voltados para a dinâmica no processo de medição. Destacou-se também como os métodos e meios propostos por esses dois laboratórios concordavam com as recomendações do GUM na aplicação dos conceitos básicos da metrologia.

O método proposto para a calibração dinâmica de sensores de temperatura e a metodologia utilizada para o cálculo de incerteza empregando a Cuba Rotativa, bem como os dispositivos desenvolvidos para calibração de sensores de pressão e para calibração de MMCs são metrologicamente consistentes, pois estão fundamentados em recomendações regulamentadas e utilizadas universalmente, destacando-se assim a contribuição brasileira para a metrologia científica.

Focando na dinâmica do processo de medição, a metodologia empregada para o estudo do comportamento dinâmico das variáveis envolvidas no processo de medição permitiu uma avaliação do efeito destas variáveis utilizando MMC com sondas de gatilhamento. Um estudo para verificar a influência de variáveis que afetam as medições dinâmicas realizadas em MMCs usando sondas com contato foi realizado. Um experimento foi planejado e executado para investigar quatro variáveis do processo de medição com sondas de gatilhamento. As variáveis velocidade de aproximação do apalpador, direção de aproximação, orientação do apalpador e número de pontos medidos, foram escolhidas para estudo através de um experimento fatorial. Estas variáveis estão relacionadas com os erros devido às propriedades dinâmicas da MMC, no entanto, não são as únicas envolvidas no

processo de medição. Cada variável foi estudada em dois valores (níveis), sendo determinados os valores do diâmetro de uma esfera de cerâmica. Os erros das medições foram determinados e utilizados para a análise dos resultados pela técnica de Análise de Variância.

Os resultados demonstraram que dentre as variáveis estudadas, a velocidade de aproximação do apalpador (A) é a que mais influencia nos erros no processo de medição, seguida do número de pontos utilizados na sondagem (D). Recomenda-se o emprego de uma menor velocidade de aproximação da sonda e um número maior de pontos para reduzir o erro de medição do diâmetro de superfícies com geometria esférica. O planejamento fatorial 2^4 foi eficiente para a identificação dos efeitos significativos e determinação das variáveis operacionais que mais influenciaram os erros de medição, através do planejamento de experimentos e da análise de variância.

Recomendações para trabalhos futuros

Para os dispositivos desenvolvidos no LMD, recomenda-se implementar uma metodologia atualizada para avaliação da incerteza do Dispositivo de Abertura Rápida e do Tubo de Choque, bem como procedimento para avaliação da incerteza do Gerador Periódico de Coluna de Líquido que envolva a função resposta do sensor.

Para os dispositivos desenvolvidos no LM, sugere-se seu uso para aplicação das metodologias na avaliação do desempenho de MMCs diferentes do tipo braço articulado. Sugere-se ainda aplicação da metodologia empregada para o teste de desempenho de MMCs tipo braço articulado com a PEV, o uso de padrões com outras geometrias.

A metodologia empregada para a análise dos erros dinâmicos envolvendo variáveis do processo de medição em MMC demonstrou ser útil e eficiente, contudo recomenda-se o desenvolvimento de mecanismos para controlar quantitativamente a velocidade para proporcionar uma avaliação e compensação dos erros associados a esta variável. Outra recomendação a ser feita a fim de dar mais consistência aos resultados obtidos, está relacionada com um estudo da propagação dos erros dinâmicos associados aos testes realizados com a MMC e das fontes de incertezas. Sugere-se ainda uma avaliação das questões relacionadas às oscilações dinâmicas no impacto da sonda ao tocar a esfera no processo de medição usando MMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSI/ASME B89.4.22 (2004). “Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines”. New York.
- ASME (1995). “A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers”. ANSI B88.1 - 1972 (R 1995), USA.
- Bosch, J. A. (1995). “Coordinate Measuring Machines and Systems”, ISBN 0-8247-9581-4, Marcel Dekker, United States of America.
- Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J. S. (1978). “Statistics for experimenters”, John Wiley, New York.
- Chensong D., Guoxiong, Z., Mu Yuhai, M. (1998). “Assessing the Dynamic Errors of Coordinate Measuring”, China Mechanical Engineering, vol.9, nº 7, p. 34-36.
- Clark, C. (1989). “The Practice of Dynamic Pressure Measurement”. Measurement & Control, vol. 22, nº 10, pag. 258 - 301.
- Cruz, P. T. A., Vianna, J. N. S, Moreira, C. S. (2003). “Study of the turbulence intensity variation within the combustion chamber of a SI engine due to turbocharging”, SAE Brasil 2003, Paper 269.
- Diniz, A. C. G. C. (1994). “Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Diniz, A. C. G. C., Neves, F. J. R. (2003). “Avaliação Metrológica de um Gerador de Pressão para Calibração Dinâmica”, Anais do Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, Recife - PE, Brasil.
- Diniz, A. C. G. C., Vianna, J. N. S., Neves, F. J. R. (2003). “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.
- Diniz, A. C. G. C., Vianna, J. N. S., Oliveira, A. B. S., Neves, F. J. R. (2004). “Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão e Temperatura”, VI Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, São Paulo – SP, Brasil.

