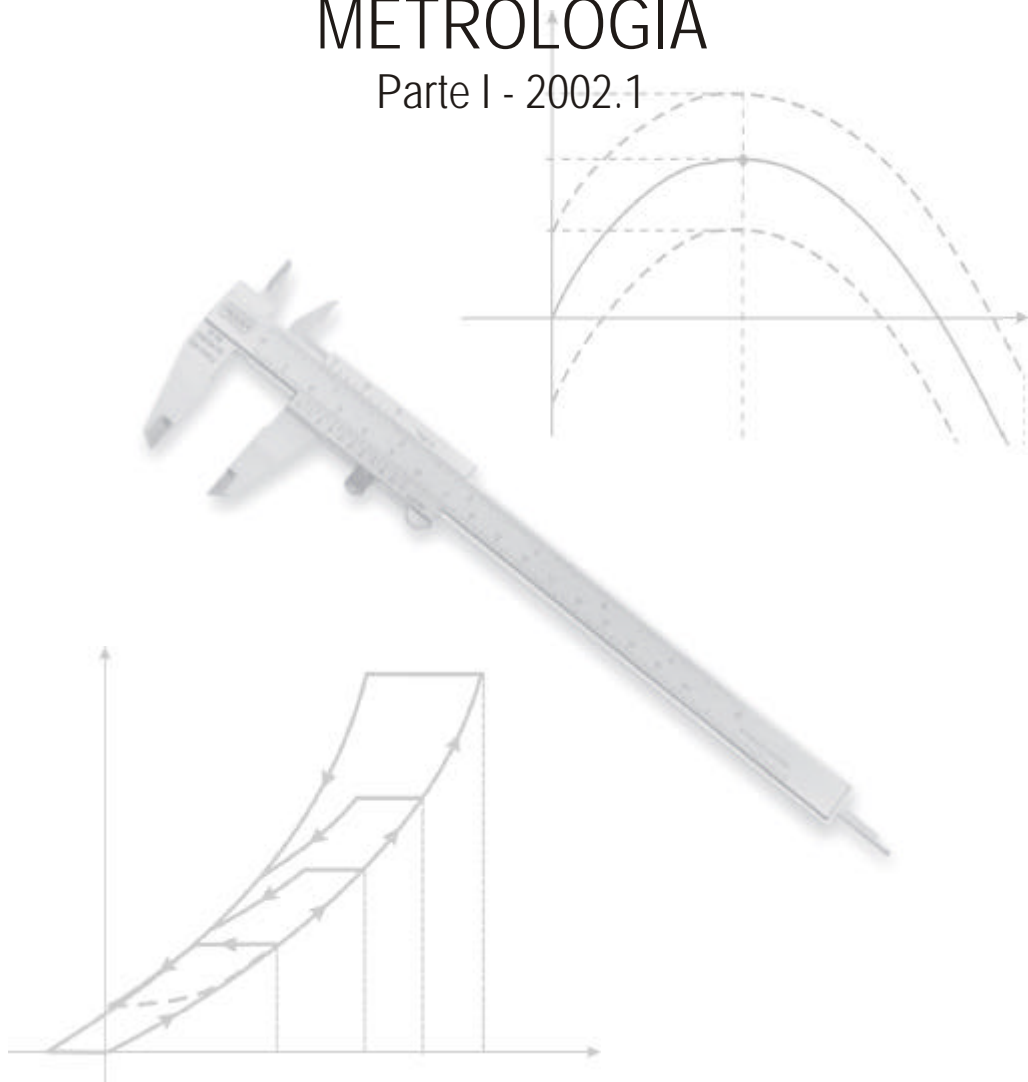


METROLOGIA

Parte I - 2002.1



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr.



Laboratório de Metrologia e Automação
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina

Erro! A origem da referência não foi encontrada.

por

Erro! A origem da referência não foi encontrada.

Erro! A origem da referência não foi encontrada. **Laboratório de Metrologia e Automatização**
Departamento de Engenharia Mecânica

Erro! A origem da referência não foi encontrada.
2 de agosto de 2002

Sumário

Sumário	iii
Capítulo 1	
CONSIDERAÇÃO INICIAIS	10
1.1 Medir Versus Colecionar Números	11
1.2 Erro de Medição Existe!	11
1.3 Terminologia.....	12
Capítulo 2	
MEDIR	14
2.1 Por que Medir?.....	14
2.2 O Processo de Medição.....	15
2.3 O Resultado de uma Medição.....	19
Capítulo 3	
O SISTEMA DE MEDIÇÃO	20
3.1 Sistema Generalizado de Medição.....	20
3.2 Métodos Básicos de Medição	22
3.2.1 O método da indicação ou deflexão	22

3.2.2	O método da zeragem ou compensação.....	23
3.2.3	O método diferencial.....	25
3.2.4	Análise comparativa	25
3.3	Parâmetros Característicos de Sistemas de Medição.....	25
3.3.1	Faixa de Indicação (FI).....	26
3.3.2	Faixa de Medição (FM).....	26
3.3.3	Valor de uma Divisão (de Escala) (VD).....	26
3.3.4	Incremento Digital (ID).....	26
3.3.5	Resolução (R).....	26
3.3.6	Erro Sistemático (Es).....	27
3.3.7	Repetitividade (Re) de um SM.....	27
3.3.8	Característica de Resposta Nominal (CRn)	27
3.3.9	Característica de Resposta Real (CRr).....	29
3.3.10	Curva de Erro (CE).....	29
3.3.11	Correção (C).....	29
3.3.12	Erro Máximo (E_{max}).....	29
3.3.13	Sensibilidade (Sb).....	30
3.3.14	Estabilidade da Sensibilidade (ESb).....	30
3.3.15	Estabilidade do Zero(Ez).....	32
3.3.16	Histerese (H).....	32
3.3.17	Erro de Linearidade (EL).....	33
3.4	Representação Absoluta Versus Relativa.....	33
3.4.1	Apresentação em termos absolutos	33
3.4.2	Apresentação em termos relativos (erro fiducial).....	33

Capítulo 4

O ERRO DE MEDIÇÃO	4.8	
4.1	A Convivência com o Erro.....	4.8
4.2	Tipos de Erros.....	4.8
4.2.1	O erro sistemático.....	4.9
4.2.2	O erro aleatório.....	4.9
4.2.3	O erro grosseiro.....	4.9
4.2.4	Exemplo.....	4.9
4.3	Estimação dos Erros de Medição.....	4.10
4.3.1	Erro sistemático/Tendência/Correção.....	4.10
4.3.2	Erro aleatório.....	4.13

4.3.3	Exemplo de determinação da Tendência e Repetitividade.....	4.14
4.3.4	Curva de erros de um sistema de medição.....	4.15
4.3.5	Erro Máximo do Sistema de Medição.....	4.17
4.4	Incerteza	4.17
4.5	Fontes de Erros.....	4.18
4.6	Minimização do Erro de Medição.....	4.21
4.6.1	Seleção correta do SM.....	21
4.6.2	Modelação correta do processo de medição.....	21
4.6.3	Adequação do Erro Máximo do Sistema de Medição.....	22
4.6.4	Calibração do Sistema de Medição.....	22
4.6.5	Avaliação das influências das condições de operação do SM.....	22
4.6.6	Calibração “in loco” do Sistema de Medição.....	22
	Problemas propostos	23

Capítulo 5

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	25	
5.1	Operações Básicas para Qualificação de Sistemas de Medição.....	25
5.1.1	Calibração.....	25
5.1.2	Ajuste	27
5.1.3	Regulagem.....	27
5.1.4	Verificação.....	27
5.2	Destino dos Resultados de uma Calibração.....	28
5.3	Métodos de Calibração.....	28
5.3.1	Calibração Direta.....	28
5.3.2	Calibração Indireta.....	29
5.3.3	Padrões para Calibração	29
5.4	Procedimento Geral de Calibração.....	35
5.5	Procedimento Geral de Calibração.....	37

Capítulo 6

O RESULTADO DA MEDIÇÃO	46
6.1 Mensurando Invariável Versus Variável.....	47
6.2 Uma Medida x Várias Medidas.....	47
6.3 Avaliação do Resultado da Medição de um Mensurando Invariável.....	48
6.3.1 Compensando efeitos sistemáticos	48
6.3.2 Não compensando efeitos sistemáticos	49
6.4 Avaliação do resultado da medição de um mensurando variável.....	51
6.4.1 Compensando efeitos sistemáticos	52
6.4.2 Não compensando e feitos sistemáticos	52
6.5 Problema Resolvido 2.....	53
6.6 Quadro Geral.....	54

Capítulo 7

CONTROLE DE QUALIDADE	57
7.1 Tolerância	57
7.2 O Controle de Qualidade	58
7.2.1 Exemplo Resolvido.....	61
7.3 Problemas Propostos	64

Capítulo 8

ESTIMATIVA DA INCERTEZA E CORREÇÃO EM MEDIÇÕES DIRETAS	65
8.1 Fontes de Incertezas.....	66
8.2 Incerteza Padrão.....	67
8.2.1 Estimativa da incerteza padrão por meios estatísticos (avaliação “tipo A”)	67
8.2.2 Estimativa da incerteza padrão por meios não estatísticos (avaliação “tipo B”).....	68
8.2.2.1 Estimativas baseadas em levantamentos estatísticos conhecidos a priori	68

8.2.2.2	Estimativas baseadas em limites máximos de variação.....	68
8.3	Combinação de efeitos	69
8.3.1	Correção combinada.....	70
8.3.2	Incerteza padrão combinada.....	70
8.3.3	Número de graus de liberdade efetivo.....	72
8.3.4	Incerteza Expandida.....	72
8.4	Balancos de incertezas.....	74
8.5	Exemplo Resolvido.....	75

Capítulo 9

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA EM MEDIÇÕES INDIRETAS	80	
9.1	Considerações preliminares.....	80
9.1.1	Medições diretas e indiretas	80
9.1.2	Dependência estatística.....	81
9.2	Grandezas de entrada estatisticamente dependentes	82
9.2.1	Soma e subtração.....	82
9.2.2	Multiplicação e divisão.....	83
9.2.3	Caso geral	85
9.3	Grandezas de entrada estatisticamente independentes.....	85
9.3.1	Soma e subtração.....	86
9.3.2	Multiplicação e divisão.....	87
9.3.3	Caso geral	88
9.4	Dependência estatística parcial.....	90
9.4.1	Combinação de grandezas estatisticamente dependentes e independentes.....	91
9.4.2	Caso geral	91
9.5	Incerteza padrão e incerteza expandida	92
9.6	Problema resolvido	92

Capítulo 10

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS ATRAVÉS DE MÓDULOS	94
--	-----------

Capítulo 11

O RESULTADO DA MEDIÇÃO - II	99
------------------------------------	-----------

11.1 Avaliação do resultado da medição de um mensurando invariável....	99
11.1.1 Compensando efeitos sistemáticos	100
11.1.2 Não compensando efeitos sistemáticos	100
11.2 Avaliação do resultado da medição de um mensurando variável.....	101
11.2.1 Compensando efeitos sistemáticos	102
11.2.2 Não compensando efeitos sistemáticos	102
11.3 Caso geral.....	103

Referências Bibliográficas	105
-----------------------------------	------------

Anexo I

O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	106
--	------------

I.1 Necessidade de um sistema internacional.....	106
I.2 As três classes de unidades do SI	107
I.2.1 Unidades de base.....	107
I.2.2 Unidades derivadas.....	107
I.2.3 Unidades suplementares	107
I.3 Regras para escrita e emprego dos símbolos das unidades SI.....	111
I.4 Múltiplos e submúltiplos decimais	111
I.5 Regras para emprego dos prefixos no SI	112
I.6 Alguns enganos	113
I.7 Unidades não pertencentes ao Sistema Internacional	113
I.7.1 Unidades em uso com o Sistema Internacional	113
I.7.2 Unidades admitidas temporariamente	114

Anexo II

TERMINOLOGIA COMPLEMENTAR	115
----------------------------------	------------

Anexo III

CONCEITOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA	117
---	------------

III.1 Distribuição de probabilidade.....	117
III.2 Distribuição normal.....	122
III.3 A natureza aleatória do erro de medição.....	123
III.4 Amostra versus população.....	124
III.5 Outras distribuições estatísticas.....	125

Anexo IV

REGRAS DE COMPATIBILIZAÇÃO DE VALORES	130
--	------------

IV.1 Regras de arredondamento de valores.....	131
IV.2 Regras de compatibilização de valores.....	131
IV.3 Observação complementares.....	132

Capítulo 1

CONSIDERAÇÃO INICIAIS

A medição é uma operação antiqüíssima e de fundamental importância para diversas atividades do ser humano. Na comunicação, por exemplo, toda vez que se quantifica um elemento, se está *medindo*, isto é, comparando este elemento com uma quantidade de referência conhecida pelo transmissor e receptor da comunicação.

O comércio é outra atividade onde a medição é fundamental: para que transações comerciais possam ser efetuadas, é necessário descrever as quantidades envolvidas em termos de uma base comum, isto é, de uma *unidade* de medição. Com a evolução da manufatura, esta necessidade se intensificou: é preciso descrever o bem fabricado em termos de elementos que o quantifiquem, isto é, número de um calçado, tamanho de uma peça, quantidade contida em uma embalagem, são apenas exemplos. A intercambialidade desejada entre peças e elementos de uma máquina só é possível através da expressão das propriedades geométricas e mecânicas destes elementos através de operações de medição.

Medir é uma forma de descrever o mundo. As grandes descobertas científicas, as grandes teorias clássicas foram, e ainda são, formuladas a partir de observações experimentais. Uma boa teoria é aquela que se verifica na prática. A descrição das quantidades envolvidas em cada fenômeno se dá através da medição.

A medição continua presente no desenvolvimento tecnológico. É através da medição do desempenho de um sistema que se avalia e realimenta o seu aperfeiçoamento. A qualidade, a segurança, o controle de um elemento ou processo é sempre assegurada através de uma operação de medição.

Há quem afirme que "*medir é fácil*". Afirma-se aqui que "*cometer erros de medição é ainda mais fácil*". De fato, existe uma quantidade elevada de fatores que podem gerar estes erros, conhece-los e controlá-los nem sempre é uma tarefa fácil.

Como o valor a medir é sempre desconhecido, não existe uma forma mágica de checar e afirmar que o número obtido de um sistema de medição representa a grandeza sob medição (mensurando). Porém, existem alguns procedimentos com os quais pode-se caracterizar e delimitar o quanto os erros podem afetar os resultados. Neste texto, são abordadas diversas técnicas e procedimentos que permitem a convivência pacífica com o erro de medição.

1.1 Medir Versus Colecionar Números

É através de um *sistema de medição* (SM) que a operação medir é efetuada: o valor momentâneo do mensurando é descrito em termos de uma comparação com a unidade padrão referenciada pelo SM. O resultado da aplicação deste SM ao mensurando é um número acompanhado de uma unidade de Indicação.

Para o leigo, por mera ignorância ou ingenuidade, o trabalho de medição está encerrado quando se obtém este número. Na verdade, esta operação é uma parte do processo de medição. É uma tarefa relativamente simples a aplicação deste SM por várias vezes e a obtenção de infindáveis coleções de números. Porém, a obtenção de informações confiáveis a partir destes números, exige conhecimentos aprofundados sobre o SM e o processo de medição empregado. Sabe-se que não existe um SM perfeito: além de limitações construtivas internas, o SM é comumente afetado por efeitos diversos relacionados com o meio ambiente, com a forma e a técnica de aplicação deste SM, pelas influências da própria grandeza, dentre outros. É necessário considerar todos estes efeitos e exprimir um resultado confiável, respeitando a limitação deste SM.

O resultado de uma medição séria deve exprimir o grau de confiança a que é depositado pelo experimentador. Como é impossível obter uma Indicação exata, o erro provável envolvido deve **sempre** ser informado através de um parâmetro denominado *incerteza*. Existem diversos procedimentos e técnicas com as quais é possível determinar o nível de confiança de um resultado. Porém, bom senso e ceticismo são características adicionais indispensáveis a quem se dispõe a medir. A regra é "duvidar sempre, até que se prove o contrário".

A qualidade de uma medição se avalia pelo nível dos erros envolvidos. Porém, nem sempre deve-se buscar o "melhor" resultado, com mínimos erros. Depende da finalidade à qual se destinam estes resultados. Aceitam-se erros de ± 20 g em uma balança de uso culinário, porém estes erros não podem ser aceitos caso deseje-se medir a massa de pepitas de ouro. Medir com mínimos erros custa caro. À medida que se desejam erros cada vez menores, os custos se elevam exponencialmente. A seleção do SM a empregar é, portanto, uma ação de elevada importância que deve equilibrar as necessidades técnicas com os custos envolvidos.

1.2 Erro de Medição Existe!

Uma medição perfeita, isto é, sem erros, só pode existir se um SM (sistema de medição) perfeito existir e a *grandeza sob medição* (denominada *mensurando*) tiver um valor único, perfeitamente definido e estável. Apenas neste caso ideal o *resultado de uma medição* (RM) pode ser expresso por um número e uma unidade de medição apenas.

Sabe-se que não existem SM perfeitos. Aspectos tecnológicos forçam que qualquer SM construído resulte imperfeito: suas dimensões, forma geométrica, material, propriedades elétricas, ópticas, pneumáticas, etc, não correspondem **exatamente** à ideal. As leis e princípios físicos que regem o funcionamento de alguns SM nem sempre são perfeitamente lineares como uma análise simplista poderia supor. A existência de desgaste e deterioração de partes agravam ainda mais esta condição. Nestes casos, o SM gera erros de medição.

Perturbações externas, como, por exemplo, as condições ambientais, podem provocar erros, alterando diretamente o SM ou agindo sobre o mensurando, fazendo com que o comportamento do SM se afaste ainda mais do ideal. Variações de temperatura provocam dilatações nas escalas de um SM de comprimento, variações nas propriedades de componentes e circuitos elétricos, que alteram o valor indicado por um SM. Vibrações ambientais, a existência de campos eletromagnéticos, umidade do ar excessiva, diferentes pressões atmosféricas podem, em maior ou menor grau, afetar o SM, introduzindo erros nas indicações deste.

O operador e a técnica de operação empregada podem também afetar a medição. O uso de força de medição irregular ou excessiva, vícios de má utilização ou SM inadequados, podem levar a erros imprevisíveis. A forma, tamanho ou faixa de medição do SM pode não ser a mais indicada para aquela aplicação.

Em parte dos casos, o mensurando não possui valor único ou estável. Apenas um cilindro ideal apresenta um valor único para o seu diâmetro. Não se consegue fabricar um cilindro real com a forma geométrica matematicamente perfeita. Características da máquina operatriz empregada, dos esforços de corte, do material ou ferramenta empregada afastam a forma geométrica obtida da ideal. Mesmo que disponha de um SM perfeito, verifica-se que diferentes medições do diâmetro em diferentes ângulos de uma mesma secção transversal ou ao longo de diferentes seções ao longo do eixo do cilindro levam a diferentes números. Estas variações são de interesse quando se deseja caracterizar as propriedades do cilindro e devem ser informadas no resultado da medição. A temperatura de uma sala é outro exemplo de um mensurando instável: varia ao longo do tempo e com a posição onde é medida. A massa de uma peça metálica é um exemplo de um mensurando estável, se forem desprezados aspectos relativísticos.

Na prática estes diferentes elementos que afetam a resposta de um SM aparecem superpostos. Ao se utilizar de um sistema de medição para determinar o resultado de uma medição é necessário conhecer e considerar a faixa provável dentro da qual se situam estes efeitos indesejáveis - sua *incerteza* - bem como levar em conta as variações do próprio mensurando. Portanto, o resultado de uma medição não deve ser composto de apenas um número e uma unidade, mas de uma faixa de valores e a unidade. Em qualquer ponto dentro desta faixa deve situar-se o valor verdadeiro associado ao mensurando.

1.3 Terminologia

Para que se possa expor de forma clara e eficiente os conceitos da metrologia, através do qual são determinados e tratados os erros de medição, é preciso empregar a terminologia técnica apropriada. A terminologia adotada neste texto está baseada na Portaria 029 de 10 de março de 1995 do INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia,

Normalização e Qualidade Industrial, que estabelece o “Vocabulário de Termos Fundamentais e Gerais em Metrologia”. Este documento é baseado no vocabulário internacional de metrologia elaborado por diversas entidades internacionais tais como BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC e IUPAP.

Capítulo 2

MEDIR

2.1 Por que Medir?

Do ponto de vista técnico, a medição é empregada para *monitorar, controlar ou investigar* um processo ou fenômeno físico.

Nas aplicações que envolvem monitoração, os SM (Sistemas de Medição) apenas indicam para o usuário o valor momentâneo ou acumulado do mensurando (ME). Barômetros, termômetros e higrômetros, quando usados para observar aspectos climáticos são exemplos clássicos de aplicações que envolvem monitoração. Medidores do consumo de energia elétrica ou volume d'água são outros exemplos. Nenhuma ação ou decisão é tomada em relação ao processo.

Qualquer sistema de controle envolve um SM como elemento sensor, compondo um sistema capaz de manter uma grandeza ou processo dentro de certos limites. O valor da grandeza a controlar é medido e comparado com o valor de referência estabelecido e uma ação é tomada pelo controlador visando aproximar a grandeza sob controle deste valor de referência. São inúmeros os exemplos destes sistemas. O sistema de controle da temperatura no interior de um refrigerador é um exemplo: um sensor mede a temperatura no interior do refrigerador e a compara com o valor de referência pré-estabelecido. Se a temperatura estiver acima do valor máximo aceitável, o compressor é ativado até que a temperatura atinja um patamar mínimo, quando é desligado. O isolamento térmico da geladeira mantém a temperatura baixa por um certo tempo, e o compressor permanece desativado enquanto a temperatura no interior estiver dentro da faixa tolerada. Exemplos mais sofisticados passam pelo controle da trajetória de um míssil balístico teleguiado, uma usina nuclear, uma máquina de comando numérico, etc.

Os recursos experimentais foram, e ainda são, uma ferramenta indispensável com a qual diversas descobertas científicas tornaram-se possíveis. Problemas nas fronteiras do conhecimento freqüentemente requerem consideráveis estudos experimentais em função de não existir ainda nenhuma teoria adequada. Estudos teóricos e resultados experimentais são complementares e não antagônicos. A análise combinada teoria-experimentação pode levar ao conhecimento de fenômenos com muito maior profundidade e em menor tempo do que cada uma das frentes em separado. Através

da experimentação é possível, por exemplo, testar a validade de teorias e de suas simplificações, testar relacionamentos empíricos, determinar propriedades de materiais, componentes, sistemas ou o seu desempenho.

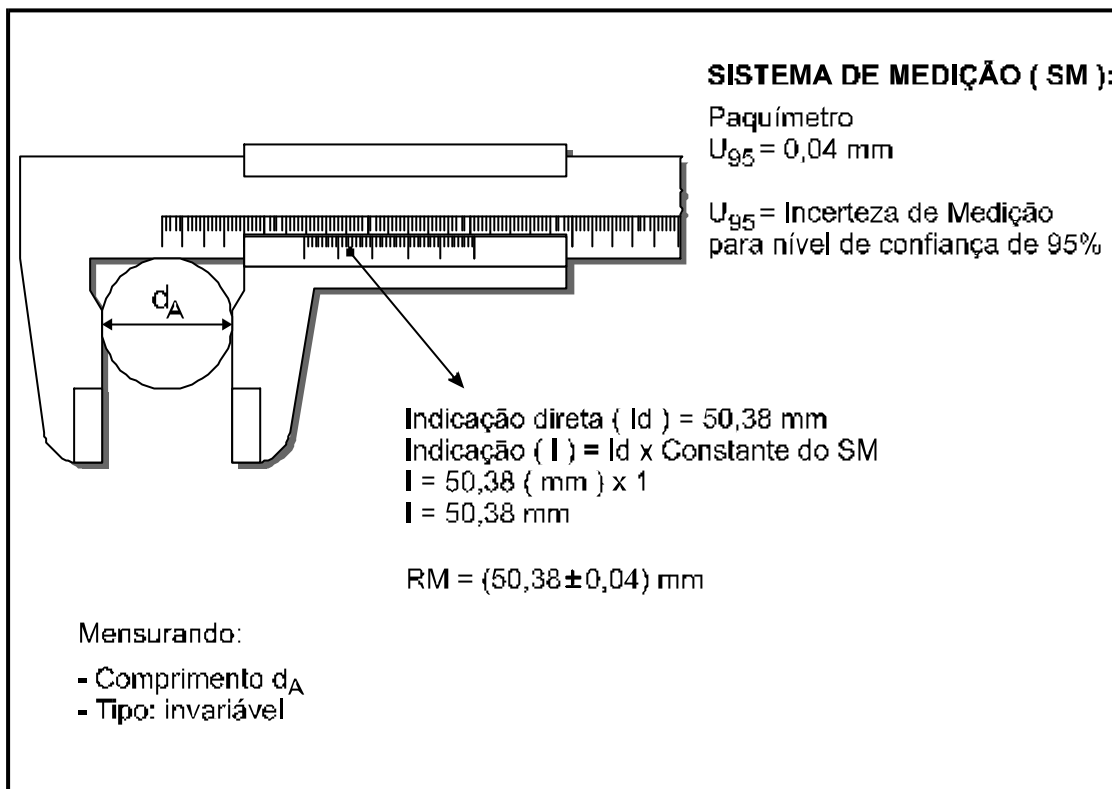
2.2 O Processo de Medição

Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (*mensurando*) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão, e reconhecida internacionalmente.

A operação de medição é realizada por um *instrumento de medição* ou, de uma forma mais genérica, por um *sistema de medição* (SM), podendo este último ser composto por vários módulos.

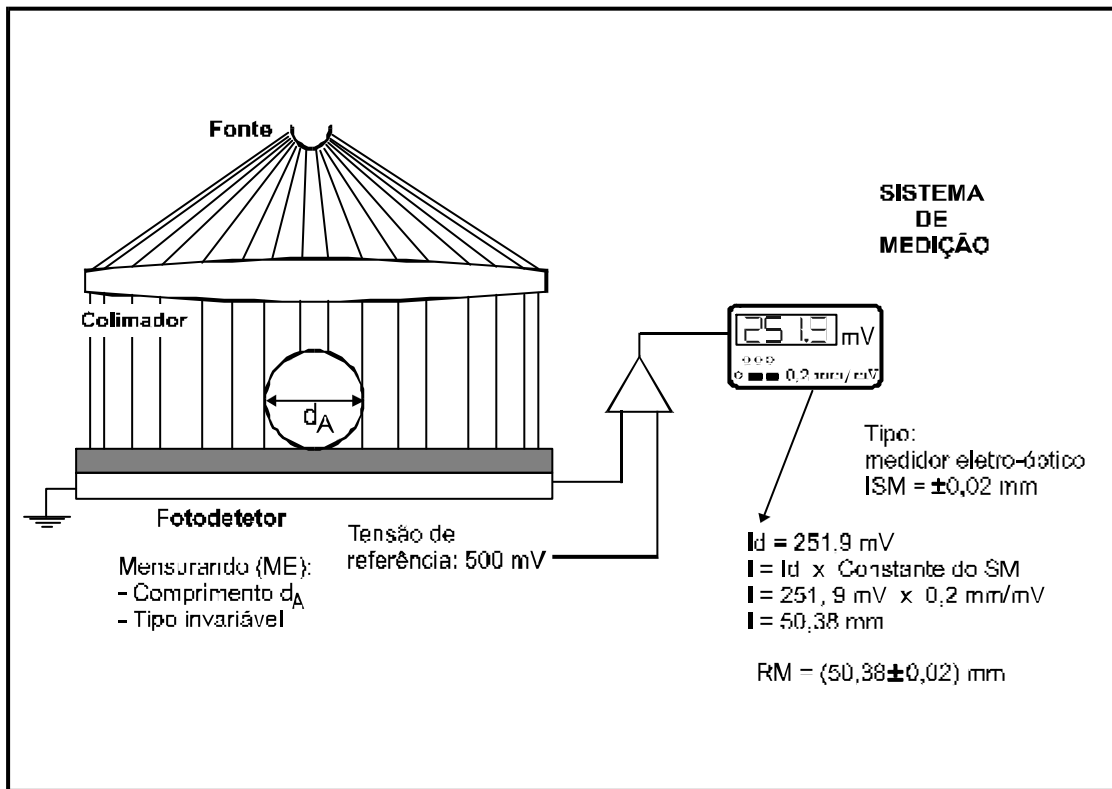
Obtém-se desta operação instrumentada a chamada *indicação direta*, que é o número lido pelo operador diretamente no *dispositivo mostrador*, acompanhado da respectiva unidade indicada neste dispositivo. Para que a medição tenha sentido, é necessário determinar a chamada *indicação*. A indicação corresponde ao valor momentâneo do mensurando no instante da medição, e é composta de um número acompanhado da mesma unidade do mensurando.

A indicação é obtida pela aplicação da chamada *constante do instrumento* à indicação direta. A constante do instrumento deve ser conhecida pelo usuário do SM antes do



AAG - 11/97 - MCG 001

Figura 2.1 - Operação de Medição



AAG - 12/97 - MCG 002

Figura 2.2 - Operação de Medição

MEDIR

multiplicativa, e em alguns casos o valor da indicação pode ser calculada a partir de equações lineares ou não lineares, tabelas ou gráficos.

A figura 2.1 ilustra a operação de medição realizada através de um instrumento de medição denominado paquímetro. A indicação direta obtida é 50,38 mm. Sabe-se que a constante multiplicativa deste instrumento é unitária. Logo, a indicação resulta em:

$$I = 50,38 \text{ mm},$$

que corresponde ao comprimento medido.

O exemplo da figura 2.2 consiste de um SM de comprimento que funciona por princípios optoeletrônicos. A peça a medir é iluminada por um feixe de luz colimada e uniforme. A sombra do comprimento a medir é projetada sobre o fotodetector, que gera um sinal elétrico proporcional à quantidade de energia recebida, que é proporcional à área iluminada. Este sinal elétrico é amplificado por meio de um circuito eletrônico e indicado pelo SM. Como mostra a figura 2.2, a indicação direta é 251,9 mV. Neste caso, fica claro que 251,9 mV não é o valor do diâmetro a medir. O cálculo do valor da indicação é efetuado através da constante multiplicativa do SM: 0,2 mm/mV. Assim,

$$I = 251,9 \text{ mV} \cdot 0,2 \text{ mm/mV} = 50,38 \text{ mm}.$$

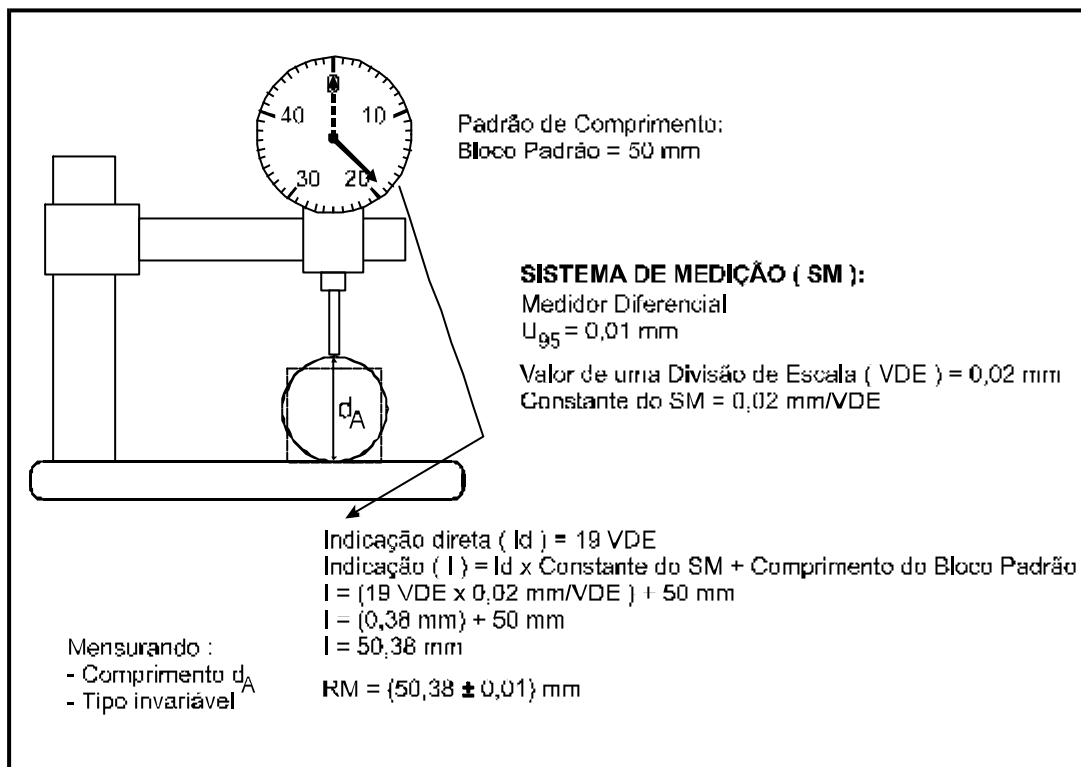
A figura 2.3 mostra um outro exemplo de SM. Deste SM faz parte um relógio comparador, cuja indicação reflete o deslocamento vertical da sua haste. A medição é efetuada em três etapas:

- a) inicialmente um bloco padrão de comprimento conhecido de 50 mm é aplicado sobre o SM;
- b) o SM é regulado para que, neste caso, a indicação direta seja zero;
- c) o padrão de 50 mm é retirado e a peça a medir é submetida ao SM;

A indicação direta obtida, neste caso, é de 19 divisões, e está associada à diferença entre os comprimentos da peça a medir e o padrão de 50 mm. A determinação da indicação envolve uma constante aditiva igual ao comprimento do padrão de 50 mm e uma constante multiplicativa relacionada com a sensibilidade do relógio comparador, isto é, com a relação mm/divisão deste relógio comparador. Assim, o valor da indicação é:

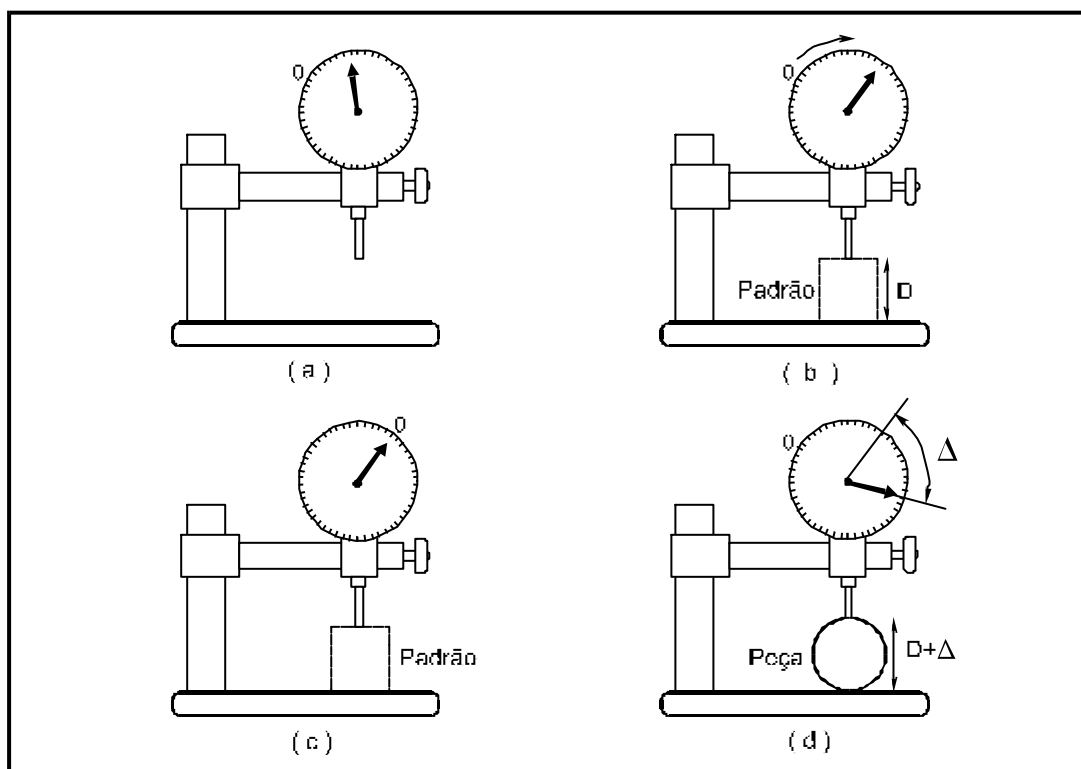
$$I = 50 \text{ mm} + 19 \text{ div} \cdot 0,02 \text{ mm/div}$$

$$I = 50,38 \text{ mm}$$



AAC - 11/07 - MCC 003

Figura 2.3 - Operação de Medição



CAF - 07/95 - AM 065

Figura 2.4 - Medição Diferencial

Em boa parte dos SM comerciais a *indicação* coincide numericamente com a *indicação direta*, caso em que a constante do instrumento é multiplicativa e unitária, o que torna bastante cômoda e prática a aplicação do SM. Porém, deve-se estar atento para as diversas situações.

2.3 O Resultado de uma Medição

A indicação, obtida de um SM, é sempre expressa por meio de um número e a unidade do mensurando. O trabalho de medição não termina com a obtenção da *indicação*. Neste ponto, na verdade, inicia o trabalho do experimentalista. Ele deverá chegar à informação denominada: *resultado de uma medição*.

O resultado de uma medição (RM) expressa propriamente o que se pode determinar com segurança sobre o valor do mensurando, a partir da aplicação do SM sobre esta. É composto de duas parcelas:

- a) o chamado *resultado base* (RB), que corresponde ao valor central da faixa onde deve situar-se o valor verdadeiro do mensurando;
- b) e a *incerteza da medição* (IM), que exprime a faixa de dúvida ainda presente no resultado, provocada pelos erros presentes no SM e/ou variações do mensurando, e deve sempre ser acompanhado da unidade do mensurando. Assim, o resultado de uma medição (RM) deve ser sempre expresso por:

$$RM = (RB \pm IM) \text{ [unidade]}$$

O procedimento de determinação do RM deverá ser realizado com base no:

- a) conhecimento aprofundado do processo que define o mensurando (o fenômeno físico e suas características);
- b) conhecimento do sistema de medição (características metrológicas e operacionais);
- c) bom senso.

No capítulo 6 são detalhados os procedimentos empregados para a determinação do RB e da IM a partir dos dados do SM, das características do mensurando e das medições efetuadas.

Capítulo 3

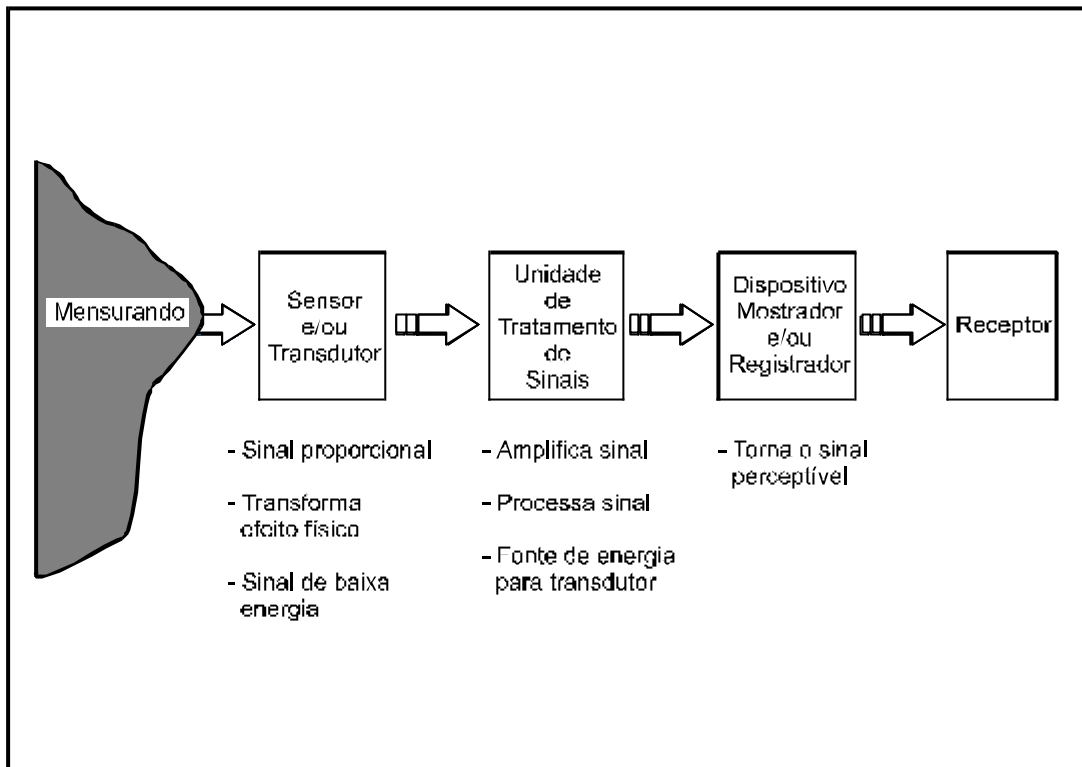
O SISTEMA DE MEDIÇÃO

É necessário o conhecimento das características metrológicas e operacionais de um sistema de medição para sua correta utilização. Para tal, é necessária a definição de alguns parâmetros para caracterizar de forma clara o seu comportamento. Antes de iniciar tal estudo é conveniente classificar as partes que compõem um sistema de medição típico e caracterizar os métodos de medição.

3.1 Sistema Generalizado de Medição

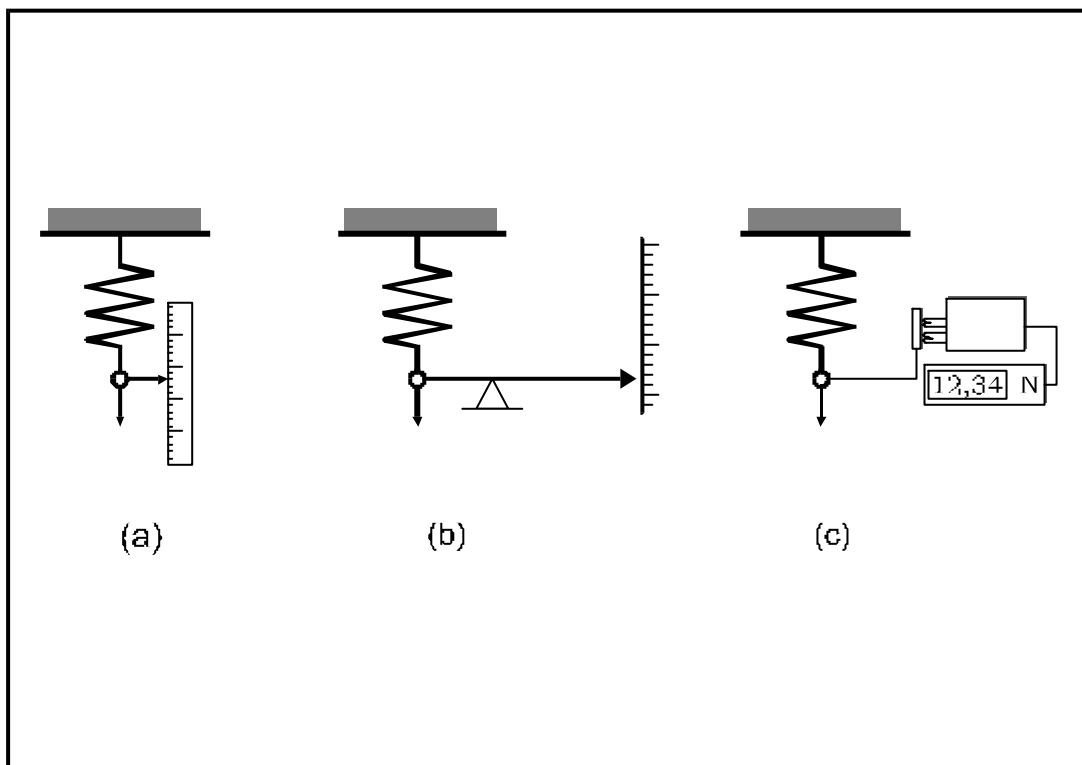
A análise sistêmica de diversos SM revela a existência de três elementos funcionais bem definidos que se repetem com grande frequência na maioria dos sistemas de medição em uso. Em termos genéricos, um SM pode ser dividido em três módulos funcionais: o *sensor/transdutor*, a *unidade de tratamento do sinal* e o *dispositivo mostrador*. Cada módulo pode constituir uma unidade independente ou pode estar fisicamente integrada ao SM. A figura 3.1 mostra genericamente este SM.

O *transdutor* é o módulo do SM que está em contato com o mensurando. Gera um sinal proporcional (mecânico, pneumático, elétrico ou outro) ao mensurando segundo uma função bem definida, normalmente linear, baseada em um ou mais fenômenos físicos. Em termos gerais, um transdutor transforma um efeito físico noutro. Quando o transdutor é composto de vários módulos, várias transformações de efeitos podem estar presentes. O primeiro módulo do transdutor, aquele que entra em contato



AAG - 11/07 - MCC 004

Figura 3.1 - Sistema Generalizado de Medição



AAG - 10/87 - VCE 035

Figura 3.2 - Três exemplos de Dinamômetros

diretamente com o mensurando, é também denominado de *sensor*. A rigor, o sensor é uma parte do transdutor.

O sinal gerado pelo sensor/transdutor normalmente é um sinal de baixa energia, difícil de ser diretamente indicado. A *unidade de tratamento do sinal* (UTS), além da amplificação da potência do sinal, pode assumir funções de filtragem, compensação, integração, processamento, etc. É às vezes chamada de condicionador de sinais. Este módulo pode não estar presente em alguns SM mais simples.

O *dispositivo mostrador* recebe o sinal tratado (amplificado, filtrado, etc) e através de recursos mecânicos, eletro-mecânicos, eletrônicos ou outro qualquer, transforma-o em um número inteligível ao usuário, isto é, produz uma indicação direta perceptível. Este módulo subentende também dispositivos registradores, responsáveis pela descrição analógica ou digital do sinal ao longo do tempo ou em função de outra grandeza independente. São exemplos: registradores X-Y, X-T, gravadores de fita, telas de osciloscópios, etc.

A figura 3.2 exemplifica alguns SM's, onde são identificados estes elementos funcionais. A mola é o transdutor do dinamômetro da figura 3.2a: transforma a força em deslocamento da sua extremidade, que é diretamente indicado através de um ponteiro sobre a escala. Neste caso não há a unidade de tratamento de sinais. Já o exemplo da figura 3.2b incorpora uma unidade deste tipo, composta pelo mecanismo de alavancas: o pequeno deslocamento da extremidade da mola é mecanicamente amplificado por meio da alavanca que, contra a escala, torna cômoda a indicação do valor da força. Na figura 3.2c, representa-se um outro dinamômetro: o transdutor é composto de vários módulos: a força é transformada em deslocamento por meio da mola, em cuja extremidade está fixado um núcleo de material ferroso que, ao se mover, provoca variação da indutância de uma bobina, que provoca um desbalanceamento elétrico em um circuito, provocando uma variação de tensão elétrica proporcional. Este sinal é amplificado pela UTS, composta de circuitos elétricos, e indicado através de um dispositivo mostrador digital.

