

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

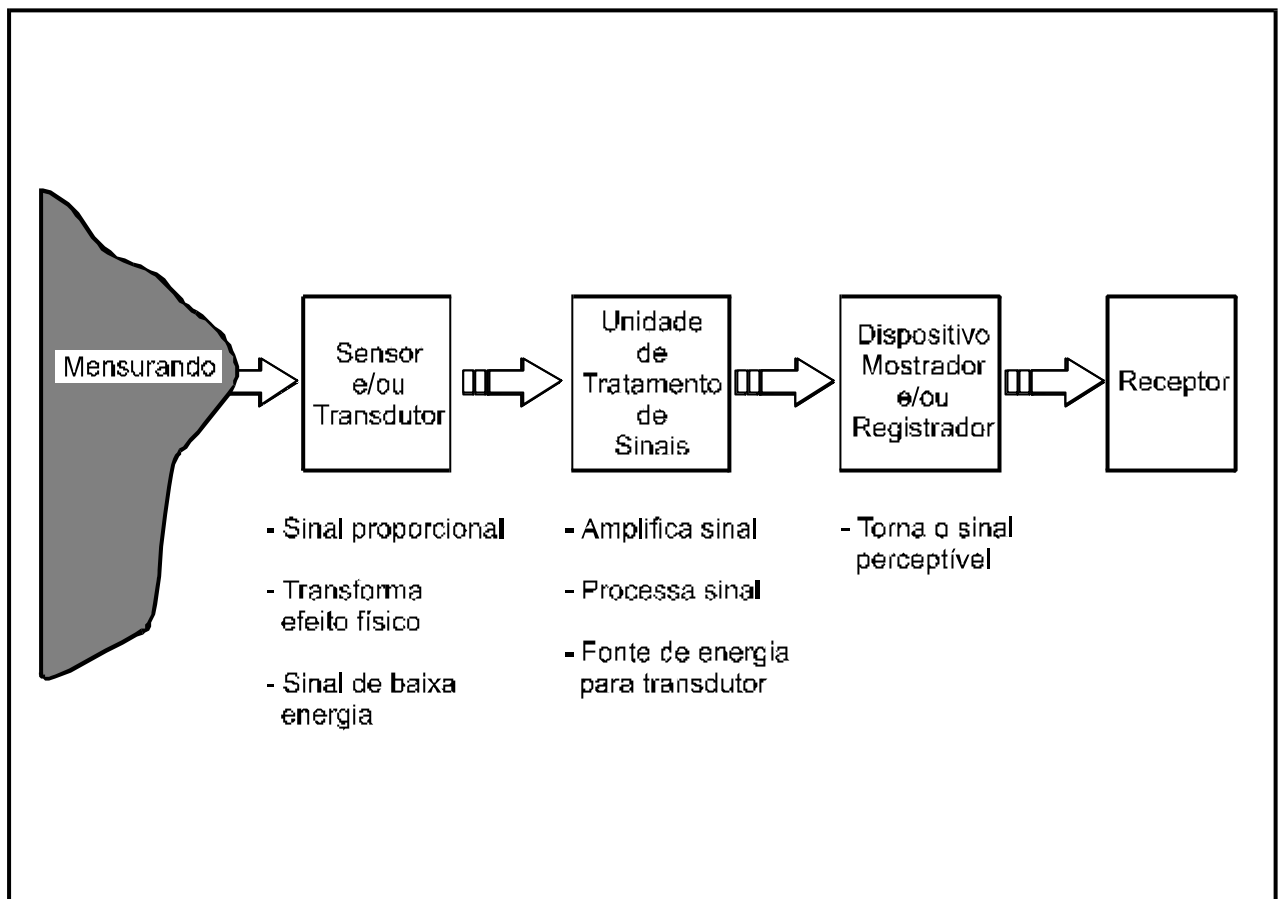
A análise sistêmica de diversos SM revela a existência de três elementos funcionais bem definidos que se repetem com grande frequência na maioria dos sistemas de medição em uso. Em termos genéricos, um SM pode ser dividido em três módulos funcionais: o *sensor/transdutor*, a *unidade de tratamento do 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 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.