- Diniz, A. C. G. C., Oliveira, A. B. S., Vianna, J. N. S., Neves, F. J. R. (2006). "Dynamic Calibration Methods for Pressure Sensors and Development of Standard Devices for Dynamic Pressure", XVIII IMEKO World Congress, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
- Donatelli, G. D., Gonçalves, A. A., Schneider, C. A., Pfeiffer, G. (2005). "Metrologia Geométrica na Indústria: tendências e desafios". O futuro da indústria: a importância da metrologia para o desenvolvimento industrial. Min. do Desenv. Indust. e Com. Exterior, SENAI, Série Política Industrial, vol 12, p. 9-28, Brasília-DF.
- Dong, C., Zhang, C., Wang, B., Zhang, G. X. (2003). "Reducing the Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines". ASME J. Mech. Design 124(4):831-839.
- Eichstädt, S., Link, A., Elster, C. (2010). "Dynamic Uncertainty for compensated second-Order Systems", Sensors (10) 7621-7631
- Elster, C.; Link, A., Bruns, T. (2007). "Analysis of Dynamic Measurements and Determination of Time-dependent Measurement Uncertainty Using a Second-order Model". In: Meas. Sci. Technol. 18 3682 -3687.
- Elster, C., Eichstädt, S., Link, A. (2009). "Uncertainty Evaluation of Dynamic Measurements In Line With GUM". In: XIX IMEKO World Congress, Lisboa, Portugal.
- Esward, T. J., Elster, C., Hessling, J. P. (2009). "Analysis of Dynamic Measurements: New challenges require new solutions". In: Proceedings of XIX IMEKO World Congress, Lisboa, Portugal.
- Ferreira, V. C. S. (2003) "Incerteza de medição para Medidas Transientes", Editora Banas, Edição Especial de Janeiro, www.banasqualidade.com.br.
- Flack, D. (2001). "CMM Probing - Measurements Good Practice Guide". N. 43. Teddington: HMSO.
- Garland, P. P., Rogers, R. J. (2008). "Dynamic calibration of tri-axial piezoelectric force transducers", Meas. Sci. Technol. (19), 095202 (9pp).
- Hessling, J. P. (2008). "A novel method of evaluating dynamic measurement uncertainty utilizing digital filters", Measurement Science and Technology, (20), 055106 (11pp).

- Hessling, J. P. (2008). “Dynamic metrology – an approach to dynamic evaluation of linear time-invariant measurement systems”, *Measurement Science and Technology* (19), 084008 (7pp).
- Hines, W. W., Montgomery, D. C., Goldsman, D. M., Borror, C. M. (2006). “Probabilidade e Estatística na Engenharia”, 4ª edição, Rio de Janeiro, LTC.
- <http://www.renishaw.com/en/7385.aspx>. Acessado em 13 de junho de 2011.
- Humienny, Z., Bialas, S., Hosanna, P. H., Tamre, M., Weckenmann, A., Blunt, L., Jakubiec, W. (2001). “Geometrical Product Specifications”, 1. ed. Poland:Warsaw University of Technology Printing House.
- INMETRO. (2003). GUM – Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. 3ª edição brasileira em língua portuguesa. Rio de Janeiro.
- INMETRO. (2009). “Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados.” 1ª edição brasileira do VIM 2008, Rio de Janeiro.78p.
- ISA. (2002). “A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers”. ISA – 37.1601.
- ISO 10360-2. (1994). “Coordinate Metrology Part 2: performance assessment of coordinate measuring machines”. International Organization for Standardization.
- JCGM. (2008). “Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in Measurement”, JCGM 100:2008, First edition. September 2008.
- JCGM. (2008). 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.
- Klen, E. R. (2000). “Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas Utilizando Placas de Esferas – Uma técnica econômica, rápida e metrologicamente eficiente, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Leodido, L. M., Sarraf, C., Damion, J. P. (2009). “Caracteristiques Dynamiques des Capteurs de Pression en Milieu Liquide”. In: 14º Congrès de Métrologie, Paris.
- Lira, F. A. de. (2001). “Metrologia na Indústria”. Editora Érica, São Paulo – SP.