Mesmo o termômetro da figura 3.3 possui os três elementos funcionais. A temperatura a medir é absorvida pelo fluido no interior do bulbo, que é o transdutor deste sistema, e sofre variação volumétrica. Esta variação é praticamente imperceptível a olho nu. O tubo capilar do termômetro tem por finalidade amplificar este sinal, transformando a variação volumétrica deste fluido em grande variação da coluna do fluido, o que caracteriza a UTS deste sistema. O mostrador é formado pela coluna do líquido contra a escala.

3.2 Métodos Básicos de Medição

Para descrever o valor momentâneo de uma grandeza como um múltiplo e uma fração decimal de uma unidade padrão, um SM pode operar segundo um dos dois princípios básicos de medição: o método da indicação (ou deflexão) ou o método da zeragem (ou compensação).

3.2.1 O método da indicação ou deflexão

Em um SM que opera segundo o método da *indicação*, a indicação direta é obtida no dispositivo mostrador, seja este um mostrador de ponteiro, indicador digital ou registrador gráfico, à medida em que o mensurando é aplicado sobre este SM. São inúmeros os exemplos de SM que operam por este princípio:

termômetros de bulbo ou digitais, manômetros e ou balanças com indicação analógica ou digital, balança de mola, etc. (fig. 3.4)

3.2.2 O método da zeragem ou compensação

No método da zeragem, procura-se gerar uma grandeza padrão com valor conhecido, equivalente e oposto ao mensurando, de forma que as duas, atuando sobre um dispositivo comparador, indiquem diferença zero. A balança de prato é um exemplo clássico de SM que opera por este princípio: procura-se formar em um dos pratos uma combinação de massas padrão que tendem a contrabalançar a massa desconhecida colocada no outro prato. Ambas massas são equivalentes quando a balança atingir o equilíbrio (fig. 3.5).

Uma variante deste método é a medição por substituição. Neste caso, substitui-se o mensurando por um elemento que tenha seu valor conhecido e que cause no SM o mesmo efeito que o mensurando. Quando estes efeitos se igualam, assume-se que o valores destas grandezas também são iguais.

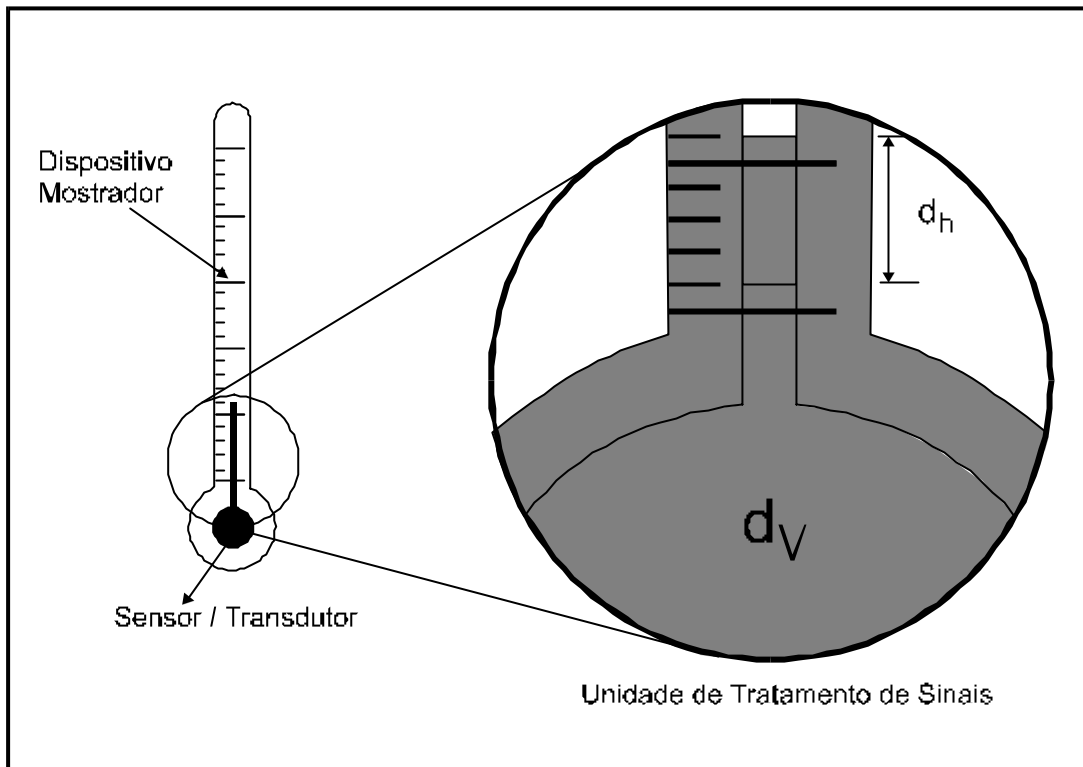


Figura 3.3 -Elementos Funcionais de um Termômetro

AAE - 11/97 - MCG 006

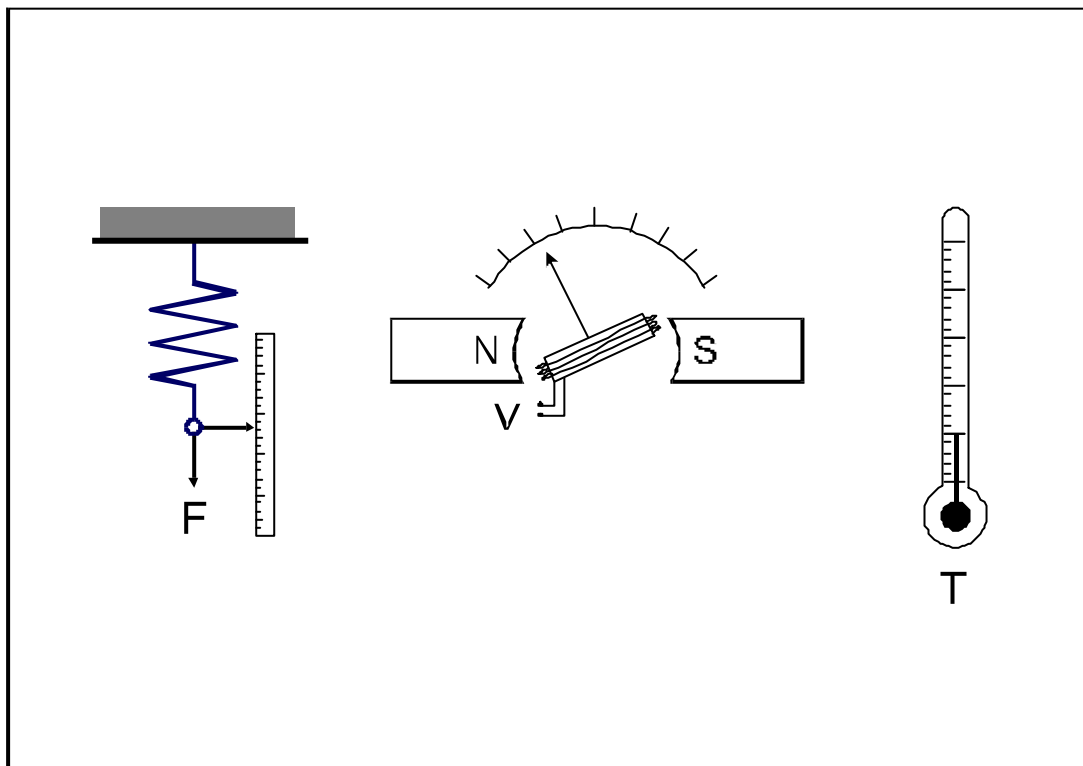


Figura 3.4 - Medição pelo Método da Indicação

AAE - 11/97 - MCG 007

3.2.3 O método diferencial

O método de medição diferencial resulta da combinação dos dois métodos anteriores. O mensurando é comparado a uma grandeza padrão e sua diferença medida por um instrumento que opera segundo o método da indicação.

Normalmente o valor da grandeza padrão é muito próximo do mensurando de forma que a faixa de medição do instrumento que opera por indicação pode ser muito pequena. Como consequência, seu erro máximo pode vir a ser muito reduzido sem que seu custo se eleve.

A incerteza da grandeza padrão geralmente é muito baixa o que resulta em um sistema de medição com excelente estabilidade e desempenho metrológico, sendo de grande utilização na indústria.

A medição do diâmetro por meio do relógio comparador da figura 2.3 é um exemplo de medição diferencial.

3.2.4 Análise comparativa

Comparativamente, cada método possui vantagens e desvantagens. Na balança de mola, por exemplo, a incerteza do SM depende da calibração da mola, ao passo em que, na balança de prato, depende da incerteza das massas padrão. Como a confiabilidade e estabilidade das massas padrão é geralmente melhor que a da mola, pode-se afirmar que normalmente a incerteza do método de zeragem é superior ao da indicação.

A principal desvantagem do método de zeragem é a velocidade de medição que é sensivelmente inferior, uma vez que deve-se modificar a grandeza padrão até que o zero seja atingido, o que torna o SM que usa este método inadequado para aplicações dinâmicas.

A medição diferencial apresenta características que a coloca em uma posição muito atrativa, sendo de fato muito adotada na indústria.

Característica	Indicação	Zeragem	Diferencial
Estabilidade	baixa	muito elevada	elevada
Velocidade de medição	muito elevada	muito baixa	elevada
Custo inicial	elevado	moderado	moderado
Facilidade de automação	elevada	muito baixa	elevada
Erro máximo	moderado	muito pequeno	muito pequeno

3.3 Parâmetros Característicos de Sistemas de Medição

Alguns parâmetros metrológicos são aqui definidos para melhor caracterizar o comportamento metrológico de sistemas de medição. Estes parâmetros podem ser expressos na forma de um simples número (que define o valor máximo assumido pelo SM em toda a sua faixa de medição), uma faixa de valores, uma tabela ou na forma de um gráfico. A apresentação do parâmetro na forma de um simples número, também chamado de *parâmetro reduzido*, traz menos informações sobre o comportamento do SM, porém é uma forma simplificada de representar o parâmetro e é facilmente aplicável em uma comparação.

3.3.1 Faixa de Indicação (FI)

A faixa de indicação (FI) é o intervalo entre o menor e maior valor que o dispositivo mostrador do SM teria condições de apresentar como indicação direta (ou indicação). Nos medidores de indicação analógica a FI corresponde ao intervalo limitado pelos valores extremos da escala. É comum especificar a capacidade dos indicadores digitais como sendo, por exemplo, de 3 ½ dígitos quando o valor máximo é ± 1999 ou 4 dígitos quando o valor máximo é ± 9999 . Exemplos de faixas de indicação:

- Manômetro : 0 a 20 bar
- Termômetro : 700 a 1200 °C
- Contador : 5 dígitos (isto é, 99999 pulsos)
- Voltímetro : $\pm 1,999$ V (isto é, $\pm 3 \frac{1}{2}$ dígitos)

Quando o mesmo sistema de medição permite que várias faixas de medição sejam selecionadas através da ação de controles do SM, isto é, em seu mostrador estão presentes várias escalas, sendo que apenas uma é selecionada ativa a cada momento, cada uma destas faixas é denominada de *faixa nominal*.

3.3.2 Faixa de Medição (FM)

É o conjunto de valores de um mensurando para o qual admite-se que o erro de um instrumento de medição mantém-se dentro de limites especificados. Exemplos:

- Termômetro: FM = - 50 a 280 °C
- Medidor de deslocamento: FM = ± 50 mm (ou FM = - 50 a + 50 mm)

A faixa de medição é menor ou, no máximo, igual a faixa de indicação. O valor da FM é obtido através:

- do manual de utilização do SM
- de sinais gravados sobre a escala
- das especificações de normas técnicas
- dos relatórios de calibração.

3.3.3 Valor de uma Divisão (de Escala) (VD)

Nos instrumentos com mostradores analógicos corresponde à diferença entre os valores da escala correspondentes à duas marcas sucessivas. O valor de uma divisão é expresso na unidade marcada sobre a escala, qualquer que seja a unidade do mensurando. Exemplos:

- manômetro: VD = 0,2 bar
- termômetro: VD = 5 K

3.3.4 Incremento Digital (ID)

Nos instrumentos com mostradores digitais, corresponde à menor variação da indicação direta possível de ser apresentada. Deve-se atentar o fato que nos mostradores digitais a variação do último dígito não é sempre unitária. Com frequência a variação é de 5 em 5 unidades e algumas vezes de 2 em 2 unidades.

3.3.5 Resolução (R)

Resolução é a menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida. A avaliação da resolução é feita em função do tipo de instrumento:

- a) Nos sistemas com mostradores digitais, a resolução corresponde ao incremento digital;
- b) Nos sistemas com mostradores analógicos, a resolução teórica é zero. No entanto, em função das limitações do operador, da qualidade do dispositivo indicador e da própria necessidade de leituras mais ou menos criteriosas, a resolução a adotar poderá ser:

- $R = VD$ quando o mensurando apresenta flutuações superiores ao próprio VD, ou no caso de tratar-se de uma escala grosseira, de má qualidade;
- $R = VD/2$ quando tratar-se de SM de qualidade regular ou inferior e/ou o mensurando apresentar flutuações significativas e/ou quando o erro de indicação direta não for crítico;
- $R = VD/5$ quando tratar-se de SM de boa qualidade (traços e ponteiros finos, etc.) e a medição em questão tiver de ser feita criteriosamente;
- $R = VD/10$ quando o SM for de qualidade, o mensurando estável a medição for altamente crítica quanto a erros de indicação direta e a incerteza do SM foi inferior ao VD.

3.3.6 Erro Sistemático (Es)

É a parcela do erro que se repete quando uma série de medições é efetuada nas mesmas condições. Numericamente corresponde à média de um número infinito de medições do mesmo mensurando, efetuadas sobre condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando. Em termos práticos, adota-se a tendência como estimativa do erro sistemático.

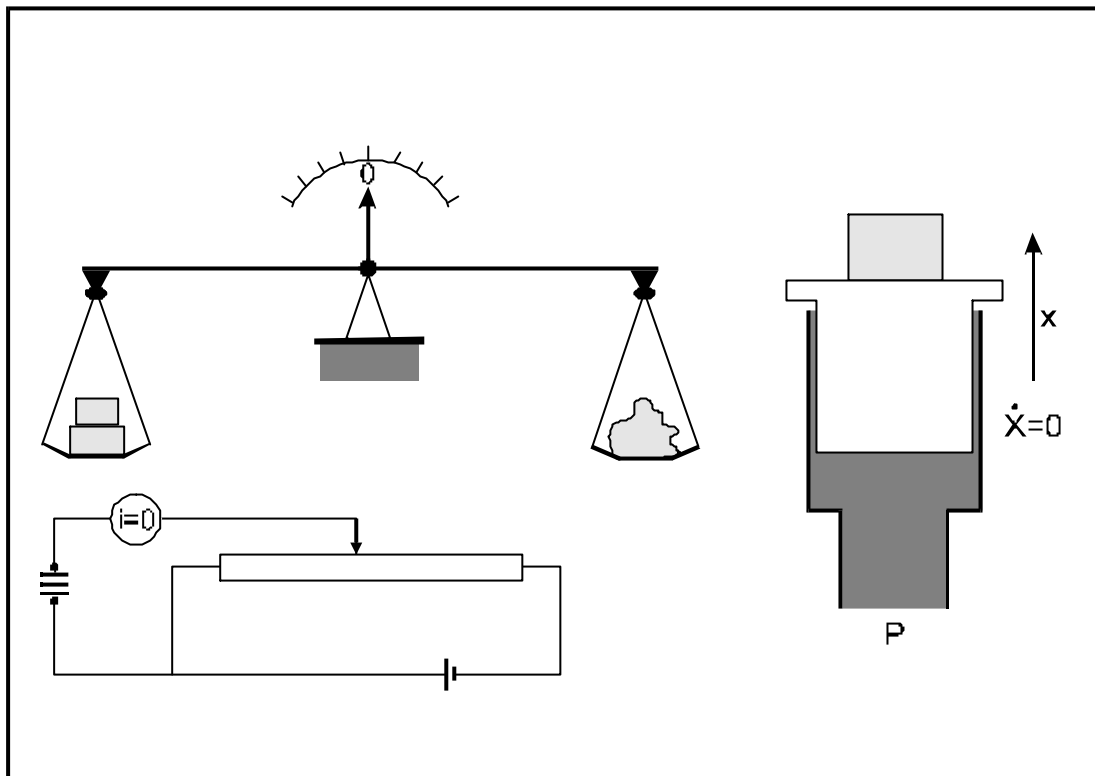
3.3.7 Repetitividade (Re) de um SM

Especifica a faixa de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situará o valor do erro aleatório da indicação de um SM, para as condições em que a medição é efetuada. Normalmente especifica-se a Re com confiabilidade de 95%. A utilização de outros níveis de confiabilidade 99% ($\pm 3s$), depende da aplicação e obedece tradições, determinações de norma ou desejo do usuário.

3.3.8 Característica de Resposta Nominal (CRn)

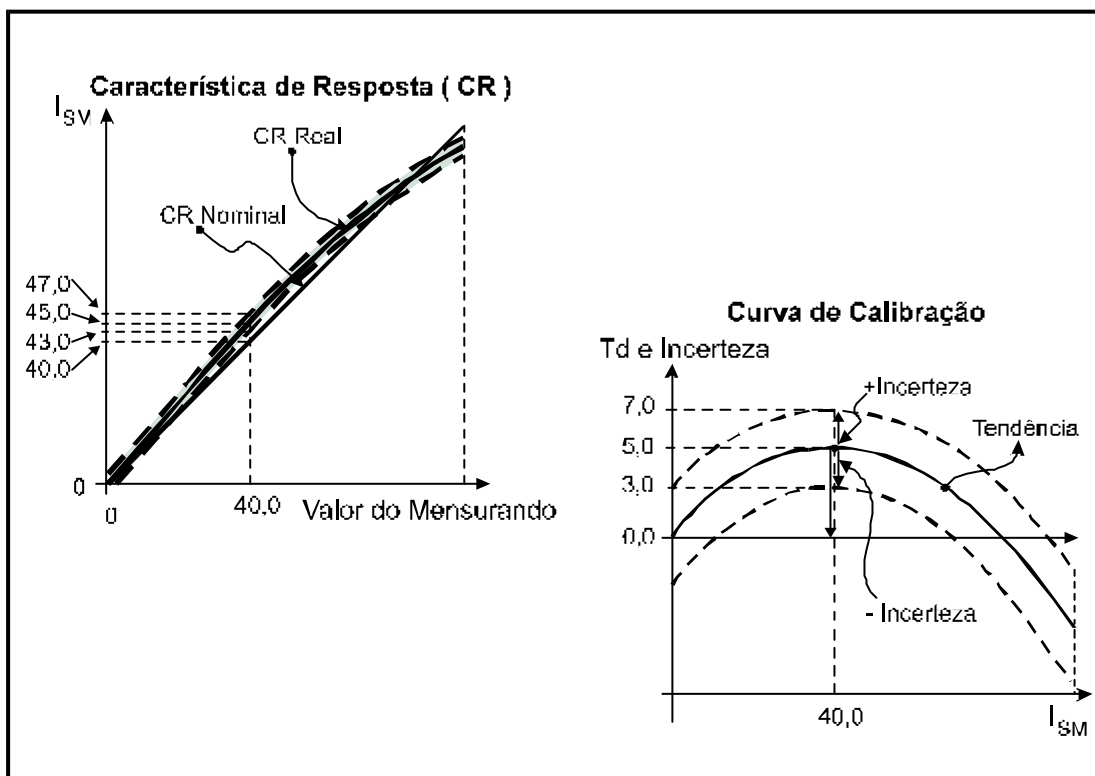
Todo sistema de medição tem o seu comportamento ideal (nominal) regido por um princípio físico bem definido. A equação que exprime o relacionamento ideal entre o estímulo (grandeza de entrada no SM) e a sua resposta (saída) é denominada de Característica de Resposta Nominal (CRn), como mostra a figura 3.6. Esta relação, na maioria dos casos, é linear, constituída de uma constante multiplicativa e/ou aditiva. Embora mais raras, funções polinomiais e exponenciais podem também ser adotadas como CRn.

A relação entre o deslocamento (x) da extremidade da mola do dinamômetro da figura 2.7.a e a força aplicada nesta extremidade (F) é definida pela constante de mola (K) por: $F = K x$. A equação da CRn deste SM é então dada por: $CRn(x) = F/K$.



AAC - 11/87 - MCG 008

Figura 3.5 - Medição pelo Método da Comparação



AAC - 11/87 - MCG 029

Figura 3.6 - Característica de Resposta e Curva de Calibração

3.3.9 Característica de Resposta Real (CRr)

Na prática, o ideal não acontece. A resposta de um SM ao estímulo (mensurando) não segue exatamente o comportamento previsto pela CRn em decorrência de imperfeições que se manifestam de forma sistemática e/ou aleatória. Define-se então a Característica de Resposta Real (CRr) como a relação que **realmente** ocorre entre o estímulo e a resposta do SM, seja em termos da indicação direta ou indicação.

A característica de resposta real difere da nominal, em função do SM apresentar erros sistemáticos e erros aleatórios, sendo portanto melhor caracterizada por uma linha média (indicação média) e uma faixa de dispersão associada, geralmente estimada pela repetitividade.

Normalmente não é fácil prever o como e o quanto a CRr se afastará da CRn. A forma construtiva, as características individuais de cada elemento, o grau de desgaste, as propriedades dos materiais, influenciam esta diferença.

3.3.10 Curva de Erro (CE)

O comportamento ideal (nominal) de um SM de boa qualidade não difere muito do comportamento real. Na prática, a representação da CRr em um gráfico que relacione o estímulo e a resposta será visualizado como se fosse praticamente uma reta, já que as diferenças entre a CRn e a CRr são muito pequenas.

Para tornar claramente perceptível o como e o quanto o comportamento real de um SM se afasta do ideal, emprega-se o gráfico conhecido como *curva de erros* (CE), como mostrado na figura 3.6. A indicação apresentada pelo SM é comparada com um valor padrão ao qual o SM é repetidamente submetido. São estimadas a tendência (erros sistemáticos) e a repetitividade do SM para aquele ponto. O processo é repetido para certo número de pontos dentro da faixa de medição, sendo usados diferentes valores padrão. Como resultado, obtém-se a curva de erros que descreve a forma como os erros sistemáticos (tendência) representada pela linha central e os erros aleatórios (faixa de $\pm Re$ em torno da Td) se distribuem ao longo da faixa de medição.

Na curva de erros, os erros são apresentados em função da indicação, ou, às vezes, da indicação direta. Este gráfico é bastante explícito sobre o comportamento do SM em toda a faixa de medição (fig. 3.6).

3.3.11 Correção (C)

A correção corresponde à tendência com sinal trocado. Este termo é às vezes empregado em substituição à Td quando é efetuada a sua compensação. Seu uso é predominante nos certificados de calibração em lugar da tendência. A correção deve ser somada ao valor das indicações para "corrigir" os erros sistemáticos.

3.3.12 Erro Máximo (E_{\max})

O Erro Máximo (E_{\max}) expressa a faixa onde espera-se esteja contido o erro máximo (em termos absolutos) do SM, considerando toda a sua faixa de medição e as condições operacionais fixadas pelo seu fabricante. O termo *precisão*, embora não recomendado, tem sido usado como sinônimo de incerteza do sistema de medição.

O erro máximo define uma faixa simétrica em relação ao zero que inscreve totalmente a curva de erros de um SM. O erro máximo de um SM é o parâmetro reduzido que melhor descreve a qualidade do instrumento.

3.3.13 Sensibilidade (Sb)

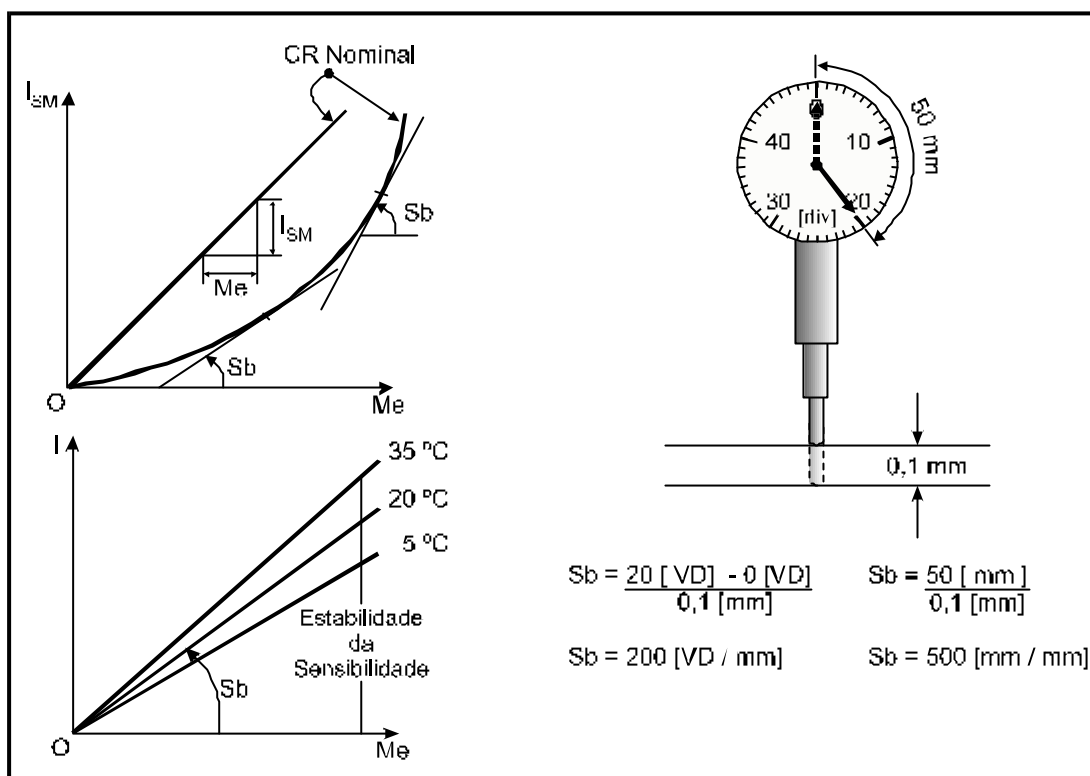
É o quociente entre a variação da resposta (sinal de saída) do SM e a correspondente variação do estímulo (mensurando). Para sistemas lineares a sensibilidade é constante e para os não lineares é variável, dependendo do valor do estímulo e determinada pelo coeficiente angular da tangente à CRr (fig. 3.7). Nos instrumentos com indicador de ponteiro às vezes se estabelece a sensibilidade como sendo a relação entre o deslocamento da extremidade do ponteiro (em mm) e o valor unitário do mensurando.

3.3.14 Estabilidade da Sensibilidade (ESb)

Em função da variação das condições ambientais e de outros fatores no decorrer do tempo, podem ocorrer alterações na sensibilidade de um SM. O parâmetro que descreve esta variação é a chamada *estabilidade da sensibilidade* (ESb). Exemplo: um dinamômetro poderá apresentar variação de sensibilidade em função da temperatura (variação do módulo de elasticidade), podendo-se expressar esta característica como:

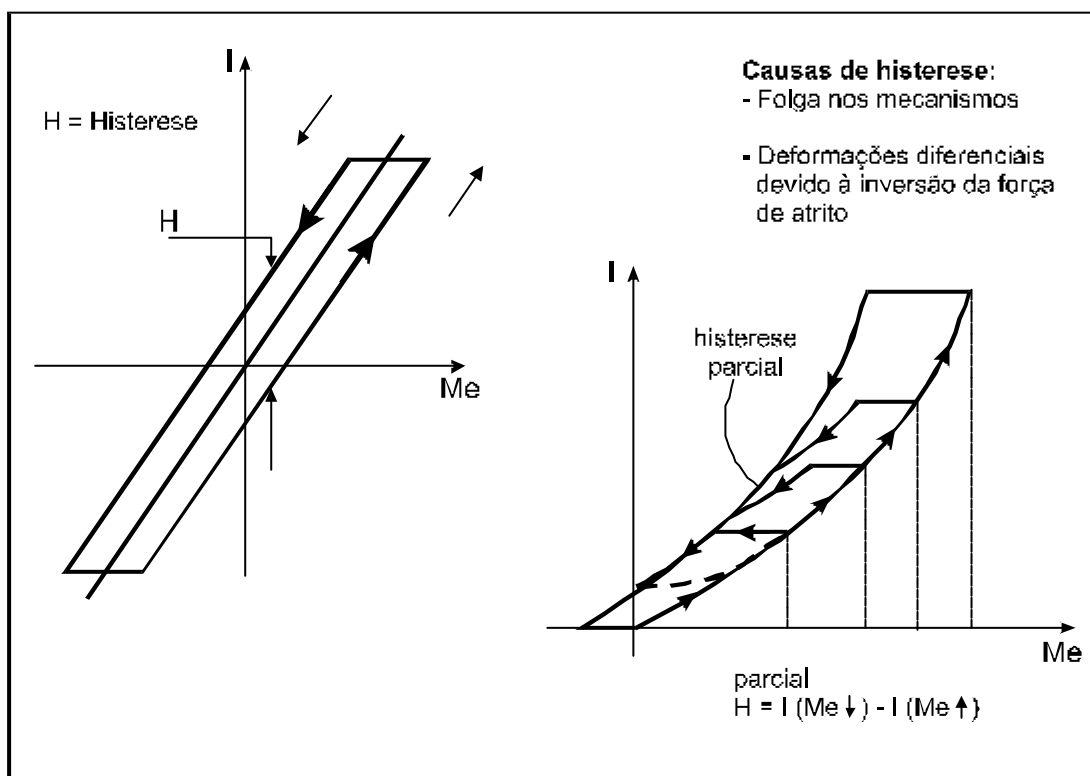
$$ESb = \pm 0,5 \text{ (div/N)/K}$$

ou seja, a sensibilidade pode variar de até $\pm 0,5$ div/N por cada kelvin de variação na temperatura.



AAQ - 11/87 - MCG 026

Figura 3.7 - Conceito de Sensibilidade



AAQ - 12/87 - MCG 209

Figura 3.8 - Histerese

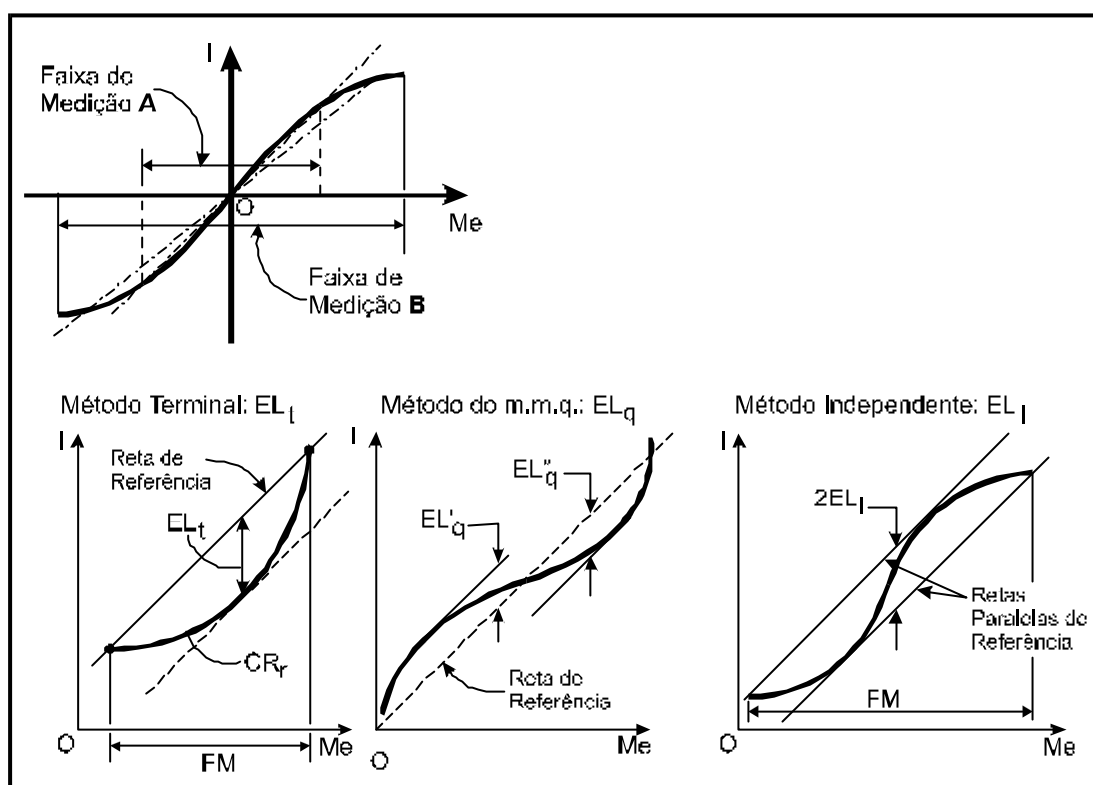


Figura 3.9 - Conceito de Faixa de Medição (FM) e Erro de Linearidade (EL)

AAQ - 11/97 - MCG 013

3.3.15 Estabilidade do Zero (Ez)

Podem ocorrer, em função dos mesmos fatores mencionados no item anterior, instabilidades no comportamento de um SM que se manifestam como alteração do valor inicial da escala (zero). O parâmetro *estabilidade do zero* (Ez) é empregado para descrever os limites máximos para esta instabilidade em função de uma grandeza de influência (tempo, temperatura, etc). Correspondem a deslocamentos paralelos da CRr. Exemplo: Um milivoltímetro pode apresentar tensões superpostas ao sinal de medição em função da temperatura (tensões termelétricas). Isto pode ser caracterizado por:

$$Ez = \pm 0,08 \text{ mV/K}$$

ou seja, pode ocorrer um deslocamento paralelo da CRr (erro de zero) de até $\pm 0.08 \text{ mV}$ por cada kelvin de variação da temperatura.

3.3.16 Histerese (H)

Histerese de um SM é um erro de medição que ocorre quando há diferença entre a indicação para um dado valor do mensurando quando este foi atingido por valores crescentes e a indicação quando o mensurando é atingido por valores decrescentes (fig. 3.8). Este valor poderá ser diferente se o ciclo de carregamento e descarregamento for completo ou parcial. A histerese é um fenômeno bastante típico nos instrumentos mecânicos, tendo como fonte de erro, principalmente, folgas e deformações associadas ao atrito.

3.3.17 Erro de Linearidade (EL)

A grande maioria dos SM apresenta um CRn linear, isto é, seu gráfico é uma reta. Entretanto, o CRr pode afastar-se deste comportamento ideal. O erro de linearidade é um parâmetro que exprime o quanto o CRr afasta-se de uma reta.

Não existe um procedimento único para a determinação do erro de linearidade. Embora estes erros sejam sempre expressos em relação a uma reta de referência, os critérios para a eleição desta reta de referência, não é único. Na figura 3.9 são apresentadas três formas de determinação do erro de linearidade:

- *terminal* (ELt): a reta de referência é estabelecida pela reta que une o ponto inicial e o final da linha média da característica de resposta real;
- *independente* (ELi): à curva de erros sistemáticos são ajustadas duas retas paralelas, de forma que a faixa definida pelas retas contenha todos os pontos da curva e que a distância entre as mesmas seja mínima. O erro de linearidade corresponde à metade do valor correspondente à distância entre estas retas.
- *método dos mínimos quadrados* (ELq): a posição da reta de referência é calculada pelo método dos mínimos quadrados. O maior afastamento da curva de erros sistemáticos à reta de regressão estabelece o erro de linearidade. Os coeficientes da reta de regressão $y = ax + b$ são calculados pelas equações abaixo:

$$a = \frac{n \sum(x_i \cdot y_i) - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{n}$$

onde n é o número de pontos coordenados (x_i, y_i) , sendo que em cada somatório i varia de 1 a n

O erro de linearidade usando o método dos mínimos quadrados tem sido muito empregado em função de sua determinação poder ser efetuada de forma automática por algoritmos de programação relativamente simples.

3.4 Representação Absoluta Versus Relativa

A apresentação dos parâmetros que descrevem as características dos sistemas de medição pode ser dada em termos absolutos ou relativos. Parâmetros expressos em termos relativos são denominados de *erros fiduciais*. Parâmetros em termos relativos facilitam a comparação da qualidade de diferentes SM.

3.4.1 Apresentação em termos absolutos

O valor é apresentado na unidade do mensurando. Exemplos:

erro de medição: $E = + 0,038 \text{ N}$ para $I = 15,93 \text{ N}$

erro máximo do SM: $E_{\text{máx}} = \pm 0,003 \text{ V}$

repetitividade (95%) = $\pm 1,5 \text{ K}$

3.4.2 Apresentação em termos relativos (erro fiducial)

O parâmetro é apresentado como um percentual de um valor de referência, ou valor fiducial. Como valor fiducial são tomados preferencialmente:

a) Erro fiducial em relação ao *valor final de escala* (VFE):¹

Aplicado normalmente a manômetros, voltímetros, etc. Exemplos:

$$E_{\text{máx}} = \pm 1\% \text{ do VFE}$$

$$\text{Re (95)} = \pm 0,1\%$$

b) Erro fiducial em relação a *faixa de indicação* (ou amplitude da faixa de indicação):

Aplicado normalmente a termômetros, pirômetros, barômetros, e outros SM com unidades não absolutas. Exemplos:

$$I_{\text{SM}} = \pm 0,2\% \text{ da FM}$$

erro de linearidade: ELq = 1% na faixa de 900 a 1400 mbar

c) Erro fiducial em relação a um *valor prefixado*:

Aplicado quando o instrumento é destinado a medir variações em torno do valor pré fixado. Exemplo:

$$\text{Re (95)} = \pm 0,5\% \text{ da pressão nominal de operação de 18,5 bar}$$

d) Erro fiducial em relação ao *valor verdadeiro convencional*:

Aplicado quando se trata de medidas materializadas . Exemplo:

$$\text{erro admissível da massa padrão de 100 mg} = \pm 0,2\%$$

NOTA: Quando o valor de referência é o valor verdadeiro convencional (ou valor medido), este também pode ser chamado de *erro relativo*.

¹ Quando não explicitado, o valor de referência é sempre o VFE

Capítulo 4

O ERRO DE MEDIÇÃO

4.1 A Convivência com o Erro

O erro de medição é caracterizado como a diferença entre o valor da indicação do SM e o valor verdadeiro o mensurando, isto é:

$$E = I - VV \quad (4.1)$$

onde E = erro de medição
 I = indicação
 VV = valor verdadeiro

Na prática, o valor "verdadeiro" é desconhecido. Usa-se então o chamado *valor verdadeiro convencional* (VVC), isto é, o valor conhecido com erros não superiores a um décimo do erro de medição esperado. Neste caso, o erro de medição é calculado por:

$$E = I - VVC \quad (4.2)$$

onde VVC = valor verdadeiro convencional

Para eliminar totalmente o erro de medição é necessário empregar um SM perfeito sobre o mensurando, sendo este perfeitamente definido e estável. Na prática não se consegue um SM perfeito e o mensurando pode apresentar variações. Portanto, é impossível eliminar completamente o erro de medição. Mas é possível, ao menos, delimitá-lo.

Mesmo sabendo-se da existência do erro de medição, é ainda possível obter informações confiáveis da medição, desde que a ordem de grandeza e a natureza deste erro sejam conhecidas.

4.2 Tipos de Erros

Para fins de melhor entendimento, o erro de medição pode ser considerado como composto de três parcelas aditivas:
sendo

$$E = E_s + E_a + E_g \quad (4.3)$$

E = erro de medição
E_s = erro sistemático
E_a = erro aleatório
E_g = erro grosseiro

4.2.1 O erro sistemático

O *erro sistemático* (E_s): é a parcela de erro sempre presente nas medições realizadas em idênticas condições de operação. Um dispositivo mostrador com seu ponteiro "torto" é um exemplo clássico de erro sistemático, que sempre se repetirá enquanto o ponteiro estiver torto.

Pode tanto ser causado por um problema de ajuste ou desgaste do sistema de medição, quanto por fatores construtivos. Pode estar associado ao próprio princípio de medição empregado ou ainda ser influenciado por grandezas ou fatores externos, como as condições ambientais.

A estimativa do erro sistemático da indicação de um instrumento de medição é também denominado *Tendência* (T_d).

O erro sistemático, embora se repita se a medição for realizada em idênticas condições, geralmente não é constante ao longo de toda a faixa em que o SM pode medir. Para cada valor distinto do mensurando é possível ter um valor diferente para o erro sistemático. A forma como este varia ao longo da faixa de medição depende de cada SM, sendo de difícil previsão.

4.2.2 O erro aleatório

Quando uma medição é repetida diversas vezes, nas mesmas condições, observam-se variações nos valores obtidos. Em relação ao valor médio, nota-se que estas variações ocorrem de forma imprevisível, tanto para valores acima do valor médio, quanto para abaixo. Este efeito é provocado pelo *erro aleatório* (E_a).

Diversos fatores contribuem para o surgimento do erro aleatório. A existência de folgas, atrito, vibrações, flutuações de tensão elétrica, instabilidades internas, das condições ambientais ou outras grandezas de influência, contribui para o aparecimento deste tipo de erro.

A intensidade do erro aleatório de um mesmo SM pode variar ao longo da sua faixa de medição, com o tempo, com as variações das grandezas de influência, dentre outros fatores. A forma como o erro aleatório se manifesta ao longo da faixa de medição depende de cada SM, sendo de difícil previsão.

4.2.3 O erro grosseiro

O *erro grosseiro* (E_g) é, geralmente, decorrente de mau uso ou mau funcionamento do SM. Pode, por exemplo, ocorrer em função de leitura errônea, operação indevida ou dano do SM. Seu valor é totalmente imprevisível, porém geralmente sua existência é facilmente detectável. Sua aparição pode ser resumida a casos muito esporádicos, desde que o trabalho de medição seja feito com consciência. Seu valor será considerado nulo neste texto.

4.2.4 Exemplo

A figura 4.1 exemplifica uma situação onde é possível caracterizar erros sistemáticos e aleatórios. A pontaria de quatro tanques de guerra está sendo colocada à prova. O objetivo é acertar os

projéteis no centro do alvo colocado a uma mesma distância. Cada tanque tem direito a 15 tiros. Os resultados da prova de tiro dos tanques A, B, C, e D estão mostrados nesta mesma figura.

As marcas dos tiros do tanque "A" se espalharam por uma área relativamente grande em torno do centro do alvo. Estas marcas podem ser inscritas dentro do círculo tracejado desenhado na figura. Embora este círculo apresente um raio relativamente grande, seu centro coincide aproximadamente com o centro do alvo. O raio do círculo tracejado está associado ao espalhamento dos tiros que decorre diretamente do erro aleatório. A posição média das marcas dos tiros, que coincide aproximadamente com a posição do centro do círculo tracejado, reflete a influência do erro sistemático. Pode-se então afirmar que o tanque "A" apresenta elevado nível de erros aleatórios enquanto o erro sistemático é baixo.

No caso do tanque "B", além do raio do círculo tracejado ser grande, seu centro está distante do centro do alvo. Neste caso, tanto os erros aleatórios quanto sistemáticos são grandes. Na condição do tanque "C", a dispersão é muito menor, mas a posição do centro do círculo tracejado está ainda distante do centro do alvo, o que indica reduzidos erros aleatórios e grande erro sistemático. Já a situação do tanque "D" reflete reduzidos níveis de erros aleatórios e também do erro sistemático.

Obviamente que, do ponto de vista de balística, o melhor dos tanques é o tanque "D", por acertar quase sempre muito próximo do centro do alvo com boa repetitividade. Ao se comparar os resultados do tanque "C" com o "A", pode-se afirmar que o tanque "C" é melhor. Embora nenhum dos tiros disparados pelo tanque "C" tenha se aproximado suficientemente do centro do alvo, o seu espalhamento é muito menor. Um pequeno ajuste na mira do tanque "C" o trará para uma condição de operação muito próxima do tanque "D", o que jamais pode ser obtido com o tanque "A".

Tanto no exemplo da figura 4.1, quanto em problemas de medição, o erro sistemático não é um fator tão crítico quanto o erro aleatório. Através de um procedimento adequado é possível estimá-lo relativamente bem e efetuar a sua compensação, o que equivale ao ajuste da mira do tanque "C" da figura 4.1. Já o erro aleatório não pode ser compensado embora sua influência sobre o valor médio obtido por meio de várias repetições se reduza na proporção de $1/\sqrt{n}$, onde "n" é o número de repetições considerado na média. A seguir são apresentados procedimentos para a estimativa quantitativa dos erros de medição.

4.3 Estimação dos Erros de Medição

Se o erro de medição fosse perfeitamente conhecido, este poderia ser corrigido e sua influência completamente anulada da medição. A componente sistemática do erro de medição pode ser suficientemente bem estimada, porém não a componente aleatória. Assim, não é possível compensar totalmente o erro.

O conhecimento aproximado do erro sistemático e a caracterização da parcela aleatória é sempre desejável, pois isto torna possível sua correção parcial e a delimitação da faixa de incerteza ainda presente no resultado de uma medição. A forma de estimação destes erros é apresentada a seguir:

4.3.1 Erro sistemático/Tendência/Correção

O erro determinado pela equação (4.2) contém intrinsecamente as parcelas sistemática e aleatória. Nota-se que, quando a medição é repetida várias vezes, o erro aleatório assume tanto valores positivos quanto negativos. De fato, geralmente, o erro aleatório pode ser modelado como

tendo distribuição aproximadamente normal com média zero. Na prática, sua média tende a zero à medida que aumenta-se o número de dados observados, uma vez que este tende a distribuir-se simetricamente em valores positivos e negativos.

Desconsiderando o erro grosseiro, e assumindo que um número suficientemente grande de medições foi efetuado, a influência do erro aleatório no valor médio das medições tende a ser desprezável. Sendo assim, o valor médio de um número grande de medidas efetuadas

$$Es = MI - VVC \quad (4.4)$$

repetidamente estará predominantemente afetado pelo erro sistemático. Logo, para um dado valor do mensurando, o Es poderia ser determinado pela equação (4.4), se fosse considerando um número infinito de medições:

onde

Es = erro sistemático

MI = média de infinitas indicações do SM

VVC = valor verdadeiro convencional

Na prática não se dispõe de infinitas medições para determinar o erro sistemático de um SM, porém sim um número restrito de medições, geralmente obtidas na calibração do instrumento. Ainda assim, a equação (4.4) pode ser usada para obter uma estimativa do erro sistemático. Define-se então o parâmetro *Tendência (Td)*, como sendo a estimativa do erro sistemático, obtida a partir de um número finito de medições, ou seja:

$$Td = MI - VVC \quad (4.4a)$$

No limite, quando o número de medidas tende a infinito, a tendência aproxima-se do valor do erro sistemático.