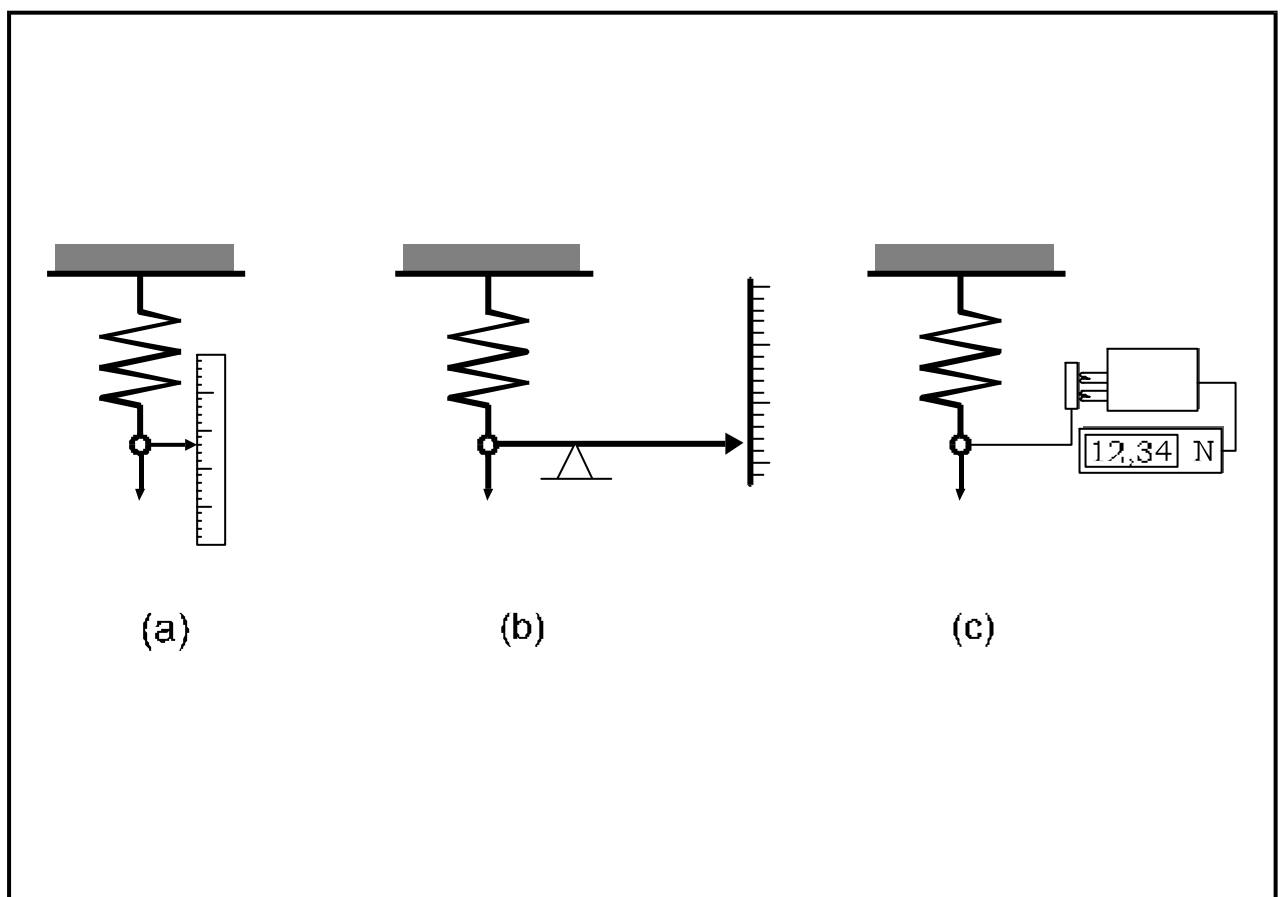
O *dispositivo mostrador* recebe o sinal tratado (amplificado, filtrado, etc) e através de recursos mecânicos, eletro-mecânicos, eletrônicos ou outro qualquer, transforma-o em um número inteligível ao usuário, isto é, produz uma indicação direta perceptível. Este módulo subentende também dispositivos 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



AAG - 11/87 - MCG 004

Figura 3.1 - Sistema Generalizado de Medição



AAG - 10/97 - MCG 005

Figura 3.2 - Três exemplos de Dinamômetros

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 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 atinge 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 os valores destas grandezas também são iguais.

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.