- Montgomery, D. C. (2001), "Design and Analysis of Experiments", 5th edition, John Wiley & Sons, New York.
- Mu, Y. H., Ngoi, B. K. A. (1999). "Dynamic Error Compensation of coordinate Measuring Machines for High-speed Measurement", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, nº15, p. 810 - 840.
- Neto, A. C. (1995). "Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura: Cuba Rotativa", Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília.
- Oliveira, A. L.; Souza, A. R. (2003). "Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade", Anais do Congresso Metrologia 2003, Recife, Brasil.
- Orrego, R. M.; Giacomo, B.; Abackerli, A. J. (2000). "Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: considerações gerais", Ciência & Tecnol., V. 8, Nº 16, pp. 43-56.
- Peng, L., Shuwen, L. (2001). "Error Analysis and Compensation of Non-rigid Errors of CMM", Tool Engineering, vol.35, nº 10, p.32 - 34.
- Pereira, P. H., Hocken, R. J. (2007). "Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine", Precision Engineering nº 31, p. 22–32.
- Piratelli Filho, A. (1997). "Método para Avaliação do Desempenho de Máquinas de Medir a Três Coordenadas Através de Planejamento de Experimentos", Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- Piratelli-Filho, A., Giacomo, B. D. (2003). "CMM Uncertainty Analysis with Factorial Design", Precision Engineering nº 27 p. 283 - 288.
- Piratelli-filho, A., Lesnau, G. R., Ferreira, J.L.A. (2007). "Development of Virtual Ball Bar for Testing of CMM Performance". In: International Congress of Mechanical Engineering, Brasilia - DF. Proceedings of COBEM.
- Piratelli-Filho, A., Morais, F. L. (2009). "Alternative approaches to check performance of articulated arm cmm". In: 14º Congres International de Metrologie, Paris, França.
- Piratelli-Filho, A., Lesnau, G. R. (2010). "Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test". Measurement nº 43 p. 236–244.

- Piratelli-Filho, A., Fernandes, F. H. T., Arencibia, R. V. (2011). "Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation", Precision Engineering doi:10.1016/j.precisioneng.2011.10.004.
- Quelhas, L. G., Valle, S. C. P., Lazari, R. F. (2004). "Regulamentação Metrológica: Novos desafios e Perspectivas." Metering Latin America, p. 11-13.
- Reche, M. M., Assis, A. S. (2010). "Desenvolvimento de Pesquisa em Metrologia Legal." In: Congresso interno do INMETRO, Rio de Janeiro.
- Salsbury, J. G. (1995) "A Simplified Methodology for the Uncertainty Analysis of CMM Measurements", Precision Metrology/Applying Imaging & Sensoring, SME Technical.
- Santos, A. M. N., Diniz, A. C. G. C., Piratelli-Filho, A. (2011). "Metrologia Dinâmica - A Experiência da Universidade de Brasília". In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - II CIMMEC, 2011, Natal RN.
- Santos, A. M. N., Piratelli-Filho, A., Diniz, A.C.G.C. (2011). "Avaliação Dinâmica de Sondas de Gatilhamento em Máquinas de Medir por Coordenadas". In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - II CIMMEC, Natal RN.
- Sartori, S., Zhang, G. X. (1995). "Geometric error measurement and compensation of machines", Annals of the CIRP 44: 599 - 609.
- Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R., Delbressine, F. (2008). "Geometric error measurement and compensation of machines – an update", CIRP Annals – Manufacturing Technology 57: 660 – 675.
- Sousa, M. T., Vianna, J. N. S. (1998). "Controle de Emissões de Poluentes Através da Recirculação dos Gases de Escape em um Motor a Gasolina", VII ENCIT, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
- Trapet, E., Franke, M., Haertig, F., Schwenke, H., Wäldele, F., Cox, M. (1999). "Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine", Final Project Report MAT1-CT94-0076. PTB-Report F-35, Parts 1 and 2.
- Trapet, E., Wäldele, F. (1995). "The Virtual MMC concept", Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Division for Precision Engineerig, Braunschweig, 1995.