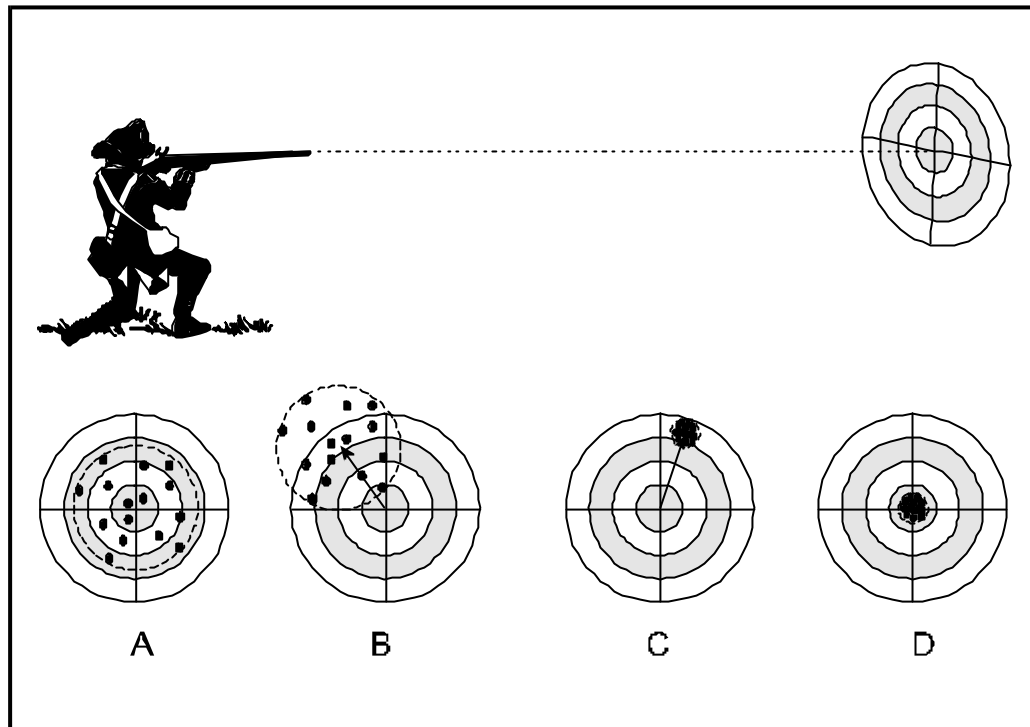


Figura 4.1 - Caracterização de Efeitos Sistemáticos e Aleatórios em um Problema de Balística

AAG - 11/87 - MCG 011

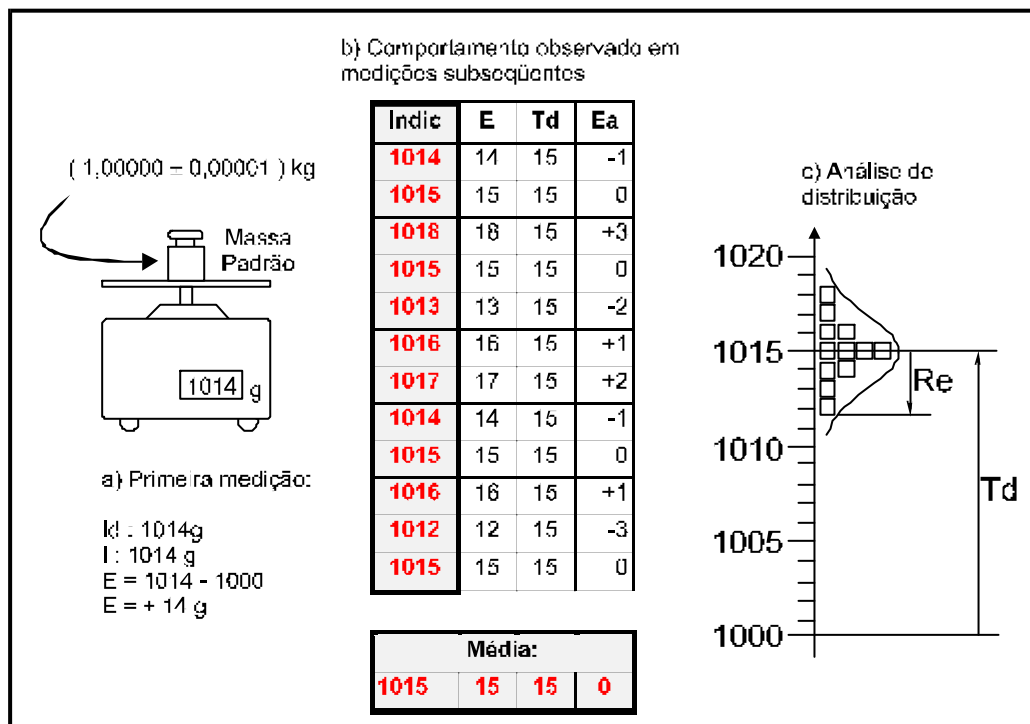


Figura 4.2 - Tendência e Repetitividade

CAF - 07/98 AM 005

Alternativamente o parâmetro *correção* (C) pode ser usado para exprimir uma estimativa do erro sistemático. A correção é numericamente igual à tendência, porém seu sinal é invertido, isto é:

$$C = - Td \quad (4.4b)$$

O termo “correção” lembra a sua utilização típica, quando, normalmente, é adicionado à indicação para “corrigir” os efeitos do erro sistemático. A correção é mais freqüentemente utilizado em certificados de calibração.

Nota: A estimativa do erro sistemático através da *tendência* (ou da *correção*) envolve uma faixa de incertezas que é função do número de medições repetidas e das incertezas do padrão utilizado como VVC (vide Anexo III).

4.3.2 Erro aleatório

O erro aleatório distribui-se em torno do valor médio das indicações. É possível isolar seu valor individual para uma determinada medição através da seguinte equação:

$$Ea_i = I_i - MI$$

onde

Ea_i = erro aleatório da i -ésima indicação

I_i = valor da i -ésima indicação individual

MI = média de infinitas indicações

Esta expressão pode ser obtida por substituição da equação (4.4) na (4.3) se o erro grosseiro for desconsiderado. Este erro varia a cada medição de forma totalmente imprevisível. O valor instantâneo do erro aleatório tem pouco ou nenhum sentido prático, uma vez que é sempre variável e imprevisível.

A caracterização do erro aleatório é efetuada através de procedimentos estatísticos. Sobre um conjunto finito de valores de indicações obtidas nas mesmas condições e do mesmo mensurando, determina-se o *desvio padrão experimental*, que, de certa forma, está associado à dispersão provocada pelo erro aleatório.

É comum exprimir de forma quantitativa o erro aleatório através da *repetitividade* (Re). A repetitividade de um instrumento de medição expressa uma faixa simétrica de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatisticamente definida, se situa o erro aleatório da indicação. Para estimar este parâmetro, é necessário multiplicar o desvio padrão experimental pelo correspondente coeficiente “ t ” de Student, levando em conta a probabilidade de enquadramento desejada e o número de dados envolvidos.

$$Re = \pm t \cdot s \quad (4.6)$$

onde:

Re = faixa de dispersão dentro da qual se situa o erro aleatório (normalmente para probabilidade de 95%)

t = é o coeficiente “ t ” de Student

s = desvio padrão experimental da amostra de n medidas

Os procedimentos para a determinação do coeficiente “ t ” de Student, e estimação do desvio padrão da amostra “ s ” e da repetitividade (Re) são detalhados no anexo III.

4.3.3 Exemplo de determinação da Tendência e Repetitividade

A figura 4.2 apresenta um exemplo onde são estimados os erros de uma balança eletrônica digital. Para tal, uma massa padrão de 1.00000 ± 0.00001 kg é medida várias vezes por esta balança. Sabe-se de antemão que o valor do erro da massa padrão é desprezável em relação aos erros tipicamente esperados para esta balança. Neste caso, o valor desta massa pode ser assumido como o valor verdadeiro convencional (VVC) do mensurando. Note que a determinação dos erros de um SM só é possível quando se mede um mensurando já previamente conhecido, isto é, apenas quando o VVC é conhecido.

A primeira indicação obtida é 1014 g, que difere do valor verdadeiro convencional 1000 g. Nota-se a existência de um erro de medição de $E = 1014 - 1000 = + 14$ g. Entretanto, ao medir-se uma única vez não é possível identificar as componentes dos erros sistemático e aleatório. Os valores das indicações obtidas nas onze medições adicionais apresentaram variações. Com o trata-se de um mensurando invariável, a dispersão dos valores das indicações é atribuída aos efeitos dos erros aleatórios do sistema de medição. A distribuição dos valores das indicações obtidas, mostrada na parte "c" da figura, agrupa-se em torno do valor central médio de 1015 g e tem uma forma que se assemelha a uma distribuição normal (anexo III). Por observação direta nota-se que os valores das doze indicações estão enquadradas dentro da faixa de 1015 ± 3 g.

A tendência e o desvio padrão experimental foram estimados com o auxílio da tabela da figura 4.2b. O valor médio das indicações foi determinado ($Ml = 1015$ g) e com este a tendência foi estimada por meio da equação (4.4a), sendo obtido:

$$\begin{aligned} Td &= 1015 - 1000 \text{ g} \\ Td &= 15 \text{ g}^2 \end{aligned}$$

A quarta coluna da figura 4.2b é obtida subtraindo-se o valor da tendência do erro total (E), resultando no erro aleatório para cada ponto. Nota-se que, neste caso, este erro distribui-se aleatoriamente em torno do zero dentro do limite ± 3 g.

A aplicação da equação III.8 (ver apêndice III) leva ao seguinte valor para o desvio padrão experimental:

$$s = 1,65 \text{ g}$$

O coeficiente t de Student para 12 medidas, portanto 11 graus de liberdade, e confiabilidade 95% é de 2,20 (fig. III.5). Logo, a repetitividade (Re), dentro da qual situa-se o erro aleatório, resulta em:

$$\begin{aligned} Re &= \pm (2,20 \cdot 1,65) \text{ g} \\ Re &= \pm 3,6 \text{ g} \end{aligned}$$

Isto quer dizer que existe 95% de probabilidade do erro aleatório se enquadrar dentro de uma faixa simétrica de $\pm 3,6$ g centrada em torno do valor médio 1015g.

observação:

² Considerando a equação III.10, a rigor pode-se afirmar apenas que a tendência situa-se dentro da faixa $Td = 15 \pm 1$ g.

Caso o valor real da massa aplicada à balança fosse desconhecido, o leigo muito provavelmente afirmaria, após o experimento, que o valor da mesma é:

$$m = (1014 \pm 3) \text{ g}$$

Ao fazer isto ele estaria cometendo um grave erro, pelo fato de não considerar a existência do erro sistemático. A forma correta da determinação do *resultado da medição* (RM) será exposta no capítulo 7, porém, pode-se adiantar que, desconsiderando as demais parcelas de incerteza, o RM poderia ser expresso por:

$$RM = MI - Td \pm \frac{Re}{\sqrt{n}}$$

onde:

MI = valor médio das indicações
Td = tendência
Re = repetitividade
n = número de medidas efetuadas

que leva a:

$$RM = (1000 \pm 1) \text{ g}$$

4.3.4 Curva de erros de um sistema de medição

Os valores estimados para a tendência e repetitividade de um sistema de medição normalmente são obtidos não apenas em um ponto, mas são repetidos para vários pontos ao longo da sua faixa de medição. Estes valores podem ser representados graficamente, facilitando a visualização do comportamento metrológico do SM nas condições em que estas estimativas foram obtidas. O gráfico resultante é denominado de *curva de erros*.

O procedimento efetuado no exemplo da figura 4.2 é repetido para valores adicionais de massas cujos valores verdadeiros convencionais sejam conhecidos (massas padrão). Costuma-se selecionar dentro da faixa de medição do SM um número limitado de pontos, normalmente regularmente espaçados, e estimar o Td e Re para cada um destes pontos. Tipicamente são usados em torno de 10 pontos na faixa de medição.

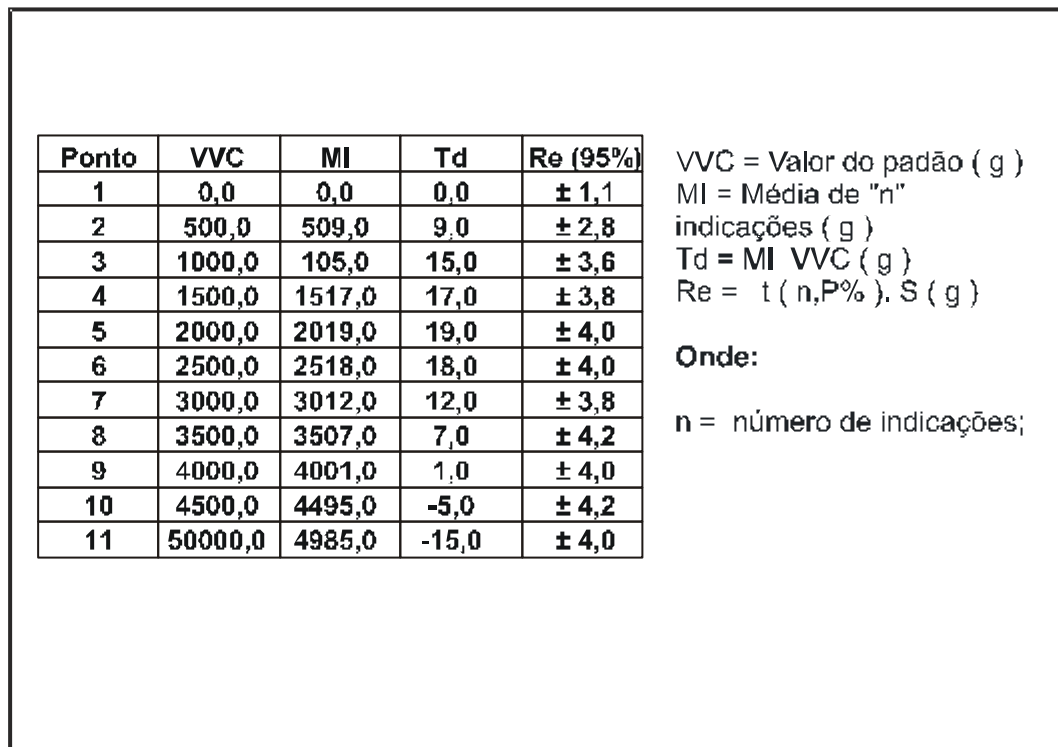


Figura 2.13 - Levantamento da Tendência e Repetitividade

CAF - 07/95 AM 037

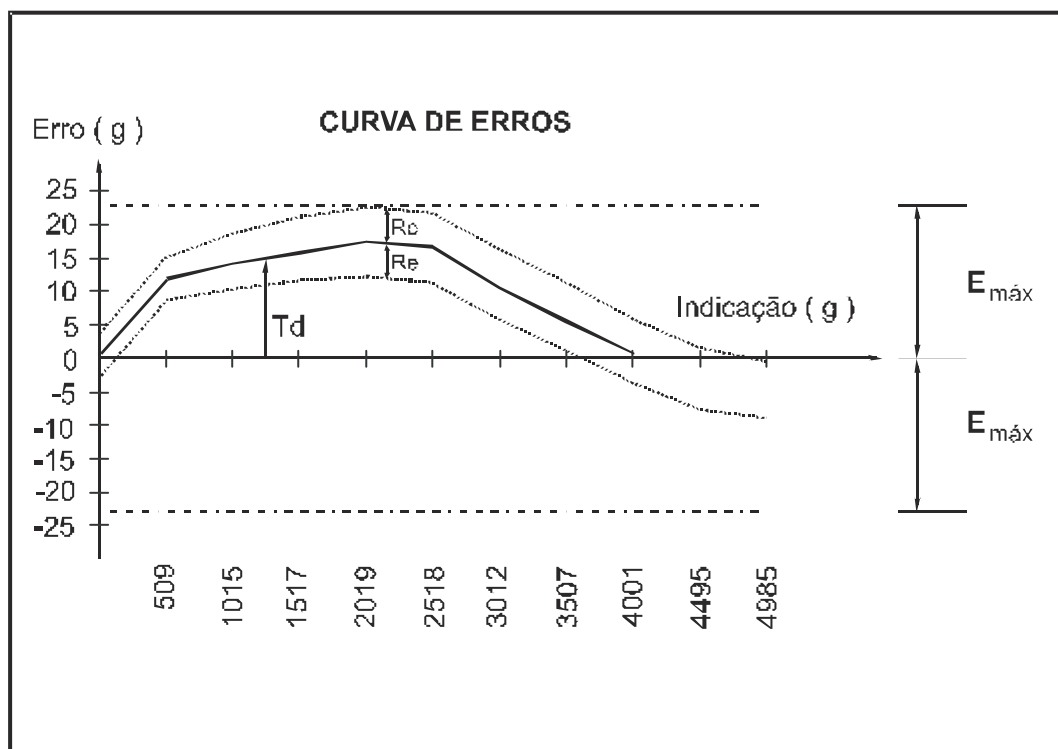


Figura 2.14 - Curva de Erros

CAF - 07/98 AM 008

Como resultado do procedimento acima, uma representação gráfica de como a tendência e a repetitividade se comportam em alguns pontos ao longo da faixa de medição. Esta é a curva de erros do SM. Para cada ponto medido, a tendência é representada pelo ponto central ao qual adiciona-se e subtrai-se a repetitividade. Caracteriza-se assim a faixa de valores dentro da qual estima-se que o erro do SM estará para aquele ponto de medição. Na prática, este levantamento é muito importante para a correta compensação de erros e estimação do denominado resultado de uma medição, como será visto em detalhes no capítulo 7.

A figura 4.3 apresenta um exemplo de determinação da curva de erros: Para a mesma balança da figura 4.2, repetiu-se o procedimento para a estimação de T_d e R_e quando foram utilizados valores adicionais de massas padrão, cada qual com seu valor verdadeiro convencional conhecido. Os valores obtidos estão tabelados na figura 4.3a. A representação gráfica destes erros, ou seja a curva de erros, é também mostrada. No eixo horizontal representa-se o valor da indicação. No eixo vertical, o erro de medição, sendo que o ponto central representa a tendência (T_d) e, em torno desta, traçam-se os limites esperados para o erro aleatório estimados por:

$$\begin{aligned} \text{limite superior:} & \quad T_d + R_e \\ \text{limite inferior:} & \quad T_d - R_e \end{aligned}$$

4.3.5 Erro Máximo do Sistema de Medição

O fabricante de um sistema de medição normalmente especifica um parâmetro que corresponde ao limite dos máximos erros presentes neste SM quando este é utilizado nas condições típicas de operação. Este parâmetro deve ser usado com muito cuidado, verificando-se que não são violadas as condições especificadas pelo fabricante nem as recomendações a nível operacional e de manutenção.

Define-se o parâmetro denominado *erro máximo* (E_{\max}) de um sistema de medição como a faixa de valores, centrada em torno do zero, que, com uma probabilidade definida, contém o maior erro do qual pode estar afetada qualquer indicação apresentada pelo sistema de medição, considerando os erros sistemáticos e aleatórios em toda a sua faixa de medição, sempre respeitando as condições de operação especificadas pelo seu fabricante. Note que este é um parâmetro característico do sistema de medição e não de um processo de medição em particular.

Nas condições de operação, os erros apresentados pelo sistema de medição não deverão ultrapassar os limites definidos por $-E_{\max}$ e $+E_{\max}$. Sua curva de erros deve estar inteiramente inscrita dentro do espaço definido por duas linhas horizontais localizadas em $-E_{\max}$ e $+E_{\max}$.

O erro máximo do sistema de medição é o parâmetro reduzido que melhor descreve a qualidade do instrumento, pois expressa os limites máximos do erro de medição associado a este SM nas suas condições normais de operação e por isso é freqüentemente utilizado na etapa de seleção do SM. O termo *precisão* é freqüente e erroneamente empregado em lugar do erro máximo. O uso do termo *precisão* pode ser empregado apenas no sentido qualitativo e jamais como um parâmetro

4.4 Incerteza

A palavra “incerteza” significa “dúvida”. De forma ampla “incerteza da medição” significa “dúvida acerca do resultado de uma medição”. Formalmente, define-se incerteza como: “parâmetro, associado com o resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando”.

A incerteza, portanto, está associada ao resultado da medição. Não corresponde ao erro aleatório do sistema de medição, embora este seja uma das suas componentes. Outras componentes são decorrentes da ação de grandezas de influência sobre o processo de medição, as incertezas da tendência (ou da correção), número de medições efetuadas, resolução limitada, etc. Não há, portanto, uma relação matemática explícita entre a incerteza de um processo de medição e a repetitividade de um sistema de medição.

A incerteza é normalmente expressa em termos da *incerteza padrão*, da *incerteza combinada* ou da *incerteza expandida*. A *incerteza padrão* (u) de um dado efeito aleatório corresponde à estimativa equivalente a um desvio padrão da ação deste efeito sobre a indicação. A *incerteza combinada* (u_c) de um processo de medição é estimada considerando a ação simultânea de todas as fontes de incerteza e ainda corresponde a um desvio padrão da distribuição resultante. A *incerteza expandida* (U) associada a um processo de medição é estimada a partir da incerteza combinada multiplicada pelo coeficiente t -Student apropriado e reflete a faixa de dúvidas ainda presente nesta medição para uma probabilidade de enquadramento definida, geralmente de 95%. A estimativa da incerteza envolve considerações adicionais e será abordada em detalhes no capítulo 8.

4.5 Fontes de Erros

Toda medição está afetada por erros. Estes erros são provocados pela ação isolada ou combinada de vários fatores que influenciam sobre o processo de medição, envolvendo o sistema de medição, o procedimento de medição, a ação de grandezas de influência e o operador.

O comportamento metrológico do SM depende fortemente de fatores conceituais e aspectos construtivos. Suas características tendem a se degradar com o uso, especialmente em condições de utilização muito severas. O comportamento do SM pode ser fortemente influenciado por perturbações externas e internas, bem como pela influência do operador, ou mesmo do SM, modificar indevidamente o mensurando (fig. 4.3).

O procedimento de medição adotado deve ser compatível com as características do mensurando. O número e posição das medições efetuadas, o modelo de cálculo adotado, a interpretação dos resultados obtidos podem também introduzir componentes de incerteza relevantes no resultado da medição.

As grandezas de influência externas podem provocar erros alterando diretamente o comportamento do SM ou agindo sobre o mensurando. O elemento perturbador mais crítico, de modo geral, é a variação da temperatura ambiente, embora outras grandezas como vibrações mecânicas, variações de pressão atmosférica, umidade ou tensão da rede elétrica, também possam trazer alguma influência. A variação da temperatura provoca dilatação das escalas dos instrumentos de medição de comprimentos, da mesma forma como age sobre o mensurando, por exemplo, modificando o comprimento a medir de uma peça.

A variação da temperatura pode também ser uma perturbação interna. Exemplo típico é a instabilidade dos sistemas elétricos de medição, por determinado espaço de tempo, após terem sido ligados. Em função da liberação de calor nos circuitos elétrico/eletrônicos há uma variação das características elétricas de alguns componentes e assim do SM. Há necessidade de aguardar estabilização térmica, o que minimizará os efeitos da temperatura. A existência de atrito, folgas, imperfeições construtivas e o comportamento não ideal de elementos físicos são outros exemplos de perturbação interna.

O ERRO DE MEDIÇÃO

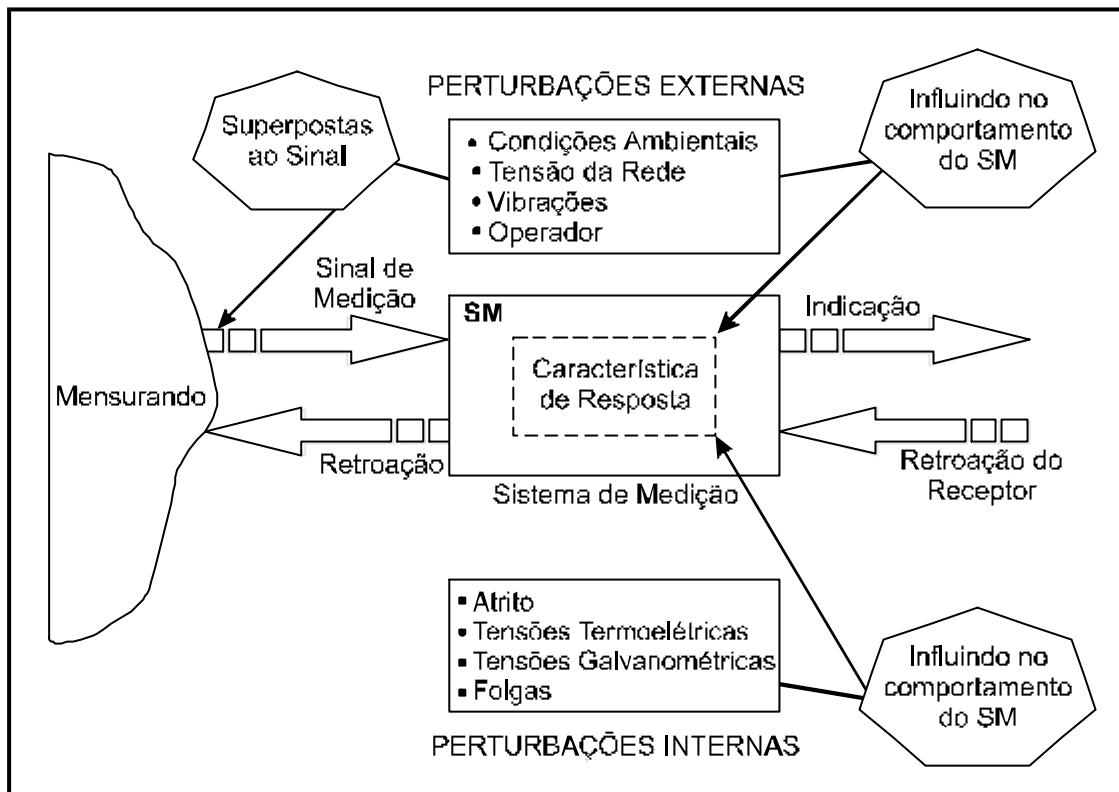
A modificação indevida do mensurando pela ação do sistema de medição, ou do operador, pode ter diversas causas. Por exemplo, na metrologia dimensional, a dimensão da peça modifica-se em função da força de medição aplicada. A figura 4.5 ilustra uma situação onde pretende-se medir a temperatura de um cafezinho. Para tal é empregado um termômetro de bulbo. Ao ser inserido no copo, há um fluxo de energia do café para o termômetro: o bulbo esquenta enquanto o café esfria, até que a temperatura de equilíbrio seja atingida. É esta temperatura, inferior a temperatura inicial do cafezinho, que será indicada pelo termômetro. Este é outro exemplo onde o mensurando é modificado pelo SM.

A modificação do mensurando por outros módulos da cadeia de medição, acontece, por exemplo, na conexão indevida de dispositivos registradores. Um exemplo onde o operador modifica o mensurando é quando se instala um termômetro para medir a temperatura no interior de uma câmara frigorífica e, por alguma razão, torna-se necessário entrar nesta câmara para fazer a leitura da temperatura. A presença do operador pode modificar o mensurando, no caso, a temperatura da câmara.

A figura 4.6 exemplifica a ocorrência de erros numa operação de medição de massa. Destaca-se na figura que o comportamento da balança, e, conseqüentemente, os erros de medição, são dependentes da temperatura ambiente e da sua variação. Dependendo da forma como se comporta a temperatura, a balança pode apresentar predominância de erros sistemáticos ou aleatórios.

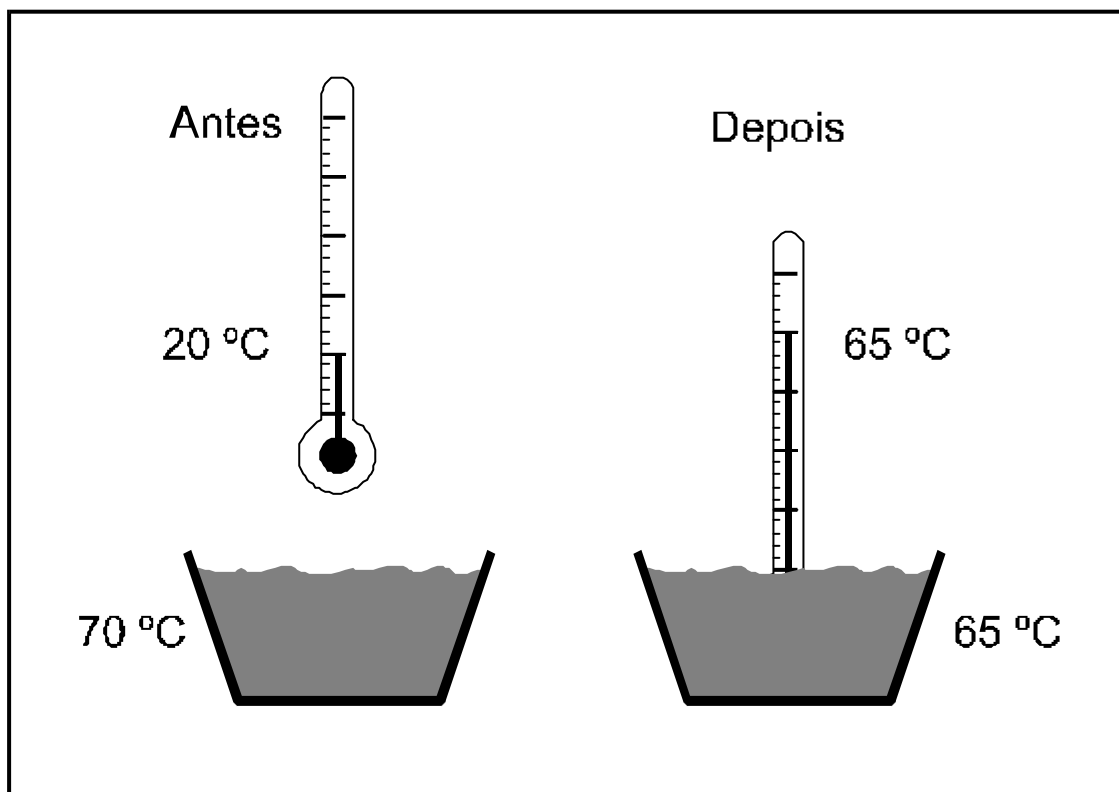
O operador também pode introduzir erros adicionais no processo de medição. Erros de interpolação na leitura, erros inerentes ao manuseio ou à aplicação irregular do SM são exemplos típicos. Sua quantificação é muito difícil, geralmente estimada por medições repetitivas em uma peça de referência, envolvendo diferentes momentos, instrumentos, operadores e nas condições ambientais típicas.

A grande dificuldade trazida por estes diversos fatores é que estas perturbações ocorrem superpostas ao sinal de medição, sendo impossível identificar e separar o que é erro do que é variação do mensurando. Para conviver com estes diversos fatores que influenciam o comportamento do SM, é comum ao fabricante fixar as condições em que o sistema de medição



AAG - 11/87 - MCB 012

Figura 4.4 - Fontes de Erros de Medição



AAG - 10/87 - VCG 013

Figura 4.5 - Erro de Retroação do Sistema de Medição sobre o Mensurando

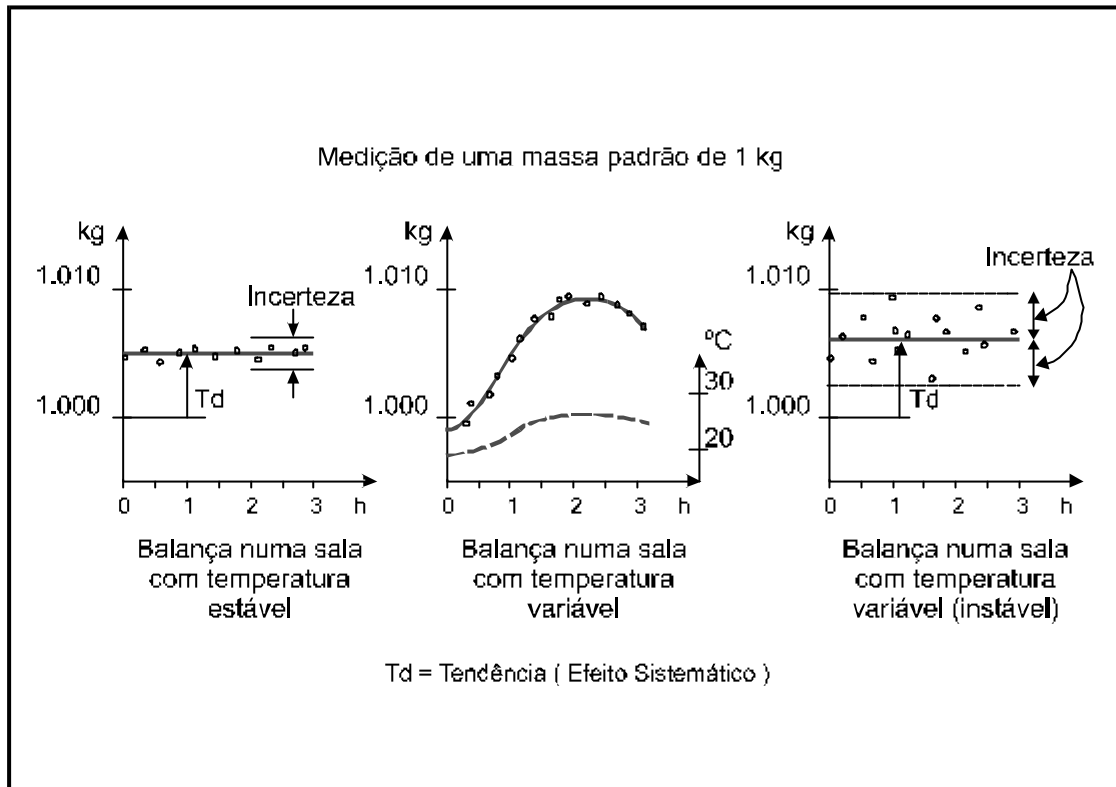


Figura 4.6 - Influência da Temperatura sobre os Efeitos Sistemáticos e Aleatórios

deve operar, por exemplo, temperatura 20 ± 1 °C, tensão da rede 220 ± 15 V, etc. Somente dentro destas faixas é que são garantidas as especificações metrológicas dos sistemas de medição. É necessário estar atento para estes limitantes.

4.6 Minimização do Erro de Medição

O erro de medição sempre existe. Não há meio de eliminá-lo completamente. No capítulo 7 são abordados os mecanismos para estabelecer os limites da sua influência no resultado da medição.

Entretanto, existem alguns cuidados e procedimentos que podem ser seguidos que resultam na minimização deste erro. A seguir são apresentadas algumas sugestões nesta direção:

4.6.1 Seleção correta do SM

Um fator de elevada importância é o conhecimento da natureza do processo ou da grandeza que está sendo medida. A correta definição do mensurando, a compreensão de suas características e comportamento devem ser levadas em conta para definir o procedimento de medição a ser adotado. Se, por exemplo, a medição envolve um mensurando variável com o tempo ou posição, a adoção de um procedimento errôneo - apenas adequado para mensurandos invariáveis - poderá levar a resultados completamente absurdos.

4.6.2 Modelação correta do processo de medição

Operacional e funcionalmente o SM deve ser apropriado para o tipo de mensurando. Deve-se verificar se o valor do mensurando situa-se dentro da faixa de medição do SM. O tipo de grandeza deve ser compatível com o SM: um micrômetro para dimensões

externas não se aplica para dimensões internas. Além disso, deve-se ficar alerta para problemas relacionados com a modificação do mensurando provocado pelo SM: seria conveniente usar um SM com baixa "inércia" térmica para o exemplo da figura 4.5. O tipo de mensurando: estático ou dinâmico; a forma de operação/indicação: digital ou analógica; o método de medição: indicação ou compensação; o peso, o tamanho e a energia necessária, devem ser levados em conta ao se selecionar o SM. Uma boa lida nos catálogos e manuais de operação do SM é indispensável.

4.6.3 Adequação do Erro Máximo do Sistema de Medição

Embora um SM sempre apresente erro de medição, diferentes sistemas de medição podem apresentar diferentes níveis de erros. A qualidade de um SM está relacionada com o nível de erro por este apresentado. É quase sempre possível adquirir no mercado SMs com diferentes níveis de qualidade por, obviamente, diferentes preços. O equilíbrio entre o custo e benefício deve ser buscado.

É difícil estabelecer um procedimento genérico para a correta seleção do SM baseado unicamente no seu preço e erro máximo. Porém, espera-se que, nas condições fixadas pelos fabricantes, os erros inerentes do sistema de medição nunca sejam superiores ao erro máximo do sistema de medição empregado. Através de uma *calibração*, e de um procedimento mais cuidadoso de medição, onde seja compensada a tendência do SM e a medição seja repetida diversas vezes, é possível reduzir significativamente o nível de erros presente no resultado.

4.6.4 Calibração do Sistema de Medição

O SM deve ser calibrado ou, ao menos, seus erros devem ser verificados em alguns pontos, quando se suspeitar que possa estar fora das condições normais de funcionamento ou vir a operar em condições adversas das especificadas pelo fabricante. Os erros de medição obtidos através da calibração são comparados com as especificações do SM dadas pelo fabricante, e ou com as características metrológicas requeridas na aplicação para a qual se destina este SM. Adicionalmente, a calibração fornece a tendência em alguns pontos da faixa de medição do SM, possibilitando a sua correção e conseqüente melhoria da incerteza da medição.

4.6.5 Avaliação das influências das condições de operação do SM

Alguns SM's são sensíveis às condições de operação, podendo apresentar componentes adicionais de erros de medição em função das condições do ambiente. Deve-se prestar especial atenção nas variações de temperatura. Fortes campos elétricos ou magnéticos ou vibrações também podem afetar o desempenho do SM. A ordem de grandeza dos erros provocados por estes fatores deve ser avaliada e estes corrigidos quando significativos para a aplicação.

4.6.6 Calibração "in loco" do Sistema de Medição

Quando se suspeitar que existe forte influência de diversos fatores sobre o desempenho do SM, é recomendável efetuar a calibração deste SM "in loco", isto é, nas condições reais de utilização deste SM. Para tal, padrões do mensurando são aplicados sobre este SM e os erros são avaliados nas próprias condições de utilização.

Problemas propostos

1. Deduza a equação (4.5) a partir combinando as equações (4.2), (4.3) e (4.4), desconsiderando a existência do erro grosseiro
2. A tensão elétrica de uma pilha foi repetidamente medida por um voltímetro comprado no Paraguai. Foram obtidas as indicações listadas abaixo (todas em V). Determine o valor médio das indicações (MI), o valor do erro aleatório para cada indicação, o desvio padrão experimental e a repetitividade (Re) para confiabilidade de 95%

1,47 1,43 1,40 1,44 1,44 1,48 1,42 1,45 1,46 1,43

3. A mesma pilha da questão anterior foi medida por um voltímetro de boa qualidade metrológica, sendo encontrado o seguinte resultado para a tensão da pilha: $1,4977 \pm 0,0005$ V. Com este dado, determine a tendência (Td) para o voltímetro da questão anterior.
4. Uma dupla de operários foi encarregada de medir o diâmetro dos 10 cabos elétricos de uma torre de transmissão (desligada). Um dos operários subiu na torre e, com um paquímetro, mediu cada um dos cabos e "gritou" os valores para o segundo operário que anotou as medidas na planilha, obtendo os dados transcritos abaixo. Determine o valor médio para o diâmetro dos cabos e a repetitividade (Re) para 95% de confiabilidade.

Indicações (mm)

25,2	25,9	24,8	24,6	225,1
24,7	25,6	25,3	24,9	25,0

5. E se for dito que o operário que subiu na torre era gago e o que anotou os dados estava com o óculos sujo, isto mudaria o seu resultado para a questão anterior ?
6. Pretende-se levantar dados acerca do comportamento metrológico de um dinamômetro. Um conjunto de 10 massas padrão foi usado para gerar forças conhecidas que foram aplicadas sobre o dinamômetro, abrangendo toda a sua faixa de medição que é de 100 N. Na tabela abaixo apresenta-se uma tabela com os resultados para cada uma das massas padrão. Represente graficamente a curva de erros deste dinamômetro.

ponto de medição	VVC (N)	Td (N)	s (para n = 20)
1	0,00	0,4	0,15
2	12,40	0,7	0,22
3	25,20	0,7	0,24
4	35,00	0,4	0,23
5	51,20	0,2	0,26
6	62,20	-0,1	0,24
7	72,40	-0,4	0,27
8	83,20	-0,6	0,28
9	90,10	-0,8	0,28
10	100,10	-1,1	0,29

O ERRO DE MEDIÇÃO

7. Determine o erro máximo (incerteza) do sistema de medição da questão anterior.
8. Dê exemplo de cinco fatores que possam introduzir erros em sistemas de medição.

Capítulo 5

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Um sistema de medição (SM) de boa qualidade deve ser capaz de operar com pequenos erros. Seus princípios construtivos e operacionais devem ser projetados para minimizar erros sistemáticos e aleatórios ao longo da sua faixa de medição, nas suas condições de operação nominais.

Entretanto, por melhores que sejam as características de um SM, este sempre apresentará erros, seja por fatores internos, seja por ação das grandezas de influência externas. A perfeita caracterização das incertezas associadas a estes erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser estimado de maneira segura. Embora, em alguns casos, os erros de um sistema de medição possam ser analítica ou numericamente estimados, na prática são utilizados procedimentos experimentais quase que exclusivamente.

Através do procedimento experimental denominado *calibração* é possível correlacionar os valores indicados pelo sistema de medição e sua correspondência com a grandeza sendo medida. Esta operação é extremamente importante e é realizada por um grande número de entidades credenciadas espalhadas pelo país.

Este capítulo apresenta, em linhas gerais, aspectos característicos da calibração e de operações a esta relacionadas.

5.1 Operações Básicas para Qualificação de Sistemas de Medição

5.1.1 Calibração

Calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

Como exemplos, através de uma calibração é possível estabelecer:

- a relação entre temperatura e tensão termoelétrica de um termopar;
- uma estimativa dos erros sistemáticos de um manômetro;
- o valor efetivo de uma massa padrão;
- a dureza efetiva de uma placa "padrão de dureza";
- o valor efetivo de um "resistor padrão".

O resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações, como a determinação das correções a serem aplicadas. Uma calibração também pode determinar outras propriedades metrológicas como, por exemplo, os efeitos das grandezas de influência sobre a indicação, ou o comportamento metrológico de sistemas de medição em condições adversas de utilização (em temperaturas elevadas ou muito baixas, na ausência de gravidade, sob radiação nuclear, etc).

O resultado da calibração geralmente é registrado em um documento específico denominado *certificado de calibração* ou, algumas vezes, referido como *relatório de calibração*. O certificado de calibração apresenta várias informações acerca do desempenho metrológico do sistema de medição analisado e descreve claramente os procedimentos realizados. Frequentemente, como seu principal resultado, apresenta uma tabela, ou gráfico, contendo, para cada ponto medido ao longo da faixa de medição: a) estimativas da correção a ser aplicada e b) estimativa da incerteza associada à correção. Em função dos resultados obtidos, o desempenho do SM pode ser comparado com aquele constante nas especificações de uma norma técnica, ou outras determinações legais, e um parecer de conformidade pode ser emitido.

A calibração pode ser efetuada por qualquer entidade, desde que esta disponha dos padrões rastreados e pessoal competente para realizar o trabalho. Para que uma calibração tenha validade oficial, é necessário que seja executada por entidade legalmente credenciada. No Brasil, existe a Rede Brasileira de Calibração (RBC), coordenada pelo INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Esta rede é composta por uma série de laboratórios secundários, espalhados pelo país, ligados a Universidades, Empresas, Fundações e outras entidades, que recebem o credenciamento do INMETRO e estão aptos a expedir certificados de calibração oficiais.

Hoje, com as tendências da globalização da economia, a competitividade internacional das empresas é uma questão crucial. A qualidade dos serviços e dos produtos da empresa têm que ser assegurada a qualquer custo. As normas da série ISO 9000 aparecem para disciplinar a gestão das empresas para melhorar e manter a qualidade de uma organização. A calibração tem o seu papel de grande importância neste processo, uma vez que um dos requisitos necessários para uma empresa que se candidate à certificação pelas normas ISO 9000, é que os sistemas de medição e padrões de referência utilizados nos processo produtivo, tenham certificados de calibração oficiais.

Embora a calibração seja a operação de qualificação de instrumentos e sistemas de medição mais importante, existem outras operações comumente utilizadas:

5.1.2 Ajuste

Operação complementar, normalmente efetuada após uma calibração, quando o desempenho metrológico de um sistema de medição não está em conformidade com os padrões de comportamento esperados. Trata-se de uma "regulagem interna" do SM, executada por técnico especializado. Visa fazer coincidir, da melhor forma possível, o valor indicado no SM, com o valor correspondente do mensurado submetido. São exemplos:

- alteração do fator de amplificação (sensibilidade) de um SM por meio de um potenciômetro interno;
- regulagem do "zero" de um SM por meio de parafuso interno.

No caso de medidas materializadas, o ajuste normalmente envolve uma alteração das suas características físicas ou geométricas. Por exemplo:

- colocação de uma "tara" em uma massa padrão;

Após o término da operação de ajuste, é necessário efetuar uma recalibração, visando conhecer o novo comportamento do sistema de medição, após os ajustes terem sido efetuados.

5.1.3 Regulagem

É também uma operação complementar, normalmente efetuada após uma calibração, quando o desempenho metrológico de um sistema de medição não está em conformidade com os padrões de comportamento esperados. Envolve apenas ajustes efetuados em controles externos, normalmente colocados à disposição do usuário comum. É necessária para fazer o SM funcionar adequadamente, fazendo coincidir, da melhor forma possível, o valor indicado com o valor correspondente do mensurado submetido. São exemplos:

- alteração do fator de amplificação (sensibilidade) de um SM por meio de um botão externo;
- regulagem do "zero" de um SM por meio de um controle externo indicado para tal.

5.1.4 Verificação

A operação de *verificação* é utilizada no âmbito da metrologia legal, devendo esta ser efetuada por entidades oficiais denominados de Institutos de Pesos e Medidas Estaduais (IPEM), existentes nos diversos estados da Federação.

Trata-se de uma operação mais simples, que tem por finalidade comprovar que:

- um sistema de medição está operando corretamente dentro das características metrológicas estabelecidas por lei;
- uma medida materializada apresenta características segundo especificações estabelecidas por normas ou outras determinações legais.

São verificados instrumentos como balanças, bombas de gasolina, taxímetros, termômetros clínicos e outros instrumentos, bem como medidas materializadas do tipo massa padrão usados no comércio e área da saúde, com o objetivo de proteger a população em geral.

A verificação é uma operação de cunho legal, da qual resulta a emissão de selo ou plaqueta com a inscrição "VERIFICADO", quando o elemento testado satisfaz às exigências legais. É efetuada pelos órgãos estaduais denominados de Institutos de Pesos e Medidas (IPEM) ou diretamente pelo INMETRO, quando trata-se de âmbito federal.