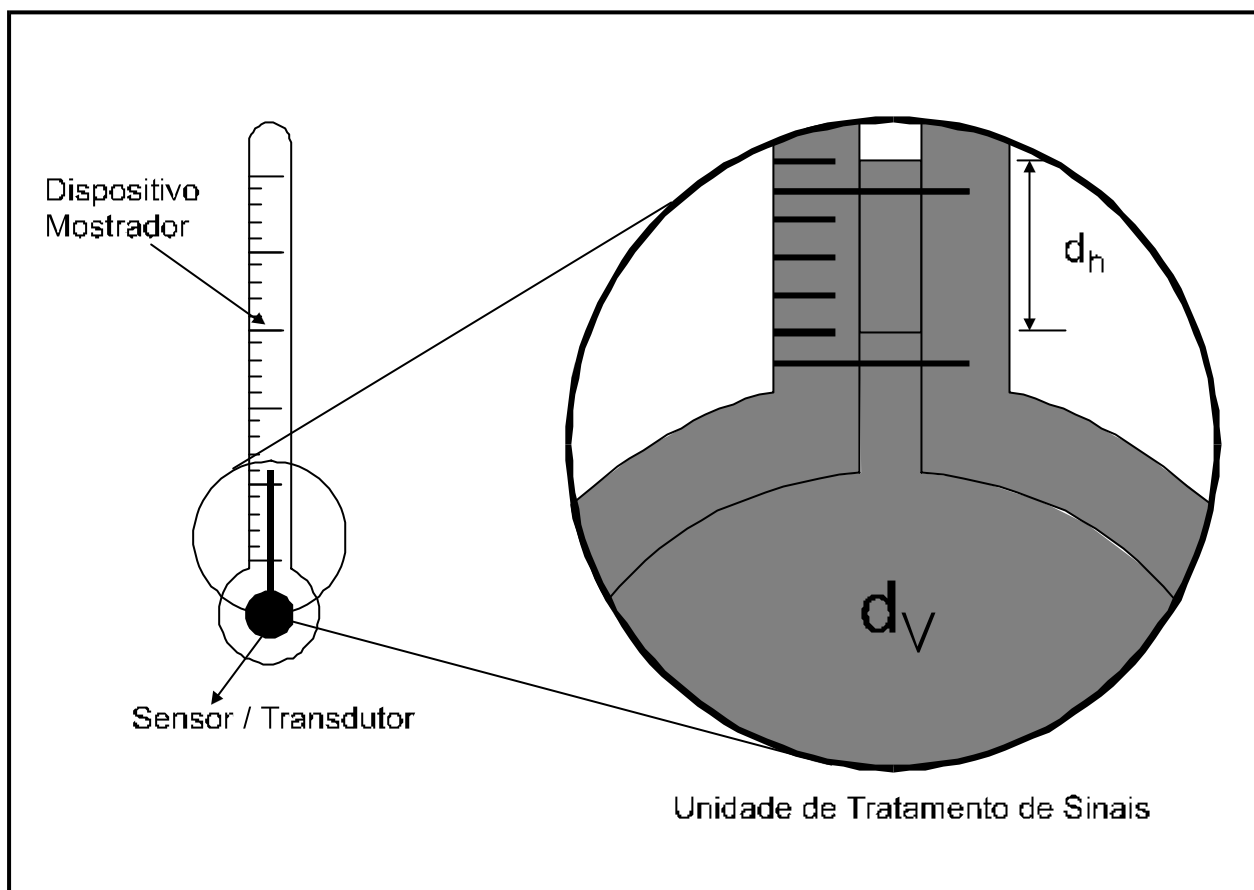


Figura 3.3 - Elementos Funcionais de um Termômetro

AAG - 11/97 - MCG 006

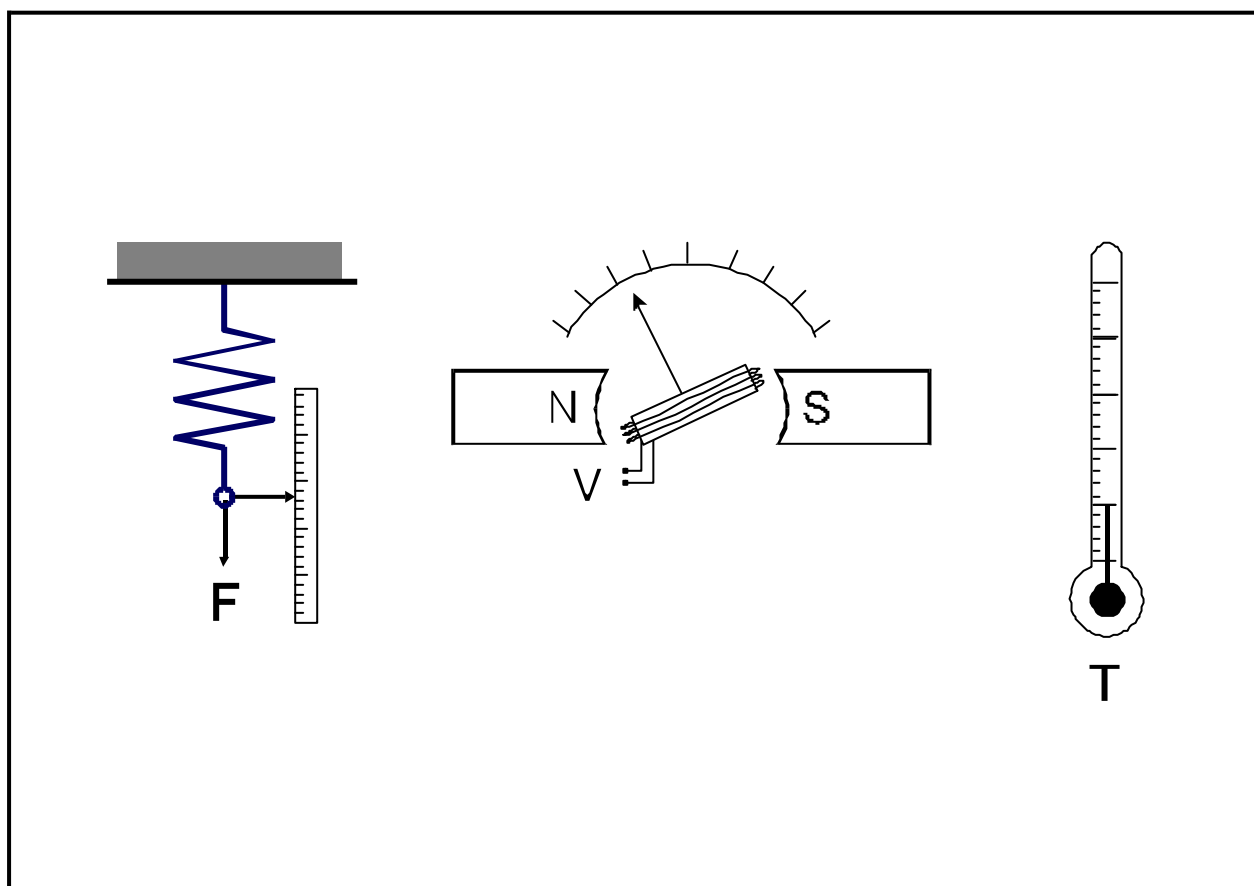


Figura 3.4 - Medição pelo Método da Indicação

AAG - 11/97 - MCG 007

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 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 : $\pm 1,999 \text{ V}$ (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 = $\pm 50 \text{ mm}$ (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:

- Nos sistemas com mostradores digitais, a resolução corresponde ao incremento digital;
- 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: $CRn(x) = F/K$.

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.

