

Instrumentação e Técnicas de Medidas

Conceitos



BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) - Pavillon de Breteuil

Controle de Versões

2013 Versão 1: Com base em [Measurement Systems Application and Design, Ernest O. Doebelin, 4th edition, 1989](#), [IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary, IEC 61298-2](#), [Vocabulário Internacional de Metrologia \(VIM\)](#) e [Guia para a Expressão da Incerteza de Medição \(GUM\)](#).
Versão 1.1: Pequenas alterações de texto, informações adicionais da IEC 61298-2, alguma informação sobre calibração dinâmica.

Última alteração: 06/11/2015 (22/08/2013)

Índice

1 Aplicações da Instrumentação.....	4
2 Cadeia de Instrumentação Generalizada.....	5
2.1 Elementos Funcionais.....	5
2.2 Transdutores Ativos e Passivos.....	6
2.3 Modos de Operação Analógico e Digital.....	6
2.4 Modos de Nulo e de Deflexão.....	7
2.5 Entradas e Saídas.....	7
3 Características de Desempenho Estático e Dinâmico.....	9
3.1 Características Estáticas.....	9
3.1.1 Calibração Estática.....	9
3.1.2 Erros aleatórios e sistemáticos.....	10
3.1.3 Exatidão.....	11
3.1.4 Precisão.....	11
3.1.5 Tendência.....	11
3.1.6 Faixa.....	11
3.1.7 Faixa dinâmica.....	12
3.1.8 Resolução.....	12
3.1.9 Limiar.....	12
3.1.10 Sensibilidade estática.....	13
3.1.11 Linearidade.....	13
3.1.12 Histerese e outras não linearidades.....	14
3.1.13 Ajustes.....	15
3.2 Aspectos Numéricos.....	19
3.2.1 Algarismos significativos.....	19
3.2.2 Representação de incertezas.....	21
3.2.3 Cálculo e propagação de incertezas.....	21
3.2.4 Erro máximo.....	23
3.2.5 Erros e incertezas em instrumentos eletrônicos.....	24
3.3 Calibração Dinâmica.....	25
3.3.1 Tempo de resposta.....	25
3.3.2 Linearidade dinâmica.....	26

1 Aplicações da Instrumentação

Basicamente existem três tipos de aplicação para a instrumentação: O monitoramento de processos e operações, o controle de processos e operações e a análise experimental. No monitoramento estamos interessados apenas na medida de diferentes grandezas físicas. No controle, por outro lado, estamos interessados em medir grandezas para fechar uma malha de controle tal qual em sistemas lineares. Também pode acontecer de estarmos estudando problemas que não tenham uma teoria bem definida para explicá-lo, neste caso simulações e experimentos devem andar de mãos dadas para tentar solucionar o problema proposto. A compreensão sobre o desenho e a concepção dos experimentos também é de fundamental importância para que se consiga manter sobre controle efeitos indesejados.

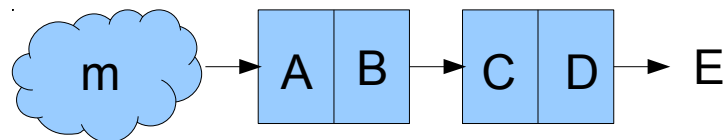
No mundo atual avaliamos, muitas vezes, que a solução de todos os problemas passa por uma análise computacional e que estes sistemas devem ser os mais eficientes. De um modo geral as pessoas já se convenceram que, no futuro, os computadores poderão resolver todos os problemas existentes. Os computadores, entretanto, não costumam ser os elementos críticos para a maioria dos problemas existentes e sim os atuadores ou sensores capazes de integrá-los ao mundo real.

De qualquer forma, o uso inteligente da instrumentação sempre ira depender do nosso conhecimento sobre o assunto, dos materiais disponíveis, e de qual desempenho cada solução proposta pode apresentar. Novos equipamentos estão sendo desenvolvidos a cada dia mas os conceitos e ideias básicas de vários sistemas de medida tem sido usadas com sucesso e continuarão assim por muitos anos ainda. Estudá-los é de grande valia para entender como funcionam e como são aplicados o que possibilitará estendê-los a outras aplicações.

2 Cadeia de Instrumentação Generalizada

2.1 Elementos Funcionais

É possível e desejável descrever a operação e o desempenho de instrumentos de medida e equipamentos de forma generalizada. A operação normalmente é descrita em termos de elementos funcionais enquanto o desempenho em termos de características estáticas e dinâmicas. Antes de mais nada, entretanto, é importante deixar claro alguns conceitos aparentemente simples mas que podem gerar confusão. Instrumento de medida, por exemplo, é definido pelo [Vocabulário Internacional de Metrologia \(VIM\)](#) como o “dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares” enquanto que um sistema de medição corresponde a um ou mais instrumentos de medição e seus insumos. Já uma cadeia de medição é uma série de elementos de um sistema de medição que formam um caminho único desde a entrada até a saída do instrumento, como na figura abaixo.



m) Mensurando; A) Elemento sensor primário; B) Elemento conversor de variável; C) Elemento de manipulação de variável; D) Elemento de transmissão de dados; E) Armazenamento ou exibição.

O elemento sensor primário é aquele que primeiro recebe energia do meio e produz uma saída que varia em função da quantidade a ser medida (**mensurando**). Em metrologia este elemento é chamado de **sensor** sendo definido como “o elemento de um sistema de medição que é diretamente afetado por um fenômeno, corpo ou substância que contém a grandeza a ser medida.” ([VIM](#)). Observe que o elemento primário sempre retira energia do meio. O sensor ideal é aquele que minimiza este efeito causando pouca influência sobre o que se deseja medir. Adicionalmente ele deve ser afetado apenas pelo mensurando desejado. A saída deste sensor primário sempre é uma variável física como deslocamento ou tensão. Algumas vezes é necessário transformar esta variável em outra mais fácil de ser tratada ou manipulada. Esta é a função do elemento conversor de variável. É interessante notar que nem todos os instrumentos incluem este bloco e outros incluem mais de uma transformação de variáveis. Também é importante dizer que algumas vezes um único elemento físico é responsável por um ou mais blocos deste diagrama.

Na sequência existe o elemento de manipulação da variável relacionada a grandeza que se deseja medir. Esta manipulação pode ser um simples amplificador ou um complexo sistema envolvendo não apenas elementos eletrônicos. Assim como os demais, este elemento não necessariamente se apresenta nesta exata posição do diagrama, podendo ser necessário seu aparecimento em diferentes posições.

Por fim existem os elementos de transmissão de dados que podem ser sistemas de exibição para o operador, telemetria ou simples alavancas para mover um ponteiro. Também podem ser sistemas para armazenar os dados obtidos permitindo uma análise ou relatório posterior.

É importante observar que todos os instrumentos de medição são criados para operarem em uma faixa de valores sendo que o seu máximo costuma ser chamado de valor nominal. O valor nominal, na verdade, é mais do que isso, ele corresponde ao valor da grandeza que serve de guia para a sua utilização apropriada. Assim ele pode ser o valor máximo de medida de um voltímetro ou de uma proveta mas também pode ser o valor de um resistor ou da sua potência máxima.