5.2 Destino dos Resultados de uma Calibração

Os resultados de uma calibração são geralmente destinados a uma das seguintes aplicações:

- a) Levantamento da curva de erros visando determinar se, nas condições em que foi calibrado, o sistema de medição está em conformidade com uma norma, especificação legal ou tolerância definida para o produto a ser medido, e conseqüente emissão de certificado. Efetuado periodicamente, garantirá a confiabilidade dos resultados da medição e assegurará correlação (rastreadabilidade) aos padrões nacionais e internacionais;
- b) Levantamento da curva de erros visando determinar dados e parâmetros para a operação de ajuste do sistema de medição;
- c) Levantamento detalhado da curva de erros e tabelas com valores da correção e sua incerteza, com o objetivo de corrigir os efeitos sistemáticos, visando reduzir a incerteza do resultado da medição (capítulo 7). A aplicação da correção poderá ser efetuada manual ou automaticamente;
- d) Análise do comportamento metrológico e operacional dos sistemas de medição nas fases de desenvolvimento e aperfeiçoamento, incluindo a análise das grandezas externas que influem no seu comportamento;
- e) Análise do comportamento metrológico e operacional dos sistemas de medição em condições especiais de operação (por exemplo: elevadas temperaturas, na ausência de gravidade, em elevadas pressões, etc);

Adicionalmente, a calibração deve ser efetuada quando, por alguma razão, se deseja o levantamento mais detalhado sobre o comportamento metrológico de um sistema de medição, sobre o qual existe dúvida ou suspeita de funcionamento irregular.

5.3 Métodos de Calibração

5.3.1 Calibração Direta

A parte superior da figura 6.1 ilustra o método de calibração direta. O mensurado é aplicado sobre o sistema de medição por meio de medidas materializadas, cada qual com seu valor verdadeiro convencional suficientemente conhecido. São exemplos de medidas materializadas: blocos padrão (comprimento), massas padrão, pontos de fusão de substâncias puras, entre outras.

É necessário dispor de uma coleção de medidas materializadas suficientemente completa para cobrir toda a faixa de medição do instrumento. As indicações dos sistemas de medição são confrontadas com cada valor verdadeiro convencional e a correção e sua incerteza são estimadas por meio de medições repetitivas.

5.3.2 Calibração Indireta

Não seria fácil calibrar o velocímetro de um automóvel utilizando a calibração direta. O conceito de medida materializada não se aplica à velocidade. As constantes físicas naturais, como a velocidade de propagação do som no ar ou nos líquidos, ou mesmo a velocidade da luz, são inapropriadas para este fim. A solução para este problema passa pela calibração indireta.

Este método é ilustrado na parte inferior da figura 6.1. O mensurado é gerado por meio de um dispositivo auxiliar, que atua simultaneamente no sistema de medição a calibrar (SMC) e também no sistema de medição padrão (SMP), isto é, um segundo sistema de medição que não apresente erros superiores a 1/10 dos erros do SMC. As indicações do SMC são comparadas com as do SMP, sendo estas adotadas como VVC, e os erros são determinados.

Para calibrar o velocímetro de um automóvel pela calibração indireta, o automóvel é posto em movimento. Sua velocidade em relação ao solo, além de indicada pelo velocímetro, é também medida por meio de um sistema de medição padrão, cujos erros sejam 10 vezes menores que os erros do velocímetro a calibrar. Este SMP pode ser, por exemplo, constituído por uma quinta roda, afixada na parte traseira do automóvel, ou, hoje é comum a utilização de sensores que usam um raio laser dirigido ao solo e, pela análise do tipo de sinal que retorna, determinar a velocidade real do automóvel com baixas incertezas. Neste exemplo o próprio automóvel é o gerador da grandeza padrão, isto é, da velocidade, que é simultaneamente submetida a ambos os sistemas de calibração. Para levantar a curva de erros, o automóvel deve trafegar em diferentes patamares de velocidade repetidas vezes.

Algumas vezes não se dispõe de um único sistema de medição padrão que englobe toda a faixa de medição do SMC. Neste caso, é possível utilizar diversos SMPs de forma complementar. Por exemplo:

- deseja-se calibrar um termômetro entre 20 e 35 °C;
- não se dispõe de um padrão que, individualmente, cubra esta faixa completamente;
- dispõe-se de um termômetro padrão para a faixa 20 a 30 °C e outro para 30 a 40 °C;
- o termômetro a calibrar é parcialmente calibrado para a faixa de 20 a 30 °C contra o primeiro padrão;
- o restante da calibração, entre 30 e 35 °C, é completado contra o segundo padrão.

5.3.3 Padrões para Calibração

Para que o valor da medida materializada, ou o indicado pelo SMP, possa ser adotado como valor verdadeiro convencional (VVC), é necessário que seus erros sejam sensivelmente menores que os erros esperados no SMC. Tecnicamente, quanto menores os erros do padrão melhor. Economicamente, quanto menores os erros do padrão, mais caro este é. Procurando buscar o equilíbrio técnico-econômico, adota-se como padrão um elemento que, nas condições de calibração e para cada ponto de

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

calibração, apresente incerteza não superior a um décimo da incerteza esperada para o sistema de medição a calibrar. Assim:

$$U_{\text{SMP}} \leq \frac{1}{10} U_{\text{SMC}}$$

Na equação acima, U representa a incerteza expandida, que corresponde à faixa de dúvidas que resultam das medições efetuadas com os respectivos sistemas de medição. Este conceito será detalhado nos capítulos 8 e 9.

Desta forma, o SMP apresentará ao menos um dígito confiável a mais que o SMC, o que é suficiente para a determinação dos erros deste último. Excepcionalmente, em casos onde é muito difícil ou caro de se obter um padrão 10 vezes superior ao SMC, usa-se o limite de 1/5 ou até mesmo 1/3 para a razão entre as incertezas do SMP e o SMC. Estes últimos devem ser analisados com cuidado para que a incerteza da calibração não venha a ser muito elevada.

Em função da mudança do comportamento do instrumento com a velocidade de variação do mensurado, distinguem-se a calibração estática e a dinâmica. Apenas nos instrumentos de ordem zero a calibração estática coincide com a dinâmica. Nos demais

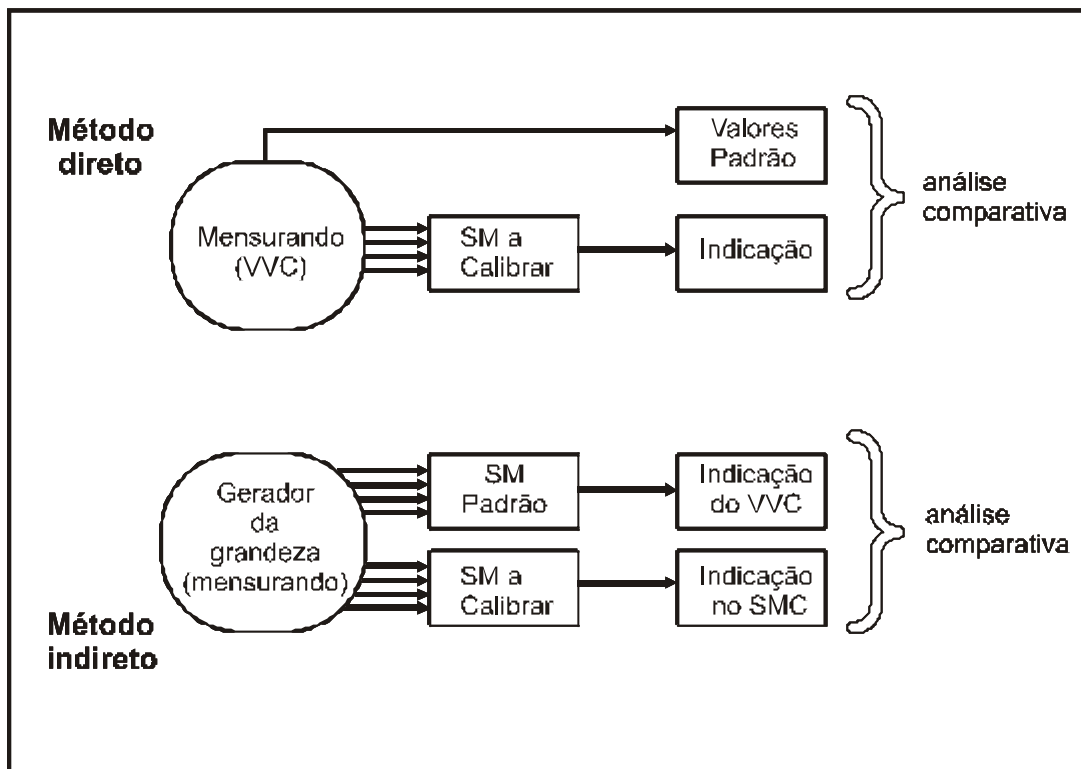


Figura 5.1 - Métodos de Calibração

AAC - 11/97 - MCG 016

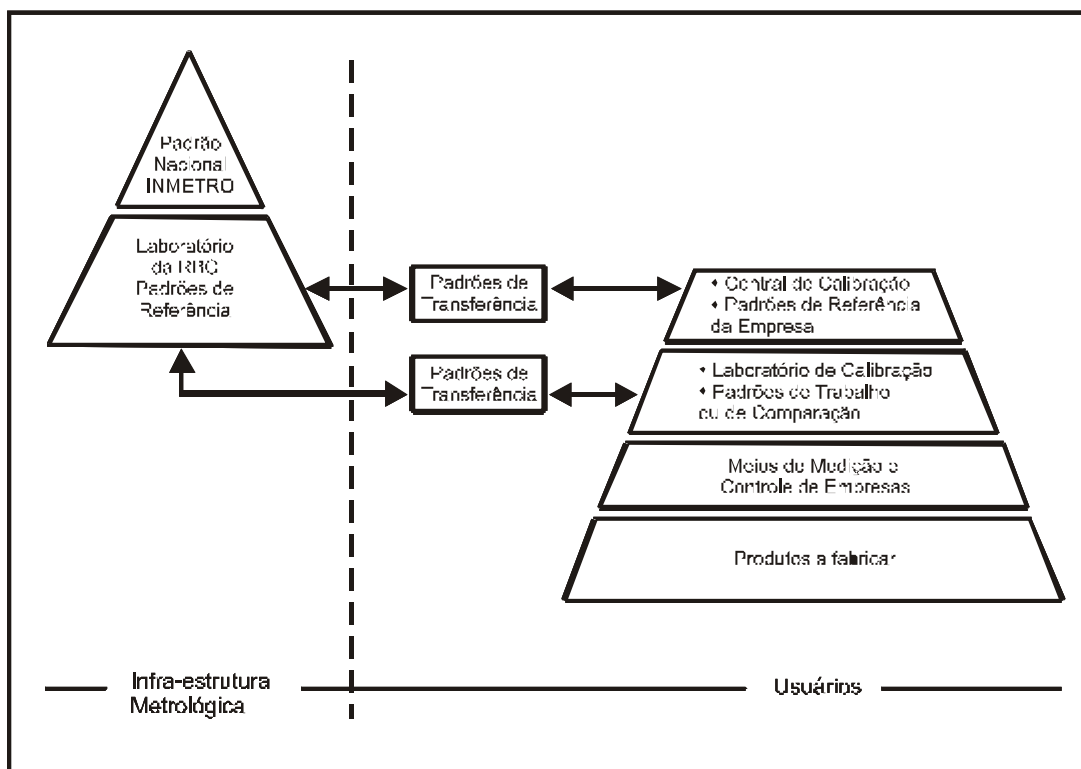
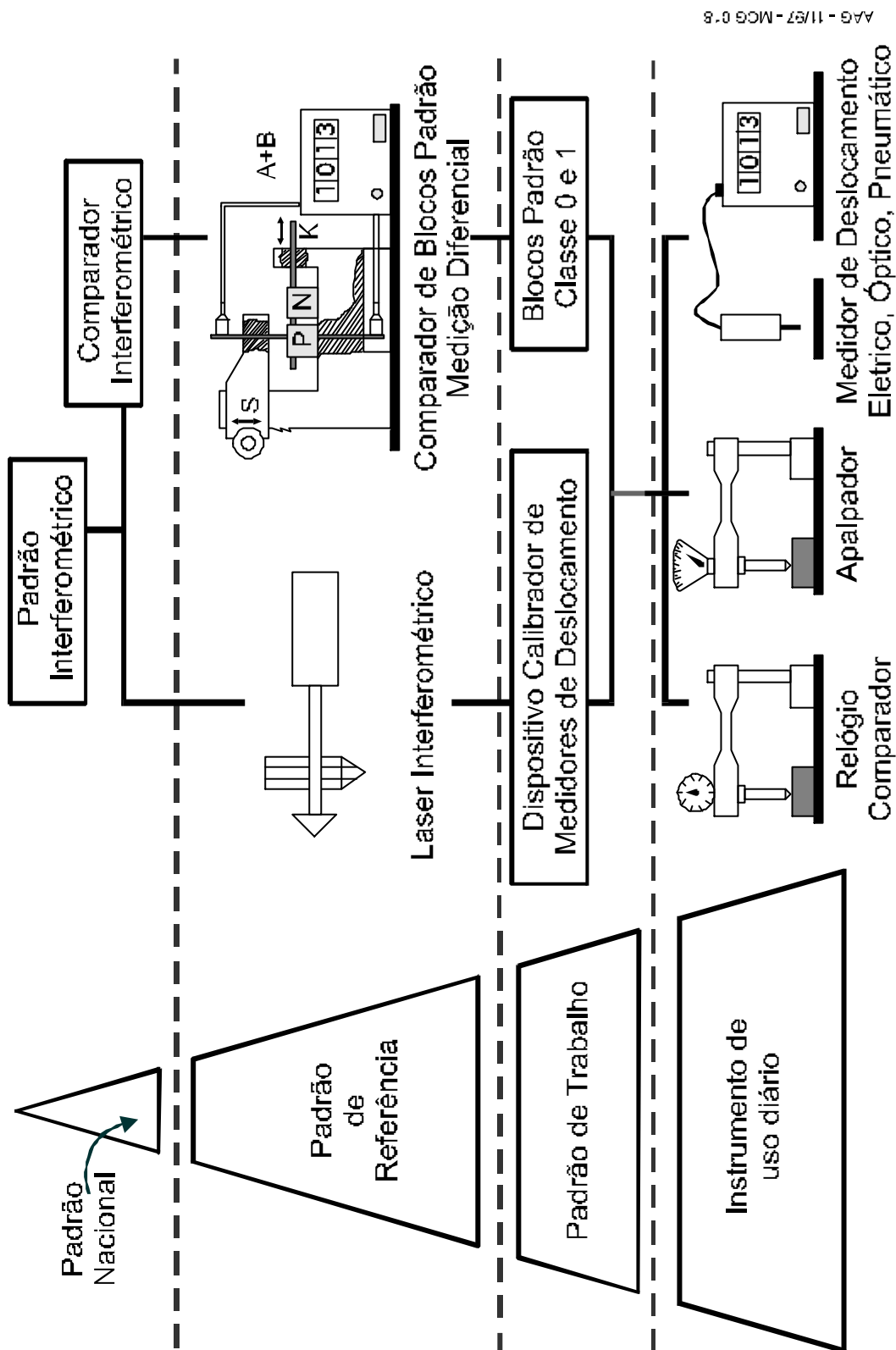
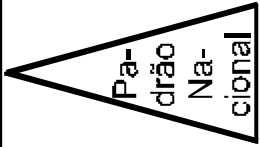

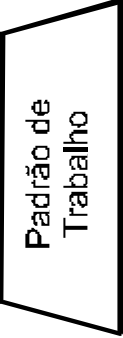
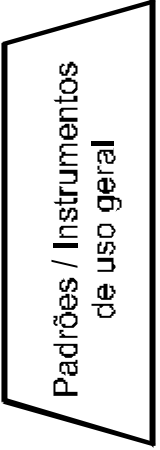


Figura 5.2 - Hierarquia de Calibração do Padrão Nacional até o Produto Acabado

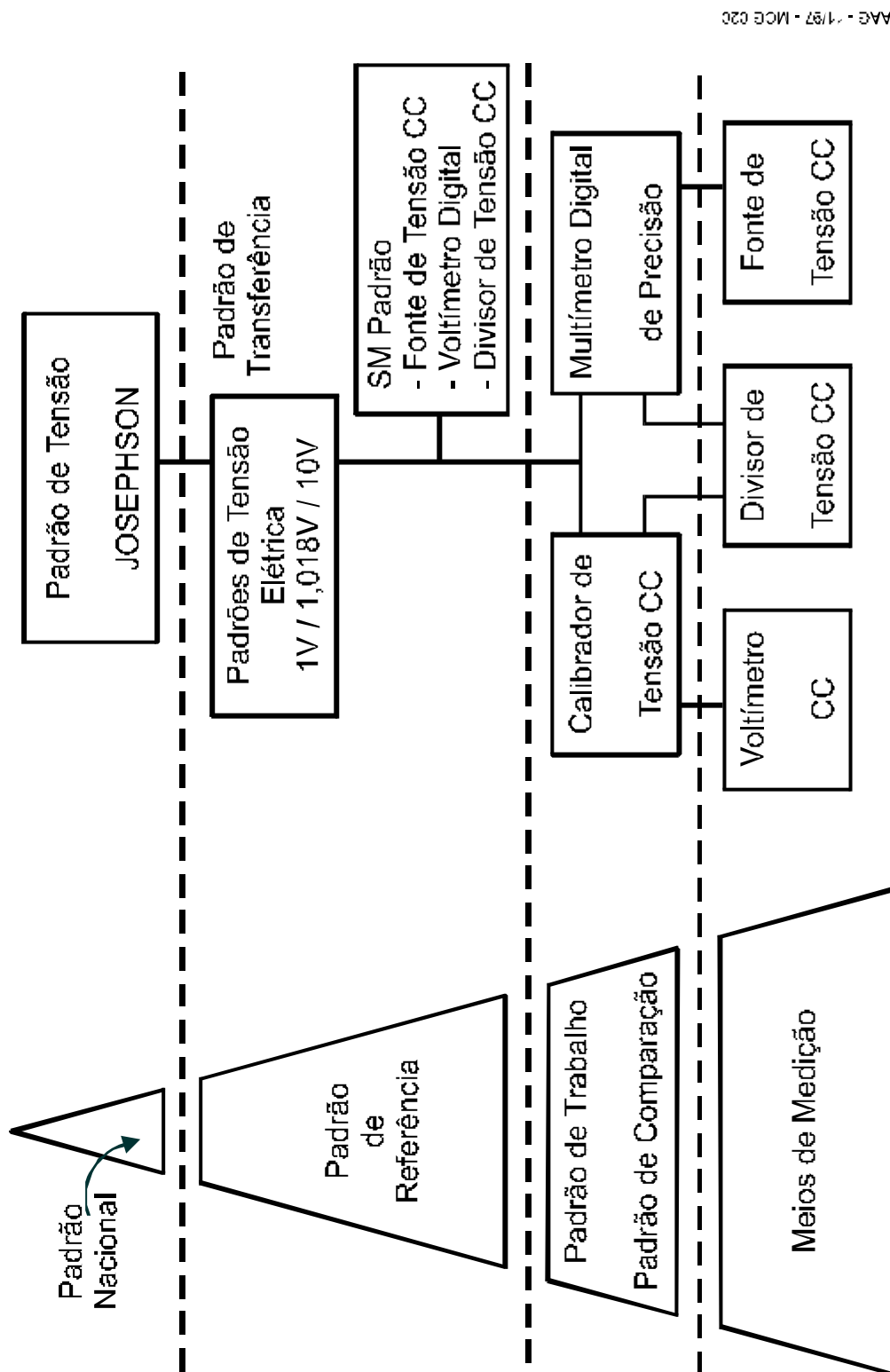
AAG - 0/97 - VCE 017



Exemplo de Níveis de Hierarquia de Calibração para Medidores de Deslocamento

PADRÃO (meios de medição)	USUÁRIO	ATIVIDADES	CONDIÇÕES PRELIMINARES DA CALIBRAÇÃO/ MEDIÇÃO	DOCUMENTAÇÃO DA CALIBRAÇÃO/ MEDIÇÃO
 <p>Pa- drão Na- cional</p>	Laboratório do INMETRO	Desenvolvimento, manutenção e transferência dos padrões nacionais	Garantia da rastreadibilidade da unidade até os padrões primários através de intercomparações internacionais	Certificado de calibração INMETRO para padrões de referência
 <p>Padrão de Referência</p>	Laboratórios da RBC	Garantia da infra-estrutura metrológica industrial	Certificado de calibração INMETRO	Certificado de calibração RBC para padrões de trabalho
 <p>Padrão de Trabalho</p>	Laboratórios de calibração das empresas	Calibração dos meios de medição para atender a demanda interna	Certificado de calibração RBC	Certificado de calibração da empresa ou outro que comprove a qualificação
 <p>Padrões / Instrumentos de uso geral</p>	Todas as áreas de atuação da empresa	Medições e calibrações no âmbito do sistema da qualidade	Certificados de calibração da empresa ou outros que comproven a qualificação	Marca, selo ou plaqueta de verificação

Estrutura Organizacional para rastrear resultados de medição de empresas a Padrões Nacionais



Exemplo dos níveis de hierarquia de rastreabilidade para instrumentos de medição de CC - Grandezas Elétricas

casos, é necessário determinar a resposta do SM para diversas freqüências de variação do mensurado.

Qualquer sistema de medição deve ser calibrado periodicamente. Este período é, algumas vezes, especificado por normas, ou fabricantes de instrumentos, ou outras fontes como laboratórios de calibração, porém são influenciados pelas condições e/ou freqüência de uso. Para a calibração de um SM em uso na indústria, são geralmente usados padrões dos laboratórios da própria indústria. Entretanto, estes padrões precisam ser calibrados periodicamente, o que é executado por laboratórios secundários da RBC. Mas também estes padrões precisam ser calibrados por outros que, por sua vez, também necessitam de calibração e assim por diante... Estabelece-se assim uma hierarquia que irá terminar nos padrões primários internacionais, ou mesmo, na própria definição da grandeza. A calibração periódica dos padrões garante a rastreabilidade internacional, o que elimina o risco do "metro francês" ser diferente do "metro australiano". Como exemplo, cita-se a figura 6.2, onde se exemplifica a correlação entre os padrões. Isto garante a coerência das medições no âmbito mundial.

5.4 Procedimento Geral de Calibração

Normalmente objetiva-se determinar o comportamento operacional e metrológico do sistema de medição na sua integralidade, isto é, do conjunto formado pelos módulos sensor/transdutor, transmissão ou tratamento de sinal, dispositivo mostrador e demais, que compõem a cadeia de medição. Este sistema de medição pode apresentar-se de forma independente (ex: manômetro, máquina de medir por coordenadas) ou pode estar integrado a um sistema composto de vários elementos interligáveis fisicamente (ex: célula de carga + amplificador da máquina de ensaio de materiais, termômetro de um reator nuclear, formado por termopar + cabo de compensação + voltímetro).

Não é raro, especialmente nas fases de desenvolvimento e fabricação de módulos, ser inviável a calibração do sistema de medição como um todo. Esta dificuldade pode surgir em função do porte e complexidade do sistema ou da dificuldade tecnológica de se obter uma grandeza padrão com a qualidade necessária ou de se manter todas as variáveis influentes sob controle. Nestes casos, é comum efetuar calibrações separadamente em alguns módulos do sistema, tendo sempre em vista que estes devem apresentar um sinal de saída definido (resposta) para um sinal de entrada conhecido (estímulo). A análise do desempenho individual de cada módulo possibilita a determinação das características de desempenho do conjunto.

Freqüentemente um módulo isolado não tem condições de operar plenamente. É necessário acrescentar elementos complementares para formar um SM que tenha condições de operar. Para que estes elementos complementares não influam de forma desconhecida sobre o módulo a calibrar, é necessário que o erro máximo introduzido por cada elemento não seja superior a um décimo do erro admissível ou esperado para o módulo a calibrar.

Esta situação é ilustrada na figura 6.3. Supondo que o sistema de medição normal (0) tenha módulos com incertezas relativas da ordem de 1% e desejando-se efetuar a calibração do sensor transdutor isoladamente, é necessário compor um outro sistema de medição, o SM1. Neste sistema, são empregados uma unidade de tratamento de sinais e um dispositivo mostrador (1), com incerteza relativa máxima de 0,1%.

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Garantido estes limites, pode-se afirmar que os erros do SM1 são gerados exclusivamente no transdutor (0), visto que os demais módulos contribuem com parcelas de incerteza significativamente menores.

Ainda na figura 6.3, no caso em que se deseje calibrar isoladamente a unidade de tratamento de sinais (0), deverá ser composto o SM2, formado por um sensor/transdutor e um dispositivo mostrador que apresentem incertezas insignificantes. Neste caso, em geral, o sensor transdutor é substituído por um gerador de sinais equivalente. Este sinal, no entanto, não deve estar afetado de um erro superior a um décimo do admitido na operação da unidade de tratamento de sinais.

Na prática, existem alguns sistemas de medição que fornecem, para grandezas vetoriais, diversas indicações (ex: as três componentes cartesianas de uma força, as três coordenadas da posição de um ponto apalpado). A calibração deste sistema é normalmente efetuada para cada uma destas componentes do vetor isoladamente, da forma usual. Deve-se adicionalmente verificar se há influência da variação de uma das componentes sobre as demais, ou seja, os coeficientes de influência.

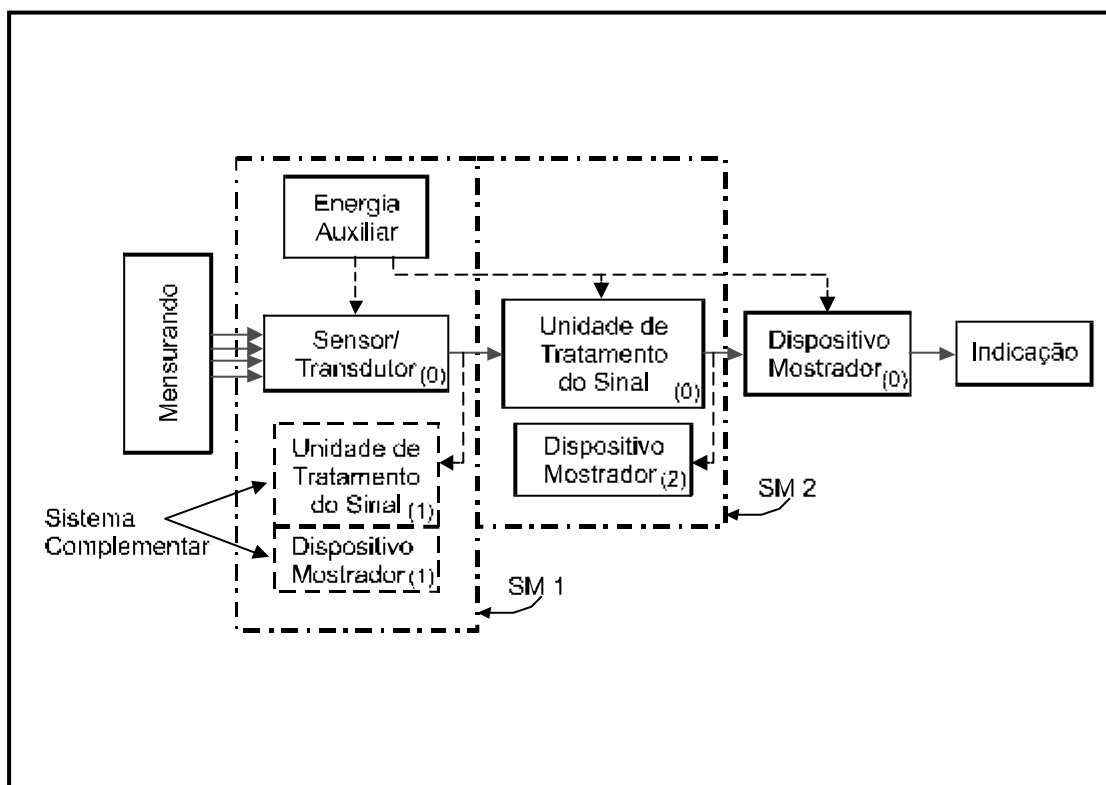


Figura 6.3 - Calibração Parcial de Módulos de um Sistema de Medição

5.5 Procedimento Geral de Calibração

A calibração de sistemas de medição é um trabalho especializado e exige amplos conhecimentos de metrologia, total domínio sobre os princípios e o funcionamento do sistema de medição a calibrar (SMC), muita atenção e cuidados na sua execução e uma elevada dose de bom senso. Envolve o uso de equipamento sofisticado e de alto custo.

Recomenda-se sempre usar um procedimento de calibração documentado, segundo exigências de normas NBR/ISO. Quando tais procedimentos de calibração não existirem, devem ser elaborados com base em informações obtidas de normas técnicas, recomendações de fabricantes e informações do usuário do SM em questão, complementados com a observância das regras básicas da metrologia e no bom senso. A seguir, apresenta-se uma proposta de roteiro geral a ser seguido para a calibração de um SM qualquer. Esta proposta deve ser entendida como orientativa apenas, devendo ser analisado caso a caso a conveniência de adotar, modificar ou acrescentar as recomendações sugeridas.

Quando trata-se de um trabalho não rotineiro, de cunho técnico-científico, e muitas vezes de alta responsabilidade, é fundamental que sejam registrados todos os eventos associados com o desenrolar da atividade, na forma de um *memorial de calibração*.

Esta proposta de roteiro genérico de uma calibração está estruturada em oito etapas:

Etapa 1 - Definição dos objetivos:

Deve-se definir claramente o destino das informações geradas. A calibração poderá ser realizada com diferentes níveis de abrangência dependendo do destino dos resultados. Por exemplo:

- dados para ajustes e regulagens: o estudo se restringirá a apenas alguns poucos pontos da faixa de medição do SMC;
- levantamento da curva de erros para futura correção: definidas as condições de operação, deve-se programar uma calibração com grande número de pontos de medição dentro da faixa de medição do SMC, bem como, realizar grande número de ciclos para reduzir a incerteza nos valores da tendência ou da correção ;
- dados para verificação: o volume de dados a levantar tem uma intensidade intermediária, orientada por normas e recomendações específicas da metrologia legal;
- avaliação completa do SMC: compreende, na verdade, diversas operações de calibração em diferentes condições operacionais (ex: influência da temperatura, tensão da rede, campos eletromagnéticos, vibrações, etc);

Etapa 2 - Identificação do Sistema de Medição a Calibrar (SMC)

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

É fundamental um estudo aprofundado do SMC: manuais, catálogos, normas e literatura complementar, visando:

- identificar as características metrológicas e operacionais esperadas. Deve-se procurar identificar todas as características possíveis, seja do sistema como um todo ou seja dos módulos independentes;
- conhecer o modo de operação do SMC: na calibração é necessário que se utilize o sistema corretamente e para isso é necessário conhecer todas as recomendações dadas pelo fabricante. Operar o sistema apenas com base na tentativa pode levar a resultados desastrosos;
- documentar o SMC: a calibração será válida exclusivamente para o instrumento analisado, sendo portanto necessário caracteriza-lo perfeitamente (número de fabricação, série, modelo, etc);

Etapa 3 - Seleção do Sistema de Medição Padrão (SMP)

Com base nos dados levantados na etapa anterior, selecionar, dentre os disponíveis, o SMP apropriado, considerando:

- a incerteza do SMP nas condições de calibração idealmente não deve ser superior a um décimo da incerteza esperada para o SMC. É importante observar que se estas estão expressas em termos percentuais, é necessário que ambas tenham o mesmo valor de referência, ou que seja efetuada as devidas compensações;
- faixa de medição: o SMP deve cobrir a faixa de medição do SMC. Vários SMP's podem ser empregados se necessário;

Etapa 4 - Preparação do Experimento

Recomenda-se efetuar o planejamento minucioso do experimento de calibração e das operações complementares, com a finalidade de reduzir os tempos e custos envolvidos e de se evitar que medições tenham que ser repetidas porque se “esqueceu” um aspecto importante do ensaio. O planejamento e a preparação do ensaio envolvem:

- executar a calibração adotando procedimento de calibração segundo documentado em normas específicas;
- quando o procedimento documentado não existir, realizar estudo de normas e manuais operativos, recomendações técnicas, de fabricantes e ou laboratórios de calibração;
- estudo do SMP: para o correto uso e a garantia da confiabilidade dos resultados, é necessário que o executor conheça perfeitamente o modo de operação e funcionamento do SMP;

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

- esquematização do ensaio: especificação da montagem a ser realizada, dos instrumentos auxiliares a serem envolvidos (medidores de temperatura, tensão da rede, umidade relativa, etc) e da seqüência de operações a serem seguidas;
- preparação das planilhas de coleta de dados: destinadas a facilitar a tomada dos dados, reduzindo a probabilidade de erros e esquecimentos na busca de informações;
- montagem do experimento, que deve ser efetuada com conhecimento técnico e máximo cuidado;

Etapa 5 - Execução do Ensaio

Deve seguir o roteiro fixado no procedimento de calibração. É importante não esquecer de verificar e registrar as condições de ensaio (ambientais, operacionais, etc). Qualquer anomalia constatada na execução dos trabalhos deve ser anotada no memorial de calibração, com identificação cronológica associada com o desenrolar do experimento. Estas informações podem ser úteis para identificar a provável causa de algum efeito inesperado que possa ocorrer.

Etapa 6 - Processamento e Documentação dos Dados:

Todos os cálculos realizados devem ser explicitados no memorial. A documentação dos dados e resultados de forma clara, seja como tabelas ou gráficos, é fundamental.

Etapa 7 - Análise dos Resultados

A partir da curva de erros, e dos diversos valores calculados para a faixa de medição, determinam-se, quando for o caso, os parâmetros reduzidos correspondentes às características metrológicas e operacionais. Estes valores são comparados às especificações do fabricante, usuário, normas, e dão lugar a um parecer final. Este parecer pode ou não atestar a conformidade do SMC com uma norma ou recomendação técnica, apresentar instruções de como e restrições das condições em que o SMC pode ser utilizado, etc.

Etapa 8 - Certificado de Calibração

A partir do memorial, gera-se o *Certificado de Calibração*, que é o documento final que será fornecido ao requisitante, no qual constam as condições e os meios de calibração, bem como os resultados e os pareceres.

A norma NBR ISO 10 012-1 "Requisitos da Garantia da Qualidade para Equipamentos de Medição" prevê que os resultados das calibrações devem ser registrados com detalhes suficientes de modo que a rastreabilidade de todas as medições efetuadas com o SM calibrado possam ser demonstradas, e qualquer medição possa ser reproduzida sob condições semelhantes às condições originais.

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

As seguintes informações são recomendadas para constar no Certificado de Calibração:

- a) descrição e identificação individual do SM a calibrar;
- b) data da calibração;
- c) os resultados da calibração obtidos após, e quando relevante, os obtidos antes dos ajustes efetuados;
- d) identificação do(s) procedimento(s) de calibração utilizado(s);
- e) identificação do SM padrão utilizado, com data e entidade executora da sua calibração, bem como sua incerteza
- f) as condições ambientais relevantes e orientações expressas sobre quaisquer correções necessárias ao SM a calibrar;
- g) uma declaração das incertezas envolvidas na calibração e seus efeitos cumulativos;
- h) detalhes sobre quaisquer manutenções, ajustes, regulagens, reparos e modificações realizadas;
- i) qualquer limitação de uso (ex: faixa de medição restrita);
- j) identificação e assinaturas da(s) pessoa(s) responsável(eis) pela calibração bem como do gerente técnico do laboratório;
- k) identificação individual do certificado, com número de série ou equivalente.

Para garantir a rastreabilidade das medições até os padrões primários internacionais, é necessário que o usuário defina, em função das condições de uso específicas do SM, os *intervalos de calibração*. Estes devem ser reajustados com base nos dados históricos das calibrações anteriores realizadas.

Nos casos em que os dados históricos das calibrações anteriores não estiverem disponíveis, e outras informações do usuário do SM não forem suficientes para definir os intervalos de calibração, são recomendados a seguir alguns intervalos iniciais que podem ser usados. Todavia reajustes nestes intervalos deverão ser efetuados, com base nos resultados das calibrações subsequentes.

**RECOMENDAÇÕES PARA INTERVALOS INICIAIS DE CALIBRAÇÃO
(ÁREA DIMENSIONAL)**

INSTRUMENTOS	INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO (MESES)
Blocos Padrão (Padrão de referência) - angulares/paralelos (Novos)	12
Calibradores (tampão/anel) lisos, de rosca, cilíndricos e cônicos	3 a 6
Desempenos	6 a 12
Escalas Mecânicas	12
Esquadros	6 a 9
Instrumentos Ópticos	6
Máquinas de Medir - (ABBE, Peças Longas, etc.)	12
Medidores de Deslocamento Eletro/Eletrônico	6 a 12
Medidores de Deslocamento Mecânicos (relógios comparadores/apalpadores)	12/3 a 6
Medidores de Deslocamento Pneumáticos	6 a 12
Medidores de Espessura de Camada	6 a 12
Micrômetros	3 / 6
Microscópios	12
Níveis de Bolha e Eletrônico	6
Paquímetros	6
Planos e Paralelos Ópticos	12
Réguas (Aço ou granito)	6 a 12
Rugosímetro e Medidor de Forma	12
Transferidores	6
Trenas	6

(OUTRAS GRANDEZAS FÍSICAS)

INSTRUMENTO/PADRÃO	INTERVALOS DE CALIBRAÇÃO (MESES)
1. MASSA, VOLUME, DENSIDADE	
Massas padrão	24
Balanças	12 a 36
Balanças Padrão	12
Hidrômetros	36
Densímetros	12 a 24
2. PRESSÃO	
Manômetros	6 a 12
Máquinas de Peso Morto	24 a 36
Barômetros	6 a 12
Vacuômetros	6 a 12
Transdutores de Pressão	12
3. FORÇA	
Transdutores de Força (Células de Carga)	12 a 24
Anéis Dinamométricos	24
Máquinas de Tração-Compressão (Hidráulicas)	12 a 24
Máquina de Peso Morto	24 a 60
4. TORQUE	
Torquímetro	12

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 0251**DATA: 02/03/1995****VALIDADE DE CALBRAÇÃO: 6 MESES****1. OBJETIVO**

Calibração de um manômetro "WIKA", a fim de conhecer as características metrológicas e compará-las com as especificações do fabricante

2. MANÔMETRO A CALIBRAR (SMC)

Proprietário: XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Fabricante: YYYYYYYYYYYYYYYYYYYYYYYY

Número de Fabricação: 1174902

Faixa de Indicação: 0 a 40 bar

Valor de uma Divisão: 0,2 bar

Tipo: Bourdon, mecânico

Estado de Conservação: Bom

Índice de Classe (segundo o fabricante): kl. 0,6 ($\pm 0,6$ % do VFE)**3. SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO (SMP)**

Máquina de Peso Morto (Manômetro de Êmbolo)

Fabricante: Budenberg Gauge Co. Limited (Inglaterra)

Número de Série (fabricante): 10334/12

Número de Registro (CERTI): RL 0136

Faixas de Medição: 1 a 55 kgf/cm² com resolução de 0,01 kgf/cm²10 a 550 kgf/cm² com resolução de 0,1 kgf/cm²Incerteza do SMP: $\pm 0,04\%$ para a faixa de 0 a 55 kgf/cm² $\pm 0,1$ % para a faixa de 0 a 550 kgf/cm²

Rastreável aos padrões primários conforme Certificado de Calibração Nº 121/92, emitido pelo INMETRO em 07/10/92, com validade até 07/10/95.

4. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

A calibração foi realizada montando-se o manômetro a calibrar na máquina de peso morto, através da qual foram os valores de pressões previamente estabelecidos, realizando-se as leituras das indicações no manômetro a calibrar.

Foram realizados 3 (três) ciclos de medição, a fim de registrar também a Repetitividade (95%) do manômetro.

Na calibração foi adotado procedimento de calibração CERTI – código PC-SSS, de acordo com especificações da norma DIN 16005.

Condições de ensaio: - Temperatura ambiente: $21,0 \pm 0,05$ °C- Pressão atmosférica: $1022,0 \pm 0,5$ mbar

5. CALIBRAÇÃO PRÉVIA E AJUSTAGEM REALIZADA

Foi realizado a calibração prévia do manômetro e constatou-se que o mesmo apresentava erros sistemáticos (tendência) elevados, conforme pode-se observar a seguir:

MANÔMETRO (bar)	SMP (bar)	ERRO SISTEMÁTICO (% do Valor Final de Escala)
02,00	01,75	0,6
06,00	05,70	0,8
14,00	13,55	1,1
22,00	21,40	1,5
30,00	29,30	1,8
38,00	37,25	1,9
40,00	39,25	1,9

Foi realizado a ajustagem do manômetro, a fim de minimizar os erros sistemáticos apresentados pelo mesmo.

Os resultados obtidos após a ajustagem do manômetro podem ser observados na folha 3.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

a) Erro sistemático máximo (tendência máxima)

$T_{d_{\max}} = 0,10$ bar ou 0,25% do VFE

b) Repetitividade (95%) máxima:

$R_{e_{\max}} = (95\%) \pm 0,14$ bar ou $\pm 0,35\%$ do VFE

c) Erro de Linearidade pelo método dos mínimos quadrados:

Erro máximo = $\pm 0,04$ bar ou $\pm 0,10\%$ do VFE

d) Incerteza do SMC ($T_d = R_e$) = $\pm 0,19$ bar ou 0,48% do VFE

Obs: VFE=Valor Final de Escala=40 bar

7. CONCLUSÃO

A incerteza do Manômetro é igual a $\pm 0,02$ bar ou $\pm 0,5\%$ do VFE

8. PARECER

O manômetro satisfaz as tolerâncias estabelecidas pela norma DIN 16005, enquadrando-se como manômetro de classe de erro kl 0,6 ($\pm 0,6\%$ do VFE)

CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

DADOS BRUTOS				
PTOS	SMC	CICLOS SMP		
		1	2	2
01	2,00	2,05	2,00	2,06
02	6,00	6,03	6,05	6,08
03	10,00	10,02	9,99	10,01
04	14,00	14,03	14,00	14,02
05	18,00	18,00	17,98	18,02
06	22,00	22,04	22,03	22,00
07	26,00	25,98	25,95	25,97
08	30,00	29,95	29,93	29,95
09	34,00	33,92	33,96	33,93
10	38,00	37,90	37,88	37,92
11	40,00	39,92	39,94	39,95

Unidade de Leitura no Sistema de Medição Padrão (SMP): bar

Unidade de Leitura no Sistema de Medição a Calibrar (SMC): bar

TABELA DADOS PROCESSADOS						
PTOS	MEDIDA MÉDIA SM	VALOR VERDADEIRO CONVENCIONAL	TENDÊNCIA		REPETITIVIDADE (\pm)	
			ABS	%VFE	ABS	% VFE
01	2,00	2,04	-0,04	-0,10	0,14	0,35
02	6,00	6,05	-0,05	-0,13	0,11	0,28
03	10,00	10,01	-0,01	-,03	0,07	0,18
04	14,00	14,02	-0,02	-0,05	0,07	0,18
05	18,00	18,00	0,00	0,00	0,09	0,23
06	22,00	22,02	-0,02	-0,05	0,07	0,18
07	26,00	25,97	0,03	0,08	0,07	0,18
08	30,00	29,94	0,06	0,15	0,05	0,13
09	34,00	33,94	0,06	0,15	0,09	0,23
10	38,00	37,90	0,010	0,25	0,09	0,23
11	40,00	39,94	0,06	0,15	0,07	0,18

Convenção:

ABS: Valor Absoluto

VFE: Valor Final de Escala = 40,00

Unidade de Análise: bar

Capítulo 6

O RESULTADO DA MEDIÇÃO

A escola ensina que a área do território brasileiro é de 8 511 965 km². Alguém pode perguntar: "Com a maré alta ou baixa?". De fato, considerando grosseiramente que o litoral brasileiro possui cerca de 8.500 km de praia e que, em média, 20 m de praia são descobertos entre as marés alta e baixa, verifica-se só aí uma variação de 170 km². Atribuir nota zero a um aluno que errou os dois últimos dígitos em uma prova de geografia parece contrariar o bom senso!

Adicionalmente, sabe-se que não existe forma de medir a área de uma extensão tão grande como a do Brasil com erro relativo tão pequeno quanto $\pm 0.000012\%$, o que seria necessário para garantir o último dígito dos 8511 965 km². Nem por terra, nem por satélite, ou outro meio conhecido, é ainda possível obter tal resultado.

Em aplicações técnicas ou científicas, o resultado de uma medição deve apresentar sempre compromisso com a verdade. Deve ser uma informação segura. O *resultado de uma medição* deve espelhar aquilo que a técnica e o bom senso permitem afirmar, nada além, nada aquém. A credibilidade de um resultado é fundamental. Por exemplo, voltando à área do Brasil, não parece muito mais sensato afirmar seu valor é de $(8.500.000 \pm 100.000)$ km²?

Sabe-se que não existe um SM perfeito. Por menores que sejam, os erros de medição provocados pelo SM sempre existem. Logo, não se pode obter um resultado exato de um SM imperfeito. Porém, mesmo com um SM imperfeito é possível obter informações confiáveis.

Neste capítulo serão detalhados os procedimentos que levam a correta determinação do chamado resultado da medição (RM), composto de um valor central, o resultado base (RB), e de uma faixa que quantifica a incerteza da medição (IM).

Por razões didáticas este estudo é, neste texto, abordado de forma progressiva. No presente capítulo será considerada a situação idealizada em que os erros de medição

são apenas decorrentes das imperfeições do sistema de medição (SM), perfeitamente caracterizados por sua correção, repetitividade ou, alternativamente, pelo seu erro máximo. Embora esta situação pareça artificial, é aplicável em uma grande quantidade de casos práticos em que os erros do sistema de medição são dominantes. Nos casos mais gerais, o operador, as condições ambientais, o procedimento de medição e outros fatores influem no resultado da medição. Estes casos serão tratados nos capítulos 8 a 11.

6.1 Mensurando Invariável Versus Variável

Para formular um modelo adequado para determinar o resultado da medição, o mensurando é aqui classificado como *variável* ou *invariável*. Será *invariável* se o seu valor permanecer constante durante o período que há interesse no seu valor. A massa de uma peça metálica isolada do meio ambiente é um exemplo. A temperatura de uma sala ao longo de um dia, ou em diferentes posições, é um exemplo de mensurando *variável*, isto é, seu valor muda em função do tempo e/ou da posição ao longo da sala.

A rigor, em termos precisistas, não existem mensurandos invariáveis. Mesmo a massa de uma peça de platina no vácuo sofre variações ínfimas se forem considerados aspectos relativísticos, uma vez que a velocidade com que as galáxias se afastam aumenta com a expansão do universo... Fugindo das discussões filosóficas, em termos práticos, o mensurando será aqui considerado invariável quando suas variações não podem ser detectadas pelo SM em uso. Ou seja, o SM não consegue "enxergar" estas variações por serem inferiores à sua resolução.