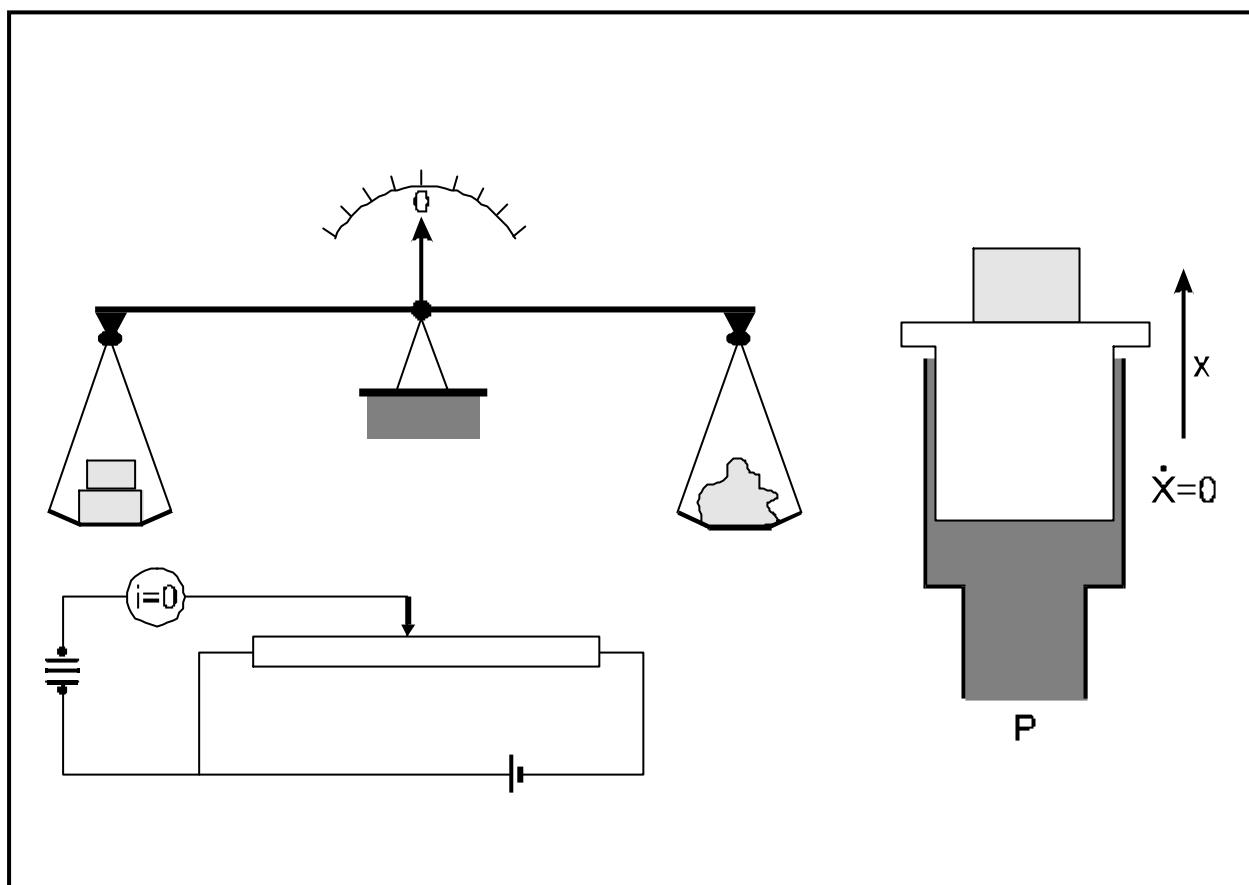


Figura 3.5 - Medição pelo Método da Comparação

AAQ - 11/97 - MCG 006

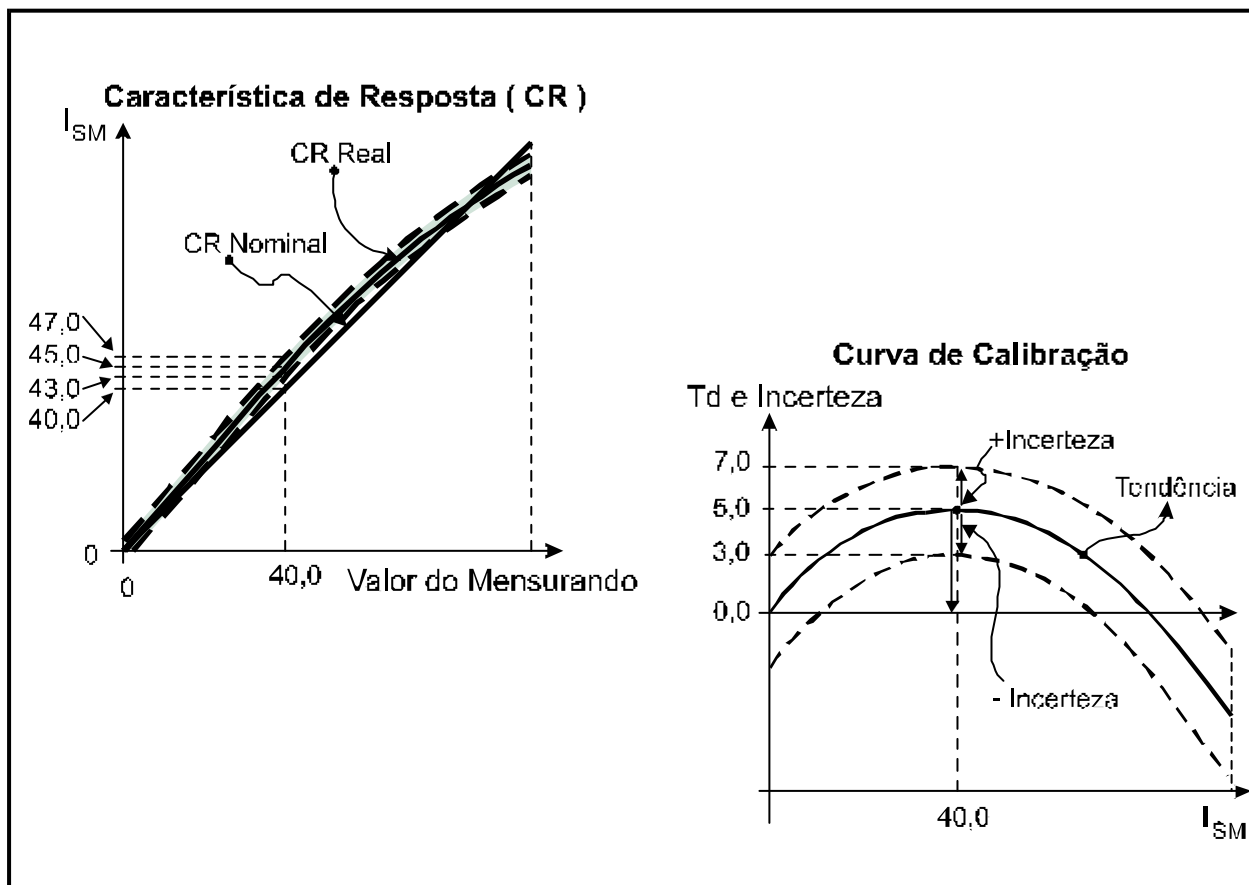


Figura 3.6 - Característica