- Veiga, C. L. N. (1997). “É difícil Calibrar CMMs ?” *Controle da Qualidade*, n. 59, Editora Banas, São Paulo – SP, p. 48-54.
- Vianna, J. N. S., Damion, J. P., Carvalho, M. A. M. (1994). “Contribution to the Study of Measurement of Dynamic Pressure in the Interior of Combustion Engines”, Paper n° 942401- SAE DATABOOK.
- Vianna, J. N. S., Oliveira, A. B. S., Damion, J. P. (1999). “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.
- Vianna, J. N. S., Fraga, A. G., Reis, A. V., Oliveira, A. B. S., Sousa, M. T. (2002). “Reduction of Pollutants Emissions on SI Engines - Accomplishments With Efficiency Increase”, *J. of the Braz. Soc. Mechanical Sci.*, April 2002, Vol. XXIV.
- Vianna, J. N. S., Almeida, M. E. K., Diniz, A. C. G. C., Oliveira, A. B. S. (2003). “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.
- Wang, G., Luo, Z. (2009). “Dynamic Errors Analysis of CMM Touch Trigger Probes”, 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, China.
- Weckmann, A., Knauer, M., Killmaier, T. (2001). “Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry”, *Journal of Materials Processing Technology* 115, p. 9-13.
- Werkema, M. C. C., Drumond, F. B., Aguiar, S. (1996). “Análise de Variância: comparação de várias situações” (Série Ferramentas da Qualidade), Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Wilhelm, R. G., Hocken, R., Schwenke, H. (2001). “Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement”. In: *CIRP*, n. 50, p. 553-563.
- Wübbeler, G., Krystek, M., Elster, C. (2008). “Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method”, *Measurement Science and Technology* (19) 084009.
- Yetai, F., Jing, Z., Hongtao, W., Xiushui, M. (2004). “A Review of Research on Dynamic Errors of Coordinate Measuring Machines”, *Chinese Journal of Scientific Instrument*, vol. 25, n° 4, p 773 -776.

APÊNDICES

APÊNDICE A: GRUPO DE PESQUISA EM DINÂMICA DE SISTEMAS – G D S

O Grupo de Dinâmica de Sistemas – GDS reúne pesquisadores para o desenvolvimento de pesquisa, extensão e formação de recursos humanos nas seguintes áreas das ciências mecânicas: Metrologia Dinâmica e Dinâmica de Estrutura. Na área de Metrologia Dinâmica, são conduzidas ações que visam o desenvolvimento de métodos e a criação de meios para a realização de calibração dinâmica de sensores de pressão, temperatura e aceleração, com a qualidade metrológica requerida para as aplicações atuais. A área de Dinâmica de Estrutura, que tem como objetivo fundamental o desenvolvimento de técnicas numéricas e experimentais para a análise modal de estruturas complexas. Seguem algumas das principais realizações do GDS.

Dissertações de Mestrado

1. Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão (1994). Aluno: Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz. Orientador: Prof. Fernando Jorge R. Neves.
2. Estudo e Aplicação Metrológica do Tubo de Choque para Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão (1995). Aluno: Marco André Mattos de Carvalho. Orientador: Prof. João Nildo de Souza Vianna.
3. Rfreq - Software para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão (2000). Aluno: Cristiano Viana Serra Villa. Orientadores: Fernando Jorge Rodrigues Neves e João Nildo de Souza Vianna.
4. Métodos Experimentais para Análise da Detonação em Motores dos Ciclos Diesel e Otto (2000). Aluno: Luiz Carlos Dantas Arboés. Orientador: Fernando Jorge Rodrigues Neves.
8. Análise dos Efeitos da Curvatura do Diafragma sobre o Escoamento dentro de um Tubo de Choque, 2001. Aluno: Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior. Orientador: João Nildo de Souza Vianna.
9. Influência do Gás de Trabalho na Resposta em Frequência do Dispositivo de Abertura Rápida para Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão (2002). Aluno: Elpídio Quinderé Fritsche. Orientador: Fernando J.R. Neves.