O diâmetro de uma peça cilíndrica pode ser considerado como um mensurando variável ou invariável, dependendo do SM utilizado. Imperfeições geométricas na forma cilíndrica fatalmente vão levar a diferentes valores do diâmetro quando medidos em diferentes posições, o que é uma característica de um mensurando variável. Entretanto, se estas variações forem inferiores à menor variação detectável pelo SM em uso – a sua resolução – esta peça será "enxergada" pelo SM como invariável. O uso de um outro SM de melhores características poderia levar a uma interpretação diferente. Portanto, a classificação de variável ou invariável não depende somente do mensurando em si, mas da relação das suas características com as do SM:

- ◆ **variável:** as variações do mensurando são maiores que a resolução do SM
- ◆ **invariável:** as variações do mensurando são inferiores à resolução do SM

Para estimar o resultado da medição de um mensurando invariável, além das indicações obtidas, devem ser consideradas as características do sistema de medição. No caso do mensurando variável, além das considerações acima, devem também ser consideradas as variações do mensurando. Se o mensurando varia, o resultado da medição deve registrar esta variação.

6.2 Uma Medida x Várias Medidas

Por questões de economia de tempo, comodidade ou praticidade, não é raro na indústria aplicar uma única vez o SM sobre o mensurando para determinar o resultado da medição (RM). Em várias situações esta prática pode ser perfeitamente correta do

ponto de vista metrológico embora haja um preço: uma redução da qualidade do resultado da medição, isto é, aumento da sua incerteza. Há casos onde não é aplicável.

A repetição da operação de medição sobre a mesma peça leva mais tempo e exige cálculos adicionais, mas é justificável em duas situações: quando se deseja reduzir a incerteza da medição (IM) ou quando se trata de um mensurando variável. No primeiro caso, a influência do erro aleatório diminui à medida em que são efetuadas várias medidas o que pode vir a reduzir a incerteza da medição, portanto, a parcela de dúvida ainda presente no resultado. Tratando-se de um mensurando variável, deve-se necessariamente efetuar várias medições visando coletar um número suficiente de indicações que permitam caracterizar a faixa de variação do mensurando. Nestes casos, não faz sentido medir apenas uma única vez

6.3 Avaliação do Resultado da Medição de um Mensurando Invariável

O ponto de partida para chegar ao resultado da medição é o conhecimento das características do sistema de medição. Informações sobre o sistema de medição, sua correção, repetitividade ou, alternativamente, seu erro máximo, tem que ser conhecidas.

São estudadas duas situações distintas para a determinação do RM: (a) quando são compensados os erros sistemáticos e (b) quando não o são.

6.3.1 Compensando efeitos sistemáticos

Neste caso o operador conhece a repetitividade e a correção (C) do SM e está disposto a fazer algumas continhas simples para compensá-la. Se apenas uma medição foi feita, a indicação obtida deve ser corrigida e o resultado da medição ainda conterà uma parcela de dúvida correspondente à repetitividade, que é a medida do erro aleatório, ou seja:

$$RM = I + C \pm Re \quad (6.1)$$

sendo:

I	indicação obtida
C	correção do SM
Re	repetitividade do SM

Se o operador decidir investir um pouco mais de tempo e medir repetidamente "n" vezes o mesmo mensurando e calcular a média obtida, este esforço resultará em uma melhora no resultado da medição. Os estatísticos provam que a influência dos erros aleatórios na média de "n" medições reduz-se na proporção $1/\sqrt{n}$. Assim, quanto maior "n", menor a influência do erro aleatório. Assim, quando a média de "n" medições é efetuada, o resultado da medição pode ser estimado por:

$$RM = MI + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

sendo:

MI	média das "n" indicações obtidas
C	correção do SM

Re repetitividade do SM
n número de medições efetuadas

6.3.2 Não compensando efeitos sistemáticos

Corresponde à situação onde o valor da correção não é conhecido ou, por questões de simplicidade ou falta de tempo, o operador deliberadamente optou por não compensar os efeitos sistemáticos. Neste caso, o erro máximo deve ser usado para estimar o resultado da medição. Caso apenas uma medição seja feita, o resultado da medição pode ser estimado por:

$$RM = I \pm E_{\max} \quad (6.3)$$

sendo:

I indicação obtida
E_{max} erro máximo do SM nas condições em que a medição foi efetuada

Neste caso se o operador decidir investir um pouco mais de tempo e medir repetidamente "n" vezes o mesmo mensurando e calcular a média obtida, este esforço terá pouco efeito sobre o resultado da medição. Como o erro máximo contém a combinação das parcelas sistemática e aleatória, e não se sabe em que proporção, não é possível reduzir sua influência de forma segura pela repetição das medições. Assim, o resultado da medição pode ser estimado por:

$$RM = MI \pm E_{\max} \quad (6.4)$$

sendo:

MI média das "n" indicações obtidas
E_{max} erro máximo do SM nas condições em que as medições são efetuadas

Problema Resolvido 1:

E1a) Quando saboreava seu delicioso almoço no restaurante universitário, um estudante achou uma pepita de ouro no meio da sua comida. Dirigiu-se então ao laboratório com a finalidade de determinar o valor da massa da pepita usando uma balança. O aluno não conseguiu localizar a curva de erros da balança, mas o valor $\pm 2,0$ g, correspondendo a seu erro máximo, estava escrito na bancada. O aluno, inicialmente, mediu apenas uma única vês, tendo obtido como indicação 32,8 g. O que pode ser dito sobre o valor da massa da pepita?

Solução:

A massa de uma pepita é um mensurando invariável. O aluno fez-se apenas uma única medição e dispõe apenas do erro máximo da balança. Os efeitos sistemáticos, sendo desconhecido, não poderão ser compensados. Assim, a incerteza da medição será o próprio erro máximo: (equação 6.3)

$$\begin{aligned} RM &= I \pm E_{\max} \\ RM &= (32,8 \pm 2,0) \text{ g} \end{aligned} \quad (I)$$

O RESULTADO DA MEDIÇÃO

- E1b) Não satisfeito com a incerteza da medição, que lhe pareceu muito grande, o aluno obteve as nove indicações adicionais listadas a seguir, todas em gramas. Para esta condição, qual o novo resultado da medição ?

32,0 33,2 32,3 32,9 32,1 33,4 33,3 32,9 32,1

Solução:

Agora 10 indicações estão disponíveis. É possível calcular o resultado da medição através da média das indicações disponíveis (equação 6.4). Embora um trabalho maior tenha sido realizado, seu efeito sobre o resultado da medição é quase inexpressivo. Assim:

$$MI = 32,70 \text{ g}$$

$$RM = MI \pm E_{\text{máx}}$$

$$RM = 32,70 \pm 2,0, \text{ que, escrito de forma conveniente (veja anexo IV)}$$

fica:

$$RM = (32,7 \pm 2,0) \text{ g} \quad (\text{II})$$

- E1c) Quando chegava ao trabalho após o período de almoço, o laboratorista, encontrando o felizado aluno ainda no laboratório, foi buscar o certificado de calibração da balança. Juntos constataram que, para valores do mensurando da ordem de 33 g esta balança apresenta correção de + 0,80 g e repetitividade de 1,20 g. Para estas novas condições, qual o resultado da medição ?

Solução:

Se o aluno usasse apenas a primeira indicação obtida, o resultado da medição seria estimado por meio da equação (6.1):

$$RM = I + C \pm Re$$

$$RM = 32,8 + 0,80 \pm 1,20$$

$$RM = (33,6 \pm 1,2) \text{ g} \quad (\text{III})$$

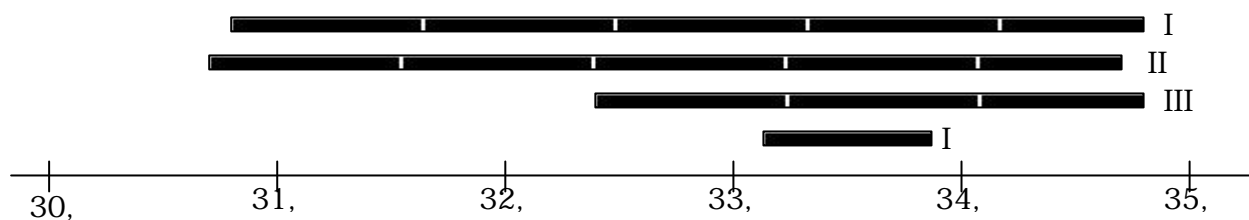
Entretanto, como 10 indicações estão disponíveis, é possível tirar proveito desta os efeitos sistemáticos podem ser compensados pois a correção é conhecida. O resultado da medição é calculado por:

$$RM = MI + C \pm Re/\sqrt{n}$$

$$RM = 32,70 + 0,8 \pm 1,20/\sqrt{10}$$

$$RM = (33,50 \pm 0,38) \text{ g} \quad (\text{IV})$$

Estes quatro resultados estão graficamente representados na figura abaixo. Note que a redução da faixa de dúvida (incerteza da medição) é expressiva quando são compensados os erros sistemáticos. É ainda mais marcante quando, além de compensar os erros sistemáticos, são feitas medições repetitivas e a média é considerada.



6.4 Avaliação do resultado da medição de um mensurando variável

Considere a figura 6.1. Representa-se, de forma exagerada, um muro imperfeito, cuja altura varia em função da posição. Qual seria a resposta mais honesta para a pergunta: qual é a altura deste muro? Seria a altura máxima? A altura mínima? A média? Não. A resposta mais honesta seria: a altura não é única, mas varia dentro de uma faixa entre o valor mínimo e o valor máximo.



Figura 6.1 - Muro com altura variável

Suponha ainda que se dispõe de um SM perfeito, sem nenhum tipo de erro sistemático ou aleatório. Este SM perfeito poderia ser usado para determinar a faixa de variação da altura do muro. Seja h_{\max} e h_{\min} as alturas nos pontos máximo e mínimo respectivamente. A faixa de variação de alturas poderia ser expressa como:

$$h = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2} \pm \frac{h_{\max} - h_{\min}}{2}$$

No te que, mesmo usando um SM perfeito, há uma faixa de variação da altura no resultado desta medição. Esta faixa decorre da variação da altura do muro. É uma característica do mensurando. Esta situação se repete toda vez que um mensurando variável está sendo medido.

Na prática nem sempre é possível determinar com segurança os valores extremos (mínimo e máximo) do mensurando de forma direta. Recomenda-se que diversas medições *sempre* sejam realizadas, procurando varrer todos os valores que possam ser assumidos pelo mensurando. A escolha do número, posição e instante onde a medição será realizada deve ser sempre direcionada para tentar assegurar que os valores extremos do mensurando estão incluídos dentre as indicações obtidas. Neste caso, e ainda considerando o SM ideal, a faixa de variação do mensurando pode ser estimada pela quantidade:

$$\Delta I_{\max} = |I_i - MI|_{\max} \quad (6.5)$$

sendo:

I_i a i -ésima indicação
 MI a média das indicações obtidas

que representa o valor absoluto da maior diferença entre a média das indicações e uma indicação individual.

No caso real em que o SM apresenta erros, além da faixa de variação estimada pela equação (6.5) é necessário acrescentar à incerteza da medição a parcela de dúvida decorrente das imperfeições do SM. Também aqui são consideradas duas situações distintas: (a) quando os erros sistemáticos são compensados e (b) quando não o são:

6.4.1 Compensando efeitos sistemáticos

Neste caso, o resultado da medição é estimado a partir da média das indicações, ao qual é adicionada a correção. Incerteza da medição é composta de duas componentes: a repetitividade do SM e o módulo da máxima variação da indicação em relação à média das indicações ($|\Delta I_{\max}|$). Assim:

$$RM = MI + C \pm (Re + \Delta I_{\max}) \quad (6.6)$$

sendo:

MI média das "n" indicações disponíveis
 C correção do SM
 ΔI_{\max} valor absoluto da máxima diferença entre as indicações e seu valor médio
 Re repetitividade do SM

Note que, mesmo que "n" medições sejam realizadas, a repetitividade (Re) não é dividida pela raiz quadrada de "n". A razão para isto decorre do fato que a indicação referente a um ponto extremo do mensurando provavelmente será medida apenas uma única vez e, conseqüentemente, estará exposta aos níveis de variação associados a uma medição.

Pela análise da equação (6.6) nota-se que, uma vez expresso numericamente o resultado da medição, não é mais possível identificar na incerteza da medição o quanto corresponde à incerteza do sistema de medição e o quanto está associado à variação do mensurando.

6.4.2 Não compensando efeitos sistemáticos

Corresponde à situação onde o valor da correção não é conhecido ou, por questões de simplicidade ou falta de tempo, o operador deliberadamente optou por não compensar os efeitos sistemáticos. Neste caso, o erro máximo deve ser usado para estimar o resultado da medição.

O RESULTADO DA MEDIÇÃO

O resultado base é calculado a partir da média das indicações. A incerteza da medição é estimada pela soma do próprio erro máximo do sistema de medição e a variação máxima das indicações em relação ao seu valor médio:

$$RM = MI \pm (E_{\max} + \Delta I_{\max}) \quad (6.7)$$

sendo:

MI média das “n” indicações disponíveis
 ΔI_{\max} valor absoluto da máxima diferença entre as indicações e seu valor médio
 E_{\max} erro máximo do SM nas condições em que as medições são efetuadas

6.5 Problema Resolvido 2

E2a) Pretende-se determinar o diâmetro de uma bola de gude. Para tal, dispõe-se de um paquímetro com erro máximo de $\pm 0,10$ mm, estimado para as condições em que as medições são efetuadas. Um total de 10 indicações foram obtidas e estão listadas abaixo, realizadas em diferentes posições diametrais, procurando atingir os valores extremos do diâmetro. Qual o diâmetro desta bola de gude?

20,8	20,4	20,5	20,0	20,4
20,2	20,9	20,3	20,7	20,6

Solução:

Como não se pode esperar “perfeição” na geometria de uma bola de gude, é prudente trata-la como mensurando variável. São disponíveis 10 indicações e uma estimativa do E_{\max} , portanto, a equação (6.7) deve ser usada.

Calcula-se inicialmente a média das 10 indicações:

$$MI = 20,48 \text{ mm}$$

Verifica-se que o ΔI_{\max} ocorre para a indicação 20,0 mm, assim:

$$\Delta I_{\max} = |20,0 - 20,48| = |-0,48| = 0,48 \text{ mm}$$

Calcula-se o resultado da medição:

$$RM = MI \pm (E_{\max} + \Delta I_{\max})$$

$$RM = 20,48 \pm (0,10 + 0,48)$$

$$RM = (20,5 \pm 0,6) \text{ mm}$$

E2b) Numa tentativa de melhorar o resultado da medição, estimou-se a partir de um grande número de medições repetitivas de um bloco padrão de $(20,5000 \pm 0,0004)$ mm, que a correção deste paquímetro é $-0,04$ mm e sua repetitividade $\pm 0,05$ mm. Com este dado adicional, estime novamente o resultado da medição ?

Solução:

Sendo a correção conhecida, esta deve ser compensada e o RM calculado pela equação (6.6). Assim:

$$RM = MI + C \pm (E_{\max} + \Delta I_{\max})$$

$$RM = 20,48 - 0,04 \pm (0,05 + 0,48)$$

$$RM = (20,44 \pm 0,53) \text{ mm}$$

6.6 Quadro Geral

As conclusões dos itens 6.3 e 6.4 permitem construir o seguinte quadro geral para a determinação do resultado da medição (RM).

Tipo de mensurando	Dados Conhecidos do SM	Número de medições efetuadas	
		n = 1	n > 1
Invariável	E_{\max}	$RM = I \pm E_{\max}$	$RM = MI \pm E_{\max}$
	C e Re	$RM = I + C \pm Re$	$RM = MI + C \pm Re/\sqrt{n}$
Variável	E_{\max}	não se aplica	$RM = MI \pm (\Delta I_{\max} + E_{\max})$
	C e Re	não se aplica	$RM = MI + C_c \pm (\Delta I_{\max} + E_{\max})$

sendo:

- RM é o resultado da medição;
- I é a indicação;
- MI é a média das indicações;
- C é a correção do SM ($C = -Td = -$ estimativa do E_s);
- ΔI_{\max} é o valor absoluto da variação máxima de uma indicação em relação a seu valor médio
- E_{\max} é o erro máximo do SM nas condições em que a(s) medição(ões) foi(ram) efetuada(s);

Na determinação do RM não é suficiente a simples aplicação das equações indicadas no quadro acima. Há necessidade de uma contínua avaliação da confiabilidade dos valores envolvidos, seja das medições efetuadas, seja das características do SM, para o qual é necessário o contínuo uso do bom senso.

Para a determinação do RM é fundamental o conhecimento do comportamento metrológico do sistema de medição. Na prática podem ocorrer três casos:

- ♦ dispõe-se de certificado de calibração onde estão disponíveis estimativas da correção (C) e da repetitividade (Re) para vários valores ao longo da faixa de medição.
- ♦ dispõe-se apenas de uma estimativa do erro máximo obtida através de catálogos ou especificações técnicas do fabricante do SM;
- ♦ não existe nenhuma informação a respeito do SM;

O RESULTADO DA MEDIÇÃO

Infelizmente, com grande freqüência, na prática depara-se com o terceiro caso. No entanto, para poder realizar o trabalho de determinação do RM, é necessário dispor, ao menos, de uma estimativa do erro máximo do sistema de medição. Recomenda-se, sempre que possível, efetuar uma calibração do SM, o que permite melhor caracterizar a estimativas da C e Re ao longo de toda a faixa de medição. Se não for possível, o SM pode ser submetido a um processo simplificado, onde uma peça de referência, com suas propriedades suficientemente conhecidas, é repetidamente medida e as várias indicações usadas para estimar a C e Re nas condições de uso.

Em último caso, se nenhuma das alternativas anteriores for possível, e existir urgência em se efetuar as medições, a experiência mostra que, para uma boa parte dos sistemas de medição de qualidade, seu erro máximo tipicamente está contido dentro de limites dados por:

- ◆ para SM com indicação analógica:
 $1 \cdot VD \leq |E_{\text{máx}}| \leq 2 \cdot VD$, onde VD = valor de uma divisão da escala
- ◆ para SM com indicação digital:
 $2 \cdot ID \leq |E_{\text{máx}}| \leq 5 \cdot ID$, onde ID = incremento digital.

Deve ficar claro que as faixas acima são típicas, mas não necessariamente verdadeiras para qualquer caso. São apenas uma primeira estimativa que deve ser usada apenas em último caso e com muita cautela.

Ao efetuar repetidamente diversas medições, é recomendável observar atentamente as variações de cada indicação em relação ao seu valor médio e procurar identificar eventuais anormalidades. Se este for o caso, deve-se procurar a causa da anormalidade e, eventualmente, eliminar as indicações que apresentam variações atípicas, provocadas por erros de leitura, interferência momentânea sobre o processo ou sistema de medição, etc. Existem procedimentos estatísticos que determinam a existência de valores atípicos em uma amostra: Por exemplo, medidas que se afastam muito da faixa $MI \pm Re$ provavelmente são afetadas por anormalidades.

Mesmo que considerados os aspectos destacados anteriormente, todo o trabalho de determinação do RM poderá não ser aceito pelo leitor, que questionará a competência do executor, se os valores que compõem o RM não forem apresentados com a devida coerência. A forma recomendada para apresentar o resultado da medição é descrita no anexo IV.

Problemas propostos

1. Determine se, em cada uma das situações abaixo, o mensurando deve ser considerado como variável ou invariável:
 - a) a altura de um muro medida com uma escala com valor de uma divisão de 1 mm;
 - b) a altura de um muro medida com uma escala com valor de um divisão de 50 mm;
 - c) a salinidade da água do mar;

- d) o diâmetro de uma moeda de R\$ 0,50 medido com escala com valor de uma divisão de 1 mm;
- e) a temperatura no interior da chaminé de uma fábrica enquanto as máquinas estão ligadas;
- f) a massa de um adulto durante cinco minutos, medida em balança com incerteza $\pm 0,2$ kg;
- g) o diâmetro de um eixo cilíndrico desconhecido;
2. Qual o resultado da medição da distância entre as estações rodoviárias de Florianópolis e Curitiba, efetuada por meio do odômetro de um automóvel, cuja incerteza expandida, para as condições da medição, é de 0,2 %, sendo que a indicação obtida foi de 311,2 km ?
3. Para determinar o diâmetro de um tarugo de um poste de concreto um operário usou um sistema de medição com incerteza expandida 0,2 mm. Foram obtidas 12 indicações em diferentes posições e alturas, conforme listagem abaixo. Qual o diâmetro deste poste ?
- | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 580,2 | 574,4 | 582,8 | 577,0 | 569,8 |
| 582,2 | | | | |
| 579,0 | 582,2 | 584,2 | 573,8 | 570,2 |
| 582,8 | | | | |
4. Um balança com incerteza expandida de 50 mg foi usada para determinar a massa de um diamante cor-de-rosa. Encontrou-se a indicação 6,962 g. Qual o resultado da medição ?
5. Não convencido com a medição da questão anterior, o dono do diamante solicitou uma calibração da balança. Para tal, uma massa padrão de $(7,000 \pm 0,001)$ g foi então medida seis vezes pela balança, sendo encontradas as indicações listadas abaixo (todas em g). Com estes dados, determine a R_e e a T_d desta balança e o novo resultado da medição considerando que, quando a tendência é devidamente compensada, nas condições de medição sua incerteza expandida é reduzida para 28 mg.
- | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6,979 | 6,964 | 6,968 | 6,972 | 6,971 |
| 6,966 | | | | |
6. Ainda não convencido, o dono do diamante solicitou que fossem efetuadas algumas medições adicionais. As indicações obtidas encontram-se abaixo (em g). No caso em que a tendência é compensada e a média de 7 indicações é efetuada, a incerteza expandida é reduzida para 0,18 g. Qual o novo RM ?
- | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6,962 | 6,970 | 6,964 | 6,977 | 6,966 | 9,969 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Capítulo 7

CONTROLE DE QUALIDADE

Uma das operações mais importantes da metrologia industrial é o controle de qualidade. As partes ou produtos devem ser produzidos de forma a atenderem, individualmente e em conjunto, certas especificações do processo conhecidas como *tolerâncias*. O controle de qualidade envolve um conjunto de operações de medição desenhado para assegurar que apenas as peças e produtos que atendem as tolerâncias sejam comercializados, preservando a qualidade de produtos e o nome da empresa.

Entretanto fica uma pergunta no ar: se não existem sistemas de medição perfeitos, como é possível assegurar através de medições que todos os produtos comercializados atendem a tolerância? Este assunto será tratado neste capítulo.

7.1 Tolerância

Normalmente no dia-a-dia o ser humano lida com muita naturalidade com imperfeições de vários tipos: As maçãs não são esféricas e freqüentemente apresentam pequenas manchas na casca, mas podem ser muito saborosas. Ao olhar com muita atenção, é possível perceber pequenas falhas mesmo na pintura de um carro novo. Há pequenos defeitos no reboco das paredes de uma casa. O asfalto da via expressa apresenta ondulações. Um microscópio pode revelar pequenas falhas na roupa que usamos. Até uma certa quantidade de microorganismos são aceitáveis na água que bebemos. Não é possível evitar estas imperfeições. Elas são naturais.

Da mesma forma, quando são produzidas peças e produtos, imperfeições estão presentes. O cuidado que deve ser tomado é manter as imperfeições dentro de faixas toleráveis, que não comprometam a função da peça ou produto. Por exemplo, o diâmetro de um cabo de vassoura tipicamente é de 22 mm. Entretanto, se um cabo de vassoura possuir 23 mm de diâmetro, para o consumidor final sua função não será comprometida. É igualmente confortável e aceitável varrer com uma vassoura com cabo de 21 ou 23 mm de diâmetro. Não seria aceitável um cabo com 5 mm ou 50 mm de diâmetro, mas qualquer diâmetro dentro da faixa de (22 ± 1) mm seria aceitável para

o consumidor final. Assim, a faixa (22 ± 1) mm constitui a tolerância para o diâmetro do cabo da vassoura considerando o consumidor final.

Além de ser levada em conta a função para a qual a parte ou o produto foi desenhada, outros aspectos ligados à engenharia de produção devem ser considerados. Por exemplo, o cabo da vassoura deve ser montado em sua base de forma firme, sem folgas. Portanto, deve haver uma relação bem definida entre os diâmetros do cabo e do furo da base da vassoura para que o conjunto, ao ser montado, permita uma fixação firme, sem folgas, mas também sem gerar uma condição de ajuste demasiadamente apertado. Assim, tolerâncias mais estreitas devem ser estabelecidas para estes diâmetros de forma que a sua montagem sempre se dê de forma adequada.

Por outro lado, tolerâncias demasiadamente estreitas envolvem processos de fabricação mais caros. A produção de cabos de vassoura com diâmetro de $(22,000 \pm 0,001)$ mm seria caríssima, inviável. Os projetistas então definem para cada parte as maiores tolerâncias possíveis mas que ainda preservem a função e a capacidade de montagem da parte no conjunto.

Especificações na forma de tolerâncias podem ser estabelecidas por motivos comerciais. Por exemplo, ao comprar um saco de 500 g de café moído, o consumidor espera levar para casa 500 g de café. A máquina automática que ensaca café não é perfeita. Pode produzir sacos com um pouco mais ou um pouco menos que 500 g. É algo natural. Os órgãos de fiscalização estabelecem então um limite: por exemplo se o conteúdo de cada saco de café for mantido dentro do limite (500 ± 10) g, a pequena diferença, ora para mais, ora para menos, será aceitável para o consumidor final. Nenhuma das partes estaria sendo lesada. Outro exemplo é a tensão da rede de energia elétrica quando mantida, por exemplo, dentro do patamar (220 ± 11) V.

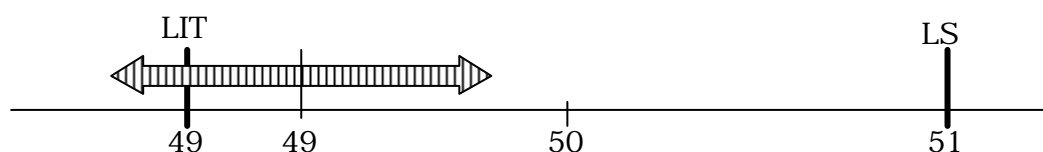
7.2 O Controle de Qualidade

O papel do controle de qualidade é medir a peça produzida, comparar o resultado com a respectiva tolerância e classificar a peça como aprovada, quando obedece a tolerância, ou rejeitada, caso contrário. Entretanto, qualquer SM apresenta erros, produzindo resultados com incertezas. Como usar informações obtidas a partir de Sm imperfeitos para tomar decisões seguras sobre a aceitação ou não de peças?

Seja, por exemplo, um balança usada para medir a massa líquida de um saco de café que deveria obedecer a tolerância de (500 ± 10) g. Suponha que suas características metrológicas sejam tais que produzam resultados com incerteza de medição de ± 5 g. Suponha ainda que a massa líquida de café de um determinado saco seja medida e o seguinte resultado tenha sido encontrado:

$$RM = (493 \pm 5) \text{ g}$$

É possível afirmar que este saco, em particular, atende à tolerância? A análise desta questão é melhor realizada com o auxílio da figura abaixo:



Os limites inferior (LIT) e superior (LST) da tolerância estão representados na figura. Sacos cuja massa líquida que estejam dentro destes limites são considerados aceitos. O resultado da medição (493 ± 5) g está representado na figura. É possível notar que este resultado representa uma faixa de valores que contém uma parte dentro do intervalo de tolerâncias e outra fora. Assim, nestas condições, não é possível afirmar com segurança que este saco atende ou não atende a tolerância. Isto se dá em função da escolha inapropriada do sistema e/ou procedimento de medição. É recomendável que a incerteza da medição não exceda uma certa fração do intervalo de tolerância.

Do ponto de vista metrológico, quanto menor a incerteza do sistema de medição usado para verificar uma dada tolerância, melhor. Na prática, o preço deste sistema de medição pode se tornar proibitivo. Procura-se então atingir um ponto de equilíbrio técnico-econômico.

Seja IT o intervalo (ou faixa) de tolerância desejável para a grandeza mensurável, dado por:

$$IT = LST - LIT \quad (7.1)$$

sendo

IT	intervalo de tolerância
LST	limite superior da tolerância
LIT	limite inferior da tolerância

A experiência prática mostra que um ponto de equilíbrio razoável é atingido quando a incerteza de medição é da ordem de um décimo do intervalo de tolerância, ou seja:

$$IM = \frac{IT}{10} \quad (7.2)$$

Seguindo esta relação, a incerteza de medição do processo de medição adequado para controlar a tolerância (500 ± 10) g deveria resultar em incerteza de medição da ordem de:

$$IM = (510 - 490)/10 = 2 \text{ g}$$

De fato, se o resultado da medição obtido fosse (493 ± 2) g seria possível afirmar, com segurança, que a tolerância foi obedecida. A faixa de valores correspondente ao resultado da medição estaria toda dentro da faixa de tolerâncias.

Mesmo obedecendo a relação estabelecida pela equação (7.2), ainda restarão casos onde não será possível afirmar, com 100% de segurança, que uma peça está ou não dentro do intervalo de tolerância. Ainda no exemplo do saco de cimento, se o RM fosse (491 ± 2) g, haveria dúvida. Assim, é possível caracterizar os três tipos de zonas representadas na figura 7.1: a zona de conformidade, as zonas de não conformidade e as zonas de dúvida:

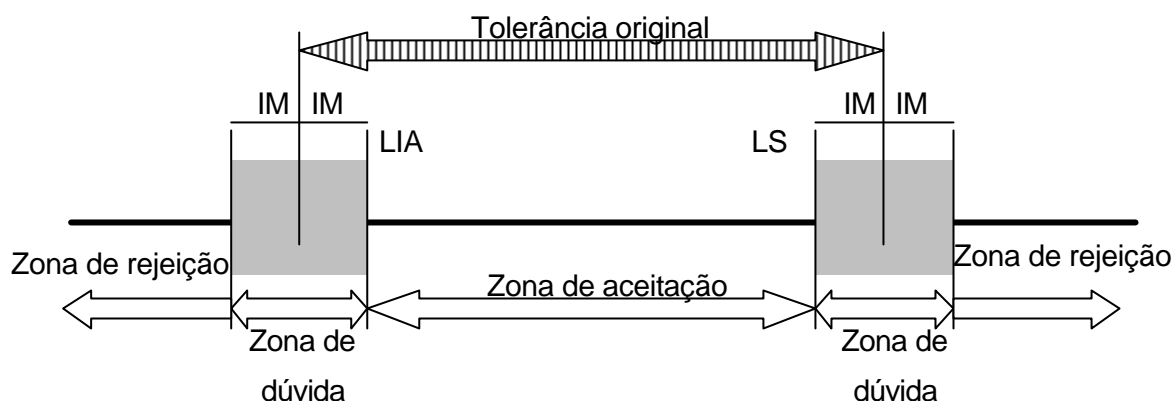


Figura 7.1 – Zonas de aceitação, de rejeição e de dúvida ao verificar-se uma tolerância.

Sejam LIT e LST os limites inferior e superior da tolerância respectivamente. Se o processo de medição fosse perfeito, resultando em incerteza de medição nula, a tolerância seria obedecida se o resultado base estivesse dentro do intervalo: $LIT \leq RB \leq LST$. Porém, em função da incerteza da medição, surgem zonas de dúvidas, isto é, regiões onde parte da faixa de valores correspondente ao resultado da medição estaria dentro e parte estaria fora da tolerância. Só é possível afirmar que a peça atende a tolerância se estiver dentro da denominada zona de aceitação (ou zona de conformidade), representada na figura 7.1. Note que a zona de aceitação é menor que a tolerância original de um valor correspondente a duas vezes a incerteza de medição. Novos limites, denominados de “limites de aceitação” são então definidos os seguintes limites:

$$\begin{aligned} LIA &= LIT + IM \\ LSA &= LST - IM \end{aligned} \quad (7.3)$$

sendo

LIA	limite inferior de aceitação
LSA	limite superior de aceitação
LIT	limite inferior de tolerância
LST	limite superior de tolerância
IM	incerteza da medição

Os limites de aceitação são usados para classificar se peças estão dentro da tolerância. Se a relação:

$$LIA \leq RB \leq LSA \quad (7.4)$$

for obedecida, a parte medida será considerada aceita, isto é, em conformidade com a tolerância. Se não obedece à condição, mas está dentro da faixa de dúvida (cinza na figura) não é possível afirmar, com este sistema de medição, que se trata de uma peça dentro ou fora da especificação e, conseqüentemente, não pode ser comercializada. Se estiver na zona de rejeição, é possível afirmar com segurança que está fora da especificação estabelecida pela tolerância.

Em um processo de fabricação bem balanceado, são poucos os produtos não conformes. O número de peças duvidosas será pequeno, não sendo este um grande problema. Porém, se necessário, as peças duvidosas podem vir a ser novamente inspecionadas por um outro processo de medição com menor incerteza com o qual será possível classificar corretamente algumas peças adicionais, porém, ainda restarão peças duvidosas.

Na indústria, por questões de praticidade e economia de tempo, não é raro efetuar uma única medição, sem compensar os erros sistemáticos, para decidir se uma peça está ou não dentro da tolerância. As relações (7.2), (7.3) e (7.4) continuam válidas, mas, neste caso, a incerteza da medição deve ser estimada para estas condições de medição.

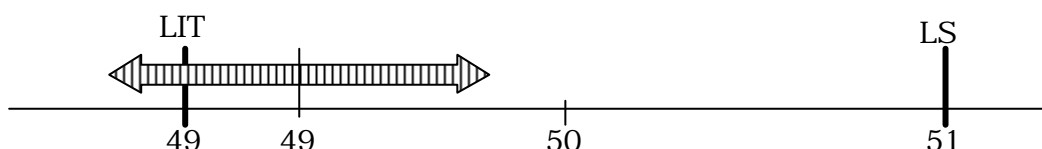
7.2.1 Exemplo Resolvido

O papel do controle de qualidade é medir a peça produzida, comparar o resultado com a respectiva tolerância e classificar a peça como aprovada, quando obedece a tolerância, ou rejeitada, caso contrário. Entretanto, qualquer SM apresenta erros, produzindo resultados com incertezas. Como usar informações obtidas a partir de SM imperfeitos para tomar decisões seguras sobre a aceitação ou não de peças?

Seja, por exemplo, um balança usada para medir a massa líquida de um saco de café que deveria obedecer a tolerância de (500 ± 10) g. Suponha que suas características metrológicas sejam tais que produzam resultados com incerteza de medição de ± 5 g. Suponha ainda que a massa líquida de café de um determinado saco seja medida e o seguinte resultado tenha sido encontrado:

$$RM = (493 \pm 5) \text{ g}$$

É possível afirmar que este saco, em particular, atende à tolerância? A análise desta questão é melhor realizada com o auxílio da figura abaixo:



Os limites inferior (LIT) e superior (LST) da tolerância estão representados na figura. Sacos cuja massa líquida que estejam dentro destes limites são considerados aceitos. O resultado da medição (493 ± 5) g está representado na figura. É possível notar que este resultado representa uma faixa de valores que contém uma parte dentro do intervalo de tolerâncias e outra fora. Assim, nestas condições, não é possível afirmar com segurança que este saco atende ou não atende a tolerância. Isto se dá em função da escolha inapropriada do sistema e/ou procedimento de medição. É recomendável que a incerteza da medição não exceda uma certa fração do intervalo de tolerância.

Do ponto de vista metrológico, quanto menor a incerteza do sistema de medição usado para verificar uma dada tolerância, melhor. Na prática, o preço deste sistema de medição pode se tornar proibitivo. Procura-se então atingir um ponto de equilíbrio técnico-econômico.

Seja IT o intervalo (ou faixa) de tolerância desejável para a grandeza mensurável, dado por:

$$IT = LST - LIT \quad (7.1)$$

sendo

IT	intervalo de tolerância
LST	limite superior da tolerância
LIT	limite inferior da tolerância

A experiência prática mostra que um ponto de equilíbrio razoável é atingido quando a incerteza de medição é da ordem de um décimo do intervalo de tolerância, ou seja:

$$IM = \frac{IT}{10} \quad (7.2)$$

Seguindo esta relação, a incerteza de medição do processo de medição adequado para controlar a tolerância (500 ± 10) g deveria resultar em incerteza de medição da ordem de:

$$IM = (510 - 490)/10 = 2 \text{ g}$$

De fato, se o resultado da medição obtido fosse (493 ± 2) g seria possível afirmar, com segurança, que a tolerância foi obedecida. A faixa de valores correspondente ao resultado da medição estaria toda dentro da faixa de tolerâncias.

Mesmo obedecendo a relação estabelecida pela equação (7.2), ainda restarão casos onde não será possível afirmar, com 100% de segurança, que uma peça está ou não dentro do intervalo de tolerância. Ainda no exemplo do saco de cimento, se o RM fosse (491 ± 2) g, haveria dúvida. Assim, é possível caracterizar os três tipos de zonas representadas na figura 7.1: a zona de conformidade, as zonas de não conformidade e as zonas de dúvida:

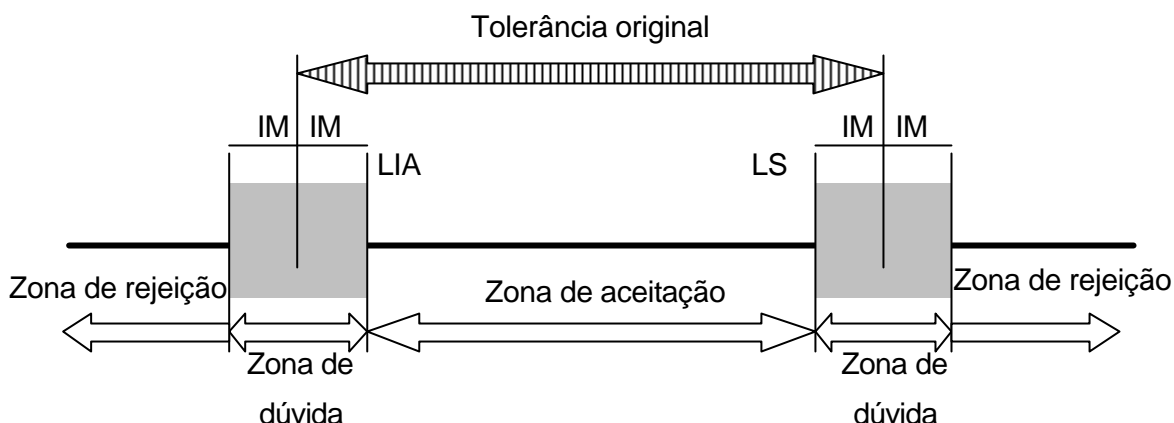


Figura 7.1 – Zonas de aceitação, de rejeição e de dúvida ao verificar-se uma tolerância.

Sejam LIT e LST os limites inferior e superior da tolerância respectivamente. Se o processo de medição fosse perfeito, resultando em incerteza de medição nula, a tolerância seria obedecida se o resultado base estivesse dentro do intervalo: $LIT \leq RB \leq LST$. Porém, em função da incerteza da medição, surgem zonas de dúvidas, isto é, regiões onde parte da faixa de valores correspondente ao resultado da medição estaria dentro e parte estaria fora da tolerância. Só é possível afirmar que a peça atende a tolerância se estiver dentro da denominada zona de aceitação (ou zona de conformidade), representada na figura 7.1. Note que a zona de aceitação é menor que a tolerância original de um valor correspondente a duas vezes a incerteza de medição. Novos limites, denominados de “limites de aceitação” são então definidos os seguintes limites:

$$\begin{aligned} LIA &= LIT + IM \\ LSA &= LST - IM \end{aligned} \quad (7.3)$$

sendo

LIA	limite inferior de aceitação
LSA	limite superior de aceitação
LIT	limite inferior de tolerância
LST	limite superior de tolerância
IM	incerteza da medição

Os limites de aceitação são usados para classificar se peças estão dentro da tolerância. Se a relação:

$$LIA \leq RB \leq LSA \quad (7.4)$$

for obedecida, a parte medida será considerada aceita, isto é, em conformidade com a tolerância. Se não obedece à condição, mas está dentro da faixa de dúvida (cinza na figura) não é possível afirmar, com este sistema de medição, que se trata de uma peça dentro ou fora da especificação e, conseqüentemente, não pode ser comercializada. Se estiver na zona de rejeição, é possível afirmar com segurança que está fora da especificação estabelecida pela tolerância.

Em um processo de fabricação bem balanceado, são poucos os produtos não conformes. O número de peças duvidosas será pequeno, não sendo este um grande problema. Porém, se necessário, as peças duvidosas podem vir a ser novamente inspecionadas por um outro processo de medição com menor incerteza com o qual será possível classificar corretamente algumas peças adicionais, porém, ainda restarão peças duvidosas.

Na indústria, por questões de praticidade e economia de tempo, não é raro efetuar uma única medição, sem compensar os erros sistemáticos, para decidir se uma peça está ou não dentro da tolerância. As relações (7.2), (7.3) e (7.4) continuam válidas, mas, neste caso, a incerteza da medição deve ser estimada para estas condições de medição.

7.3 Problemas Propostos

1. A polia de um motor de toca-discos deve possuir dimensões dentro da tolerância de $(15,00 \pm 0,02)$ mm. Especifique as características necessárias a um processo de medição adequado para classificar as peças disponíveis como dentro ou fora da tolerância e os limites de controle.
2. Quantifique os limites para as zonas de conformidade, de não conformidade e de dúvida para a tolerância $(6,00 \pm 0,01)$ mm quando:
 - a) é usado um sistema de medição que obedece a equação $U = IT/10$
 - b) é usado um sistema de medição que obedece a equação $U = IT/5$

Capítulo 8

ESTIMATIVA DA INCERTEZA E CORREÇÃO EM MEDIÇÕES DIRETAS

Há um grande número de casos onde as incertezas do sistema de medição são dominantes. O capítulo 6 trata da determinação do resultado da medição para estes casos. Entretanto, há situações mais complexas onde outros fatores também trazem incertezas significativas sobre o resultado de uma determinada medição. Por exemplo, a influência do operador (considerando desde a sua destreza em usar o SM até a sua capacidade de fazer uma leitura corretamente), as variações da temperatura ambiente (que afeta o SM e pode modificar a peça medida) e o procedimento de medição, são exemplos de outros fatores que se somam às incertezas do próprio SM. Cada um destes fatores traz uma componente aleatória, mas também pode trazer uma componente sistemática.

Para estimar adequadamente a correção e as incertezas envolvidas em uma operação de medição é necessário caracterizar perfeitamente o *processo de medição*. Deve ser considerado tudo que pode influenciar no resultado da medição. Por exemplo: além do próprio sistema de medição e seus eventuais acessórios, o procedimento como as medições são efetuadas e os dados são tratados, a definição do mensurando e os princípios de medição envolvidos, a ação de grandezas de influência sobre o sistema de medição e/ou sobre o mensurando e a ação do operador, para citar os mais importantes. Cada um desses elementos acrescenta uma componente de incerteza ao resultado da medição e devem ser convenientemente considerados e combinados para que se obtenha uma estimativa realista da incerteza do processo de medição.

Neste texto, o termo *fonte de incertezas* é utilizado de forma genérica para referenciar qualquer fator cuja influência sobre a medição efetuada traga componentes aleatórias e/ou sistemáticas para o resultado da medição.

Este capítulo apresenta metodologia baseada no “Guia Para Expressão de Incertezas em Medições” [1], aqui denominado simplesmente de “o guia”, com a qual são estimadas e combinadas as contribuições sistemáticas e aleatórias de cada fonte de

incertezas. Por razões didáticas, neste capítulo serão abordados aspectos referentes à estimativa das incertezas em medições diretas. O capítulo 9 abordará a determinação das incertezas nas medições indiretas.

Uma *medição direta* é aquela cuja indicação resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre o mensurando. Há apenas uma grandeza de entrada envolvida. A medição de um diâmetro com um paquímetro, e a temperatura de uma sala por um termômetro, são dois exemplos de medição direta. A *medição indireta* envolve a combinação de duas ou mais grandezas de entrada por meio de expressões matemáticas que viabilizam a determinação do valor associado ao mensurando. São exemplos de medição indireta: (a) a determinação da área de um terreno a partir da multiplicação dos valores medidos para sua largura e comprimento e (b) a determinação da massa específica de um material calculada a partir da razão entre sua massa e seu volume separadamente medidos.

8.1 Fontes de Incertezas

Para identificar as várias fontes de incertezas que agem sobre um processo de medição é necessário conhecer muito bem o processo de medição. O próximo passo é fazer uma análise crítica, procurando identificar tudo que pode trazer influências sobre o resultado da medição. Normalmente as fontes de incertezas estão contidas nos *meios e métodos* de medição, no *ambiente* e na *definição do mensurando*. Por *meios de medição* entende-se, além do próprio SM, acessórios, dispositivos e módulos complementares, o operador deve também ser incluído. O *método de medição* refere-se ao procedimento segundo o qual a medição é efetuada, por exemplo, o número de medições repetitivas, a forma de repetir, a maneira de zerar um SM, o sentido de medição, o tempo entre medições, etc. Os fatores relacionados ao *ambiente* referem-se principalmente à influência da temperatura (sobre o SM e sobre o mensurando), porém, outros fatores como variações da tensão da rede elétrica, alterações de umidade relativa do ar e pressão atmosférica podem também ser significantes. A *definição do mensurando* pode afetar o resultado da medição: por exemplo, se a sua definição não for clara ou precisa ou mesmo se o mensurando for variável, o resultado da medição será afetado. A medição da temperatura no interior de um refrigerador (variável), o diâmetro de um eixo com geometria imperfeita (varia de ponto para ponto), a distância entre duas cidades (marcos não muito bem definidos), são exemplos de situações onde o mensurando não está bem definido.

Para que a influência de cada fonte de incertezas seja corretamente considerada é necessário caracterizar as respectivas componentes aleatória e, quando for o caso, sistemática que estas trazem sobre o processo de medição.

Fundamentalmente, dois parâmetros numéricos devem ser estimados para cada fonte de incertezas: a *incerteza padrão* (u), e a *correção* (C). A incerteza padrão é uma medida relacionada aos erros aleatórios trazidos pela fonte de incertezas. A correção é o parâmetro que deve ser adicionado à indicação para corrigir os efeitos sistemáticos da fonte de incertezas.

Se fossem perfeitamente determinadas, as influências dos efeitos sistemáticos poderiam ser exatamente compensadas por sua correção. Entretanto, como o valor da correção nunca pode ser perfeitamente conhecido, a correção dos efeitos sistemáticos não pode ser perfeita, o que dá origem a uma incerteza residual. No conjunto, as

diversas componentes de incerteza, residuais ou não, deve ser levadas em conta e combinadas para que a incerteza expandida seja corretamente estimada.

8.2 Incerteza Padrão

A *incerteza padrão* (u) de uma fonte de incertezas é definida como a *faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão*. Portanto, corresponde ao desvio padrão do erro aleatório associado à fonte de incertezas.