de Resposta e Curva de Calibração

AAQ - 11/97 - MCG 029

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.

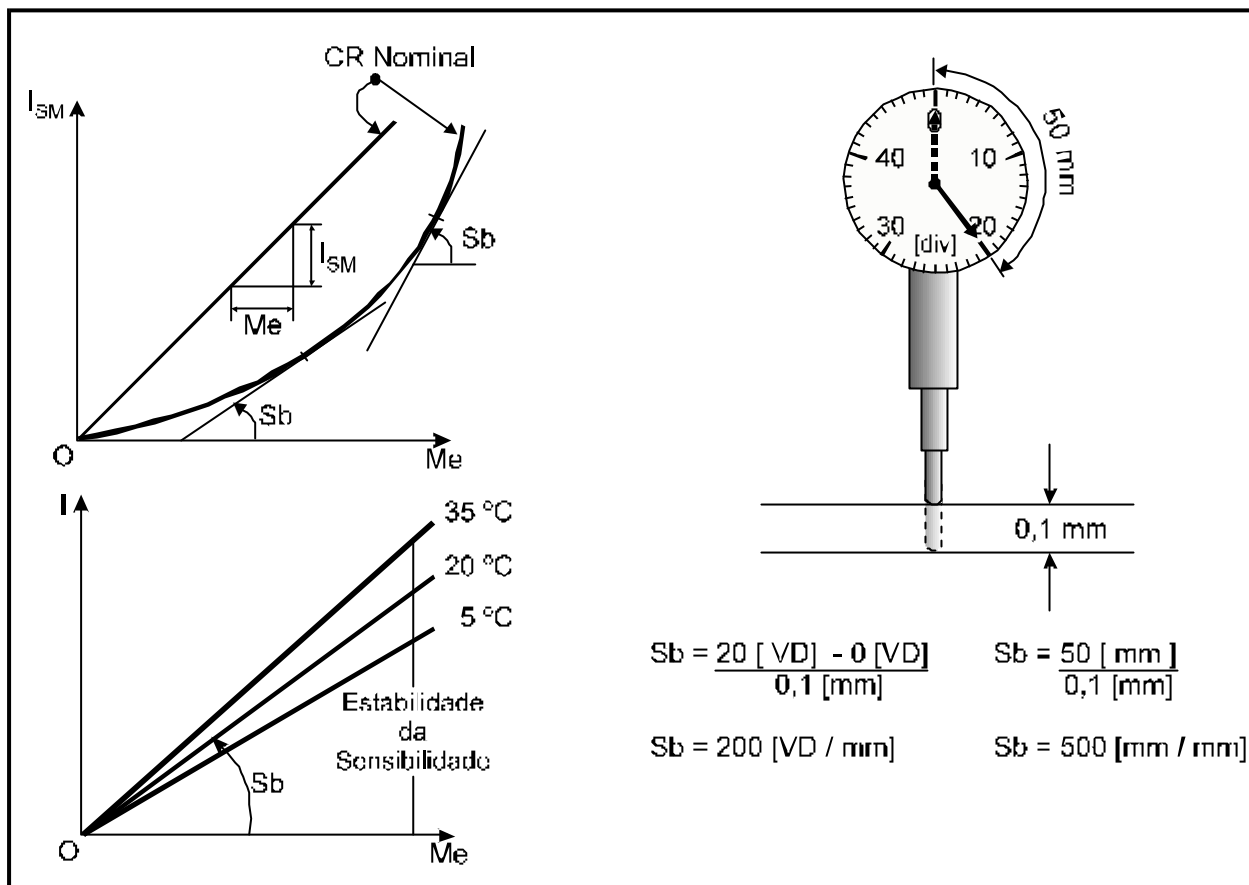
3.3.12 Erro Máximo (E_{max})