2.2 Transdutores Ativos e Passivos

Os **transdutores**, “dispositivos utilizados em medição e que fornecem uma grandeza de saída que guarda uma relação especificada com uma grandeza de entrada” ([VIM](#)), podem ser ativos ou passivos. Como este texto foi criado a partir de diferentes fontes podem aparecer nele duas definições diferentes para transdutores ativos e passivos.

Transdutores passivos serão aqueles cuja energia para seu funcionamento é fornecida total ou quase que totalmente pelo sinal de entrada. Por outro lado um transdutor ativo é aquele que uma fonte auxiliar fornece a maior parte da energia necessária para o funcionamento do transdutor. Esta definição pode gerar algumas confusões. Uma chave, por exemplo, pode ser um transdutor ativo uma vez que a energia para ligar ou desligar o restante do circuito vem de uma fonte externa e não da chave ou do objeto que ativou a chave. Amplificadores são elementos naturalmente ativos pois a energia na saída do amplificador não vem da fonte de sinal mas sim da fonte de energia.

Assim um transdutor resistivo pode ser considerado como ativo, uma vez que ele precisa ser alimentado por fontes de tensão ou corrente para resultar em uma tensão de saída. Neste caso a energia na saída do transdutor não é fornecida por ele mas sim pela fonte. Um sensor passivo por outro lado é aquele que provê sua própria energia, ou a deriva do próprio fenômeno que está sendo medido. Um exemplo poderia ser um termopar, normalmente utilizado para medir temperatura.

Atenção especial deve ser dada a estas definições pois elas podem ser utilizadas com sentidos diferentes em diferentes bibliografias. Um sentido mais eletrônico é comumente atribuído a elas e, neste caso, resistores e chaves seriam sempre transdutores passivos.

2.3 Modos de Operação Analógico e Digital

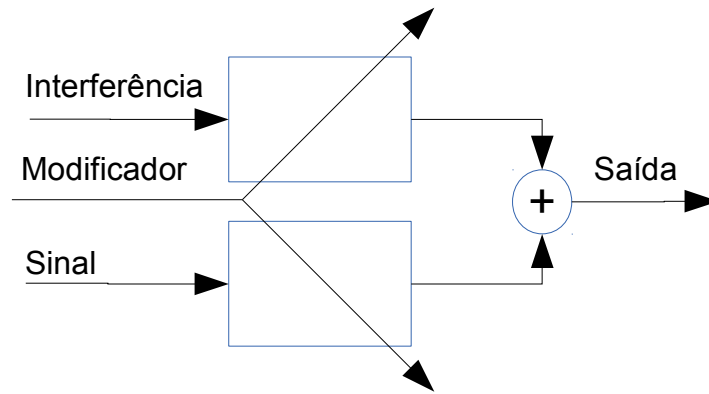
Os instrumentos de medida podem funcionar em modo digital ou analógico. Normalmente o conceito de analógico implica na medida contínua enquanto que sistemas digitais utilizam quantização do que se mede. Esta quantização, entretanto, não deve ser significativa para afetar a exatidão do equipamento mas deve ser usada como uma característica de imunidade a ruído. A limitação na exatidão geralmente está associada às porções analógicas e ao conversor A/D.

2.4 Modos de Nulo e de Deflexão

Instrumentos de medida que funcionam no modo de deflexão apresentam uma saída que muda proporcionalmente com mudanças na entrada. Classicamente são instrumentos com ponteiros que apresentam deflexão de uma força e que se opõe a um dispositivo de mola, por exemplo. Instrumentos que operam com nulo necessitam de uma realimentação (manual ou automática) para equilibrar a saída ou seja, manter os ponteiros ou indicadores em uma posição de equilíbrio ou zero. Utilizam um sensor de equilíbrio entre uma quantidade desconhecida e uma quantidade padrão. Em geral possui maior exatidão (desvio entre o valor considerado verdadeiro e o valor medido – veja definição na seção 3.1.3) e sensibilidade (razão entre a variação de saída e a variação correspondente de entrada – veja definição na seção 3.1.10) mas uma pobre resposta dinâmica. Equipamentos de nulo costumam ser muito exatos porém costumam apresentar pior característica dinâmica que os instrumentos de deflexão.

2.5 Entradas e Saídas

O instrumento ideal é aquele que responde a um único tipo de estímulo, ou seja, não é influenciado por variáveis distintas daquelas que se deseja medir. Este instrumento ideal não existe e sempre teremos que conviver com entradas que interferem diretamente na saída ou que modificam a função de transferência do instrumento.



Entradas que interferem diretamente na saída podem ser, por exemplo, vibrações ou inclinações em equipamentos mecânicos ou com partes hidráulicas ou ainda o campo de 60 Hz gerado pelas linhas de energia e que induzem tensões em diferentes elementos alterando diretamente a saída do equipamento. Entradas que modificam funções e transferência podem ser, por exemplo, a temperatura, alterando as dimensões de um equipamento mecânico ou valores de um divisor resistivo ou a saída de um amplificador, ou variações na fonte de alimentação do equipamento.

Para resolver este problema ou minimizar sua influência podemos buscar sensores ou transdutores que respondam a um único tipo de estímulo e sejam mais insensíveis a interferências e as variáveis modificadoras. Isto é difícil de obter então outras estratégias normalmente são empregadas. As principais estratégias são a realimentação com alto ganho de malha, como nos casos de servo mecanismos, correções matemáticas da saída a partir de estimativas de como as interferências e os modificadores afetam a saída do equipamento, filtragens e a inclusão de outros sensores que medem as interferências e os modificadores e os cancelam na saída do equipamento.

3 Características de Desempenho Estático e Dinâmico

3.1 Características Estáticas

3.1.1 Calibração Estática

As características estáticas de um equipamento são obtidas através de um procedimento chamado calibração estática. Esta consiste em apresentar ao instrumento diferentes valores das grandezas desejadas mantendo constante as entradas modificadoras e as interferências. A relação entre as entradas e saídas é chamada de calibração estática. Este procedimento pode ser repetido várias vezes para cada entrada desejada. A calibração então, pode ser apresentada como uma curva, uma equação ou uma tabela ou ainda como uma família delas.

Apesar de a definição acima exigir que todas as variáveis modificadoras e de interferência sejam mantidas constantes durante o processo de calibração, isto é impossível de se obter na prática. Também não é possível garantir um valor verdadeiro para a grandeza que se deseja medir. Uma definição mais verdadeira acerca da calibração é dada pelo (VIM). No VIM 2012 a **calibração** é definida como a “operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação.” Desta forma o uso da incerteza contorna os problemas práticos apresentados.