A estimativa da incerteza padrão associada a uma fonte de incertezas pode ser efetuada através de procedimentos estatísticos ou por outros meios:

8.2.1 Estimativa da incerteza padrão por meios estatísticos (avaliação “tipo A”)

Há várias situações onde o desvio padrão experimental associado a uma fonte de incertezas pode ser estimado a partir de valores de observações repetitivas do mensurando. A incerteza padrão coincide então com o valor estimado do desvio padrão.

O “guia” denomina os procedimentos estatísticos como procedimentos “tipo A”.

Suponha que a variável aleatória q represente os efeitos de uma fonte de incertezas sobre o resultado da medição. O desvio padrão experimental desta variável q é determinado a partir de “n” valores independentemente obtidos para a variável q , isto é, q_k (para $k = 1, 2, \dots, n$). A média de q pode ser estimada por:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (8.1)$$

O desvio padrão experimental de q , representado por “s”, é estimado por:

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (8.2)$$

Uma vez estimado $s(q)$, a incerteza padrão a ser associada à fonte de incerteza avaliada depende apenas do procedimento de medição utilizado. Se apenas uma medição é efetuada, a incerteza padrão é dada por:

$$u(q) = s(q) \quad (8.3)$$

Entretanto, se “m” medições são efetuadas e o seu valor médio é usado para calcular o resultado da medição, a incerteza padrão corresponde ao desvio padrão da média de “m” medições, ou seja:

$$u(q) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{m}} \quad (8.4)$$

O “guia” denota por v o número de *graus de liberdade* associado à determinação da incerteza padrão. O número de graus de liberdade (v) é calculado como o número de dados usados para estimar o desvio padrão experimental (n) menos um, isto é:

$$u = n - 1 \quad (8.5)$$

8.2.2 Estimativa da incerteza padrão por meios não estatísticos (avaliação “tipo B”)

Há várias situações onde não é prático, ou mesmo possível, usar procedimentos estatísticos para estimar o desvio padrão experimental associado a uma fonte de incertezas. Outras informações devem ser usadas para estimar o desvio padrão associado aos efeitos da fonte de incertezas sobre o processo de medição.

A nomenclatura adotada no “guia” denomina os procedimentos não estatísticos como procedimentos de avaliação “tipo B”.

Informações conhecidas *a priori* sobre o comportamento da fonte de incertezas ou deduzidas por observação das suas características, são consideradas. Informações obtidas de medições anteriores, certificados de calibração, especificações do instrumento, manuais técnicos e mesmo estimativas baseadas em conhecimentos e experiências anteriores do experimentalista, são exemplos de conhecimento *a priori* que podem ser levados em conta. Os limites dentro dos quais uma fonte de incertezas naturalmente se encontra, e o tipo de distribuição de probabilidade tipicamente atribuída a esta podem ser deduzidos em alguns casos.

8.2.2.1 Estimativas baseadas em levantamentos estatísticos conhecidos a priori

É o caso em que existem levantamentos estatísticos anteriores, realizados em um tempo passado, que fornecem dados quantitativos confiáveis sobre os efeitos da fonte de incertezas considerada sobre a medição. Certificados ou relatórios de calibração de padrões ou módulos do sistema de medição normalmente trazem este tipo de informação. Registros históricos das características metrológicas ou operacionais de elementos utilizados na medição ou das próprias grandezas de influência, podem também ser utilizados.

Deve-se procurar extrair da documentação disponível estimativas da influência das parcelas sistemática e da incerteza padrão associadas à fonte de incertezas e seus efeitos sobre o valor indicado pelo sistema de medição.

Muitas vezes encontra-se na documentação disponível o parâmetro denominado *incerteza expandida*. É possível calcular a incerteza padrão a partir da incerteza expandida dividindo esta última por um parâmetro conhecido como *fator de abrangência*. Estes conceitos serão detalhadamente apresentados no item 8.4, bem como a forma de converter um parâmetro no outro.

8.2.2.2 Estimativas baseadas em limites máximos de variação

Não é rara a situação onde o conjunto de informações disponíveis sobre a fonte de incertezas considerada seja muito limitado. Mesmo na ausência de levantamentos estatísticos anteriores é ainda válida a busca por outros elementos que levem a uma estimativa segura para os limites de influências da fonte de incertezas.

Em algumas situações dispõe-se de informações que permitem estimar os limites máximos dentro dos quais espera-se que os efeitos da fonte de incertezas sobre o mensurando estejam contidos. São exemplos:

- ◆ registros históricos de valores típicos de grandezas de influência;
- ◆ informações extraídas de folhas de especificações técnicas de sistemas ou padrões;
- ◆ normas que regulamentam limites máximos admissíveis para a grandeza de influência ou classe de padrões ou instrumentos de referência utilizados;
- ◆ informações extraídas de curvas de calibração na forma de limites máximos de erros;
- ◆ deduções ou análises acerca dos efeitos da fonte de incertezas baseados em suas propriedades e características naturais.

Nestes casos, caracterizam-se os limites superior (LS) e inferior (LI) dentro do qual se situam os efeitos da fonte de incertezas sobre o processo de medição em análise.

Quando não há informações adicionais suficientes para permitir que seja determinada a forma da distribuição de probabilidades associada aos efeitos desta fonte de incertezas, geralmente assume-se, por segurança, a existência de uma distribuição de probabilidades uniforme (ou retangular), isto é, há a mesma probabilidade do efeito se situar em qualquer ponto dentro dos limites estabelecidos.

Seja q uma variável aleatória com distribuição retangular contida entre os limites LI e LS. Seu valor médio e incerteza padrão podem ser estimados respectivamente por:

$$\bar{q} = \frac{LI + LS}{2} \quad (8.6)$$

e

$$u(q) = \frac{LS - LI}{2\sqrt{3}} \quad (8.7)$$

Onde:

LI e LS são, respectivamente, os limites inferior e superior da faixa que delimita os efeitos da fonte de incertezas sobre a indicação do sistema de medição

A correção deve ser estimada a partir dos efeitos que o valor médio da grandeza de influência exerce sobre a indicação.

O “guia” recomenda que, nos casos em que a forma da distribuição de probabilidade é assumida como conhecida, como é o caso da distribuição uniformes (ou retangular), o número de graus de liberdade adotado seja infinito.

Há outras distribuições de probabilidade que podem melhor se adequar a situações particulares. Estes casos não serão tratados neste texto. Recomenda-se consultar o “guia”.

8.3 Combinação de efeitos

Uma vez estimadas a correção e a incerteza padrão para cada fonte de incertezas, estas devem ser consideradas em conjunto para que, tanto a correção combinada, quanto a incerteza padrão combinada, possam ser determinadas para o processo de medição.

8.3.1 Correção combinada

As componentes sistemáticas de cada fonte de incertezas devem ser combinadas por soma algébrica simples. Os valores das correções associadas a cada fonte de incertezas devem estar expressos na mesma unidade, que deve ser a unidade do mensurando. Por exemplo, se a temperatura afeta o valor medido de um comprimento, o efeito da temperatura média sobre a medição do comprimento deve ser expresso em unidades de comprimento e não em unidades de temperatura.

Assim, a *correção combinada* para “p” fontes de incertezas deve ser estimada por:

$$C_C = \sum_{k=1}^p C_k \quad (8.8)$$

sendo:

C_k representa a correção associada à k-ésima fonte de incerteza

p é o número de fontes de incertezas considerado

C_C representa a correção combinada das “p” fontes de incertezas

8.3.2 Incerteza padrão combinada

Os efeitos aleatórios de cada fonte de incertezas devem ser considerados para compor a chamada *incerteza padrão combinada*. Para que a estimativa da incerteza padrão combinada seja efetuada de forma correta, algumas propriedades das variáveis aleatórias devem ser consideradas.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculadas, isto é, não há nenhuma relação entre o crescimento aleatório de uma e o crescimento (ou decréscimo) aleatório da outra. Um exemplo é a relação entre a temperatura do mar na praia da Joaquina e a cotação do Dollar. São completamente desvinculadas. Do ponto de vista estatístico duas variáveis são ditas independentes ou não correlacionadas, se seu coeficiente de correlação é zero. É a relação mais comumente observada entre as fontes de incertezas nas medições diretas.

Por outro lado, duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente dependentes se suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra de forma proporcional à primeira. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é unitário e positivo (+1). Há ainda o caso em que o crescimento da primeira está nitidamente atrelado ao decréscimo proporcional da segunda. Neste caso estas variáveis são ditas possuir correlação inversa, e seu coeficiente de correlação é -1. São raros os casos onde fontes de incertezas estatisticamente dependentes estão presentes em medições diretas.

Sejam “X1” e “X2” duas variáveis aleatórias estatisticamente independentes. Seja “Y” calculado pela soma: $Y = X1 + X2$ e “Z” pela diferença: $Z = X1 - X2$. “Y” e “Z” também

serão variáveis aleatórias. É possível demonstrar que as médias de “Y” e “Z” podem ser estimadas por:

$$\begin{aligned}m_Y &= m_{X1} + m_{X2} \\m_Z &= m_{X1} - m_{X2}\end{aligned}\quad (8.9)$$

Sendo “X1” e “X2” estatisticamente independentes, é possível demonstrar que os desvios padrões de “Y” e “Z” podem ser calculados a partir dos desvios padrões de “X1” e “X2” por:

$$\begin{aligned}s_Y &= \sqrt{s_{X1}^2 + s_{X2}^2} \\s_Z &= \sqrt{s_{X1}^2 + s_{X2}^2}\end{aligned}\quad (8.10)$$

As equações (8.10) mostram que, se X1 e X2 são variáveis estatisticamente independentes, o desvio padrão da sua soma e da sua diferença coincidem, e obtidos pela raiz quadrada da soma dos quadrados de ambos. É possível mostrar que a expressão (8.10) pode ser generalizada para estimar a soma (ou subtração ou combinações de somas e subtrações) de um número ilimitado de termos:

$$s_{(X1 \pm X2 \pm \dots \pm Xp)} = \sqrt{s_{X1}^2 + s_{X2}^2 + \dots + s_{Xp}^2}$$

Freqüentemente na medição direta os efeitos associados às várias fontes de incertezas se refletem sobre a indicação do sistema de medição como parcelas aditivas, isto é, cada fonte de incertezas soma (ou subtrai) sua contribuição sobre a indicação. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias.

Ao desvio padrão resultante da ação conjunta das várias fontes de incertezas agindo simultaneamente sobre o processo de medição denomina-se de *incerteza padrão combinada*. A incerteza padrão combinada (u_c) das várias fontes de incertezas pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de incertezas por:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2}\quad (8.11)$$

sendo

u_1, u_2, \dots, u_p representam as incertezas padrão de cada uma das “p” fontes de incertezas

u_c representa a incerteza padrão combinada

Também aqui é necessário que as incertezas padrão de cada fonte de incertezas sejam expressas na mesma unidade do mensurando.

A expressão (8.11) só é válida para estimar a incerteza padrão combinada se os efeitos de cada fonte de incertezas manifestarem-se de forma aditiva sobre a indicação e no caso que estas sejam mutuamente estatisticamente independentes. Caso ao menos uma destas condições não seja obedecida, as expressões desenvolvidas no capítulo 9 devem ser consideradas em lugar da (8.11).

8.3.3 Número de graus de liberdade efetivo

Quando as incertezas padrão de várias fontes de incertezas são consideradas para estimar a incerteza padrão combinada, o número de graus de liberdade resultante da incerteza padrão combinada deve ser estimado.

O "guia" denomina por *número de graus de liberdade efetivos* (v_{ef}) o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada. O "guia" recomenda a utilização da equação de Welch-Satterthwaite para estimar o número de graus de liberdade efetivos:

$$\frac{u_c^4}{u_{ef}} = \frac{u_1^4}{u_1} + \frac{u_2^4}{u_2} + \dots + \frac{u_p^4}{u_p} \quad (8.12)$$

onde:

u_c é a incerteza padrão combinada;

u_1, u_2, \dots, u_p são as incertezas padrão de cada uma das "p" fontes de incerteza;

v_1, v_2, \dots, v_p são os números de graus de liberdade de cada uma das "p" fontes de incerteza;

v_{ef} é o número de graus de liberdade efetivo associado à incerteza padrão combinada.

8.3.4 Incerteza Expandida

A incerteza padrão combinada, estimada através da equação (8.11), corresponde ao desvio padrão resultante da ação combinada das várias fontes de incertezas consideradas.

Em aplicações nas áreas da engenharia é comum trabalhar com níveis de confiança de 95%. Para atingir este nível de confiança, a incerteza padrão combinada (u_c), que corresponde a apenas um desvio padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de Student. No "guia", este coeficiente é denominado de *fator de abrangência*, comumente representado pelo símbolo " k_{95} " quando o nível de confiança 95% é usado.

A denominada *incerteza expandida* ($U_{95\%}$) corresponde à faixa de valores que enquadra a incerteza com nível de confiança de aproximadamente 95%. É estimada por:

$$U_{95\%} = k_{95\%} \cdot u_c \quad (8.13)$$

sendo

u_c é a incerteza padrão combinada;

$k_{95\%}$ é o fator de abrangência para o nível de confiança de 95%

$U_{95\%}$ representa a incerteza expandida para o nível de confiança 95%

Nota: é muito comum representar a incerteza expandida pelo símbolo "U" e o fator de abrangência por "k" e subentendendo-se que o nível de confiança é sempre 95%.

O fator de abrangência $k_{95\%}$ equivale ao coeficiente de Student para dois desvios padrões (o que corresponde ao nível de confiança de 95,45%). O “guia” recomenda que a tabela reproduzida abaixo seja usada:

Tabela 8.1 – Valores para o fator de abrangência ($k_{95\%}$) para nível de confiança 95% em função do número de graus de liberdade efetivo (n_{ef}):

v_{ef}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
k_{95}	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17
v_{ef}	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	∞
k_{95}	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

Para valores fracionários de v_{ef} , interpolação linear pode ser usada se $v_{ef} > 3$. Alternativamente, o valor de k_{95} correspondente ao valor de v_{ef} imediatamente inferior na tabela pode ser adotado.

Em geral a determinação da incerteza expandida segue os seguintes passos:

1. Estime as incertezas padrão e o número de graus de liberdade de cada fonte de incertezas considerada no processo de medição;
2. Estime a incerteza padrão combinada usando a equação (8.11);
3. Estime o número de graus de liberdade efetivos através da equação (8.12);
4. Entre na tabela 8.1 com o número de graus de liberdade efetivo e obtenha o fator de abrangência correspondente;
5. Estime a incerteza expandida multiplicando o fator de abrangência pela incerteza padrão combinada.

Exemplo: Estime a incerteza expandida de um processo de medição onde foram consideradas três fontes de incertezas cujas respectivas incertezas padrão e número de graus de liberdade estão especificados abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Fonte de incertezas I: } & u_I = 0,012 \text{ mm}, & n_I &= 12 \\ \text{Fonte de incertezas II: } & u_{II} = 0,006 \text{ mm}, & n_{II} &= \infty \\ \text{Fonte de incertezas III: } & u_{III} = 0,008 \text{ mm}, & n_{III} &= \infty \end{aligned}$$

Solução: Uma vez que as informações resultantes do Passo 1 acima já estão disponíveis, prossegue-se do passo 2:

$$\text{Passo 2: Estimando } u_c = \sqrt{(0,012^2 + 0,006^2 + 0,008^2)} = 0,0156$$

Passo 3: Estimando v_{ef} pela equação (5.16):

$$\frac{0,0156^4}{u_{ef}} = \frac{0,012^4}{12} + \frac{0,006^4}{\infty} + \frac{0,008^4}{\infty}$$

$$v_{ef} = 34,3$$

Passo 4: $k_{95\%} = 2,09$

Passo 5: $U_{95\%} = 2,09 * 0,0156 = 0,033 \text{ mm}$

8.4 Balanços de incertezas

É possível sistematizar o procedimento para estimar a correção combinada e a incerteza expandida associadas a um processo de medição onde mais de uma fonte de incertezas esteja envolvida. Recomenda-se que estas informações sejam organizadas na forma de uma planilha de avaliação, como a apresentada na tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Planilha sugerida para realizar o balanço de incertezas

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
sím-bolo	Descrição	Correção []	valor bruto []	tipo de distribuição	divisor	u []	v
C_c	Correção combinada	(8.8)					
u_c	Incerteza padrão combinada			normal		(8.11)	(8.12)
U	Incerteza expandida (95%)			normal		(8.13)	

A tabela 8.2 possui três campos principais. No primeiro campo, formado pelas duas primeiras colunas, devem ser descritas cada fonte de incertezas considerada, uma por linha. A primeira coluna é reservada para, se desejado, atribuir um símbolo para a fonte de incertezas.

O segundo campo, formado pela terceira coluna, conterá informações sobre os efeitos sistemáticos. Na terceira coluna deverá ser atribuída a estimativa da correção associada à respectiva fonte de incertezas na mesma unidade do mensurando.

O terceiro campo, formado pelas demais colunas, contém informações acerca dos efeitos aleatórios associados a cada fonte de incertezas. A quarta coluna contém o valor bruto associado à fonte de incertezas por exemplo, os limites de uma distribuição uniforme. Na quinta coluna deve ser identificado o tipo de distribuição (uniforme, triangular, normal, etc). Na sexta coluna deve ser explicitado o divisor que transforma o valor bruto na incerteza padrão, assumindo normalmente $\sqrt{3}$ para distribuição uniforme (ou retangular), 2 quando o valor bruto é a incerteza expandida e 1 quando é o próprio desvio padrão experimental. Finalmente, a última coluna deverá conter o número de graus de liberdade associado a cada fonte de incertezas.

ESTIMATIVA DA INCERTEZA E CORREÇÃO EM MEDIÇÕES DIRETAS

As três últimas linhas são usadas para exprimir os resultados combinados da análise de incertezas: a correção combinada, a incerteza padrão combinada, o número de graus de liberdade efetivos e, finalmente, a incerteza expandida. Em cada campo da tabela estão representados os números das equações usadas para estimar cada um destes parâmetros a partir dos demais dados da tabela.

Em linhas gerais, o procedimento de avaliação da incerteza expandida e correção combinada de um processo de medição pode ser organizado nos seguintes passos:

1. Analise o processo de medição. Procure entender claramente os princípios envolvidos e os procedimentos adotados para chegar ao resultado da medição.
2. Faça um levantamento de todas as fontes de incertezas que possuem influência sobre o processo de medição. Não descarte *a priori* fontes de incertezas que aparentemente não tenham influência significativa sobre o processo. Disponha cada fonte de incertezas em uma linha diferente da tabela.
3. Procure, para cada fonte de incertezas estimar os efeitos sistemáticos e aleatórios. Lembre-se que efeitos sistemáticos não conhecidos ou não compensados devem ser considerados como efeitos aleatórios. Estime e transponha para cada linha correspondente da tabela os valores estimados para a correção e os dados que permitam a estimativa da respectiva incerteza padrão, como o tipo de distribuição. Informe também o respectivo número de graus de liberdade. Mantenha uma memória de cálculo com as informações e considerações que levaram àquelas estimativas.
4. Calcule a correção combinada através da equação (8.8) somando algebricamente os valores da terceira coluna.
5. Calcule os valores das incertezas padrão de cada fonte de incertezas. Calcule a incerteza padrão combinada usando a equação (8.11) e transponha o resultado na sétima coluna da linha correspondente.
6. Calcule o número de graus de liberdade efetivos através da equação (8.12) e transponha o resultado para a última coluna da linha correspondente.

Estime a incerteza padrão através da equação (8.13).

8.5 Exemplo Resolvido

A seguir é apresentado um exemplo completo resolvido onde um balanço de incertezas é realizado para a medição de uma massa com uma balança.

Formulação:

Determine a incerteza da medição da massa de um anel de ouro realizada nas seguintes condições:

Foi usada uma balança eletrônica com certificado de calibração. Os valores da correção e da respectiva incerteza (para $k = 2$) estão disponíveis para vários pontos da faixa de medição e são apresentados na figura 8.1;

esta balança apresenta um indicador digital com resolução de 0,05 g;

a temperatura no local onde a medição foi efetuada oscila tipicamente entre 24,0 e 26,0°C. Sabe-se que esta balança apresenta deriva térmica, isto é, acresce o valor da indicação de +0,025 g para cada +1°C de variação da temperatura ambiente acima da temperatura de calibração (20,0°C);

ESTIMATIVA DA INCERTEZA E CORREÇÃO EM MEDIÇÕES DIRETAS

a calibração da balança foi realizada há 5 meses. Sabe-se que sua estabilidade em função do tempo permanece dentro dos limites de $\pm 0,02$ g/mês;

foram efetuadas as 12 medições independentes listadas na figura.

Deve ser ainda acrescentado que deseja-se compensar todos os efeitos sistemáticos possíveis, reduzindo ao máximo as incertezas.

Este problema está esquematicamente ilustrado na figura 8.1.

Solução:

A solução do problema segue o roteiro apresentado no item 8.5

Passo 1: Análise do processo de medição.

Trata-se de um mensurando invariável, medido repetidamente por 12 vezes. O certificado de calibração está disponível, onde constam estimativas para a correção e sua respectiva incerteza, sendo viável a correção dos respectivos efeitos sistemáticos. Devem ser considerados os efeitos da temperatura do ambiente sobre o comportamento da balança e que suas características se degradam com o tempo.

Passo 2: Identificação das fontes de incerteza.

- a) repetitividade da indicação (o fato de medições repetitivas não mostrarem sempre a mesma indicação) – símbolo adotado: Re
- b) erros detectados na calibração (a correção para cada ponto e sua respectiva incerteza) – símbolo adotado: Cal
- c) resolução limitada do dispositivo mostrador digital – símbolo adotado: R
- d) deriva temporal (degradação das características da balança com o tempo) – símbolo adotado: DTmp
- e) deriva térmica (influência da temperatura ambiente sobre o comportamento da balança) – símbolo adotado: DTer

Estas informações foram transpostas para as duas primeiras colunas da tabela 8.3.

Passo 3: estimativa dos efeitos sistemáticos e aleatórios

- a) Repetitividade da indicação: avaliação por métodos estatísticos (tipo A)

Sua influência é tipicamente aleatória, não há componente sistemática associada. Aplicando a equação (8.2) nas doze medidas efetuadas estima-se o desvio padrão experimental: $s = 0,0634$ g. A equação (8.4) é usada para estimar o desvio padrão experimental da média das doze medidas: $s/\sqrt{12} = 0,0183$ g. Esta já é uma estimativa da incerteza padrão associada. O número de graus de liberdade envolvido é $\nu = 12 - 1 = 11$.

- b) Erros detectados na calibração: avaliação com base em informações existentes *a priori* (tipo B)

Os efeitos destas fontes de incertezas são estimados tendo por base dados já existentes decorrentes de uma calibração previamente realizada e apresentados no respectivo certificado.

Este certificado apresenta a respectiva correção para vários pontos da faixa de medição. O valor médio das indicações é 19,950 g. Como este valor está muito

ESTIMATIVA DA INCERTEZA E CORREÇÃO EM MEDIÇÕES DIRETAS

próximo de 20,00 g, o valor estimado para da correção -0,15 g é adotado. A respectiva incerteza expandida associada ($k = 2$) é de $\pm 0,08$ g, o que leva à incerteza padrão de $\pm 0,04$ g.

Observação: Nos casos em que a média das indicações não seja um valor muito próximo de um ponto onde uma estimativa para a correção é apresentada no certificado de calibração, é comum estimar os valores da correção e incerteza através de interpolação linear, tendo por base os respectivos valores dos pontos mais próximos. Isto deve ser feito com cautela, uma vez que não há garantias de que entre estes pontos o comportamento seja linear. Nestes casos, é prudente elevar o nível da incerteza obtida.

c) Resolução: avaliação com base em características naturais (tipo B)

A resolução do dispositivo mostrador digital da balança introduz uma componente adicional de erro devido ao truncamento numérico. Seu efeito é apenas de natureza aleatória e pode ser quantificado através dos limites máximos possíveis. O máximo erro de truncamento corresponde a metade do valor da resolução. O mínimo a menos metade da resolução. Este erro poderia então ser modelado por meio de uma distribuição uniforme (retangular), centrada no zero, e limites extremos dados por metade do valor da resolução (-0,025 g a + 0,025 g).

d) Deriva temporal: avaliação com base em informações do certificado de calibração (tipo B)

Em função do tempo transcorrido após a calibração é possível que as características da balança tenham se degradado. Sua extensão pode ser estimada a partir dos limites máximos esperados para a balança, calculados a partir de dados da sua estabilidade ao longo do tempo (fig. 8.1). Para um período de 5 meses, espera-se que os erros estejam dentro do limite dado por $\pm 5 * 0,02 = \pm 0,10$ g. Não há como estimar os efeitos sistemáticos. Na falta de outras informações, assume-se uma distribuição retangular, centrada no zero, e com limites em $\pm 0,10$ g.

e) Deriva térmica: avaliação com base em informações do certificado de calibração (tipo B)

Em função da temperatura no local da medição ser diferente da temperatura na qual a calibração foi realizada, uma componente de incerteza adicional é introduzida, Uma vez conhecidas as características de estabilidade da balança em função da temperatura e os limites dentro dos quais a temperatura no local da medição se manteve, é possível estimar sua influência através dos limites máximos estimados para esta grandeza.

Para o limite superior da temperatura (26°C) a balança indica em média 0,15 g a mais. Para 24°C, indica 0,10 g a mais. Este efeito dá origem a uma parcela sistemática e outra aleatória. O valor médio de 0,125 g corresponde à melhor estimativa da parcela sistemática, levando ao valor da correção de -0,125 g. A parcela aleatória pode ser modelada através de uma distribuição uniforme (retangular), centrada no zero, com limites dados por $\pm 0,025$ g.

Passo 4: Estimativa da correção combinada

ESTIMATIVA DA INCERTEZA E CORREÇÃO EM MEDIÇÕES DIRETAS

Aplicando a equação (8.8) chega-se à correção combinada de $-0,275$ g.

Passo 5: incertezas padrão de cada fonte e incerteza combinada

As respectivas incertezas padrão de cada fonte de incertezas calculadas a partir dos valores brutos, aplicado-se o devido divisor, estão apresentadas na tabela 8.3. A incerteza padrão combinada, calculada pela equação (8.11), é de $0,079$ g.

Passo 6: número de graus de liberdade efetivos

Aplicando a equação (8.12) chega-se a:

$$u_{ef} = \frac{(0,0740)^4}{\frac{(0,0183)^4}{11} + 0 + 0 + 0 + 0} = 2941$$

Passo 7: incerteza expandida

O fator de abrangência para 2941 graus de liberdade é 2,00. A incerteza expandida pode ser calculada multiplicando-se a incerteza padrão combinada por 2,00. Assim, tem-se:

$$U_{95\%} = 0,148 \text{ g.}$$

Tabela 8.3 – Balanço de incertezas do problema resolvido

Fontes de incertezas		Efeitos sistemáticos	Efeitos aleatórios				
sim-bolo	Descrição	correção [g]	valor bruto [g]	tipo de distribuição	divisor	μ [g]	ν
Re	Repetitividade	0,000	0,0183	normal	1	0,0183	11
Cal	Erros detectados na calibração	-0,150	0,0800	normal	2	0,0400	∞
R	Resolução	0,000	0,0025	uniforme	$\sqrt{3}$	0,0014	∞
DTmp	Deriva temporal	0,000	0,1000	uniforme	$\sqrt{3}$	0,0577	∞
Dter	Deriva térmica	-0,125	0,0250	uniforme	$\sqrt{3}$	0,0144	∞
C_c	Correção combinada	-0,275					
U_c	Incerteza padrão combinada			normal		0,074	2941
U	Incerteza expandida (95%)			normal		0,148	

Assim, o processo de medição apresenta correção combinada $-0,275$ g e incerteza expandida $0,148$ g.

Finalmente, a massa medida teria como resultado:

$$RM = 19,950 - 0,275 \pm 0,148 = (19,68 \pm 0,15) \text{ g}$$

Considere, como um segundo exemplo, a mesma situação do problema anterior com a diferença que o operador deliberadamente não pretende fazer os cálculos necessários para compensar os efeitos sistemáticos. Obviamente que a parcela sistemática não compensada elevará a incerteza global da medição.

Para estimar a incerteza resultante neste caso, considere a soma dos valores absolutos das parcelas sistemáticas não compensadas (soma dos módulos das correções). Esta soma deve ser adicionada algebricamente à incerteza expandida já calculada para o caso em que os efeitos sistemáticos são compensados levando à nova incerteza expandida.

Assim, a soma dos valores absolutos das correções não compensadas leva a:

$$SC = |-0,150| + |-0,125| = 0,275 \text{ g}$$

A nova incerteza expandida será então:

$$U_{95\%} = 0,275 + 0,148 = 0,423 \text{ g}$$

Neste caso, há sensível piora na incerteza do processo de medição que passa a apresentar correção combinada zero e incerteza expandida 0,423 g, levando ao seguinte resultado da medição:

Capítulo 9

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA EM MEDIÇÕES INDIRETAS

Este capítulo aborda procedimentos para estimar a incerteza associada à medição em casos onde o valor do mensurando não pode ser determinado diretamente a partir da indicação vinda de um único instrumento de medição, mas deve ser calculada por uma equação que relaciona mais de uma grandezas de entrada medidas independentemente. Estimativas iniciais das incertezas padrão associadas a cada uma destas grandezas de entrada devem ser conhecidas e são o ponto de partida para os procedimentos aqui apresentados.

9.1 Considerações preliminares

9.1.1 Medições diretas e indiretas

Na medição direta o valor associado ao mensurando resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre este. Há interesse focado apenas em uma grandeza. A medição de um diâmetro com um paquímetro, da temperatura de uma sala por um termômetro são exemplos de medição direta.

A medição indireta envolve a determinação do valor associado ao mensurando a partir da combinação de duas ou mais grandezas por meio de expressões matemáticas. São exemplos de medição indireta: a) a determinação da área de um terreno a partir da multiplicação dos valores medidos para sua largura e comprimento, b) a determinação da massa específica de um material calculada a partir da razão entre sua massa e seu volume e c) a medição da corrente que passa por um condutor a partir da divisão da queda de tensão medida sobre um resistor de precisão em série com o condutor pelo valor da sua resistência elétrica.

Embora menos prática que a medição direta, a medição indireta é utilizada com muita frequência, principalmente em casos onde: a) por impossibilidade física não é viável fazer medições diretas e b) do ponto de vista econômico, ou, no que diz respeito ao nível de incerteza possível de ser obtida, é mais vantajoso efetuar medições indiretas.

9.1.2 Dependência estatística

Como visto no capítulo 8, duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculadas, isto é, não há nenhuma relação entre o crescimento momentâneo e aleatório de uma e o crescimento (ou decrescimento) da outra. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas independentes ou não correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é zero.

Dois variáveis aleatórias são ditas estatisticamente dependentes se suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra de forma proporcional à primeira. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é unitário (+1). Há ainda o caso em que o crescimento da primeira está nitidamente atrelado ao decrescimento proporcional da segunda. Neste caso estas variáveis possuem correlação inversa, e seu coeficiente de correlação é também unitário porém negativo (-1).

Dois variáveis aleatórias podem apresentar dependência estatística parcial, isto é, nem são totalmente dependentes nem totalmente independentes. Nestes casos, o coeficiente de correlação entre estas variáveis pode assumir qualquer valor não inteiro entre -1 e +1.

A indicação de um módulo ou sistema de medição é uma variável aleatória. As variações observadas em uma série de indicações obtidas de medições sucessivas, realizadas nas mesmas condições e do mesmo mensurando, são manifestação desta parcela aleatória. Os fatores que provocam esta aleatoriedade são diversos, podendo ter origem interna no próprio sistema de medição, ou resultarem de efeitos externos provocados por grandezas de influência como, por exemplo, variações ambientais, variações da tensão da rede elétrica, etc.

Nos casos onde dois ou mais módulos da cadeia de medição estão expostos às mesmas grandezas de influência, e seus comportamentos são particularmente sensíveis a uma ou mais destas grandezas de influência, é muito provável que as indicações destes módulos apresentem dependência estatística. Flutuações aleatórias das grandezas de influência podem provocar alterações correspondentes em cada módulo. Estas alterações serão correlacionadas. Quando as principais grandezas de influência são relativamente bem controladas, isto é, mantidas constantes, as variações em cada módulos possuem uma série de causas secundárias, o que resulta, com grande probabilidade, em independência estatística. É sempre possível caracterizar de forma segura o tipo de dependência estatística calculando, para cada caso, o coeficiente de correlação linear.

Embora grande parte das variáveis aleatórias envolvidas na medição seja parcialmente dependentes, para tornar o cálculo de incertezas mais facilmente executável, é prática comum aproximar seu comportamento e classificá-las como totalmente dependentes ou independentes. Na prática, apenas em situações muito raras a dependência estatística parcial é considerada.

De uma forma simplificada, em medições indiretas é comum tratar como estatisticamente dependentes as medições de diferentes parâmetros efetuadas pelo mesmo instrumento. Por exemplo, se um mesmo paquímetro é usado para medir os comprimentos dos três lados de um paralelepípedo cujo volume deseja-se calcular,

estas três medições são tratadas como estatisticamente dependentes (ou correlacionadas). Esta prática justifica-se quando considera-se que, nos três casos, o SM pode estar trazendo um erro muito similar para as três medições (por exemplo, uma parcela sistemática desconhecida, provocada pelo desgaste), o que caracterizaria um a situação de "sincronismo" do erro, ou, em outras palavras, dependência estatística.

Por outro lado, medições efetuadas por diferentes SM são tratadas como estatisticamente independentes (ou não correlacionadas). No exemplo anterior, se o comprimento de cada lado do paralelepípedo fosse medido por um SM diferente, os erros de medição de cada SM seriam independentes, gerando a situação de independência estatística.

9.2 Grandezas de entrada estatisticamente dependentes

No caso em que há dependência estatística entre as variáveis de entrada, a variação aleatória associada a cada grandeza de entrada poderá estar agindo de forma sincronizada sobre as respectivas indicações. Para estimar a incerteza da combinação de duas ou mais grandezas de entrada estatisticamente dependentes, deve ser levado em conta que estas podem assumir, ao mesmo tempo, valores extremos dentro de suas respectivas faixas de incerteza. O valor estimado geralmente representa os limites da variação máxima possível.

Embora exista uma expressão geral para a estimativa da incerteza associada à combinação de grandezas de entrada estatisticamente dependentes, há casos particulares, freqüentemente presentes na prática, onde as equações são drasticamente simplificadas. A soma e subtração e a multiplicação e divisão são grupos de operações onde são possíveis simplificações consideráveis e serão inicialmente tratados.

9.2.1 Soma e subtração

A combinação das incertezas de grandezas de entrada estatisticamente dependentes que são apenas somadas ou subtraídas entre si é muito simples, e pode ser intuída por simples observação. Seja o caso onde deseja-se somar o valor de duas massas conhecidas, determinadas a partir de uma mesma balança e nas mesmas condições de medição dadas por:

$$m_1 = (200 \pm 4) \text{ g}$$

$$m_2 = (100 \pm 3) \text{ g}$$

O valor mínimo possível desta soma pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)_{\min} &= (200 - 4) + (100 - 3) \\ &= (200 + 100) - (4 + 3) \\ &= 300 - 7 = 293 \text{ g} \end{aligned}$$

Analogamente, o valor máximo possível é obtido por:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)_{\max} &= (200 + 4) + (100 + 3) \\ &= (200 + 100) + (4 + 3) \\ &= 300 + 7 = 307 \text{ g} \end{aligned}$$

O que leva ao resultado:

$$m_1 + m_2 = 300 \pm 7 \text{ g}$$

Por observação, nota-se que a incerteza de 7 g resulta da soma das incertezas 3 g e 4 g. De fato, esta regra é válida tanto para soma quanto para subtração, como pode ser facilmente verificado.

Esta mesma regra continua válida para qualquer número de termos envolvidos, desde que apenas somas e/ou subtrações estejam presentes no cálculo. Porém, recomenda-se combinar as incertezas padrão de cada variável de entrada e, somente após obter a incerteza padrão combinada, estimar a incerteza expandida. Em termos genéricos, pode-se escrever:

$$u(x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm \dots) = u(x_1) + u(x_2) + u(x_3) + \dots \quad (9.1)$$

ou seja:

na soma ou subtração de qualquer número de grandezas de entrada estatisticamente dependentes, a incerteza padrão combinada do resultado pode ser estimada pela soma algébrica das incertezas padrão individuais de cada grandeza envolvida

É também possível mostrar que:

$$u(k_1.x_1 \pm k_2.x_2 \pm k_3.x_3 \pm \dots) = k_1.u(x_1) + k_2.u(x_2) + k_3.u(x_3) + \dots \quad (9.1a)$$

onde k_1, k_2, k_3, \dots , são constantes multiplicativas.

9.2.2 Multiplicação e divisão

Também neste caso, através de um exemplo simples, é possível intuir a expressão para a estimativa da incerteza combinada: Seja V o volume de um paralelepípedo calculado pelo produto dos seus lados: a , b e c , cada qual conhecido com incertezas $u(a)$, $u(b)$ e $u(c)$ respectivamente e estatisticamente independentes entre si. Logo:

$$V \pm u(v) = (a \pm u(a)) \cdot (b \pm u(b)) \cdot (c \pm u(c))$$

Expandindo a expressão acima:

$$V \pm u(v) = a.b.c \pm b.c.u(a) \pm a.c.u(b) \pm a.b.u(c) \pm a.u(b).u(c) \pm b.u(a).u(c) \pm c.u(a).u(b) \pm u(a).u(b).u(c)$$

Subtraindo $V = a.b.c$ de ambos os lados e desprezando os termos de ordens mais altas, obtém-se:

$$u(v) = b.c.u(a) + a.c.u(b) + a.b.u(c)$$

Dividindo ambos os termos desta equação por $V = a.b.c$, obtém-se finalmente:

$$\frac{u(v)}{V} = \frac{u(a)}{a} + \frac{u(b)}{b} + \frac{u(c)}{c}$$

$u(v)/V$, $u(a)/a$, $u(b)/b$ e $u(c)/c$ são as incertezas relativas de cada grandeza. Assim, verifica-se que na multiplicação a incerteza relativa do produto é estimada pela soma

das incertezas relativas de cada fator. Pode-se verificar que esta conclusão também vale para a divisão e também para qualquer número ou combinações entre multiplicações e divisões.

Assim, pode ser escrito de forma genérica que:

$$\frac{u(x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots)}{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots} = \frac{u(x_1)}{x_1} + \frac{u(x_2)}{x_2} + \frac{u(x_3)}{x_3} + \dots$$

e

$$\frac{u(x_1 / x_2 / x_3 / \dots)}{x_1 / x_2 / x_3 / \dots} = \frac{u(x_1)}{x_1} + \frac{u(x_2)}{x_2} + \frac{u(x_3)}{x_3} + \dots \quad (9.2)$$

ou seja:

na multiplicação e/ou divisão de várias grandezas de entrada estatisticamente dependentes, a incerteza padrão relativa combinada é obtida pela soma das incertezas padrão relativas de cada grandeza de entrada envolvida

a) Exemplo 1:

Determine a incerteza padrão associada à medição da área de um círculo, cujo diâmetro foi medido, sendo encontrado $d = 30,02$ mm com incerteza padrão $u(d) = 0,05$ mm.

Solução:

A expressão para o cálculo da área é $A = \frac{1}{4} \pi d^2$, que pode ser reescrita como:

$$A = \frac{1}{4} \pi d d$$

que se trata apenas de multiplicações. Neste caso, a equação (9.2) pode ser empregada:

$$u(A)/A = u(\frac{1}{4})/(\frac{1}{4}) + u(\pi)/\pi + u(d)/d + u(d)/d$$

Porém, $\frac{1}{4}$ é um número matematicamente exato, sua incerteza é nula o que também anula o termo $u(\frac{1}{4})/(\frac{1}{4})$. π pode ser hoje calculado com milhares de casas decimais, mas dificilmente é representado por mais de 5 ou 6 algarismos significativos. A incerteza no valor de π é muito mais consequência do erro de truncamento quando se considera apenas algumas casas decimais. Se um número suficiente de dígitos for considerado, o termos $u(\pi)/\pi$ pode ser desprezado frente ao $u(d)/d$. Assim, tem-se:

$$u(A)/A = 2 u(d)/d, \text{ ou}$$

ou

$$u(A)/A = 2 \cdot 0,05/30,02$$

$$u(A)/A = 0,00333$$

$$u(A) = 0,00333 \cdot (\frac{1}{4} (\pi 30,02)^2)$$

$$u(A) = 2,36 \text{ mm}^2$$

b) Exemplo 2:

Determinar a incerteza da grandeza (G) calculada por: $G = (a+b)/c$, sabendo-se que a, b e c são estatisticamente dependentes.

Embora trate-se de uma combinação entre soma e divisão, o cálculo da incerteza pode ser efetuado por etapas. Para tal, seja $d = a + b$, logo:

$$u(d) = u(a+b) = u(a) + u(b)$$

e

$$u(G)/G = u(d)/d + u(c)/c$$

obs: o procedimento ilustrado neste exemplo em particular, onde são combinadas soma/subtração com multiplicação/divisão por meio de variáveis intermediárias, só pode ser efetuado se estas variáveis não aparecem mais de uma vez dentro da expressão. Não seria possível, por exemplo, aplicar este procedimento para $H = (a+b)/(a-b)$. Estes casos são tratados no item seguinte.

9.2.3 Caso geral

A estimativa da incerteza combinada para o caso geral, onde as grandezas de entrada se relacionam através de uma expressão matemática qualquer, pode ser efetuada através da aplicação de uma expressão genérica. Sua demonstração matemática é baseada na expansão da expressão em termos de série de Taylor e não será tratada neste texto. Seja, por exemplo, uma grandeza G calculada em função de diversas grandezas de entrada relacionadas por:

$$G = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots)$$

Após a expansão em série de Taylor, eliminação de termos de ordens mais altas e redução de termos semelhantes chega-se a:

$$u(G) = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| u(x_1) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| u(x_2) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| u(x_3) + \left| \frac{\partial f}{\partial x_4} \right| u(x_4) + \dots \quad (9.3)$$

onde:

$u(G)$ representa a incerteza padrão da grandeza G

$u(x_1)$, $u(x_2)$, $u(x_3)$, $u(x_4)$, ... representam as incertezas padrão associadas às grandezas de entrada x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , ... respectivamente

$\left| \right|$ representa o módulo (valor absoluto) da expressão do seu interior

É muito fácil verificar que as equações (9.1) e (9.2) são casos particulares da equação (9.3)..

9.3 Grandezas de entrada estatisticamente independentes

No caso em que as grandezas de entrada são estatisticamente independentes entre si, isto é, não guardam nenhuma forma de sincronismo, são remotas as chances que as

variações aleatórias, associadas a cada grandeza de entrada, levem a uma combinação em que todos os valores extremos sejam atingidos ao mesmo tempo. Para este caso, é possível demonstrar que a forma mais apropriada para combinar estes efeitos é através da soma das variâncias. A estimativa para a incerteza padrão combinada, nessas condições, resulta em um número menor do que seria obtido se as grandezas de entrada fossem tratadas como estatisticamente dependentes.

Embora, também neste caso, exista uma expressão geral para a estimativa da incerteza padrão associada à combinação de grandezas de entrada estatisticamente independentes, há casos particulares, freqüentemente presentes na prática, onde as equações são drasticamente simplificadas.

9.3.1 Soma e subtração

A soma de duas variáveis aleatórias estatisticamente independentes é um problema já bastante estudado pela estatística. O valor médio da soma pode ser estimado pela soma dos valores médios de cada variável. A variância da soma pode ser estimada a partir da soma das variâncias de cada variável. Para a subtração, o comportamento é similar.

A incerteza padrão associada às grandezas de entrada estatisticamente independentes tem um comportamento estatístico semelhante ao do desvio padrão quando estas são combinadas. Assim, uma expressão geral para a estimativa da incerteza combinada associada à somas e/ou subtrações de duas ou mais grandezas de entrada estatisticamente independentes é dada por:

$$u^2(x_1 \pm x_2 \pm x_3 \pm \dots) = u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3) + \dots \quad (9.4)$$

ou seja:

na soma e subtração de várias grandezas de entrada estatisticamente independentes, o quadrado da incerteza padrão combinada é obtida pela soma dos quadrados das incertezas padrão de cada grandeza de entrada envolvida

Exemplo:

Considerando que as massas m_1 e m_2 dadas por:

$$m_1 = 200 \quad \text{com } u(m_1) = 4 \text{ g}$$

$$m_2 = 100 \quad \text{com } u(m_2) = 3 \text{ g}$$

foram medidas por balanças e em condições completamente diferentes e independentes, determine a incerteza associada à sua soma.

Neste caso, é razoável tratar estas grandezas de entrada como estatisticamente independentes. Assim, a incerteza combinada pode ser estimada por:

$$u(m_1 + m_2) = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$$

A massa resultante será:

$$m_1 + m_2 = 300 \text{ g} \quad \text{com } u(m_1 + m_2) = 5 \text{ g}$$

Note que o valor estimado para a incerteza padrão da soma neste caso é inferior a 7 g, o que seria encontrado caso estas variáveis fossem tratadas como estatisticamente dependentes.

9.3.2 Multiplicação e divisão

Neste caso, uma expressão indicada para estimar a incerteza resultante da combinação de apenas multiplicações e/ou divisões de qualquer número de variáveis de entrada estatisticamente independentes pode ser deduzida.

Seja G a grandeza de interesse calculada por multiplicações e/ou divisões de várias grandezas de entrada, simbolicamente representadas por:

$$G = (x_1)^{\pm 1} \cdot (x_2)^{\pm 1} \cdot (x_3)^{\pm 1} \cdot \dots$$

A incerteza relativa combinada pode ser estimada por:

$$\left(\frac{u(G)}{G}\right)^2 = \left(\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{u(x_3)}{x_3}\right)^2 + \dots$$

(9.5)

o que permite formar o seguinte enunciado:

na multiplicação e divisão de várias grandezas de entrada estatisticamente independentes, o quadrado da incerteza padrão relativa combinada é obtida pela soma dos quadrados das incertezas padrão relativas de cada grandeza de entrada envolvida

Exemplo:

Determine a incerteza padrão associada à corrente elétrica que passa por um resistor R previamente conhecido de 500,0 W com incerteza padrão $u(R) = 0,5 \text{ W}$, sobre o qual mediu-se a queda de tensão de $V = 150,0 \text{ V}$ com $u(V) = 1,5 \text{ V}$.