Alguns trabalhos publicados

1. Neves, F.J.R., Diniz, A.C.G.C., “Estudo de Método para Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão”, Anais do III Congresso de Engenharia Mecânica do Norte e Nordeste, Belem, junho 1994.
2. Neves, F.J.R., Diniz, A.C.G.C., Bartoli, F.P., “Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão Usando Sinal Periódico - Um Estudo de Caso, XIII Seminário de Ciências Exatas e Engenharias”, Guaratingetá, 1994.
3. Carvalho, M. A. M., Andrade, F. E., Vianna, J. N.S. “The Importance of Dynamic Metrology in Control System: Methods and Apparatuses for Determining the Transient Response of Temperature and Pressure Transducers”, VI DINAME – Caxambú, 1995.
4. Vianna, J.N.S., Carvalho, M.A.M. , Oliveira, A.B.S. “Identificação dos Efeitos de Amortecimento e Defasagem nas Medições de Pressão no Interior de Cilindros de Motores de Combustão Interna”, VIII SIMEA-Simpósio de Engenharia Automotiva, S. Paulo, 1995.

5. Oliveira, A.B.S. , Vianna, J.N.S., Neves, F.J.R., Menezes, R.A.X. “Caracterização em Tempo Real do Fenômeno de Detonação em Motores de Combustão Interna com Quatro Cilindros’, VIII SIMEA-Simpósio de Engenharia Automotiva, S. Paulo 1995.
6. Oliveira, A.B.S., Arboés, L.C.D. “Método de qualificação de sensores de detonação comerciais”. VIII SIMEA - S. Paulo - 1995.
7. Oliveira, Alessandro Borges S., Neves, Fernando J.R., Vianna, João N.S. “Identificação de Detonação em Motores de Combustão Interna pela Análise de Sinais”, XIII COBEM - B. Horizonte - 1995.
8. Carvalho, Marco André M., Vianna, João N.S., Nerosky, Luiz Augusto R. “ Estudo da Influência das Membranas de Separação nos Processos Aéro-termodinâmicos Desenvolvidos no Interior de um Tubo de Choque”. XIII COBEM - B. Horizonte - 1995.
9. Vianna, João N.S., Carvalho, Marco André M. “Estudo da Influência das Linhas Pneumáticas na Medição Dinâmica de Pressão no Interior de Cilindros de Motores de Combustão Interna”. XIII COBEM - B. Horizonte - 1995.
10. Diniz, A.C.G.C., Neves, F.J.R., Bartoli, F.P., “Caracterização e Análise de um Gerador Periódico para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão”, XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica e II Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, dezembro 1995.
11. Oliveira, Alessandro Borges S., Vianna, João N.S., Neves, Fernando J.R., Menezes, Ricardo R.A.X. “Caracterização em Tempo Real do Fenômeno de Detonação em Motores de Combustão Interna com Quatro Cilindros”, I Congresso de Ciência e Cultura da UnB - Brasília, 1995.
12. Vianna, João N.S, Carvalho, Marco André M., Oliveira, Alessandro Borges S. “Identificação dos Efeitos de Amortecimento e Defasagem nas Medições Dinâmicas de Pressão no Interior dos Cilindros de Motores de Combustão Interna”, I Congresso de Ciência e Cultura da UnB - Brasília , 1995.
13. Oliveira, A.B.S., Arboés, L.C.D. “Método de Qualificação de Sensores de Detonação Comerciais”, I Congresso de Ciência e Cultura da UnB - Brasília, 1995.
14. Oliveira, Alessandro Borges S., Vianna, João N.S., Neves, Fernando J.R., Sousa, Marcelo T. “Estudo Metrológico da Determinação do Ponto Morto Superior de Motores de Combustão Interna” V Congresso e Exposição Internacionais da SAE - S. Paulo 1996.
15. Oliveira, Alessandro B.S., Arboés, Luiz C. Dantas, Vianna, João N.S., Neves, Fernando J.R. “Métodos Experimentais para Identificação de Detonação em Motores de Combustão Interna” VI ENCIT/LATCYM 96 - VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - Florianópolis - SC- 1996.
16. Oliveira, A.B.S., Vianna, J.N.S., Neves, F.J.R., Sousa, M.T., “Metrological Study on the Setting of the Top Dead Center in Internal Combustion Engines”, Global Mobility Data Base, Society of Automotive Engineers, USA, 1996.
17. Neves, F.J.R., Diniz, A.C.G.C., “Influence of the Forcing Signal on the Frequency Response of a Pressure Generator for Dynamic Pressure Sensor Calibration”, Proceedings of the 7th International Conference on Dynamic Problems in Mechanics, Rio de Janeiro, março de 1997.
18. Vianna, João N.S., Oliveira, Alessandro B.S., Neto, A. C. “Contribuição para o Estudo de Meios de Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura”, III Congresso Anual de La Somim -Morelia, México, 1997.
19. Oliveira, Alessandro B.S., Neves, Fernando J.R., Vianna, João N.S “Resposta Dinâmica de linhas Pneumáticas de Sensores para Medição de Pressão em Câmaras de Combustão” COBEM, Bauru-SP, 1997.