O uso da incerteza na calibração de equipamentos é relativamente nova. A abordagem tradicional, baseada em erro entre o valor medido e o valor verdadeiro da grandeza, definia que existiam erros aleatórios e sistemáticos, mas estes erros deviam ser tratados diferentemente e não há regras para determinar a combinação destes erros (na verdade eles eram tratados da mesma forma como agora, porém as definições atuais são mais consistentes e menos sujeitas a má interpretação). Na abordagem moderna o conceito de **erro** (normalmente impossível de ser determinado, pois depende do valor real, verdadeiro, da grandeza) foi substituído pelo de incerteza. Na abordagem da **incerteza** o processo é tratado estatisticamente e dois Tipos de incerteza são definidos, a incerteza do **Tipo A** e a incerteza do **Tipo B**. A incerteza do Tipo A é avaliada de forma estatística e a incerteza do Tipo B é avaliada de outras formas mas ambas são tratadas matematicamente pela teoria da probabilidade. Assim, o resultado total pode ser expresso como um **desvio padrão (incerteza padrão)**. Desta forma a incerteza é um parâmetro não negativo que caracteriza a

dispersão dos valores atribuídos a grandeza que se deseja medir. Convém salientar que não existe relação entre erro aleatório e a incerteza do Tipo A nem entre o erro sistemático e a incerteza do Tipo B.

Mais detalhes sobre este tipo de abordagem podem ser obtidos no [Guia para a Expressão da Incerteza de Medição \(GUM\)](#).

3.1.2 Erros aleatórios e sistemáticos

O erro de medição é a diferença entre o valor medido e um valor de referência. Se este valor de referência corresponde ao valor verdadeiro do mensurando então o erro (verdadeiro) é desconhecido, pois o valor verdadeiro nunca poderá ser definido. Se o valor de referência corresponde ao valor de um padrão de medição ou um valor convencional (uma constante, como a aceleração da gravidade, uma equação teórica...) então o erro pode ser determinado.

Em medidas repetidas a parcela do erro que permanece contante é chamada de erro sistemático e aquela que varia de forma imprevisível é chamada de erro aleatório. O erro aleatório é aquele devido a causas desconhecidas que ocorrem mesmo que todos os erros sistemáticos tenham sido levados em conta. Esses erros têm características estatísticas e só assim podem ser considerados.

Já os erros sistemáticos correspondem a erros previsíveis mas que não se devem a um uso inadequado dos instrumentos. Nesta família de erros podemos listar os erros instrumentais (equipamento não calibrado, danificado...), erros característicos do instrumento (diferença entre a curva ideal e a curva real de calibração...), erros dinâmicos (caso um equipamento seja calibrado em condições estáticas e usado em medidas dinâmicas, tempo de resposta inadequado, resposta em frequência, distorções de amplitude e fase...), e erros ambientais (aqueles derivados do ambiente onde o sistema de medição é utilizado como temperatura, pressão, vibrações, choques, altitude...).

Além destes, também nos deparamos com erros grosseiros devidos ao uso inadequado do instrumento como erros de leitura, erros de cálculo e registro de resultados e erros de inserção (aqueles onde o instrumento é inserido de forma incorreta no local da medição, como por exemplo o uso de um voltímetro com impedância de entrada da mesma ordem de grandeza dos resistores sobre os quais se deseja medir a tensão) ou erros de aplicação (causados pelo operador, tais como o fechamento de um sensor de pressão com bolhas de ar em seu interior). Estes erros devem ser evitados a qualquer custo.

3.1.3 Exatidão

Grau de concordância entre o valor medido e o valor verdadeiro de um mensurando. A exatidão (em inglês *accuracy*) reflete um comportamento de tendência central mas não é uma grandeza e, portanto, não pode ser quantificada numericamente. Recentemente passou a se adotar também o termo “veracidade de medição” como sendo o grau de concordância entre a média de infinitos valores medidos e o valor de referência (observe que veracidade de medição é diferente de exatidão). A veracidade de medição está ligada ao erro sistemático mas não ao erro aleatório.

Nos catálogos dos fabricantes de sensores, transdutores e equipamentos, assim como na norma [IEC 61298-2](#) a exatidão é definida como o erro máximo entre o valor verdadeiro e o valor medido. Nela são incluídos os erros relacionados a linearidade e a histerese (descritos a seguir) entre outros.

Muitas vezes a medida de erro é dada de forma percentual calculada com relação ao valor medido, valor do fundo de escala ou faixa dinâmica. Este último é o recomendado pela [IEC 61298-2](#) mas, mesmo para a faixa dinâmica, existem variantes (faixa dinâmica de saída ideal ou faixa dinâmica de entrada nominal).

3.1.4 Precisão

O conceito de precisão refere-se ao grau de concordância de uma medição realizada diversas vezes em condições de **repetibilidade** (mesmo procedimento, operadores, sistema de medição, condições de operação e local onde são realizadas medidas repetidas de um objeto num curto espaço de tempo) ou **reprodutibilidade** (diferentes procedimentos, operadores, sistema de medição, condições de operação e local onde são realizadas medidas repetidas do mesmo objeto). A precisão é uma medida de dispersão e geralmente é expressa como um desvio padrão, variância ou coeficiente de variação. A precisão está ligada a um erro aleatório.

3.1.5 Tendência

Tendência (em inglês *bias*) é a estimativa de um erro sistemático.

3.1.6 Faixa

A faixa ou, segundo o [VIM](#), “intervalo de medição” (em inglês *range*) diz respeito aos valores máximo e mínimo do parâmetro de entrada que podem ser medidos, por exemplo, um dado sensor de pressão pode operar na faixa de -60 a +400mmHg. Não existe a necessidade da faixa

incluir valores negativos e positivos, ser simétrica, ou englobar o zero. De qualquer forma a faixa é sempre informada como um intervalo de valores.

Em instrumentos completos onde a saída já é calibrada a faixa é estipulada com relação a saída. Com relação a sensores e transdutores normalmente o interesse é a grandeza que se deseja medir, ou seja, a entrada. Mesmo assim em alguns contextos o termo faixa, ou *range*, se refere apenas a um intervalo de valores independente deles serem entrada ou saída, ou ainda, variáveis modificadoras, como no caso da faixa de temperatura em que o equipamento pode operar.

3.1.7 Faixa dinâmica

A faixa dinâmica, formalmente conhecida por “amplitude de medição” (em inglês *span*), é um escalar que indica o valor da faixa total de operação do sensor indo do mínimo até o máximo da sua entrada. Assim, um sensor com faixa de -60 a $+400$ mmHg apresenta faixa dinâmica de 460mmHg.

Assim como ocorre para a definição de faixa, no caso de instrumentos calibrados a faixa dinâmica é estipulada com relação a saída do equipamento e para sensores e transdutores a faixa dinâmica é calculada com relação a grandeza que se deseja medir. O termo faixa dinâmica, ou *span*, também pode ser utilizado apenas para indicar a variação máxima de entrada, saída ou variáveis modificadores. No caso de algumas normalizações, por exemplo, como no cálculo da linearidade ou histerese, emprega-se a faixa dinâmica na grandeza onde é calculado o erro (normalmente na saída). De qualquer forma a faixa dinâmica é um escalar cujo valor é igual a diferença entre o máximo e o mínimo de uma determinada grandeza.