O Erro Máximo ($E_{m\acute{a}x}$) 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.

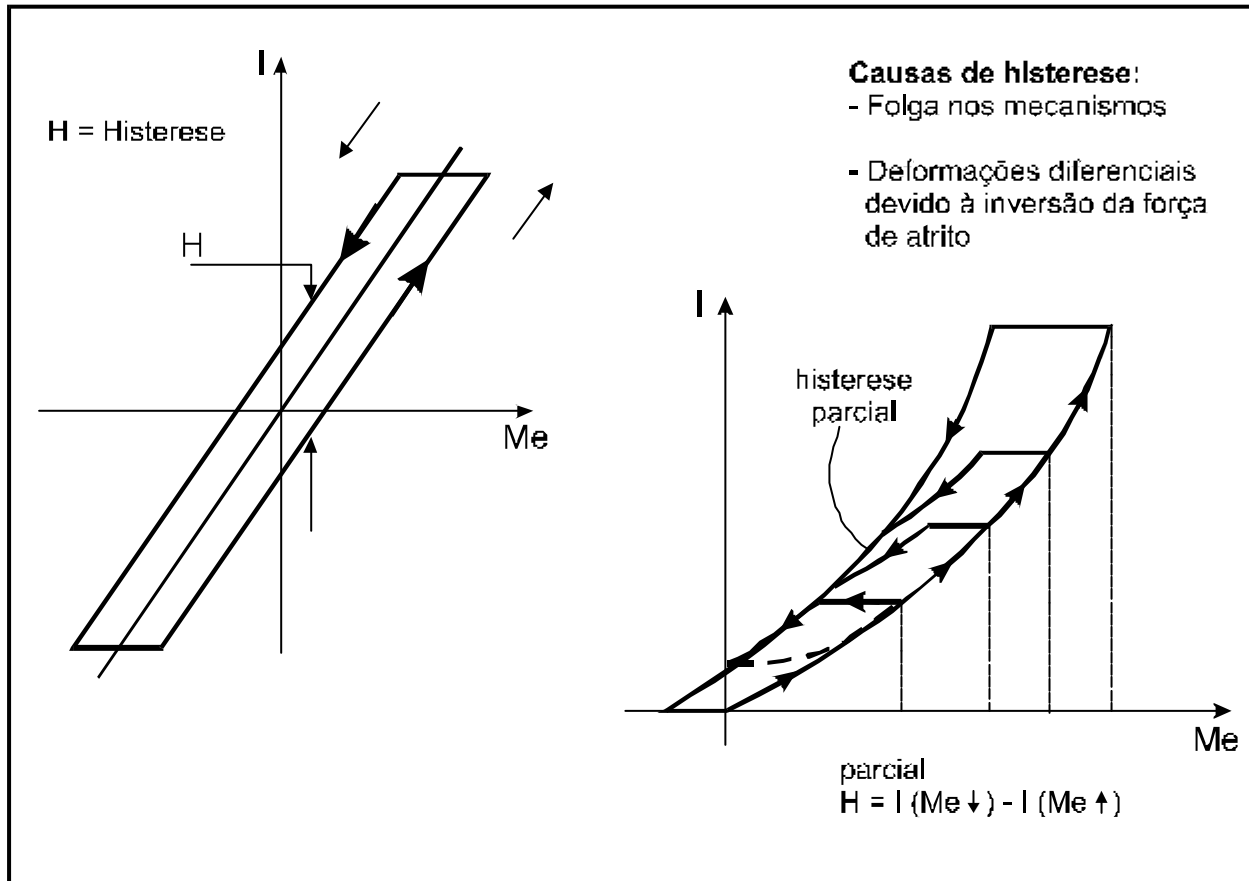
3.3.13 Sensibilidade (Sb)

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.