20. Vianna, João N.S., Oliveira, Alessandro B.S., Neto, Arthur C. “Reposta Dinâmica de Sensores de Temperatura Através do Desmascaramento em Meio Líquido” COBEM, Bauru - SP, 1997.
21. Diniz, Alberto C.G.C., Neves, Fernando J.R., Santos, Danilo J. “Delimitação do Campo de Utilização de um Gerador Periódico de Pressão”, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 97, Bauru, 1997.
22. Arboés, L.C.D., Oliveira, A.B.S., Neves, F.J.R., Vianna, J.N.S., “Métodos Experimentais para Identificação de Detonação em Motores de Combustão Interna”, XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 97, Bauru, 1997.
23. Vianna, J.N.S., Damion, J.P. Oliveira, A.B.S. “Avaliação da Influência da Membrana na Incerteza de Medição do Degrau de Pressão Gerado pela Onda Refletida em um Tubo de Choque” VII ENCIT – Rio de Janeiro – Brasil, 1998.
24. Oliveira, A B.S., Siqueira, M.B.B., Vianna, J.N.S. “Determinação da Incerteza de Medição em Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão” VII ENCIT - Rio de Janeiro - Brasil, 1998.
25. Vianna, J.N.S., Damion, J.P., Oliveira, A.B.S. “The Influence of the Diaphragm on the Metrological Characteristics of a Shock Tube”, 3rd Comité International des Poids et Mesures CCM - International Conference – Torino – 1999.
26. Vianna, J. N. S., Oliveira, A. B. S., Henriques, R. R. R., Almeida, M. E. “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura em Meio Líquido”, CONEM 2002, João Pessoa. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. RJ: ABCM, 2002. v.1.
27. Vianna, J. N. S., Almeida, M. E. K., Diniz, A. C. G. C., Oliveira, A. B. S. “Incerteza de Medição na Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura”, Anais do Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, 2003, Recife - PE, Brasil.
28. Diniz, A. C. G. C., Neves, F. J. R. “Avaliação Metrológica de um Gerador de Pressão para Calibração Dinâmica”, Anais do Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, 2003, Recife - PE, Brasil.
29. Diniz, A. C. G. C., Oliveira, A. B. S., Vianna, J. N. S., Neves, F. J. R. “Dynamic Calibration Methods for Pressure Sensors and Development of Standard Devices for Dynamic Pressure”, XVIII IMEKO World Congress, 2006, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.
30. Diniz, A. C. G. C., Vianna, J. N. S., Neves, F. J. R. “Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão: Métodos e Meios”, Anais do Congresso de Metrologia - Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia, 2003, Recife - PE, Brasil.
31. Santos, A., Diniz, A.C.G.C., Piratelli-Filho. “Metrologia dinâmica - a experiência da Universidade de Brasília”. In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - II CIMMEC, 2011, Natal RN.

Alguns projetos de iniciação científica ou de graduação

1. Arthur Carneiro Neto, “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura - Cuba Rotativa”, dezembro de 1993. Orientador: Prof. João Nildo de S. Vianna.
2. Fernando de A. Linhares, “Sistema Especialista para Aquisição e Tratamento de Grandezas Físicas”, novembro 1995. Orientadores: Prof. João Nildo de S. Vianna e Prof. Fernando J. Rodrigues Neves.
3. Luiz Carlos Dantas Arboés, “Métodos Experimentais para Identificação e Análise de Detonação em Motores de Combustão Interna”, janeiro de 1997.