3.1.8 Resolução

Esta especificação é a menor mudança incremental do parâmetro de entrada que causa uma variação detectável no valor de saída do sensor. A resolução pode se expressa como uma porcentagem da faixa de leitura (ou da escala total de leitura) ou em valores absolutos. Seu valor pode depender, por exemplo, de ruído ou atrito.

3.1.9 Limiar

Maior valor de um mensurando e que não causa variação perceptível na indicação correspondente. Assim como na resolução o seu valor pode depender, por exemplo, de ruído ou atrito.

3.1.10 Sensibilidade estática

Quando uma calibração estática é realizada a sensibilidade corresponde a inclinação da curva de calibração. Esta inclinação pode variar com a relação a entrada (quando a relação entre entrada e saída é não linear) e neste caso duas coisas podem acontecer: a sensibilidade estática deixa de ser um parâmetro importante (casos muito não lineares ou onde a exatidão requerida é grande) ou uma reta de calibração é fornecida e os desvios com relação a esta reta são considerados erros. É interessante notar que a curva de calibração para um elemento sensor é diferente da curva de calibração do equipamento onde ele está inserido, mesmo que após o sensor exista apenas um amplificador com ganho unitário. Isto acontece pois a saída do sensor será uma tensão, por exemplo, e a saída do equipamento é um valor correspondente a grandeza que está sendo medida. Ou seja, o equipamento faz uma dupla conversão de valores. Um sensor de pressão, por exemplo, apresenta uma sensibilidade em V/cmH₂O mas antes de apresentar o valor no mostrador do equipamento este sinal em Volts deve ser novamente convertido para cmH₂O. Algumas vezes, quando se utilizam sensores ativos, a sensibilidade também pode aparecer como uma função da tensão de alimentação, e assim, como uma dupla razão entre grandezas. Neste caso uma sensibilidade de 10 µV/V/mmHg, por exemplo, significa que o sensor produzirá 10 µV de tensão de saída por Volt de tensão de excitação e por mmHg de pressão aplicada.

3.1.11 Linearidade

A linearidade de um sensor é um tipo de parâmetro que expressa o quanto a sua curva característica se desvia da curva de calibração. A linearidade é uma característica típica de equipamentos ou sensores cuja relação entre entrada e saída pode ser considerada linear. Neste caso o fabricante especifica uma reta de calibração para o equipamento. Segundo a [IEC 61298-2](#), entretanto, esta reta pode ser definida de três formas diferentes. Ela pode ser a reta que passa pelos pontos extremos da curva de calibração média, a reta que minimiza o erro com a curva de calibração média ou a reta que passa pela origem e minimiza o erro com a curva de calibração média.

A linearidade é normalmente especificada em termos do percentual de não linearidade, relativa a medida atual, ao fundo de escala (neste caso costuma-se apresentar as letras FS – *full scale* – ou outro indicador semelhante) ou faixa dinâmica (*FSS – full span scale*).

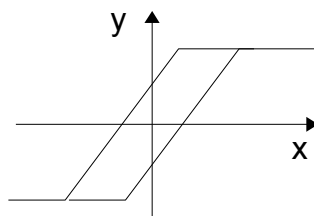
$$\text{Não Linearidade}(\%) = \frac{\text{Erro}_{MÁX}}{\text{Norm}} \cdot 100\%$$

onde $Erro_{MÁX}$ é o erro máximo de saída entre o valor medido pela curva de calibração média (real) e a reta de referência, tida como a curva de calibração ideal (veja gráfico abaixo); $Norm$ é um normalizador que pode ser a saída atual, o fundo de escala de saída ou a faixa dinâmica de saída (recomendado pela [IEC 61298-2](#)). Observe que a não linearidade é uma razão entre valores de mesma unidade e, portanto, é adimensional.

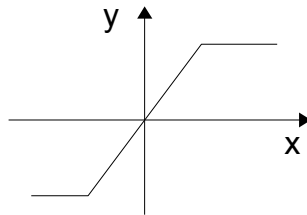
3.1.12 Histerese e outras não linearidades

Diversas não linearidades recebem nomes especiais em função de sua característica. Na sequência são descritas brevemente algumas destas não linearidades e um gráfico de cada uma é apresentado como ilustração.

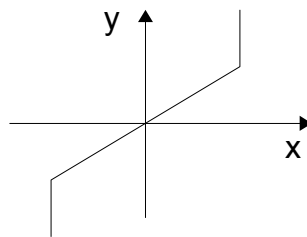
Histerese: O comportamento da saída do dispositivo difere para um mesmo valor de entrada, dependendo se o sinal está subindo ou descendo em amplitude. Para a determinação ou caracterização da histerese devem ser estimadas as diferenças de saída para cada entrada (durante a subida e a descida) e, então, o maior valor é usado. O valor pode ser indicado como um erro percentual com relação a faixa dinâmica de saída (assim como a maioria dos erros).



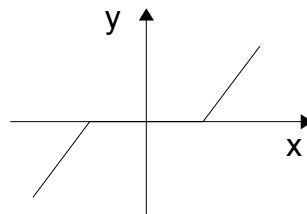
Saturação: Existe um valor máximo para a saída do instrumento (transdutor) a partir do qual incrementos na entrada não acarretam em modificações na saída



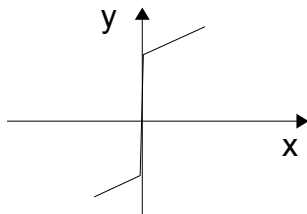
Rompimento (*breakdown*): A partir de uma dada entrada a saída dispara (aumenta com elevada derivada)



Zona Morta: Variações da entrada em uma determinada região não acarretam em saída



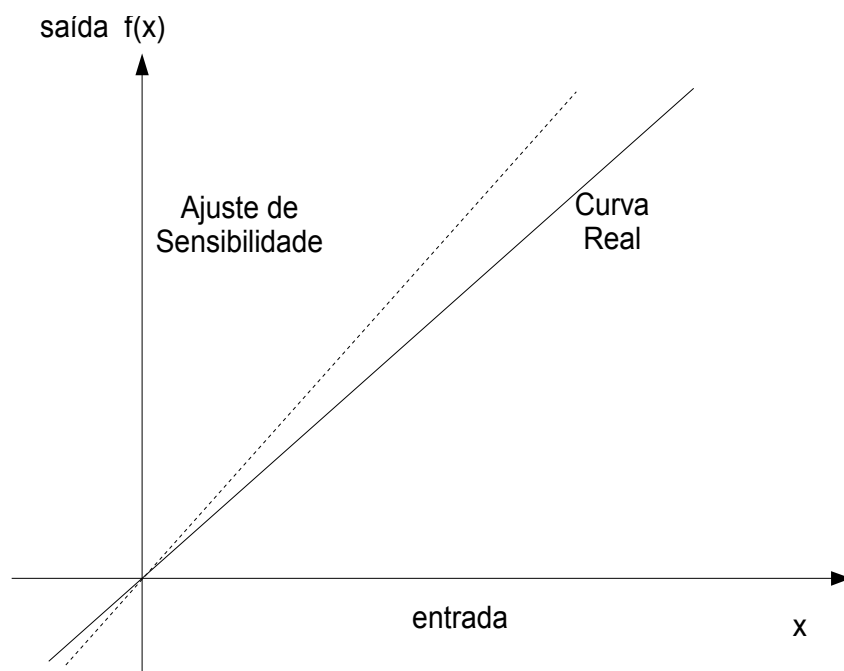
Bang Bang: É caracterizado por uma mudança abrupta da saída para uma variação mínima da entrada.