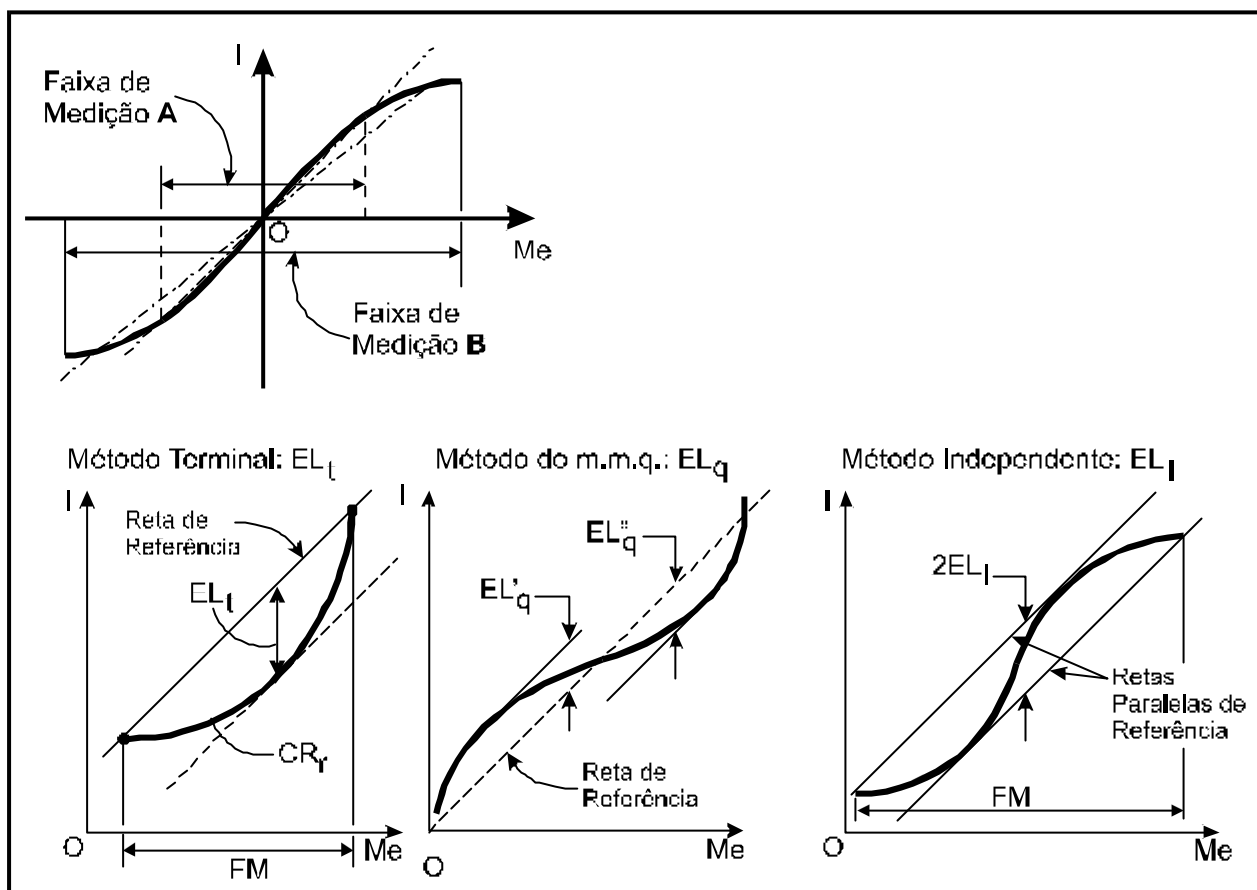
AAG - 11/97 - VCG 026

Figura 3.7 - Conceito de Sensibilidade



AAG - 11/97 - MCG 009

Figura 3.8 - Histerese



LAG - 1°/97 - MCG 010

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

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 $\pm 0,5 \text{ div/N}$ por cada kelvin de variação na temperatura.

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:

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

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

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:

$E_{\text{máx}} = \pm 1\% \text{ do VFE}$
 $Re (95) = \pm 0,1\%$

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:

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

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

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:

$Re(95) = \pm 0,5\%$ 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:

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*.