APÊNDICE B: EXPERIÊNCIAS DO LM - UnB

O Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (LM-UnB) tem desenvolvido atividades de ensino e pesquisa nos temas Metrologia, Incerteza de Medição e Acreditação de Laboratórios. Estas atividades envolvem estudos avançados para contribuir com conhecimentos nacionais na calibração e na dinâmica de medição de Máquinas de Medir por Coordenadas. Alguns dos trabalhos mais importantes são relacionados na sequência.

Artigo aceito para publicação

Piratelli-Filho, A., Fernandes, F. H. T., Arencibia, R. V. “Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation”, *Precision Engineering* (2011), doi:10.1016/j.precisioneng.2011.10.004

Alguns trabalhos publicados

1. Piratelli-Filho, A., Giacomo, B.D. “Evaluation Of Coordinate Measuring Machines Performance Using Design Of Experiments”. In: XV INTERNATIONAL MEASUREMENT CONFEDERATION - IMEKO, 1999, Osaka, Japão, v.8, p.23-29.
2. Zirondi, R. B., Giacomo, B.D., Piratelli-Filho, A. “CMM Positioning Errors and the Measurement Uncertainties Using a Hole Bar and Reversal Technique”. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, 1999, Águas de Lindóia – SP.
3. Piratelli-Filho, A., Giacomo, B.D. “Application of Design of Experiments Techniques too Estimate CMM Measurement Uncertainty”. In: American Society for Precision Engineering - ASPE, 2000, Scottsdale, Arizona, EUA. 2000 ASPE Annual Meeting.
4. Piratelli-Filho, A., Giacomo, B.D. “Development of CMM Performance Test Utilizing Ball Bar Gauge”. In: 2nd International Conference and 3rd General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology - Euspen, may 27-31, 2001, Turim, Itália.
5. Piratelli-Filho, A., Giacomo, B.D. “CMM uncertainty analysis with factorial design. *Precision Engineering*”. New York, EUA, v. 27, p. 283-288, 2003.
6. Piratelli-Filho, A., Giacomo, B.D. “Uncertainty Evaluation in Small Angle Calibration using ISO GUM Approach and Monte Carlo Method”. In: XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croácia. 2003.
7. Piratelli-filho, A., Okubo Júnior, S. S. “Desenvolvimento e Calibração de Padrão Tubo de Esferas para Testes de Desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, 2003, Uberlândia, MG.
8. Piratelli-filho, A., Lesnau, G. R., Ferreira, J.L.A. “Development of Virtual Ball Bar for Testing of CMM Performance”. In: International Congress of Mechanical Engineering, Brasilia - DF. Proceedings of COBEM 2007.
9. Piratelli-Filho, A., Lesnau, G. R. “Uma proposta para execução de testes em Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs)”. *Metrologia & Instrumentação*, v. 49, p. 32-36, 2007.
10. Piratelli-Filho, A., Motta, J.M.S.T. “Performance of CAD model recovering method based on CMA measurement and NURBS modeling applied to small free form surfaces”. *Ciência & Engenharia*, v. 16, p. 67-72, 2007.

11. Piratelli-Filho, A., Morais, F.L. "Alternative Approaches to Check Performance of Articulated ARM CMM". In: 4.o Congres International de Metrologie, june 22-25, 2009, Paris, França : Colleege Français de Metrologie.
12. Piratelli-Filho, A., Fadel, A.A., Araujo, D.S.B., Alves, R.L. "Retrofitting de calibrador Pneumático", Parte I. Saber Eletrônica, v. 433, p. 42-48, 2009.
13. Piratelli-Filho, A., Fadel, A.A., Araujo, D.S.B., Alves, R.L. "Retrofitting de calibrador pneumático", Parte final. Saber Eletrônica, v. 434, p. 23-25, 2009.
14. Piratelli-Filho, A., Araujo, J.A., Brasil Junior, A.C.P. "Reverse engineering of hidraulic turbine runners using coordinate measuring arms and NURBS modeling". Revista Tecnologia (UNIFOR), v. 30, p. 114-122, 2009
15. Piratelli-Filho, A., Lesnau, G.R. "Virtual spheres gauge for coordinate measuring arms performance test". Measurement (London. Print), v. 43, p. 236-244, 2010.
16. Piratelli-Filho, A., Levy Neto, F. "Behavior of granite-epoxy composite beams subjected to mechanical vibrations". Materials Research (São Carlos. Impresso), JVC v. 13, p. 497-503, 2010.
17. Piratelli-Filho, A., Anwer, N. "Inspection of Parts With Free Form Profile: measurement and uncertainty determination". In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica-CONEM, 2010, Campina Grande - PB.
18. Santos, A., Piratelli-Filho, A., Diniz, A.C.G.C. "Avaliação Dinâmica de Sondas de Gatilhamento em Máquinas de Medir por Coordenadas". In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - II CIMMEC, 2011, Natal RN.
19. Pizo, G.I., Piratelli-Filho, A., Mota, J.M.S.T. "Determinação da incerteza de medição de um sistema scanner laser através do método de Monte Carlo". In: Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - II CIMMEC, 2011, Natal RN.
20. Piratelli – Filho, A., Souza, P.H.J., Gennari Junior, W., Arencibia, R. V. "Study Of CAD/CAM Processing of Free From Surfaces". In: International Congress of Mechanical Engineering - 21st COBEM, 2011, Natal RN.
21. Franco de Moraes, M.A., Arencibia, R.V., Barbieri, H., piratelli-Filho, A. "Avaliação da Incerteza da Medição de Rugosidade e Análise da Influência das Vibrações". In: XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX Semetro / Metrologia 2011, Natal RN.
22. Arencibia, R. V., Cedre, E. M. D., Crespo, Piratelli-Filho, A. "Incerteza na Medição dos Parâmetros Geométricos do Cordão de Solda". Soldagem e Inspeção (Impresso), JCR v. 16, p. 62-70, 2011.