A expressão para o cálculo da corrente é dada por $I = V/R$. Este caso envolve apenas divisão de duas grandezas de entrada que, como foram medidas independentemente por instrumentos diferentes, podem ser tratadas com estatisticamente independentes. Assim, sendo o valor esperado para a corrente dado por:

$$I = 150/500 = 0,30 \text{ A}$$

Sua incerteza pode ser estimada por:

$$\left(\frac{u(I)}{I}\right)^2 = \left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2, \text{ ou}$$

$$\left(\frac{u(I)}{0,3}\right)^2 = \left(\frac{1,5}{150}\right)^2 + \left(\frac{0,5}{500}\right)^2$$

$$\left(\frac{u(I)}{0,3}\right)^2 = (0,01)^2 + (0,001)^2 = 0,0001 + 0,000001$$

$$u(I) = 0,003 \text{ A}$$

Assim:

$$I = 0,300 \text{ A e sua incerteza padrão } u(I) = 0,003 \text{ A}$$

Note que, neste caso, a contribuição na incerteza associada à tensão elétrica tem uma influência 100 vezes maior do que a incerteza da resistência sobre a incerteza padrão da corrente. É óbvio que, se for desejável reduzir a incerteza do valor da corrente, a incerteza padrão associada à medição da tensão precisa ser reduzida. De nada adiantaria reduzir a incerteza da resistência elétrica apenas.

9.3.3 Caso geral

Há uma expressão genérica que permite estimar a incerteza padrão combinada para o caso geral onde apenas grandezas de entrada estatisticamente independentes se relacionam através de uma expressão matemática. Seja, por exemplo, uma grandeza G calculada em função de diversas grandezas de entrada relacionadas por:

$$G = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots)$$

A incerteza combinada da grandeza G pode ser estimada por:

$$u^2(G) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot u(x_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} \cdot u(x_3)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_4} \cdot u(x_4)\right)^2 + \dots \quad (9.6)$$

onde:

$u(G)$ representa a incerteza padrão da grandeza G

$u(x_1)$, $u(x_2)$, $u(x_3)$, $u(x_4)$, ... representam as incertezas padrão associadas às grandezas de entrada x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , ... respectivamente

Também neste caso é fácil verificar que as equações (9.4) e (9.5) são casos particulares da equação (9.6).

Exemplo:

Na determinação da massa específica (ρ) de um material usou-se um processo indireto, medindo-se com uma balança a massa (m) de um cilindro cujo diâmetro (D) e altura (h) foram determinados por um micrômetro e um paquímetro respectivamente. Após a estimativa das incertezas padrão associadas, foram encontrados os seguintes resultados para cada grandeza medida:

$$\begin{array}{ll} m = 1580 \text{ g} & u(m) = 10 \text{ g} \\ D = 25,423 \text{ mm} & u(D) = 0,003 \text{ mm} \\ h = 77,35 \text{ mm} & u(h) = 0,05 \text{ mm} \end{array}$$

A massa específica é calculada por:

$$r = \frac{m}{\text{Vol}} = \frac{4m}{\rho D^2 h}$$

Como tratam-se de grandezas estatisticamente independentes, a equação (9.6) deve ser aplicada para determinar a incerteza padrão combinada $u(\rho)$.

A equação (9.6) envolve as derivadas parciais de ρ em relação a cada grandeza independente:

$$\frac{\partial r}{\partial m} = \frac{4}{\rho D^2 h}$$

$$\frac{\partial r}{\partial h} = \frac{-4m}{\rho D^2 h^2}$$

$$\frac{\partial r}{\partial D} = \frac{-8m}{\rho D^3 h}$$

que leva a:

$$u(r) = \sqrt{\left(\frac{4}{\rho D^2 h} \cdot u(m)\right)^2 + \left(\frac{-4m}{\rho D^2 h^2} \cdot u(h)\right)^2 + \left(\frac{-8m}{\rho D^3 h} \cdot u(D)\right)^2} \quad (9.7)$$

Esta equação permite estimar a incerteza associada à massa específica obtida nas condições especificadas. Entretanto, esta equação pode ser rearranjada de forma a

$$\frac{u(r)}{r} = \sqrt{\left(\frac{u(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(h)}{h}\right)^2 + \left(2\frac{u(D)}{D}\right)^2} \quad (9.8)$$

tornar-se mais simples. Para tal, sejam ambos os membros divididos por ρ . Assim: que é o mesmo resultado que se obtém pela aplicação da equação (9.5).

Substituindo os valores de m , D , h e suas incertezas padrão na equação (9.8) chega-se a:

$$\frac{u(r)}{r} = \pm \frac{1}{10000} \sqrt{(63,3)^2 + (2,36)^2 + (6,46)^2}$$

ou

$$\frac{u(r)}{r} = \pm \frac{1}{10000} \sqrt{4006,1 + 5,6 + 41,7}$$

Portanto a massa específica do material poderá ser dada como.

$$\mathbf{r} = \frac{4 \cdot m}{\mathbf{p} \cdot D^2 \cdot h}$$

$$\mathbf{r} = \frac{4,1580}{3,1416 \cdot (25,423)^2 \cdot 77,35}$$

$$\mathbf{r} = 0,040239 \text{ g/mm}^3$$

daí:

$$u(\mathbf{r}) = 0,00637 \cdot 0,040239$$

$$u(\mathbf{r}) = 0,0002563 \text{ g/mm}^3$$

ou seja:

$$\mathbf{r} = 0,04024 \text{ g/mm}^3 \quad e \quad u(\mathbf{r}) = 0,00025 \text{ g/mm}^3$$

O exemplo mostra claramente que a incerteza padrão combinada está sendo fortemente afetada pela incerteza da massa, em função desta ter incerteza padrão relativa superior às demais grandezas. Uma melhora no resultado da medição só será alcançada buscando-se reduzir a incerteza de medição da massa até níveis em que haja uma equiparação com a incerteza de medição relativa associada às outras grandezas.

9.4 Dependência estatística parcial

Há casos mais complexos onde as interações entre grandezas de entrada que compõem uma medição direta não podem ser realisticamente modeladas como sendo perfeitamente dependentes e nem independentes do ponto de vista estatístico. São os casos onde há dependência estatística parcial. A forma de quantificar a dependência estatística linear parcial é através do coeficiente de correlação linear entre cada par de grandezas de entrada envolvidas. Haverá dependência parcial se o coeficiente de correlação for um número não inteiro.

9.4.1 Combinação de grandezas estatisticamente dependentes e independentes

Será inicialmente abordado o caso onde apenas combinações de grandezas de entrada estatisticamente dependentes e independentes são envolvidas. Sejam, por exemplo, as grandezas a , b e c onde sabe-se, *a priori*, que:

- ◆ a e b são estatisticamente dependentes ($r(a,b) = 1$)
- ◆ a e c e b e c são estatisticamente independentes entre si ($r(a,c) = 0$ e $r(b,c) = 0$)

A incerteza padrão combinada da grandeza G dada por: $G = f(a, b, c)$ pode ser estimada por:

$$u^2(G) = \left(\frac{\partial f}{\partial a} \cdot u(a) + \frac{\partial f}{\partial b} \cdot u(b) \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \cdot u(c) \right)^2 \quad (9.9)$$

9.4.2 Caso geral

A expressão usada para estimar a incerteza padrão combinada de uma grandeza G dada por:

$$G = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

considerando que pode haver dependência estatística parcial entre cada par das grandezas de entrada $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, é dada por:

$$u^2(G) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (9.10)$$

onde $r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação entre as grandezas de entrada x_i e x_j .

Exemplo:

Seja o volume V de um paralelepípedo determinado a partir do produto dos comprimentos de cada um dos seus lados. Os lados “ a ” e “ b ” foram medidos por um mesmo sistema de medição e nas mesmas condições. O lado “ c ” foi medido por outro instrumento independente e em momentos distintos. Determine a incerteza padrão do volume.

Solução:

Em função de um mesmo instrumento ter sido usado para medir os lados “ a ” e “ b ”, é provável que estas grandezas de entrada estejam fortemente correlacionadas. Este fato deveria ser verificado experimentalmente pelo cálculo do coeficiente de correlação entre “ a ” e “ b ”, “ b ” e “ c ” e entre “ a ” e “ c ”. Para três grandezas de entrada, a equação (9.10) resume-se a:

$$u^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial a} u(a) \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial b} u(b) \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial c} u(c) \right)^2 + 2 \frac{\partial V}{\partial a} \frac{\partial V}{\partial b} u(a) u(b) r(a,b) + \\ + 2 \frac{\partial V}{\partial b} \frac{\partial V}{\partial c} u(b) u(c) r(b,c) + 2 \frac{\partial V}{\partial a} \frac{\partial V}{\partial c} u(a) u(c) r(a,c)$$

Assume-se aqui que $r(a, b) = 1$. Como a medição do lado “c” é independente das demais, assume-se $r(b, c) = 0$ e $r(a, c) = 0$. Assim, sendo $V = a.b.c$, estes dados aplicados na equação acima ficam:

$$u^2(V) = (b.c.u(a))^2 + (a.c.u(b))^2 + (a.b.u(c))^2 + 2.bc.ac.u(a).u(b).1$$

dividindo ambos os membros por V^2 , a equação acima fica:

$$\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 = \left(\frac{u(a)}{a}\right)^2 + \left(\frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2 + 2\left(\frac{u(a)}{a} \frac{u(b)}{b}\right)$$

Note que há um quadrado perfeito no segundo termo que pode ser reagrupado como:

$$\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 = \left(\frac{u(a)}{a} + \frac{u(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{u(c)}{c}\right)^2$$

Que é a solução do problema. A expressão acima também poderia ser diretamente obtida da aplicação da equação (9.9).

9.5 Incerteza padrão e incerteza expandida

Recomenda-se que a incerteza associada à medição indireta seja estimada através das estimativas das incertezas padrão de cada grandeza de entrada. Somente após obter a incerteza padrão combinada da medição indireta, determina-se a correspondente incerteza expandida.

Também neste caso, a incerteza expandida é estimada pela multiplicação da incerteza padrão combinada pelo respectivo fator de abrangência. O fator de abrangência é determinado em função do número de graus de liberdade efetivo, obtido a partir da equação de Welch-Satterthwaite (8.13), conforme abordado no capítulo 8. O fator de abrangência é obtido da tabela de coeficientes também apresentada neste capítulo.

O número de graus de liberdade de cada grandeza de entrada corresponde ao número de graus de liberdade efetivo encontrado por ocasião da sua estimativa. Se esta informação não é disponível, deve ser aproximadamente estimado em função das condições de medição. Após o cálculo de ν_{ef} , determina-se k_{95} e, finalmente:

$$U_{95} = k_{95} \cdot u$$

9.6 Problema resolvido

Determine a incerteza na determinação da velocidade média de um projétil a partir do tempo “t” que este leva para percorrer a distância “d” entre dois sensores. A distância foi medida, sendo encontrado $d = (182,4 \pm 0,4)$ m, determinado com 20 graus de liberdade efetivos e $t = (52,6 \pm 0,3)$ ms, determinado com 12 graus de liberdade, já incluindo a influência dos sensores e suas imperfeições.

Solução:

A velocidade média é calculada por $V = d/t$. Por serem medidas por instrumentos diferentes e, provavelmente, em momentos diferentes, as grandezas “d” e “t”

certamente são estatisticamente independentes. A equação (9.5) pode ser usada para estimar a incerteza de V .

Para aplicar esta equação, deve-se utilizar as incertezas padrão de “ d ” e “ t ”, que podem ser obtidas a partir da divisão da incerteza expandida pelo respectivo fator de abrangência. Os valores de k_{95} para 20 e 12 graus de liberdade são 2,13 e 2,23 respectivamente. Assim:

$$u(d) = 0,4/2,13 = 0,188 \text{ m}$$

$$u(t) = 0,3/2,23 = 0,135 \text{ ms}$$

A incerteza padrão combinada pode ser determinada por:

$$\left(\frac{u(V)}{V}\right)^2 = \left(\frac{u(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{u(t)}{t}\right)^2$$

Sendo o valor nominal de dado por: $V = 182,4 \text{ m}/52,6 \text{ ms} = 3467,7 \text{ m/s}$, a estimativa da incerteza padrão $u(V)$ será

$$\left(\frac{u(V)}{3467,7}\right)^2 = \left(\frac{0,188}{182,4}\right)^2 + \left(\frac{0,135}{52,6}\right)^2$$

$$u(V) = 9,59 \text{ m/s}$$

Como as unidades de cada grandeza são diferentes, é conveniente usar a equação de Welch-Satterthwaite na forma relativa. Assim, o número de graus de liberdade efetivo será:

$$\frac{\left(\frac{u(V)}{V}\right)^4}{\mathbf{n}_{ef}} = \frac{\left(\frac{u(d)}{d}\right)^4}{\mathbf{n}_d} + \frac{\left(\frac{u(t)}{t}\right)^4}{\mathbf{n}_t}$$

Logo, $\nu = 15,9$ e $k_{95} = 2,17$

Assim, a incerteza expandida será:

$$U_{95}(V) = 2,17 \cdot 9,59 = 20,8 \text{ m/s com } \nu = 16$$

E a velocidade poderá finalmente ser expressa por:

$$V = (3468 \pm 21) \text{ m/s}$$

Capítulo 10

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS ATRAVÉS DE MÓDULOS

Freqüentemente diferentes módulos são interligados para compor sistemas de medição específicos. Transdutores de diferentes tipos e características metrológicas são interligados à unidades de tratamento de sinais que, por sua vez, são conectadas a sistemas de indicação ou registro. As incertezas de cada um dos módulos interligados se propagam de forma a compor a incerteza combinada do sistema de medição completo.

Este problema aparece de forma tão freqüente na experimentação que é aqui tratado em detalhes. É um caso particular da análise de incertezas também denominado de *propagação de incertezas*. Este capítulo apresenta considerações e procedimentos recomendados para estimar a incerteza combinada do sistema de medição a partir das características metrológicas dos módulos interligados.

A interligação de diversos módulos para compor um sistema de medição é esquematicamente representada na figura 10.1. O comportamento metrológico individual de cada uma dos módulos é conhecido *a priori*, em termos de sua incerteza padrão $u(M_i)$ e sua correção $C(M_i)$, para as condições de operação. Deseja-se avaliar o comportamento metrológico do sistema completo.

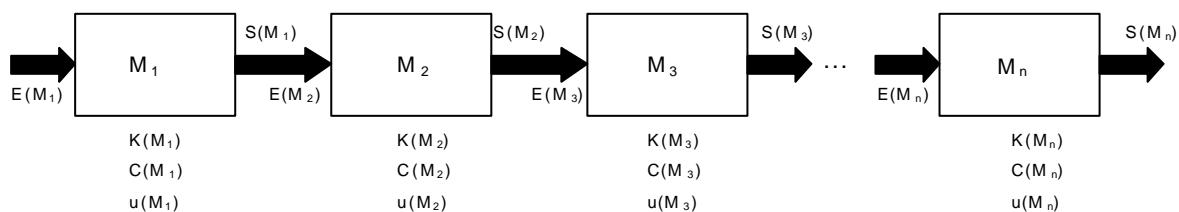


Figura 10.1 - Propagação de incertezas entre módulos interligados de um Sistema de Medição

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS ATRAVÉS DE MÓDULOS

Seja $E(M_1)$ o sinal de entrada do módulo 1 e $S(M_1)$ o seu respectivo sinal de saída. Sejam ainda conhecidas a sensibilidade deste módulo, denominada por $K(M_1)$ (a constante multiplicativa que relaciona a entrada com a saída do módulo), a correção $C(M_1)$ e a incerteza padrão $u(M_1)$. O sinal de saída do primeiro módulo está correlacionado com a entrada pela equação (10.1)

$$S(M_1) = E(M_1) \cdot K(M_1) - C(M_1) \pm u(M_1) \quad (10.1)$$

A correção $C(M_1)$ aparece com sinal negativo porque a saída do módulo é calculada em função da entrada, que o caminho contrário ao usual. Note ainda que a dispersão equivalente a uma incerteza padrão do primeiro módulo está presente no sinal de saída. Analogamente, para o módulo 2:

$$S(M_2) = E(M_2) \cdot K(M_2) - C(M_2) \pm u(M_2)$$

Quando o módulo 2 é interligado ao módulo 1, a saída do módulo 1 passa a coincidir com a entrada do módulo 2. Assim, a equação acima, quando combinada com a (10.1), leva a:

$$S(M_2) = E(M_1) \cdot K(M_1) \cdot K(M_2) - [C(M_1) \cdot K(M_2) + C(M_2)] \pm [u(M_1) \cdot K(M_2) + u(M_2)]$$

O lado direito da equação acima foi agrupado em três blocos: O primeiro bloco corresponde ao sinal de saída nominal, livre da influência de qualquer incerteza. O segundo bloco decorre dos erros sistemáticos. O terceiro é a componente associada à incerteza padrão de cada módulo.

Se esta análise for estendida para n módulos, a equação acima cresce em complexidade. Porém, já é possível notar a existência de um certo padrão que pode ser extrapolado para n módulos. Note que a entrada do bloco 1 coincide com a entrada do SM e a saída do bloco n com a saída do SM. Assim:

a) O valor nominal da saída do SM dado por:

$$S(SM) = E(SM) \cdot K(M_1) \cdot K(M_2) \cdot K(M_3) \dots K(M_n) \quad (10.2)$$

b) A influência dos erros sistemáticos, expressos através das respectivas correções de cada módulo:

$$C(SM) = (\dots(((C(M_1) \cdot K(M_2) + C(M_2))) \cdot K(M_3) + C(M_3))) \cdot K(M_4) + C(M_4)) \dots) \cdot K(M_n)$$

c) A influência da incerteza padrão de cada módulo na saída do SM:

$$u(SM) = \pm (\dots(((u(M_1) \cdot K(M_2) + u(M_2))) \cdot K(M_3) + u(M_3))) \cdot K(M_4) + u(M_4)) \dots) \cdot K(M_n)$$

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS ATRAVÉS DE MÓDULOS

Após algumas manipulações algébricas, as equações acima podem ser reescritas em termos dos erros relativos, o que leva aos seguintes resultados:

$$C_r(SM) = C_r(M_1) + C_r(M_2) + C_r(M_3) + \dots + C_r(M_n) \quad (10.3)$$

onde:

$$C_r(SM) = C(SM) / S(SM) \text{ é a correção relativa do SM}$$

$$C_r(M_i) = C(M_i) / S(M_i) \text{ é a correção relativa do módulo } i$$

e

$$u_r(SM) = \pm \sqrt{u_r^2(M_1) + u_r^2(M_2) + u_r^2(M_3) + \dots + u_r^2(M_n)} \quad (10.4)$$

onde:

$$u_r(SM) = u(SM) / S(SM) \text{ é a incerteza padrão relativa do SM}$$

$$u_r(M_i) = u(M_i) / S(M_i) \text{ é a relativa do módulo } i$$

As equações (10.2), (10.3) e (10.4) permitem a caracterizar o comportamento do SM composto pela interligação dos n módulos a partir das características metrológicas de cada módulo individualmente.

Uma vez determinada a incerteza relativa combinada do sistema de medição é necessário determinar a incerteza expandida. Para tal, deve ser utilizada a equação de Welch-Satterwaite para estimar o número de graus de liberdade efetivos envolvido e, a partir deste, determinar o respectivo fator de abrangência.

Problema resolvido:

A indicação do voltímetro abaixo é de 2,500 V. Determinar o resultado da medição do deslocamento, efetuado com o sistema de medição especificado abaixo, composto de:

a) *Transdutor indutivo de deslocamentos:*

faixa de medição 0 a 20 mm

sensibilidade de 5 mV/mm

correção: -1 mV

incerteza padrão = 2 mV, estimada com $n = 16$

b) *Unidade de tratamento de sinais*

faixa de medição: ± 200 mV na entrada

amplificação: 100 X

correção: 0,000 V

incerteza padrão = 0.2 %, estimada com $n = 20$

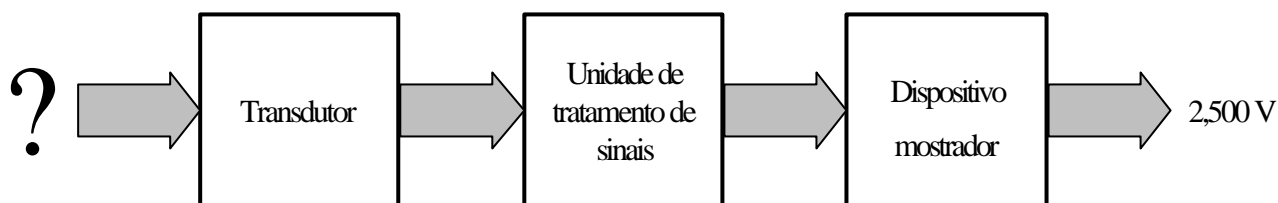
c) *Dispositivo mostrador: voltímetro digital*

faixa de medição: ± 20 V

resolução: 5 mV

correção: + 0.02% do valor indicado

incerteza padrão = 5 mV, estimada com $n = 96$



$$K(T) = 5 \text{ mV/mm}$$

$$C(T) = -1 \text{ mV}$$

$$u(T) = 2 \text{ mV}$$

$$K(UTS) = 0,1 \text{ V/mV}$$

$$C(UTS) = 0,000 \text{ mV}$$

$$u(UTS) = 0,2\%$$

$$K(DM) = 1 \text{ V/V}$$

$$C(DM) = 0,02\% \text{ da indicação}$$

$$u(DM) = 5 \text{ mV}$$

Para determinar o valor nominal do deslocamento é necessário aplicar a equação (10.2) sobre o valor indicado no voltímetro. Neste caso, $S(SM) = 2,500 \text{ V}$ e as constantes K , dadas pelas sensibilidades de cada módulo do SM, são:

Transdutor:	$K(T) = 5 \text{ mV/mm}$
UTS:	$K(UTS) = 0,1 \text{ mV/V}$
Mostrador	$K(DM) = 1 \text{ V/V}$

logo:

$$2,500 = E(SM) \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot 1$$

donde:

$$E(SM) = 5,000 \text{ mm}$$

Para determinar os erro relativos, é necessário determinar o valor de saída de cada módulo:

$$S(T) = E(T) \cdot K(T) = 5,000 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mV/mm} = 25,000 \text{ mV}$$

$$S(UTS) = E(UTS) \cdot K(UTS) = 25,000 \text{ mV} \cdot 0,1 \text{ mV/V} = 2,500 \text{ V}$$

$$S(DM) = E(DM) \cdot K(DM) = 2,500 \text{ V} \cdot 1 \text{ V/V} = 2,500 \text{ V}$$

A correção expressa em termos relativos para cada módulos é calculada por:

$$C_r(T) = C(T)/S(T) = -1 \text{ mV}/25,000 \text{ mV} = -0,04$$

$$C_r(UTS) = C(UTS)/S(UTS) = 0,000 \text{ V}/2,500 \text{ V} = 0,000$$

$$C(DM) = 0,02\% \cdot 2,500 \text{ V} = 0,5 \text{ mV}$$

$$C_r(DM) = C(DM)/S(DM) = 0,5 \text{ mV}/2500 \text{ mV} = 0,0002$$

As incertezas padrão relativas são determinadas:

$$u_r(T) = u(T)/S(T) = 2 \text{ mV}/25,000 \text{ mV} = 0,08$$

$$u(UTS) = 0,2\% \cdot 20 \text{ V} = 0,04 \text{ V}$$

$$u_r(\text{UTS}) = u(\text{UTS})/S(\text{UTS}) = 0,04 \text{ V}/2,500 \text{ V} = 0,016$$

$$u_r(\text{DM}) = u(\text{DM})/S(\text{DM}) = 5 \text{ mV}/2500 \text{ mV} = 0,002$$

A correção relativa combinada do SM é calculada pela equação (10.3):

$$C_r(\text{SM}) = -0,04 + 0,000 + 0,0002 = -0,0398$$

o que, na entrada do SM, resulta em:

$$C(\text{E}) = -0,0398 \cdot 5,000 \text{ mm} = -0,199 \text{ mm}$$

A incerteza padrão relativa combinada do SM é:

$$u_r(\text{SM}) = (0,08^2 + 0,016^2 + 0,002^2)^{1/2}$$

$$u_r(\text{SM}) = 0,01 \cdot (64 + 2,56 + 0,04)^{1/2}$$

$$u_r(\text{SM}) = 0,0815$$

O que, na entrada do SM, resulta em:

$$u(\text{E}) = 0,0815 \cdot 5,000 \text{ mm} = 0,4075 \text{ mm}$$

A incerteza expandida deve ser obtida pela multiplicação da incerteza padrão multiplicada pelo fator de abrangência para o número de graus de liberdade envolvidos, calculado por:

$$n_{ef} = \frac{(0,0815)^4}{\frac{(0,080)^4}{16} + \frac{(0,016)^4}{20} + \frac{(0,002)^4}{96}} = 17,2$$

Logo, $k_{95} = 2,17$ e:

$$U(\text{E}) = 2,17 \cdot 0,4075 \text{ mm} = 0,88 \text{ mm}$$

Assim, finalmente, o resultado da medição do deslocamento é calculado por:

$$\text{RM} = I + C \pm U$$

$$\text{RM} = (5,000 - 0,199 \pm 0,88) \text{ mm}$$

$$\text{RM} = (4,8 \pm 0,9) \text{ mm}$$

Tendo em vista que a parcela sistemática do erro de medição pode ser compensada através da correção, neste exemplo, fica claro que o módulo que mais afeta a incerteza do sistema global é o transdutor, que tem a maior incerteza padrão relativa. Para diminuir a incerteza de medição do resultado deve-se substituir este transdutor por outro de melhor qualidade. A incerteza expandida do SM não seria melhorada em nada se, por exemplo, o voltímetro fosse substituído por outro melhor. Este tipo de análise é de grande valia para dimensionar e balancear um SM composto por diversos módulos.

Capítulo 11

O RESULTADO DA MEDIÇÃO – II

O Capítulo 6 tratou da determinação do resultado da medição para o caso em que os erros de medição são predominantemente decorrentes das imperfeições do sistema de medição (SM), caracterizadas pela sua correção e repetitividade ou, alternativamente, através do seu erro máximo.

Este capítulo estende os procedimentos para determinar o resultado da medição para os casos onde várias fontes de incertezas relevantes estão envolvidas. O ponto de partida é a determinação do balanço de incertezas do processo de medição (Capítulo 8). Caso medições indiretas estejam presentes, as incertezas envolvidas devem ter sido corretamente combinadas (Capítulo 9). Se sistemas de medição compostos por módulos estiverem envolvidos os modelos de propagação de incertezas devem ser considerados (Capítulo 10).

Uma vez disponíveis estas informações, o procedimento para a determinação do resultado da medição torna-se relativamente simples. Porém, antes de repassar uma informação para terceiros é fundamental que quem efetua a medição esteja absolutamente seguro do que está fazendo e confie no resultado. Como em qualquer outra atividade na metrologia, também a determinação do resultado da medição deve estar fortemente baseada no tripé formado por: conhecimento técnico, honestidade e bom senso.

11.1 Avaliação do resultado da medição de um mensurando invariável

Do ponto de vista metrológico é sempre interessante compensar os erros sistemáticos. Há sempre um ganho que resulta na redução da incerteza de medição. Porém, por questões operacionais, seja para simplificar, seja para acelerar o processo de medição, há casos onde, deliberadamente, decide-se por não compensar os erros sistemáticos. Esta prática é metrologicamente correta, mas envolve um preço: aumento da incerteza da medição.

São estudadas duas situações distintas para a determinação do RM no caso de se tratar de um mensurando invariável, que são função da compensação ou não dos efeitos sistemáticos:

11.1.1 Compensando efeitos sistemáticos

Este caso assume que o balanço de incertezas foi devidamente efetuado e estão disponíveis valores para a correção combinada (C_c) e incerteza expandida (U), considerando todas as condições reais do processo de medição, incluindo o número de medições efetuadas e os limites de variação das grandezas de influência.

Para o caso em que apenas uma medição é efetuada, estima-se o resultado da medição por:

No caso em que “n” diferentes medições forem efetuadas, o resultado da medição pode ser avaliado a partir da média das “n” indicações disponíveis por:

$$RM = I + C_c \pm U_1 \quad (11.1)$$

sendo:

- I: indicação obtida
- C_c : correção combinada ($C_c = - Td_c$)
- U_1 : incerteza expandida estimada para uma única medição

$$RM = MI + C_c \pm U_n \quad (11.2)$$

sendo:

- MI: média das “n” indicações disponíveis
- C_c : correção combinada ($C_c = - Td_c$)
- U_n : incerteza expandida estimada para a média de “n” medições

11.1.2 Não compensando efeitos sistemáticos

Neste caso assume-se que o usuário deliberadamente optou por não compensar os efeitos sistemáticos ou que a respectiva correção combinada não estava disponível. O balanço de incertezas fornece a estimativa da incerteza expandida (U_1^*), devendo esta ter sido propriamente efetuada, considerando que nenhum dos efeitos sistemáticos foi compensado, as condições reais do processo de medição, incluindo o número de medições efetuadas e os limites de variação das grandezas de influência.

O resultado mais provável é a própria indicação, ou a média das indicações, e a incerteza de medição do resultado é a própria incerteza expandida do processo de medição.

No caso em que apenas uma medição é efetuada, o resultado da medição é dado por:

$$RM = I \pm U_1^* \quad (11.3)$$

sendo:

- l: indicação obtida
 U_1^* : incerteza expandida estimada para uma única medição quando não são compensados os efeitos sistemáticos

No caso em que “n” diferentes medições forem efetuadas, o resultado da medição pode ser avaliado a partir da média das “n” indicações disponíveis por:

$$RM = MI \pm U_n^* \quad (11.4)$$

sendo:

- MI: média das “n” indicações disponíveis
 U_n^* : incerteza expandida estimada considerando a média de “n” medições quando não são compensados os efeitos sistemáticos

Nota: Quando a incerteza expandida para a situação em que os erros sistemáticos não são compensados não é conhecida, esta pode ser estimada a partir da correção e a incerteza expandida estimada para a condição em que os erros sistemáticos são compensados por:

$$\begin{aligned} U1^* &= U1 + |Cc| \\ U_n^* &= U_n + |Cc| \end{aligned} \quad (11.5)$$

sendo:

- $U1^*$ incerteza expandida para uma medição não compensando os erros sistemáticos
 $U1$ incerteza expandida para uma medição compensando os erros sistemáticos
 U_n^* incerteza expandida para a média de "n" medições não compensando os erros sistemáticos
 U_n incerteza expandida para a média de "n" medições compensando os erros sistemáticos
 $|Cc|$ valor absoluto da correção combinada que seria aplicada para compensar os erros sistemáticos

11.2 Avaliação do resultado da medição de um mensurando variável

Esta é uma situação onde o valor do mensurando não é único, podendo apresentar variações em função do tempo, do espaço ou de amostra para amostra. O resultado da medição, idealmente, deve exprimir uma faixa que englobe os valores possíveis de serem assumidos pelo mensurando nas condições em que é observado. As incertezas do processo de medição devem também ser consideradas, o que estende a faixa ideal.

Diversas medições *sempre* devem ser realizadas, procurando abranger os diversos valores que possam ser assumidos pelo mensurando. A escolha do número, posições e instantes onde as medições serão realizadas deve ser sempre direcionada para tentar englobar uma amostra representativa da faixa de variação do mensurando.

Neste caso, quando a determinação da parcela de incertezas relativa à repetitividade, isto é, a avaliação "tipo A", obtida de um grande número de medições do mensurando, engloba também os diferentes valores do mensurando, automaticamente a parcela de

incertezas devido à repetitividade também conterà as variações do mensurando. Porém, em lugar da incerteza padrão da média, deve ser usada a incerteza padrão de uma medida apenas. Esta última recomendação justifica-se porque as variações do mensurando devem ser consideradas na íntegra, não podendo ser abrandadas pela divisão do desvio padrão pela raiz quadrada do número de medições efetuadas.

Assim, para estimar corretamente o resultado da medição equações similares às (11.2) e (11.4) podem ser usadas, porém com duas ressalvas: (a) que a incerteza expandida tenha sido estimada a partir de um conjunto suficientemente grande e representativo das variações do mensurando e (b) que a componente de incerteza padrão relativa à repetitividade tenha sido considerada para uma medição e não para a média de "n" medições.

Também aqui são estudadas duas situações distintas para a determinação do RM, classificados em função da compensação ou não dos efeitos sistemáticos:

11.2.1 Compensando efeitos sistemáticos

O resultado da medição é calculado necessariamente a partir da média das indicações, ao qual é adicionada a correção combinada. A parcela de dúvida corresponde à própria incerteza expandida acrescida da máxima variação da indicação em relação à média das indicações. Assim:

$$RM = MI + C_c \pm U_1 \quad (11.6)$$

onde:

- MI: média das "n" indicações disponíveis
- C_c : correção combinada ($C_c = - Td_c$)
- U_1 : incerteza expandida para uma única medição quando os efeitos sistemáticos são compensados mas estimada a partir de uma amostra suficientemente representativa das variações do mensurando

Note que a incerteza expandida estimada para uma medição (U_1) tem que ser usada. Embora o resultado envolva a média de várias indicações, deve ser considerado que trata-se de uma grandeza variável. A faixa de variação do mensurando só será corretamente representada a partir da distribuição das medidas efetuadas e não da distribuição da média das medições. Assim, deve ser considerada a incerteza expandida para uma medição.

Pela análise da equação (11.6) nota-se que, uma vez expresso numericamente o resultado da medição, não é mais possível identificar na incerteza da medição o quanto corresponde à incerteza do processo de medição e o quanto está associado à variação do mensurando.

11.2.2 Não compensando efeitos sistemáticos

Neste caso, o usuário deliberadamente optou por não compensar os efeitos sistemáticos ou não tinha informações disponíveis para tal. O balanço de incertezas deve ter sido realizado de forma a estimar a incerteza expandida (U_1^*) de forma apropriada, isto é: nenhum dos efeitos sistemáticos tendo sido compensado e uma

amostra de "n" medidas representativa da faixa de variação do mensurando tenha sido considerada na determinação da incerteza padrão associada à repetitividade (tipo A), e o desvio padrão das medidas (e não da média das n medidas) seja considerado.

O resultado base é calculado a partir da média das indicações. A incerteza da medição é a própria incerteza expandida determinada nas condições acima:

$$RM = MI \pm U_1^* \quad (11.7)$$

onde:

MI: média das "n" indicações disponíveis
 U₁*: incerteza expandida para uma única medição e quando os efeitos sistemáticos não são compensados, porém estimada a partir de uma amostra suficientemente representativa das variações do mensurando

11.3 Caso geral

As situações estudadas neste capítulo permitem construir o seguinte quadro geral para a determinação do resultado da medição (RM).

Tipo de mensurando	Dados Conhecidos do SM	Número de medições efetuadas	
		n = 1	n > 1
Invariável	U*	RM = I ± U ₁ *	RM = MI ± U _n *
	C _c e U	RM = I + C _c ± U ₁	RM = MI + C _c ± U _n
Variável	U*	não se aplica	RM = MI ± U ₁ *
	C _c e U	não se aplica	RM = MI + C _c ± U ₁

onde:

RM é o resultado da medição;
 I é a indicação;
 MI é a média das indicações;
 C_c é a correção combinada do SM (C_c = -Td = - estimativa do Es);
 U₁* é a incerteza expandida do processo de medição estimada para uma medição quando não são compensados os efeitos sistemáticos;
 U_n* é a incerteza expandida do processo de medição estimada para a média de "n" medições quando não são compensados os efeitos sistemáticos;
 U₁ é a incerteza expandida do processo de medição estimada para uma medição quando são compensados os efeitos sistemáticos;

U_n é a incerteza expandida do processo de medição estimada para a média de “n” medições quando são compensados os efeitos sistemáticos;

Na determinação do RM não é suficiente a simples aplicação das equações indicadas no quadro acima. Há necessidade de uma contínua avaliação da confiabilidade dos valores envolvidos, seja das medições efetuadas, seja das características do SM ou do processo de medição, para o qual é necessário o contínuo uso do bom senso.

Referências Bibliográficas

- [1] INMETRO - Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais em Metrologia. 1995
- [2] BIPM/IEC/IFCC/ISSO/IUPAC/IUPAP/OIML – Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Segunda Edição Brasileira. 1998
- [3] DOEBELIN, E. O. Measurement Systems: Application and Design – McGraw-Hill. Quarta Edição. 1990
- [4] PROFOS, Prof. D. P. Handbuchder Industriellen Messrechnik – Vulkan-Verlag. Essen. 1978
- [5] LINK, Walter. Metrologia Mecânica – Expressão da Incerteza de Medição, Programa RH-Metrologia
- [6] GUIMARÃES, Vagner A. Controle Dimensional e Geométrico – Uma Introdução à Metrologia Industrial. Ed: Universidade de Passo Fundo. 1999
- [7] THIESEN, Álvaro M. F. .Fundamentos da Metrologia Industrial – Programa RH-Metrologia. 1997
- [8] FROTA, Maurício N. & OHAVON, Pierre. Padrões e Unidades de Medida – Referências Metrológicas da França e do Brasil – INMETRO/LNM. 1998

Anexo I

O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

I.1 Necessidade de um sistema internacional

Essencial para a realização de uma medição é a existência da unidade, estabelecida por um padrão, segundo uma convenção própria, regional, nacional ou internacional.

No transcorrer do tempo, diversos foram os sistemas de unidades estabelecidas nas diferentes regiões do mundo. Em função do intercâmbio internacional de produtos e informações, bem como da própria incoerência entre unidades anteriormente adotadas, estabeleceu-se em 1960, através do "Bureau Internacional de Pesos e Medidas - BIPM" um conjunto coerente de unidades, o SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI), que consta das unidades de: base, derivadas e suplementares.

O BIPM tem por missão assegurar a unificação mundial das medidas físicas; ele é encarregado:

- de estabelecer os padrões fundamentais e as escalas das principais grandezas físicas, e de conservar os protótipos internacionais;
- de efetuar a comparação dos padrões nacionais e internacionais;
- de assegurar a coordenação das técnicas de medidas correspondentes;
- de efetuar e de coordenar as determinações relativas às constantes físicas que intervêm naquelas atividades.

A adoção das unidades do SI é no Brasil uma obrigatoriedade legal e traz uma série de pontos positivos:

- a) facilidade de entendimento das informações a nível internacional (vantagem comercial e científica);
- b) demonstração de maturidade técnico-científica através do abandono de sistemas superados.

- c) a simplificação das equações que descrevem os fenômenos físicos, pelo fato de existir consistência entre as unidades das grandezas envolvidas;

I.2 As três classes de unidades do SI

No Sistema Internacional distinguem-se três classes de unidades:

- unidades de base;
- unidades derivadas;
- unidades suplementares.

I.2.1 Unidades de base

No SI apenas sete grandezas físicas independentes são definidas, as chamadas *unidades de base*. Todas as demais unidades são derivadas destas sete. As definições destas grandezas são apresentadas na figura I.1. Embora o valor de cada grandeza seja sempre fixo não é raro que a forma de definir uma grandeza sofra alteração. Quando ocorrem, estas alterações são motivadas por algum avanço tecnológico que cria melhores condições de reprodução do valor unitário desta grandeza, isto é, praticidade e menores erros.

I.2.2 Unidades derivadas

Unidades derivadas são as unidades que são formadas pela combinação das unidades de base segundo relações algébricas que correlacionam as correspondentes grandezas. Constituem a grande maioria das grandezas em uso. A figura I.2 exemplifica algumas destas grandezas. Por serem muito empregadas, algumas grandezas recebem denominação específica, como exemplo o newton, pascal, watt, hertz, etc (a grafia com iniciais em letras minúsculas é intencional e é para diferenciar dos respectivos nomes próprios Newton, Pascal, Watt, Hertz, etc).

I.2.3 Unidades suplementares

No SI são também definidas as *unidades suplementares*. São unidades cuja definição é puramente matemática, sem que um padrão ou elemento físico seja necessário. Trata-se basicamente das unidades de ângulo plano e ângulo sólido, como mostra a figura I.3. O ângulo plano é a relação entre dois comprimentos e o Ângulo sólido é a relação entre uma área e o quadrado de um comprimento. São unidades sem dimensão. Nota-se que estas unidades também podem ser combinadas com as unidades base para formar novas unidades derivadas.

GRANDEZAS	UNIDADE SI	
	NOME	GRANDEZA
ângulo plano	radiano	rad
ângulo sólido	esteradiano	sr
velocidade angular	radiano por segundo	rad/s
aceleração angular	radiano por segundo quadrado	rad/s ²
intensidade energética	watt por esteradiano	W/sr
luminância energética	watt por metro quadrado esteradiano	W.m ⁻² .sr ⁻¹

Figura I.3 - Unidades SI suplementares e suas derivadas

observação:

É importante salientar que cada grandeza física tem uma só unidade SI, mesmo que esta unidade possa ser expressa sob diferentes formas, porém o inverso não é verdadeiro: a mesma unidade SI pode corresponder a várias grandezas diferentes.

GRANDEZA FUNDAMENTAL	UNIDADE DEFINIÇÃO	UNIDADE SÍMBOLO	ERRO ATUAL DE REPRODUÇÃO
comprimento	O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo, durante o intervalo de tempo de 1/299792458 do segundo.	m	10^{-11}
massa	O quilograma é a unidade de massa: ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma.	kg	10^{-9}
tempo	O segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do césio 133.	s	3.10^{-14}
intensidade de corrente elétrica	O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida entre dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situada à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre estes condutores uma força igual a 2×10^{-7} newton por metro de comprimento.	A	3.10^{-7}
temperatura termodinâmica	O kelvin, unidade de temperatura termodinâmica, é a fração 1/273,16 da temperatura termodinâmica do ponto tríplice da água.	K	$1K \rightarrow 3 \times 10^{-3}$
intensidade luminosa	A candela é a intensidade luminosa, numa dada direção de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540×10^{12} e cuja intensidade energética nessa direção é 1/683 watt por esterradiano.	cd	10^{-4}
quantidade de matéria	O mol é a quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quanto átomos existem em 0,012 quilogramas de carbono 12.	mol	6.10^{-7}

Figura I.1 - Unidades de Base do Sistema Internacional.

MCG 042

GRANDEZAS	UNIDADE SI		
	NOME	SÍMBOLO	EXPRESSÃO EM UNIDADE DE BASE
superfície	metro quadrado	m ²	m ²
volume	metro cúbico	m ³	m ³
velocidade	metro por segundo	m/s	m/s
aceleração	metro por segundo ao quadrado	m/s ²	m/s ²
número de ondas	1 por metro	m ⁻¹	m ⁻¹
massa específica	quilograma por metro cúbico	kg/m ³	kg/m ³
concentração quant. Matéria	mol por metro cúbico	mol/m ³	mol/m ³
volume específico	metro cúbico por quilograma	m ³ /kg	m ³ /kg
luminância	candela por metro quadrado	cd/m ²	cd/m ²
freqüência	hertz	Hz	s ⁻¹
força	newton	N	m.kg.s ⁻²
pressão	pascal	Pa	m ⁻¹ .kg.s ⁻²
energia, trabalho, quantidade de calor	joule	J	m ² .kg.s ⁻²
potência, fluxo energético	watt	W	m ² .kg.s ⁻³
carga elétrica	coulomb	C	s.A
tensão elétrica	volt	V	m ² .kg.s ⁻³ .A ⁻¹
capacitância elétrica	farad	F	m ⁻² .kg ⁻¹ .s ⁴ .A ²
resistência elétrica	ohm	Ω	m ² .kg.s ³ .A ⁻²
condutância	siemens	S	m ⁻² .kg ⁻¹ .s ³ .A ²
fluxo de indução magnética	weber	Wb	m ² .kg.s ⁻² .A ⁻¹
indução magnética	tesla	T	kg.s ⁻² .A ⁻¹
indutância	henry	H	m ² .kg.s ⁻² .A ⁻²
fluxo luminoso	lumen	lm	cd.sr
iluminamento ou aclaramento	lux	lx	m ⁻² .cd.sr
viscosidade dinâmica	pascal segundo	Pa.s	m ⁻¹ .kg.s ⁻¹
momento de uma força, torque	newton metro	N.m	m ² .kg.s ⁻²
tensão superficial	newton por metro	N/m	kg.s ⁻²
densidade de fluxo térmico	watt por metro quadrado	W/m ²	kg.s ⁻³
capacidade térmica, entropia	joule por kelvin	J/K	m ⁻² .kg.s ⁻² .K ⁻¹
calor espec., entropia espec.	joule por quilograma kelvin	J/(kg.K)	m ² .s ⁻² .K ⁻¹
energia específica	joule por quilograma	J/kg	m ² .s ⁻²
condutividade térmica	watt por metro kelvin	W/(m.K)	m.kg.s ⁻³ .K ⁻¹
densidade de energia	joule por metro cúbico	J/m ³	m ⁻¹ .kg.s ⁻²
campo elétrico	volt por metro	V/m	m.kg.s ⁻³ .A ⁻¹
densidade de carga elétrica	coulomb por metro cúbico	C/m ³	m ⁻³ .s.A
deslocamento elétrico	coulomb por metro quadrado	C/m ²	m ⁻² .s.A
permissividade	farad por metro	F/m	m ⁻³ .kg ⁻¹ .s ⁴ .A ²
densidade de corrente	ampère por metro quadrado	A/m ²	A/m ²
campo magnético	ampère por metro	A/m	A/m
permeabilidade	henry por metro	H/m	m.kg.s ⁻² .A ⁻¹
energia molar	joule por mol	J/mol	m ² .kg.s ⁻² .mol ⁻¹
entropia molar, calor molar	joule por mol kelvin	J/(mol.K)	m ² .kg.s ⁻² .K ⁻¹ .mol ⁻¹

Figura I.2 - Unidades SI derivadas

MCG 043-2

I.3 Regras para escrita e emprego dos símbolos das unidades SI

Os princípios gerais referentes a grafia dos símbolos das unidades, são:

- 1) Os símbolos das unidades são expressos em caracteres romanos (verticais) e, em geral, minúsculos. Entretanto, se o nome da unidade deriva de um nome próprio, a primeira letra do símbolo é maiúscula (Ex: hertz → Hz).
- 2) Os símbolos das unidades permanecem invariáveis no plural.
- 3) Os símbolos das unidades não são seguidos por ponto.

A Organização Internacional de Normalização (ISO) baixou recomendações adicionais para uniformizar as modalidades de emprego dos símbolos das unidades SI.

De acordo com essas recomendações:

- a) O produto de duas ou mais unidades pode ser indicado, de uma das seguintes maneiras:

Por exemplo: N.m, ou Nm

- b) Quando uma unidade derivada é constituída pela divisão de uma unidade por outra, pode-se utilizar a barra inclinada (/), o traço horizontal, ou potências negativas.

Por exemplo: m/s , $\frac{m}{s}$ ou $m.s^{-1}$

- c) Nunca repetir na mesma linha mais de uma barra inclinada, a não ser com o emprego de parênteses, de modo a evitar quaisquer ambigüidades. Nos casos complexos devem utilizar-se parênteses ou potências negativas.

Por exemplo: - m/s^2 ou $m.s^{-2}$, porém não $m/s/s$
 - $m.kg/(S^3.A)$ ou $m.kg.S^{-3}.A^{-1}$, porém não $m.kg/s^3/A$

Observação: O *quilograma*

Entre as unidades de base do Sistema Internacional, a unidade de massa é a única cujo nome, por motivos históricos, contém um prefixo. Os nomes dos múltiplos e submúltiplos decimais da unidade de massa são formados pelo acréscimo dos prefixos à palavra "grama".