3.1.13 Ajustes

Segundo o [VIM](#) os ajustes correspondem a um “conjunto de operações efetuadas num sistema de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados

valores duma grandeza a ser medida.”. Existem vários ajustes que podem ser feitos em sistemas de medição e dentre eles podemos citar o ajuste de zero (em inglês *offset*) e o ajuste de ganho ou sensibilidade.



O ajuste de zero é feito para tornar a saída do sistema de medição igual a zero quando a entrada for nula. Também pode ser atribuído a diferença entre o valor de saída realmente observado e aquele especificado para uma dada condição. O ajuste de ganho ou sensibilidade, por sua vez, diz respeito a uma mudança de sensibilidade do sistema de medição. Isto pode ser necessário, por

exemplo, quando a sensibilidade real for diferente da sensibilidade preconizada como ideal para o sistema.

Exemplo ([IEC 61298-2](#)): Uma tabela de calibração foi feita com três ciclos de medida onde a entrada foi gradativamente aumentada e diminuída. A tabela abaixo mostra os erros relativos obtidos pela diferença entre cada medida e seu valor de referência dividido pelo valor máximo de saída. Determine a não repetibilidade, a histerese, a inexactidão, o erro máximo e a não linearidade.

<i>Entrada</i> %	<i>Ciclo 1</i>		<i>Ciclo 2</i>		<i>Ciclo 3</i>		<i>Média</i>		<i>Média Geral</i>
	<i>Erro percentual</i>		<i>Erro percentual</i>		<i>Erro percentual</i>		<i>Erro percentual</i>		
	<i>Subindo</i>	<i>Descendo</i>	<i>Subindo</i>	<i>Descendo</i>	<i>Subindo</i>	<i>Descendo</i>	<i>Subindo</i>	<i>Descendo</i>	
0		-0,04		-0,05		0,06		-0,01	-0,010
10	0,06	0,14	0,04	0,15	0,05	0,16	0,05	0,15	0,100
20	0,13	0,23	0,08	0,26	0,09	0,26	0,10	0,25	0,175
30	0,11	0,24	0,09	0,25	0,1	0,26	0,10	0,25	0,175
40	-0,04	0,13	-0,07	0,15	-0,04	0,17	-0,05	0,15	0,050
50	-0,18	-0,02	-0,16	0,01	-0,13	0,01	-0,16	0,00	-0,078
60	-0,27	-0,12	-0,25	-0,1	-0,23	-0,08	-0,25	-0,10	-0,175
70	-0,32	-0,17	-0,3	-0,16	-0,28	-0,12	-0,30	-0,15	-0,225
80	-0,27	-0,17	-0,26	-0,15	-0,22	-0,13	-0,25	-0,15	-0,200
90	-0,16	-0,06	-0,15	-0,05	-0,14	-0,04	-0,15	-0,05	-0,100
100	0,09		0,11		0,1		0,10		0,100

Não repetibilidade (tracejado): $0,13 - 0,08 = 0,05\%$

Histerese (pontilhado – mesmo ciclo): $0,15 - (-0,07) = 0,22\%$

Inexactidão (linha cheia – máximo e mínimo): $[-0,32\%; 0,26\%]$

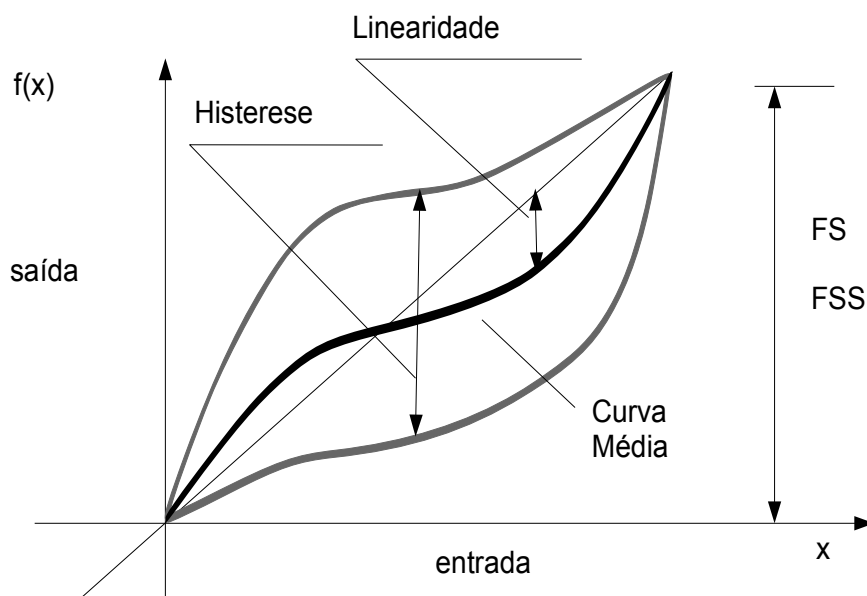
Erro máximo (linha cheia – curva média): $-0,30\%$

Linearidade: A linearidade vai depender da reta de calibração escolhida (curva média geral).

1. Reta de mínimos quadrados: $0,18\%$ (da faixa dinâmica de saída)
2. Reta que passa pelos pontos médios extremos: $-0,28\%$ (da faixa dinâmica de saída)

3. Reta que passa pela origem e minimiza os erros quadrados: 0,22% (da faixa dinâmica de saída).

Caso não seja possível calcular o erro da forma como foi feito neste exemplo, o que acontece quando a saída do dispositivo ensaiado apresenta uma grandeza diferente da entrada, por exemplo, é possível fazer as contas com relação a reta ou equação de calibração.



3.2 Aspectos Numéricos

3.2.1 Algarismos significativos

Em instrumentação não são usados tantos algarismos quantos os que resultarem das contas efetuadas uma vez que o número de algarismos significativos ou o número de casas decimais está ligada a precisão e a incerteza. De um modo geral os algarismos incertos não devem ser apresentados, pois levariam a uma falsa impressão de precisão ou incerteza. Para evitar este problema, o melhor é realizar os arredondamentos adequados e entender como as incertezas se propagam nos cálculos.