Registro de Patentes

1. Piratelli-Filho, A. ; Lesnau, G. R., Queiroz, T. de O. Barra com Esferas Virtuais e sua Aplicação em Testes de Desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas (INPI Processo n.o PI0803145-2, 05/junho/08). 2008.
2. Piratelli Filho, A. Placa com Esferas Virtuais e sua Aplicação em Testes de Desempenho de Maquinas de Medir por Coordenadas (INPI Processo n.o PI1001161-7). 2010.
3. Piratelli Filho, A., Fernandes, F. H. T. Software de Análise de Desempenho AACMM-PEV (protocolo INPI nº 012110000095, registrado em 15/02/2011). 2011.

Alguns projetos de iniciação científica ou de graduação

1. Alfredo Daniel Arce Gomez, "Avaliação do desempenho de uma célula robótica de soldagem". 1999.
2. Glauber Roberto Lesnau, "Verificação do desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas com técnicas de planejamento de experimentos", 2006.

3. Alexandre Frade Rodrigues, “Avaliação do desempenho de Máquinas de Medir por Coordenadas modelo braço articulado segundo norma ANSI/ASME B89”, 2006. Fernando de Paula Junior, “Simulação de Erro em Superfícies de Forma Livre. 2007
5. Cesar Renato Santos Silva, “Estudo da Avaliação da Rugosidade em Madeiras. 2007.
6. Fabio Luiz de Moraes, “Construção de Padrão Placa de Esferas Virtuais de Medir por Coordenadas. 2008.
7. Tiago Noletto, “Análise de filtros aplicados na determinação de rugosidade de madeiras”, 2008.
8. André Luiz Ventura Gonçalves, “Comparação Interlaboratorial Aplicada a Máquinas de Medir por Coordenadas. 2009.
9. Leandro Araújo Moura, “Calibração de trenas, esquadros e réguas/retitude através de técnicas de medição por coordenadas”, 2009.
10. Gustavo de Carvalho Sousa, “Desenvolvimento de Métodos para Calibração de MMCs Braço Articulado. 2010.
11. Fabrício Henrique Tavares Fernandes, “Desenvolvimento de softwares e algoritmos para calibração de MMCs e filtros de rugosidade”. 2011.

APÊNDICE C: PROGRAMA PARA ANÁLISE DO PLANEJAMENTO FATORIAL

```
% Programa para analise do DOE fatorial 2^4
% -----
% variaveis: n=4
% niveis: 2
% replicas: 6
clear, close all
% Load data from files
arranjo=dlmread('C:\Documents and Settings\Usuario\Meus
documentos\Trabalho\Pesquisa\Alunos_UnB\Angela_mestrado\arranjo_fatorial_
2_4.txt');
matriz=arranjo;
dados=dlmread('C:\Documents and Settings\Usuario\Meus
documentos\Trabalho\Pesquisa\Alunos_UnB\Angela_mestrado\dados_erros.txt')
;
y=dados;
% ANOVA analise de variancia
p=anovan(y,matriz);
```