Por exemplo: 10^{-6} kg = 1 miligrama (1mg), porém nunca 1 microquilograma (1 μ kg).

I.4 Múltiplos e submúltiplos decimais

No SI foram estabelecidos para as unidades os *múltiplos e submúltiplos decimais* com a nomenclatura e simbologia dada na figura I.4.

Apesar de serem previstos os múltiplos (da e h) bem como, os submúltiplos (d e c), o seu uso não é recomendado pelo SI. Desta forma, por exemplo, comprimentos, recomenda-se expressar em km, m, mm, μm , mas não em hm, dam, dm ou cm.

FATOR	PREFIXO	SÍMBOLO	FATOR	PREFIXO	SÍMBOLO
10^{24}	yotta	Y	10^{-1}	deci	d
10^{21}	zetta	Z	10^{-2}	centi	c
10^{18}	exa	E	10^{-3}	mili	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	micro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	pico	p
10^6	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^3	quilo	k	10^{-18}	atto	a
10^2	hecto	h	10^{-21}	zepto	z
10^1	deca	da	10^{-24}	yocto	y

Figura I.4 - Múltiplos e Submúltiplos Decimais das Unidades do SI.

I.5 Regras para emprego dos prefixos no SI

Os princípios gerais adotados pela ISO no emprego dos prefixos SI, são:

- 1) Os símbolos dos prefixos são impressos em caracteres romanos (verticais), sem espaçamento entre o símbolo do prefixo e o símbolo da unidade.
- 2) O conjunto formado pelo símbolo de um prefixo ligado ao símbolo de uma unidade constitui um novo símbolo inseparável (símbolo de um múltiplo ou submúltiplo dessa unidade) que pode ser elevado a uma potência positiva ou negativa e que pode ser combinado a outros símbolos de unidades para formar os símbolos de unidades compostas.

Por exemplo:

$$1\text{cm}^3 = (10^{-2}\text{ m})^3 = 10^{-6}\text{m}^3$$

$$1\text{cm}^{-1} = (10^{-2}\text{ m})^{-1} = 10^2\text{m}^{-1}$$

$$1\mu\text{s}^{-1} = (10^{-6}\text{ s})^{-1} = 10^6\text{s}^{-1}$$

$$1\text{V/cm} = (1\text{V})/(10^{-2}\text{ m}) = 10^2\text{V/m}$$

- 3) Os prefixos compostos, formados pela justaposição de vários prefixos SI, não são admitidos;
por exemplo: 1nm, porém nunca 1m μ m
- 4) Um prefixo não deve ser empregado sozinho,
por exemplo: $10^6/\text{m}^3$, porém nunca M/ m^3

I.6 Alguns enganos

São listados a seguir algumas situações errôneas muito comuns na prática que devem ser evitadas:

ERRADO	CERTO
Km	km
Kg	kg
μ	μm
a grama	o grama
2 hs	2 h
peso de 10 quilos	massa de 10 kg (quilogramas)
80 KM	80 km/h
250 °K (250 graus kelvin)	250 K (250 kelvin)

I.7 Unidades não pertencentes ao Sistema Internacional

I.7.1 Unidades em uso com o Sistema Internacional

O BIPM reconheceu que os utilizadores do SI terão necessidade de empregar conjuntamente certas unidades que não fazem parte do Sistema Internacional, porém estão amplamente difundidas. Estas unidades desempenham papel tão importante que é necessário conservá-las para uso geral com o Sistema Internacional de Unidades. Elas são apresentadas na figura I.5.

A combinação de unidades deste quadro com unidades SI, para formar unidades compostas, não deve ser praticada senão em casos limitados, a fim de não perder as vantagens de coerência das unidades SI.

NOME	SÍMBOLO	VALOR EM UNIDADES SI
minuto	min	1 min = 60 s
hora	h	1 h = 60 min = 3.600 s
dia	d	1 d = 24 h = 86.400 s
grau	°	1° = $(\pi/180)$ rad
minuto	'	1' = $(1/60)^\circ = (\pi/10.800)$ rad
segundo	"	1" = $(1/60)'$ = $(\pi/648.000)$ rad
litro	l, L	1 l = $1\text{dm}^3 = 10^{-3}\text{m}^3$
tonelada	t	1 t = 10^3 kg

Figura I.5 - Unidades em uso com o Sistema Internacional.

Do mesmo modo é necessário admitir algumas outras unidades não pertencentes ao Sistema Internacional, cujo uso é útil em domínios especializados da pesquisa

científica, pois seu valor (a ser expresso em unidades SI) tem de ser obtido experimentalmente e, portanto não é exatamente conhecido (figura I.6).

I.7.2 Unidades admitidas temporariamente

Em virtude da força de hábitos existentes em certos países e em certos domínios, o BIPM julgou aceitável que as unidades contidas na figura I.7 continuassem a ser utilizadas, conjuntamente com as unidades SI, até que seu emprego não seja mais necessário.

Estas unidades não devem todavia ser introduzidas nos domínios onde elas não são mais utilizadas.

É altamente recomendável um estudo complementar do SI, para que se tome conhecimento de uma série de detalhes interessantes e importantes com respeito a esta normalização.

NOME	SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
elétron-volt unidade (unificada) de massa atômica	eV u	(a) (b)
<p>(a) 1 elétron-volt é a energia cinética adquirida por um elétron atravessando uma diferença de potencial de 1 volt no vácuo: 1 eV = 1,602 19 x 10⁻¹⁹ aproximadamente</p> <p>(b) A unidade unificada de massa atômica é igual à fração 1/12 da massa de um átomo do nuclídeo C₁₂. 1 u = 1,660 57 x 10⁻²⁷ kg aproximadamente.</p>		

Figura I.6 - Unidades em uso com o Sistema Internacional, cujo valor em unidades SI é obtido experimentalmente.

NOME	SÍMBOLO	VALOR EM UNIDADES SI
milha marítima		1 milha marítima = 1852 m
nó		1 milha marítima por hora = (1852/3600)m/s
angstrom	Å	1 Å = 0,1nm = 10 ⁻¹⁰ m
are	a	1 a = 1 dam ² = 10 ² m ²
hectare	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
bar	bar	1 bar = 0,1MPa = 100kPa = 1000hPa = 10 ⁵ Pa

Figura I.7 - Unidades em uso temporariamente com o Sistema Internacional.

Anexo II

TERMINOLOGIA COMPLEMENTAR

A terminologia adotada neste trabalho é compatível com a regulamentada pela portaria número 029 de 10/03/95 do INMETRO, em vigor no Brasil, que assegura compatibilidade com normas internacionais da ISO (*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*).

Neste anexo são apresentadas algumas definições complementares, não contempladas por esta portaria, porém consideradas necessárias para expor de forma mais clara os conceitos e fenômenos aqui descritos.

Erro Máximo de um Sistema de Medição - $E_{máx}$

Faixa de valores simetricamente distribuída em relação ao zero que, com uma probabilidade estatisticamente definida, enquadra o erro máximo que pode ser cometido por um sistema de medição dentro de toda sua faixa de medição. Inclui as parcelas sistemática e aleatória. Normalmente adota-se 95 % de probabilidade de enquadramento. Este conceito pode ser estendido para os módulos que constituem o SM (erro máximo do indicador, erro máximo do transdutor, etc). O mesmo que *Incerteza do SM*.

Histerese - H

Histerese de um SM é um erro de medição que ocorre quando há diferença entre a indicação de um SM para um dado valor do mensurando quando este foi atingido por valores crescentes e a indicação quando atingida por valores decrescentes do mensurando.

Incremento Digital - ID

Variação mínima da indicação direta apresentada por um mostrador digital. Deve ser notado que nem sempre o último dígito varia de forma unitária.

Repetitividade - Re

É uma estimativa da faixa de valores dentro da qual, com uma probabilidade estatística definida, se situa o erro aleatório de um dado módulo ou sistema de medição. Quando não mencionado em contrário, entende-se que a

probabilidade de enquadramento do intervalo de confiança é sempre 95 %. Sua estimativa é calculada pelo produto do desvio padrão experimental pelo respectivo coeficiente “t” de Student para indicações obtidas nas mesmas condições.

Anexo III

CONCEITOS BÁSICOS DE ESTATÍSTICA

Existem funções cujo comportamento é perfeitamente previsível. Estas funções são denominadas *determinísticas*. A função $f(x) = 2x - 4$ é uma função determinística uma vez que seu valor está perfeitamente caracterizado quando x é definido. Funções determinísticas são muito empregadas em modelos matemáticos idealizados.

O mundo real não é composto apenas por funções determinísticas. Certas propriedades, como por exemplo a resistência mecânica de um material, a vida de uma lâmpada, a soma de dois dados honestos jogados ao acaso ou a temperatura máxima em Curitiba no mês de janeiro, variam de amostra para amostra. Um valor médio é obtido, porém é impossível prever exatamente qual o valor a ser encontrado na própria amostra a ser testada.

Funções que apresentam imprevisibilidade são denominadas de *aleatórias*. Como são imprevisíveis, não podem ser equacionadas através dos recursos usuais da matemática determinística. Ferramentas estatísticas são necessárias para tal.

III.1 Distribuição de probabilidade

A soma de dois dados honestos pode resultar em qualquer número entre 2 e 12. Embora exista apenas uma única combinação de dados que resulte em 2 (1+1), nota-se que existem seis diferentes combinações de dados cuja soma resulta em 7 (1+6, 2+5, 3+4, 4+3, 5+2, 6+1). As chances de que a soma de dois dados lançados ao acaso resulte em 7 são maiores do que resultem em 2. Em outras palavras, a probabilidade de 7 ser obtido é maior do que 2.

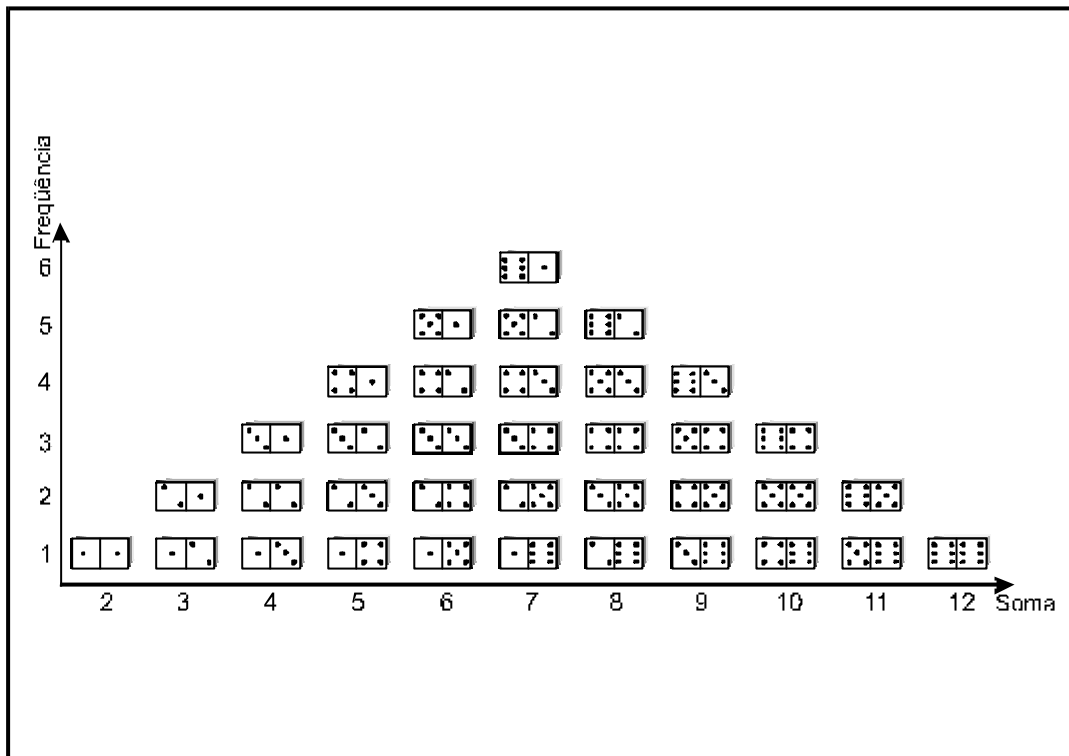
A figura III.1 melhor caracteriza o universo das possíveis combinações dos dados que levam a cada soma. No eixo horizontal estão representados os valores possíveis para a soma, enquanto que no eixo vertical representa-se o número de combinações que resultam naquela soma, ou seja, a frequência com que aquele evento se manifesta. No total são 36 combinações possíveis.

Para determinar a probabilidade de que uma determinada soma seja obtida, é suficiente dividir o número de combinações que resultam naquela soma pelo número de combinações totais possíveis. A probabilidade de que 7 seja obtido como soma é de $6/36$ ou $1/6$. As chances de obter 8 são de $5/36$.

A probabilidade de que um valor situado dentro de uma faixa de valores seja obtido pode ser calculado pela soma das probabilidades individuais. Assim, as chances de que a soma esteja dentro da faixa 7 ± 1 é calculado por $5/36 + 6/36 + 5/36$, que são as probabilidades de se obter 6, 7 e 8 respectivamente, o que resulta em $16/36$ ou $4/9$. Verifica-se que as chances de que qualquer valor entre 2 e 12 seja obtido são de 1 (100%).

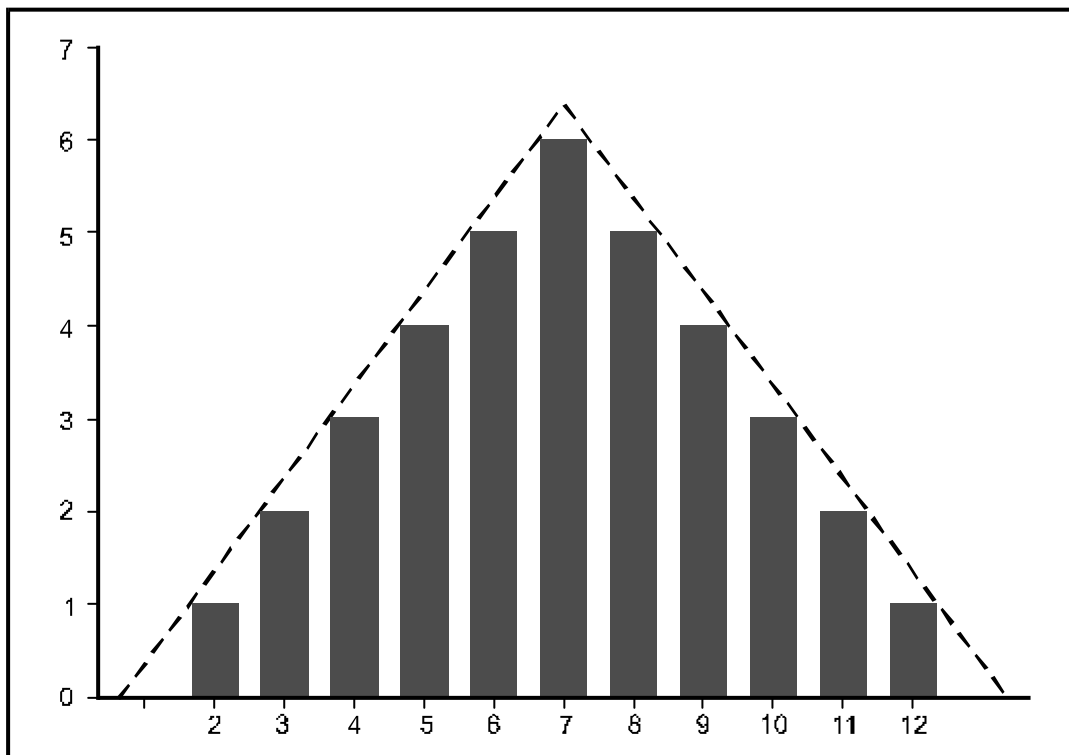
O gráfico da figura III.1 pode ter a frequência expressa em termos relativos. Para tal, divide-se a frequência de cada evento pelo número total de eventos do universo possível. No caso, divide-se cada frequência por 36. A figura III.2 mostra o gráfico resultante. Este gráfico das frequências relativas recebe o nome de *função densidade de probabilidade*, representada por $p(x)$, onde x representa cada evento envolvido e $p(x)$ a probabilidade deste evento ocorrer. No caso da soma de dois dados honestos, $p(7) = 1/6$, $p(6 \leq x \leq 8) = 4/9$, $p(-\infty < x < +\infty) = 1$.

A soma de dois dados é uma variável discreta, isto é, pode assumir apenas alguns valores inteiros e bem definidos. Porém, freqüentemente, encontra-se na natureza funções aleatórias contínuas, isto é, podem assumir qualquer valor real. Ao se analisar



AAG - 11/97 - MCG 023

Figura III.1 - Combinações Possíveis para a Soma de Dois Dados Honestos



AAG - 11/97 - MCG 024

Figura III.2 - Densidade de probabilidade para a Soma de dois Dados Honestos

estatisticamente o comportamento de uma máquina ensacadeira que, idealmente, deveria empacotar 1,00 kg do produto por saco, verifica-se, na prática, que isto não ocorre sempre. Por imperfeições no seu mecanismo, sacos com massas, por exemplo entre 0,98 kg e 1,02 kg podem resultar. Embora seja muito difícil calcular teoricamente a função densidade de probabilidade desta ensacadeira, é possível determiná-la aproximadamente através de um grande número de observações experimentais.

O aspecto da função densidade de probabilidade de uma função aleatória contínua é uma curva contínua. A figura III.3.a ilustra $p(x)$ para uma ensacadeira com distribuição de probabilidade normal ou gaussiana. Nota-se que $p(x)$ é também uma função contínua. Neste caso, não há sentido em se determinar a probabilidade de que um determinado valor real venha a ocorrer, mas apenas de que faixas venham a ocorrer. Por exemplo, para determinar as chances de que sacos $1,00 \pm 0,02$ kg sejam obtidos determina-se a área abaixo da curva $p(x)$, representada por $P(0,98 \leq x \leq 1,02)$ ¹, entre estes limites, isto é:

$$P(0,98 \leq x \leq 1,02) = \int_{x=0,98}^{x=1,02} p(x) dx \quad (\text{III.1})$$

Deve-se notar uma importante propriedade de $p(x)$: $P(-\infty < x < +\infty) = 1$, isto é, a integral de $p(x)$ entre os limites $-\infty$ e $+\infty$, que corresponde à probabilidade de x estar dentro destes limites, sempre resulta em 1.

A figura III.b apresenta a função densidade de probabilidade de outra ensacadeira com características diferentes. Nota-se que, embora a área total sob $p_b(x)$ seja também unitária, esta é uma curva mais fechada que $p_a(x)$. A máquina que possui $p_b(x)$ apresenta maior probabilidade de resultar sacos com valores mais próximos do ideal que a primeira, portanto é uma máquina melhor. Já a máquina que possui $p_c(x)$ é a pior

¹ Aqui o símbolo $p(x)$ é empregado para a função densidade de probabilidade enquanto $P(y)$ representa a probabilidade do evento y ocorrer.

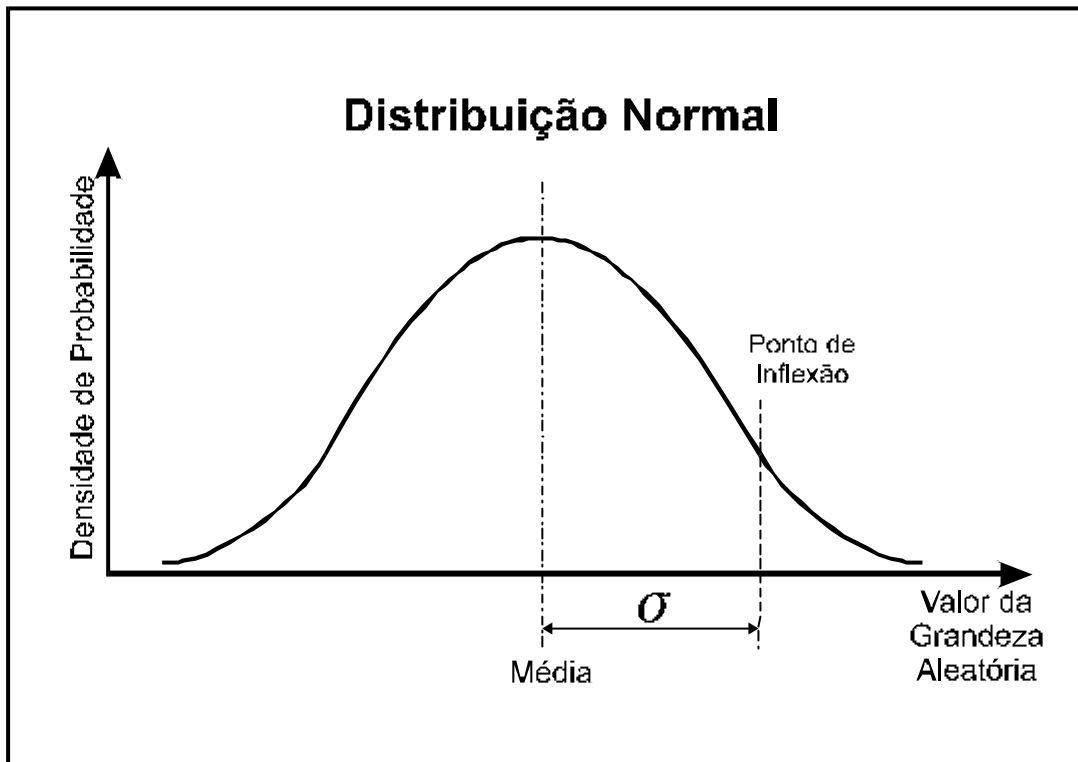


Figura III.3 - Distribuição Normal ou Gaussiana

AAG - 11/97 - MCG 025

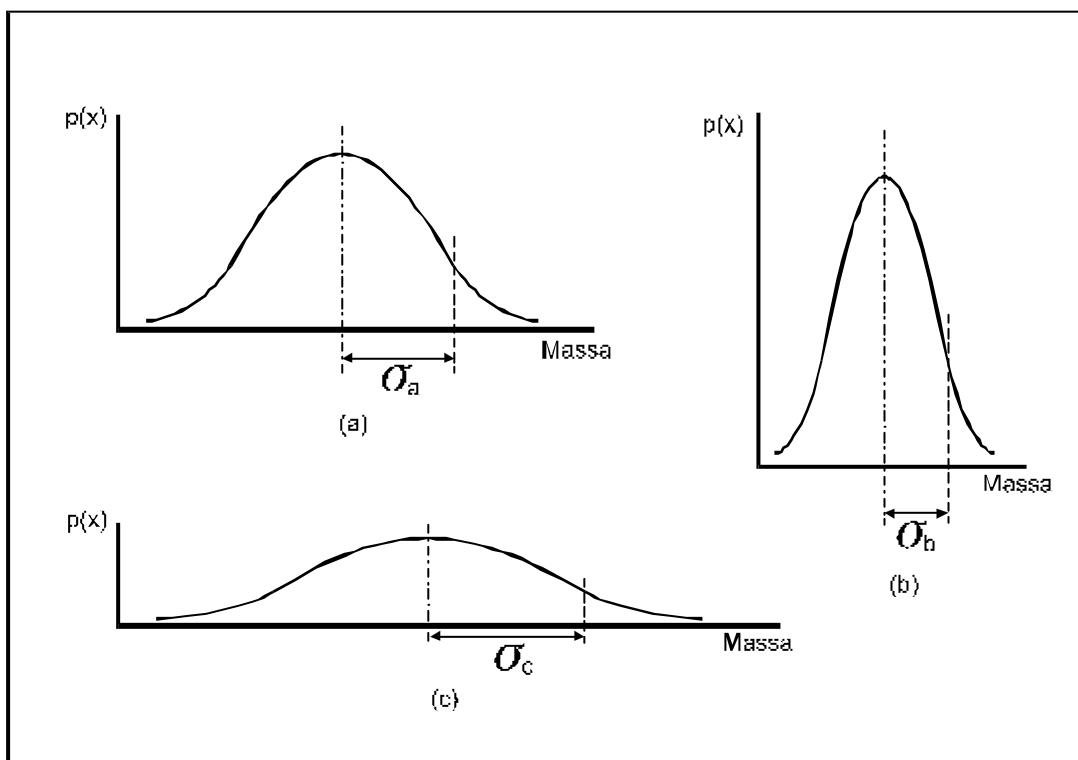


Figura III.4 - Densidade de Probabilidade para Três Ensacadeiras

a) Ensacadeira normal; b) Ensacadeira com pequena dispersão; c) Ensacadeira com grande dispersão

AAG - 10/87 - MCG 026

de todas por apresentar probabilidade relativamente altas de que valores que se afastam bastante do ideal venham a ocorrer. A característica que diferencia estas três ensacadeiras é a chamada *dispersão* que é maior quanto maior for o "espalhamento" da curva $p(x)$, isto é, a dispersão de $p_C(x)$ é maior que a dispersão de $p_B(x)$.

O desvio padrão (σ) é um parâmetro estatístico empregado para medir a dispersão de uma função aleatória. É tanto maior quanto maior for a dispersão. No caso da figura III.3 é evidente que $\sigma_C > \sigma_A > \sigma_B$. σ é calculado por:

$$s = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\infty} (x_i - m)^2}{n}} \quad (\text{III.2})$$

onde:

x_i é o valor do evento "i"

m é o valor médio de todos os eventos

Outro parâmetro importante que caracteriza uma função aleatória é o seu valor central, isto é, seu valor médio (μ). μ é calculado por:

$$m = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} x_i \quad (\text{III.3})$$

III.2 Distribuição normal

Uma das distribuições estatísticas mais comumente encontradas na prática é a distribuição *normal* ou *gaussiana*. O *teorema do limite central* demonstra que a combinação de um grande número de fatores de natureza aleatória, com qualquer distribuição, aproxima-se da distribuição normal à medida que aumenta o número dos fatores envolvidos. A forma da função densidade de probabilidade $p(x)$ da distribuição normal assemelha-se a de um sino, como mostrada na figura III.4. Apresenta simetria em torno do valor central (médio). O desvio padrão desta distribuição corresponde à distância entre o valor central e o ponto de inflexão de $p(x)$, isto é, o ponto onde a segunda derivada de $p(x)$ é zero. Sua função densidade de probabilidade é:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2}$$

onde:

$$z = \frac{x - m}{s}$$

(III.4)

e

μ é o valor médio

σ é o desvio padrão

A distribuição das dimensões de um lote de peças fabricadas por uma máquina, a distribuição em um alvo de tiros dados por um atirador, os erros de medição e a

temperatura média do dia 21 de abril de cada ano são exemplos de distribuições normais.

O cálculo da probabilidade de que uma dada função aleatória com distribuição normal esteja dentro de uma faixa de valores é também calculada pela equação (III.1), isto é, pela integral definida de $p(x)$ entre os limites considerados. No caso da distribuição normal não se pode exprimir a integral de $p(x)$ como uma função simples. É comum encontrar esta integral na forma de tabelas normalizadas. Entretanto, existem alguns valores particulares que, por serem muito empregados na prática, devem ser citados.

Se tratando de uma função aleatória com distribuição normal, valor médio μ e desvio padrão σ , é possível calcular as seguintes probabilidades:

$$P(\mu - \sigma < x < \mu + \sigma) = 0.6826$$

$$P(\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma) = 0.9973$$

$$P(\mu - 1.96\sigma < x < \mu + 1.96\sigma) = 0.95$$

$$P(\mu - 2.58\sigma < x < \mu + 2.58\sigma) = 0.99$$

$$P(\mu - 3.30\sigma < x < \mu + 3.30\sigma) = 0.999$$

III.3 A natureza aleatória do erro de medição

Sabe-se que é impossível efetuar uma medição absolutamente isenta de erros. Seja em função do sistema de medição ou em função do mensurando ou do operador, o erro de medição está sempre presente. Ao se repetir a medição de um mensurando invariável, com o mesmo sistema de medição e nas mesmas condições, como por exemplo a medição repetitiva da massa de uma peça com a mesma balança, verifica-se, com frequência, que o valor obtido não se repete.

O erro de medição presente em cada indicação pode ser determinado pela diferença entre a indicação e o valor verdadeiro convencional, isto é, $E = I - VVC$. Em um SM ideal, este erro deveria ser sempre nulo. Porém, nota-se que este erro é na verdade uma função aleatória com distribuição aproximadamente normal.

O valor médio do erro de medição é o *erro sistemático* (E_s), que só poderia ser determinado baseada em um número infinito de observações, por:

$$E_s = MI - VVC$$

onde:

(III.5)

$$MI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$

e

MI é a média de infinitas indicações

VVC é o valor verdadeiro convencional

Se um número finito de observações é envolvido, a equação (III.5) pode ainda ser usada para estimar o erro sistemático. Neste caso, esta estimativa recebe o nome específico de *tendência* (T_d).

A parcela aleatória do erro de medição é simplesmente chamada de *erro aleatório*. Tratando-se de uma função aleatória, cada valor medido possui um erro aleatório diferente, e dado por: $Ea_j = I_j - MI$. A sua caracterização é realizada através da medida da dispersão da distribuição normal associada, isto é, do desvio padrão (σ).

Define-se a *repetitividade (Re)*, como sendo a faixa que, com uma probabilidade estatística definida, conterá o erro aleatório. É comum adotar a probabilidade de 95% como aceitável para a Re ². Assim, 95% dos erros aleatórios estarão dentro desta faixa. A Re é estimada por:

$$Re(95\%) = \pm 1,96 s \quad (III.6)$$

Porém, como será visto no próximo item, a estimação de σ não é tão direta.

III.4 Amostra versus população

Os conceitos de média (μ) e desvio padrão (σ) são válidos para uma função aleatória. Para caracterizá-los perfeitamente pelas equações III.2 e III.3 é necessário envolver um número infinito de valores observados desta função, isto é, toda a *população*.

Na prática, não se tem tempo para coletar um número infinito de valores. É comum considerar apenas uma *amostra* de n valores desta população. A média e o desvio padrão da população são *estimados* a partir da média, do desvio padrão e do tamanho da amostra. A média e o desvio padrão da amostra são calculados por:

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

e

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (III.8)$$

Esta estimativa só é confiável para valores grandes de n . Se amostras pequenas são envolvidas ($n < 200$), é necessário aplicar um coeficiente de correção (t) conhecido como *coeficiente t-Student*. O coeficiente t-Student é função da probabilidade de enquadramento desejada (P) e do tamanho da amostra (n). A figura III.5 apresenta valores tabelados para “ t ” como função de n e de P . Assim, a repetitividade associada ao erro aleatório pode ser estimada por:

$$Re = \pm t \cdot s \quad (III.9)$$

A média verdadeira da população (μ), calculada a partir dos parâmetros da amostra, não pode ser determinada exatamente. Alguma incerteza ainda resultará. Pode-se

² Alguns autores adotam 99,7%, o que corresponde a $\pm 3\sigma$

mostrar que a média da população estará situada dentro da seguinte faixa, determinada de *intervalo de confiança da média*:

$$\bar{x} \pm \frac{t}{\sqrt{n}} s = \bar{x} \pm \frac{Re}{\sqrt{n}} \quad (\text{III.9})$$

onde:

- \bar{x} é a média da amostra
- s é o desvio padrão da amostra
- t é o coeficiente t-Student
- n é o tamanho da amostra

III.5 Outras distribuições estatísticas

Existem situações na prática onde é conveniente modelar certos efeitos ou fenômenos por meio de outras distribuições distintas da normal. Neste texto, não será discutida a aplicabilidade das diversas distribuições em problemas de metrologia.

a) Distribuição retangular

É caracterizada por apresentar a mesma densidade de probabilidade para todos os valores dentro dos limites dados por " $m - a$ " e " $m + a$ ", e zero fora destes (figura III.6). Seu desvio padrão é dado por:

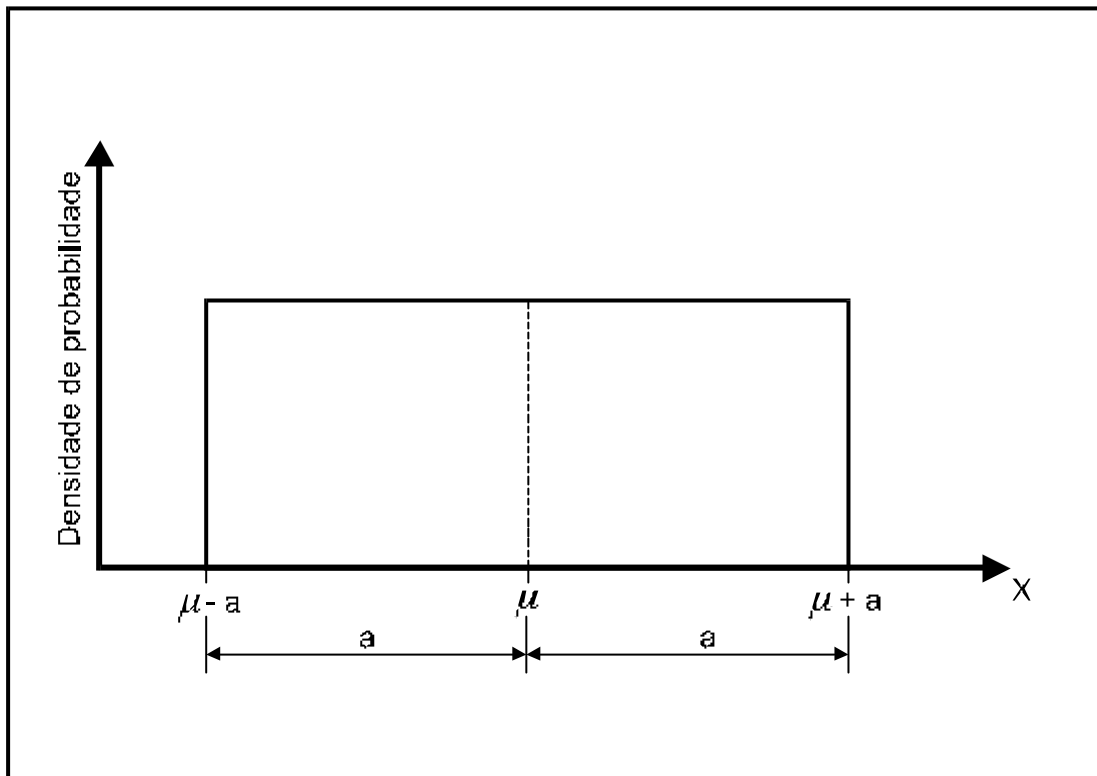
$$s = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

b) Distribuição triangular

Número de valores Individuais (n)	Valores do coeficiente t de Student			
	P = 68,3% 1,00 σ	P = 95,0% 1,96 σ	P = 99,0% 2,58 σ	P = 99,7% 3,00 σ
2	1.839	12.706	63.656	235.774
3	1.322	4.303	9.925	19.206
4	1.198	3.182	5.841	9.219
5	1.142	2.776	4.604	6.620
6	1.111	2.571	4.032	5.507
7	1.091	2.447	3.707	4.904
8	1.077	2.365	3.499	4.530
9	1.067	2.306	3.355	4.277
10	1.059	2.262	3.250	4.094
11	1.053	2.228	3.169	3.957
12	1.048	2.201	3.106	3.850
13	1.044	2.179	3.055	3.764
14	1.041	2.160	3.012	3.694
15	1.038	2.145	2.977	3.636
16	1.035	2.131	2.947	3.586
17	1.033	2.120	2.921	3.544
18	1.031	2.110	2.898	3.507
19	1.029	2.101	2.878	3.475
20	1.028	2.093	2.861	3.447
21	1.026	2.086	2.845	3.422
22	1.025	2.080	2.831	3.400
23	1.024	2.074	2.819	3.380
24	1.023	2.069	2.807	3.361
25	1.022	2.064	2.797	3.345
26	1.021	2.060	2.787	3.330
27	1.020	2.056	2.779	3.316
28	1.020	2.052	2.771	3.303
29	1.019	2.048	2.763	3.291
30	1.018	2.045	2.756	3.280
40	1.014	2.023	2.708	3.204
60	1.009	2.001	2.662	3.132
120	1.005	1.980	2.618	3.064
∞	1.000	1.960	2.580	3.000

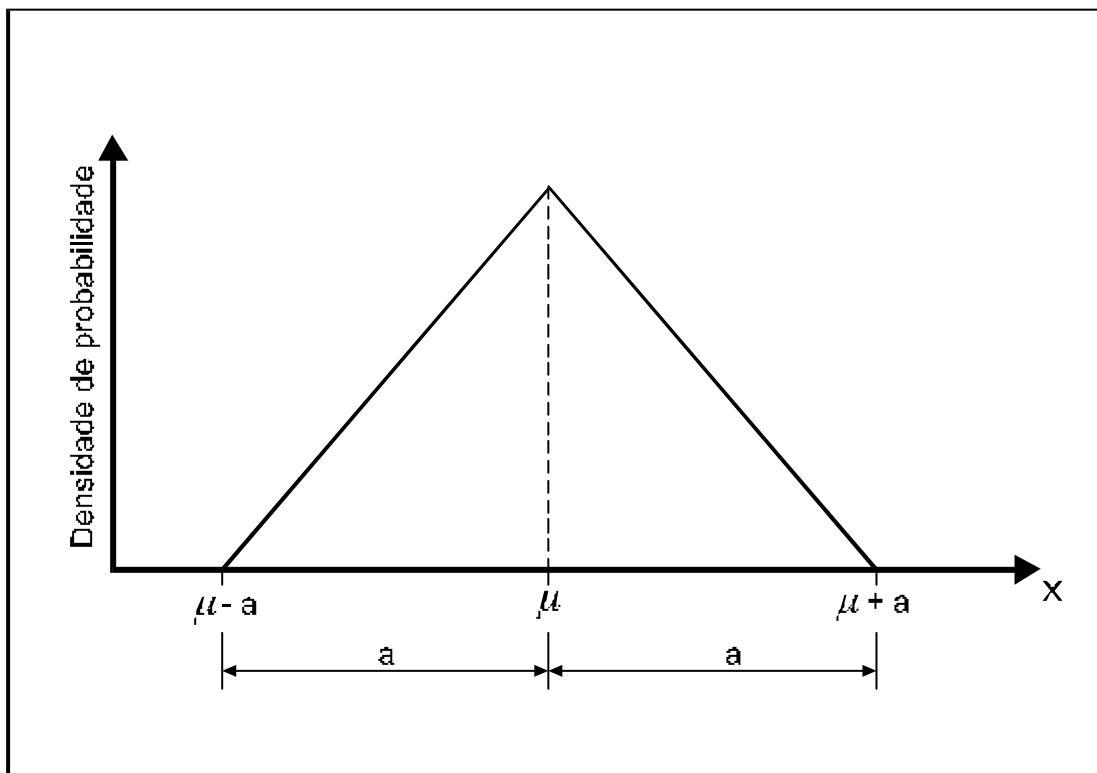
Figura III.5 - Tabela de Coeficientes de Student para vários níveis de probabilidade

AAG - 05/99 MCG 044



AAC - 11/37 - MCG 015

Figura III.6 - Distribuição de Probabilidade Retangular



AAG - 13/87 - MCG 027

Figura III.7 - Distribuição de Probabilidade Triangular

É caracterizada por apresentar máxima probabilidade para o valor médio e decrescer linearmente até zero nos limites dados por " $m - a$ " e " $m + a$ ", e zero fora destes (figura

III.7). Seu desvio padrão é dado por: $s = \frac{a}{\sqrt{6}}$

Exercícios para o Anexo III

III.1. Classifique as variáveis abaixo como determinísticas ou aleatórias:

- A) A distância indicada no odômetro de automóveis que percorrem o trecho Florianópolis-Curitiba pela mesma estrada
- B) O horário do pôr-do-sol de uma mesma cidade ao longo do ano
- C) A massa de "uma pitada de sal" que uma cozinheira acrescenta todo dia no feijão
- D) A vida de uma lâmpada de 60W de um mesmo lote de fabricação
- E) O seno do terço do quadrado de um número

III.2. Qual a probabilidade da soma de três dados honestos estar entre 5 e 7 inclusive?

III.3. Classifique as seguintes variáveis aleatórias como discretas ou contínuas:

- A) A massa de uma "pitada de sal"
- B) A medida da massa de uma "pitadas de sal" obtida de uma balança com resolução de 0,1g
- C) A vida de lâmpadas de um mesmo lote de fabricação
- D) O tempo expresso em horas correspondente à vida de uma pessoa do sexo masculino residente em uma dada cidade
- E) As várias medidas efetuadas da massa de uma mesma peça, efetuadas pela mesma balança

III.4. Sendo $p(x)$ a função densidade de probabilidade de uma variável aleatória contínua, determine expressões para o cálculo da probabilidade desta variável:

- A) Ser maior que o valor x_z
- B) Ser menor que o valor x_b
- C) Sendo $x_a > x_b$, estar entre estes dois valores
- D) Sendo $x_a > x_b$, ser maior que x_a ou menor que x_b

III.5. Qual a probabilidade de uma variável aleatória com distribuição normal com média 18,00g e desvio padrão 0,12g situar-se dentro da faixa $18,00 \pm 0,36g$? e na faixa

18,24 ± 0,12g?

III.6. Calcule a média amostral, o desvio padrão amostral e o intervalo de confiança do erro aleatório dos dados abaixo. Calcule também o intervalo de confiança dentro do qual estará a média verdadeira população completa (equação III.9)

12,8	12,5	13,0	13,1
12,6	12,9	13,1	12,8
12,3	12,8	12,6	12,7

III.7. Supondo que os dados da questão anterior referem-se à calibração de juma balança onde a mesma massa padrão de $12,500 \pm 0,002g$ foi medida diversas vezes, o que possível afirmar sobre o erro sistemático e sua incerteza?

Anexo IV

REGRAS DE COMPATIBILIZAÇÃO DE VALORES

O resultado de uma medição, envolvendo o resultado base (RB) e a incerteza do resultado (IR), deveO resultado de uma medição, envolvendo o resultado base (RB) e a incerteza do resultado (IR), devem sempre ser apresentado de forma compatível. É importante que o número e a posição dos dígitos que representam estes componentes do RM guardem uma certa relação.

Seja, por exemplo, o RM representado da forma abaixo:

$$RM = (255,227943 \pm 4,133333333) \text{ mm}$$

A forma acima é de difícil legibilidade por conter uma série de dígitos que absolutamente não trazem nenhuma informação relevante.

Sabe-se que a IR (incerteza do resultado) é um número obtido em função de certos procedimentos estatísticos, portanto é uma estimativa aproximada. Não há necessidade de apresentar o tamanho da faixa de incerteza com precisão melhor que um ou dois *algarismos significativos*¹. No caso, a representação $\pm 4,1$, ou mesmo ± 4 , é suficiente para a IR. O resultado base deve ser escrito de forma a conter o mesmo número de casas decimais que a IR.

As seguintes regras são recomendadas como forma de automaticamente estabelecer as considerações acima:

¹ Não confundir com casas decimais.

IV.1 Regras de arredondamento de valores

Quando deseja-se arredondar um número para que seja expresso com uma certa quantidade de dígitos significativos, deve-se aplicar as regras convencionais de arredondamento:

Regra 1:

Se o algarismo a direita do último dígito que se pretende representar for inferior a 5, apenas desprezam-se os demais dígitos à direita.

Exemplo:

3.1415926535 → 3.14

Regra 2:

Se o algarismo a direita do último dígito que se pretende representar for maior que 5, adiciona-se uma unidade ao último dígito representado e desprezam-se os demais dígitos à direita.

Exemplo:

3.1415926535 → 3.1416

Regra 3:

Se o algarismo a direita do último dígito que se pretende representar for igual a 5:

- a) adiciona-se uma unidade ao último dígito representado e desprezam-se os demais dígitos à direita se este dígito for originalmente ímpar;*
- b) apenas são desprezados os demais dígitos à direita se este dígito for originalmente par ou zero.*

Exemplos:

3.1415926535 → 3.142
12.625 → 12.62

IV.2 Regras de compatibilização de valores

O RM deve ser expresso preferencialmente com apenas um algarismo significativo na IR. Neste caso as regras de compatibilização 1 e 2 devem ser usadas:

Regra 1:

Arredondar a IR para apenas um algarismo significativo, isto é, com apenas um algarismo diferente de zero.

Regra 2:

Arredondar o RB para mante-lo compatível com a IR de forma que ambos tenham o mesmo número de dígitos decimais após a vírgula.

Exemplos:

58.33333 ± 0.1 → 58.3 ± 0.1

385.42333	± 0.21253	\rightarrow	385.4	± 0.2
37.8359	± 1	\rightarrow	38	± 1
95.94	± 0.0378	\rightarrow	9594.	± 0.04
93	± 0.002	\rightarrow	93.000	$\pm 0.002^2$

A IR pode ser representada com dois dígitos significativos, quando se tratar do resultado de uma medição crítica, executada com todo o cuidado e envolvendo um grande número de medições e/ou quando a IR for relativamente grande quando comprada ao RB. Nestes casos, aplica-se a regra 3 em substituição à 1, em conjunto com a regra 2:

Regra 3:

Escrever a IR com dois algarismos significativos, isto é, com apenas dois algarismos diferentes de zero.

Exemplos:

3.1385	± 0.15	\rightarrow	3.14	± 0.15
385.46333	± 0.24374	\rightarrow	385.46	± 0.24
319.213	± 11	\rightarrow	319	± 11
6.325	± 0.414	\rightarrow	6.32	± 0.41
0.03425	± 0.0034	\rightarrow	0.0342	± 0.0034

IV.3 Observação complementares

Não se deve esquecer de apresentar a unidade do RM, observando a grafia correta do símbolo que representa a unidade, inclusive respeitando as letras maiúsculas e minúsculas, conforme o caso. A unidade deverá pertencer ao Sistema Internacional de Unidades (SI). Caso seja necessária a utilização de outra unidade não pertencente ao SI, deve-se, entre parênteses, apresentar o correspondente RM em unidades do SI. Isto mostra que não houve falta de conhecimentos na apresentação do resultado.

É recomendável o uso de parêntesis envolvendo o RB e a IR para deixar claro que ambas parcelas estão referenciadas à mesma unidade. Exemplo:

(120,6 \pm 0,9) m deve ser preferido em lugar de 120,6 \pm 0,9 m.

c) Embora na apresentação do RM sejam utilizados apenas os dígitos mínimos necessários, deve ser dito que é conveniente manter um número razoável de dígitos significativos nos cálculos intermediários e efetuar o arredondamento apenas no final. Deve se adotar, nestes cálculos, ao menos um ou dois dígitos significativos a mais que o resultante para o RB.

d) Em qualquer situação, o bom senso deve sempre prevalecer.

² Esta representação é correta se for assumido que a leitura original era de 93.000, cujos zeros não foram escritos. Se a leitura tivesse sido simplesmente truncada, independentemente dos dígitos abandonados, a representação deveria ser 93.0 \pm 0.5.