Antes de mais nada é necessário definir algarismos significativos e casas decimais. A forma mais fácil de entender estes conceitos é com exemplos. O número 0,0453, por exemplo, tem apenas 3 algarismos significativos mas 4 casas decimais enquanto que o número 4,350 tem 4 algarismos significativos e apenas 3 casas decimais. Ou seja, o último algarismo de um determinado valor ou medida representa uma incerteza associada a este valor ou medida. Se a medida indica 101 V é porque é mais provável que a resposta certa esteja mais próxima de 101 V do que de 100 ou 102 V. Se a medida indica 101,0 V é porque provavelmente a resposta verdadeira está mais próxima de

101,0 V do que de 100,9 ou 101,1 V. Entretanto, para o caso de número inteiros que terminam com zero isto pode não ser verdade. O valor 10.000Ω pode ter sido obtido com cinco algarismos significativos ou menos. Para evitar esta confusão estes números são melhor apresentados na notação científica. Assim, $1,00 \cdot 10^4 \Omega$ possui 3 algarismos significativos e $1,0000 \cdot 10^4 \Omega$ possui cinco algarismos significativos.

Regras de arredondamento também devem ser definidas. De um modo geral os arredondamentos devem ser feitos sempre para o número mais próximo, porém quando os números terminarem em 5 devem, preferencialmente, ser arredondados para o algarismo par mais próximo. Por exemplo 2,635 deve ser arredondado para 2,64 e 7,6345 para 7,634.

Para fazer adições utiliza-se um algarismo significativo a mais que no número de menor precisão. O resultado deve ser arredondado para o mesmo número de casas decimais ou algarismos significativos do número menos preciso. Por exemplo, a soma de 18,7 com 3,624 deve ser feita como 18,70 somado a 3,62 cujo resultado é 22,3. Por outro lado $1,02 \cdot 10^3$ somado a 5,36 resulta em 1020 mas $1,02 \cdot 10^3$ somado a 6,36 resulta em 1030. Na subtração mantém-se o mesmo número de casas decimais ou algarismos significativos do número menos preciso.

Para multiplicação, divisão, radiciação e outras funções matemáticas se utilizam números com um algarismo significativo a mais que o do número com menor número de algarismos significativos. O resultado é arredondado para o número com a menor quantidade de algarismos significativos. O produto de 35,68 por 3,18 resulta em 113,4624 que deve ser arredondado e expresso como 113, pois uma das medidas só tem três algarismos significativos (note que a casa depois da vírgula pode assumir qualquer valor entre 0 e 8 – $35,69 \cdot 3,19 = 113,8511$ e $35,67 \cdot 3,17 = 113,0739$ – então não há razão para exibir estes dígitos).

Assim, se uma medida for obtida como uma média de três medidas de um mesmo peso, como por exemplo, a média de 5202 g, 5202 g e 5203 g, deve-se tomar cuidado com a apresentação do resultado. A apresentação do número 5202,3333 (o valor da média) não é muito indicada, pois todas as contas foram realizadas com apenas quatro algarismos significativos, então é melhor apresentar o resultado com quatro algarismos significativos. Para apresentar o valor da média é importante informar que o valor foi obtido por uma média de três medidas, cada qual com quatro algarismos significativos.

Diversas ferramentas estão disponíveis para cálculos levando em conta o número de algarismos significativos e arredondamentos. Um exemplo, que usa as regras apresentadas, é a [Significant Figures Calculator](#).

3.2.2 Representação de incertezas

As incertezas (assim como os erros) podem ser representadas de três formas principais, absoluta, relativa e percentual (também podem ser apresentadas como partes por milhão – ppm – ou partes por bilhão – ppb) conforme indicado a seguir. No exemplo são apresentadas três formas de representar uma medida de 100 s com incerteza de 2 s. Observe o uso apropriado da unidade apenas para o caso da representação absoluta.

Absolutas – $t=(100\pm 2)s$

Relativas – $t=(100s\pm 0,02)$

Percentual – $t=(100s\pm 2\%)$

3.2.3 Cálculo e propagação de incertezas

Para o caso de medidas repetidas, onde as estimativas do mensurando podem ser feitas por processos estatísticos é possível determinar um desvio padrão desta medida. Este desvio padrão se refere a **incerteza padrão** da medição. Assim, uma **incerteza padrão combinada** pode ser obtida considerando-se a incerteza padrão individual de cada elemento que afeta a estimativa do mensurando. Esta incerteza padrão combinada pode, então, ser utilizada para estimar um intervalo onde o valor verdadeiro de um mensurando provavelmente se encontra. Isto é feito com o cálculo da **incerteza de medição expandida**, que é aquela cuja incerteza padrão combinada foi multiplicada por um valor constante (**fator de cobertura**) para aumentar o intervalo de valores prováveis para o mensurando.

Estas incertezas calculadas estatisticamente com amostras repetidas formam a chamada incerteza **Tipo A**. Um outro tipo de incerteza, a incerteza do **Tipo B**, obtida por outros métodos que não os estatísticos (não pode ser obtida por medidas repetidas), também pode ser expressa na forma de desvio-padrão e, desta forma, combinada com a anterior. Por exemplo, uma medida feita com uma régua indica que um determinado objeto mede alguma coisa entre 7,3 e 7,4 cm. Como a probabilidade do mensurando assumir qualquer valor neste intervalo é razoável, podemos considerar uma distribuição uniforme de possíveis valores para o mensurando entre 7,3 e 7,4 cm. Uma distribuição uniforme no intervalo $[-a; +a]$, por exemplo, tem desvio padrão

$$\varepsilon = \frac{a}{\sqrt{3}}.$$

Porém, se considerarmos que existe mais probabilidade do valor assumir um determinado valor, mais próximo do centro da escala por exemplo, não há indícios de que uma distribuição normal se aplique ao caso, pode-se utilizar uma distribuição triangular para o intervalo $[-a; +a]$, neste caso o desvio padrão é dado por

$$\varepsilon = \frac{a}{\sqrt{6}}.$$

Uma vez que as incertezas padrões Tipo A e Tipo B podem ser determinadas basta saber como pode ser obtida a incerteza padrão combinada. Supondo as grandezas X_1, X_2, \dots, X_n com seus respectivos valores numéricos estimados x_1, x_2, \dots, x_n , e incertezas associadas $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}, \dots, \varepsilon_{xn}$ (cada uma destas incertezas definida como um desvio padrão). Supondo uma grandeza R que se relaciona com as grandezas X_i através de uma função $R = F(X_1, X_2, \dots, X_N)$. R pode ser expressa como

$$R = r + \varepsilon$$

onde r corresponde a avaliação da função F e ε corresponde a incerteza combinada. Considerando que as grandezas X_i são variáveis aleatórias não correlacionadas então as incertezas podem ser tratados convenientemente na forma de variâncias ou desvios padrão ou valores RMS. Se houver correlação entre as grandezas as covariâncias também devem ser consideradas. Neste texto serão considerados apenas os casos não correlacionados, assim

$$\varepsilon = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial F}{\partial X_1} \right) \cdot \varepsilon_{x1} \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial F}{\partial X_2} \right) \cdot \varepsilon_{x2} \right]^2 + \dots + \left[\left(\frac{\partial F}{\partial X_N} \right) \cdot \varepsilon_{xN} \right]^2}$$

Para o caso particular em que F é uma soma ou uma subtração de grandezas então a incerteza absoluta pode ser obtida por pela raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas. Por exemplo, se $T_1 = (200 \pm 4) s$ e $T_2 = (100 \pm 2) s$, então

$$(T_1 - T_2) = (200 - 100 \pm \sqrt{4^2 + 2^2}) = (100 \pm 4,47) s.$$

Para o caso particular em que F apresenta apenas produtos ou divisões então a incerteza relativa pode ser obtida pela raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas relativas. Por exemplo, se $L_3 = (551 \pm 1) \cdot 10^{-6} m$ e $T_1 = (100 \pm 2) s$, então

$$(L_3/T_1) = \left(\frac{551 \cdot 10^{-6}}{100} \pm \sqrt{\left((1/551)^2 + (2/100)^2 \right)} \right) = (5,51 \mu m/s \pm 2\%) .$$

3.2.4 Erro máximo

Nem sempre as incertezas são informadas diretamente. Muitas vezes a informação dada consiste de um erro limite. Por exemplo, em alguns instrumentos a exatidão é garantida no que concerne ao valor de fundo de escala, e no caso dos componentes eletrônicos estes são garantidos dentro de limites percentuais do valor nominal do componente. Os limites destes desvios são chamados de limites de erro. Se considerarmos uma probabilidade uniforme entre os limites de erro, este pode ser considerado como uma incerteza de medição expandida com um fator de cobertura suficientemente grande.

Exemplo: Um voltímetro tem exatidão de 1% do valor do fundo da escala (FS) e está sendo utilizado para medir uma tensão de 30V, na escala 0-200V. Calcule o erro limite percentual

$$\text{Erro limite} = 200 \cdot 1\% = 2V$$

$$\text{Erro}(\%) = \frac{2}{30} \cdot 100\% = 6,7\%$$

Observe que para valores relativos ao fundo de escala a exatidão absoluta é constante mas o erro percentual é variável.

Em alguns equipamentos outras formas de tolerância para os valores medidos ou erros limites são empregadas. É comum o uso de erros limite

$$\text{Erro limite} = \pm (\% \text{ do valor lido} + \text{resolução})$$

$$\text{Erro limite} = \pm (\% \text{ do valor lido} + \% \text{ do fundo escala})$$

Exemplo ([GUM](#) 4.3.7 e 5.1.5): As especificações do fabricante para um voltímetro digital estabelecem que a exatidão na faixa de 1 V é de $14 \cdot 10^{-6}$ V vezes a leitura mais $2 \cdot 10^{-6}$ V vezes a faixa. Considere que o multímetro está sendo usado para medir em sua faixa de 1 V e que a média aritmética de um número de observações repetidas independentes de tensão é encontrada como sendo $\bar{V} = 0,928571 V$, com uma incerteza-padrão do Tipo A de $12 \mu V$. Qual a incerteza padrão combinada para esta medida?

$$\text{Erro limite} = 14 \cdot 10^{-6} \cdot 0,928571 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 15 \mu V$$

Supondo que a exatidão declarada fornece limites simétricos para uma correção aditiva do valor medido (com esperança igual a zero e com igual probabilidade de estar em qualquer parte dentro dos limites), então a incerteza padrão Tipo B é

$$\varepsilon_{\text{Tipo B}} = \frac{15 \mu V}{\sqrt{3}} = 8,7 \mu V$$

Uma vez que $V = \bar{V} + \Delta V$ então $\partial V / \partial \bar{V} = 1$ e $\partial V / \partial \Delta V = 1$ então

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{\text{Tipo A}}^2 + \varepsilon_{\text{Tipo B}}^2} = \sqrt{(12 \mu V)^2 + (8,7 \mu V)^2} = 15 \mu V$$

3.2.5 Erros e incertezas em instrumentos eletrônicos

Uma cadeia de medição genérica para um instrumento de medição moderno é apresentado na figura abaixo. Observe que os blocos, ligados em cascata, multiplicam sua entrada por um valor pré-determinado, permitindo que a incerteza combinada possa ser determinada pelas expressões apresentadas anteriormente.

A) Mensurando; B) Sensores e Transdutores; C) Circuito de Entrada; D) Condicionador; E) Saída; F) Filtragem e conversão A/D; G) Processamento Digital; H) Saída; I) Reconstrução e filtragem; J) Saída.

A tabela a seguir mostra algumas fontes de erro e incerteza presentes numa cadeia de medição como a apresentada.

<i>Sistema</i>	<i>Fonte de Erro</i>	<i>Descrição</i>
Aquisição de sinais	Transdutor	Não linearidade
	Interface	Terminação do circuito – contatos
	Amplificador	Erro nos componentes

<i>Sistema</i>	<i>Fonte de Erro</i>	<i>Descrição</i>
	Filtro PB	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	Qualidade do sinal	Exatidão do sinal
Conversão	Multiplexador	Erros de transferência e inerentes ao componente
	Amostrador	Erros na aquisição e e inerentes ao componente
	<i>Aperture</i>	Incerteza na amplitude do sinal adquirido
	Resolução	Interpolação do sinal
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído,
	Filtro – $\text{sen}(x)/x$	Atenuação devido a amostragem
	A/D	Erros de quantização
Reconstrução	D/A	Erros inerentes ao componente como não linearidades
	Filtro – $\text{sen}(x)/x$	Atenuação devido a reconstrução
	Filtragem PB	Erro na amplitude em função do ganho e fase
	<i>Aliasing</i>	Faixa de passagem, ruído,
	Resolução	Erro na amplitude do sinal reconstruído.

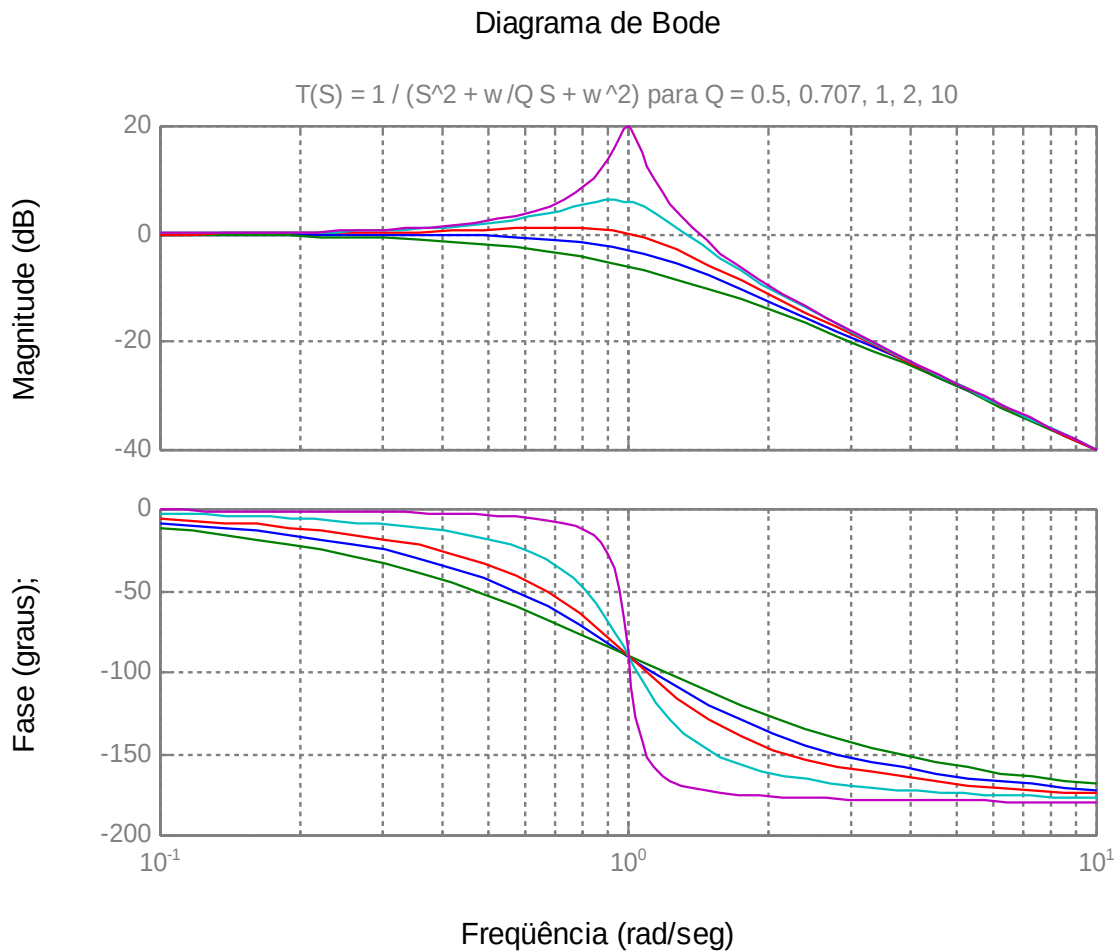
3.3 Calibração Dinâmica

As características dinâmicas relacionadas aos sensores, transdutores ou dispositivos de medida dizem respeito especificamente a resposta temporal ou resposta em frequência. A padronização de ensaios para avaliação destas características utiliza a resposta ao degrau e resposta em frequência de sinais senoidais. A primeira permite inferir diretamente sobre questões temporais e não lineares com sinais de amplitude elevada. A segunda analisa especificamente o comportamento em frequência do sistema e deve ser realizada com amplitude baixa para evitar distorções (usualmente 20% da faixa dinâmica de saída).

3.3.1 Resposta em Frequência

Normalmente são analisadas desde frequências que permitam obter o ganho estático do sistema até frequências onde a saída corresponda a 10% do sinal de entrada ou a fase apresente variação de 360°. Como resultado deste ensaio é desenhado um diagrama de Bode da resposta em

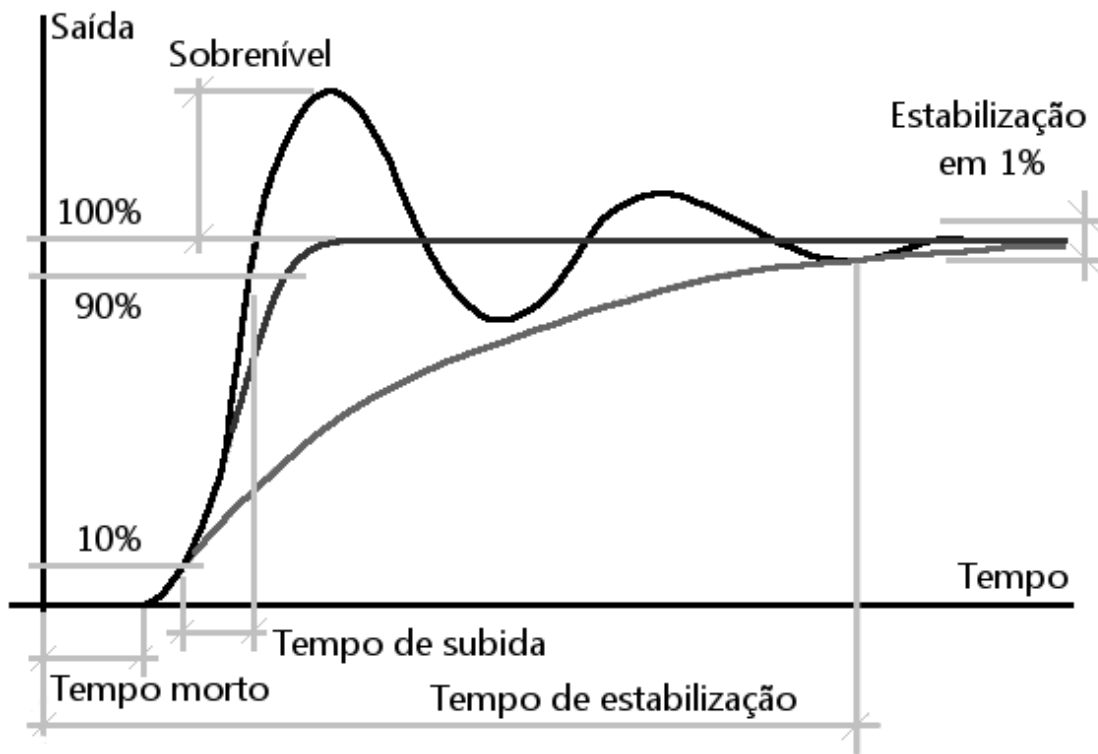
frequência do dispositivo analisado onde devem ser marcados os pontos onde o ganho seja máximo ou reduzido para 70% do valor basal além dos pontos onde a fase atinja 45° ou 90°.



3.3.2 Resposta ao Degrau

Degraus de entrada correspondendo a 80% da faixa dinâmica de saída devem ser aplicados mudando a saída de 10% para 90% e de 90% para 10%. Degraus menos, produzindo uma saída correspondente a 10% da faixa dinâmica de saída também devem ser fornecidos. Estes degraus podem ser aplicados em diferentes faixas cobrindo toda a operação do dispositivo. As faixas de 5% a 15%, de 45% a 55% e de 85% a 95% são as recomendadas pela [IEC 61298-2](#).

Neste teste são anotados o tempo de estabilização (*settling time*) até que a saída atinja 99% do seu valor final, tempo em que a saída permanece em zero (*dead time*) e tempos e amplitudes de sobrepessos (*overshot*), tempo de subida (*rise time*) e constantes de tempo. Na figura a seguir são apresentados algumas das características listadas.



3.4 Outras Características

Outras características funcionais podem ser informadas. As mais comuns são a isolação elétrica do dispositivo em condições de temperatura e umidade distintos, consumo energético, flutuação do sinal de saída (*ripple*), limites ajustáveis, flutuações com temperatura (*drift*) ou de longo tempo, características de dispositivos pneumáticos como consumo de ar, consumo de gás, fluxos entre outros. Cada dispositivo deve vir com informações complementares específicas de acordo com cada aplicação.