

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE INSTRUMENTAÇÃO E SISTEMAS DE AQUISIÇÃO

Créditos: Parcialmente baseado em
IPT – Introdução a Instrumentação – Mário Gangorra Rubio
Unifor – Prof. Welington Brito
Unifor – Prof. Marcos Cunha

Objetivo

- ✓ Este material pretende fornecer os conceitos básicos de Instrumentação e Aquisição de Dados, para isto apresenta de forma sucinta e simplificada dentro do possível os termos e conceitos que considero relevantes para se obter uma noção clara desta área.
- ✓ A idéia principal deste material é fornecer aos alunos da disciplina Sistemas de Aquisição de Dados & Interfaces informações básicas que venham a consolidar os conceitos ajudando no desenvolvimento de sistemas práticos.
- ✓ Este texto mostra diversos conceitos teóricos, alguns tipos de transdutores e métodos de medida existentes, noções sobre condicionamento de sinais e processamento de informações normalmente usados em Instrumentação e Sistemas de Aquisição.

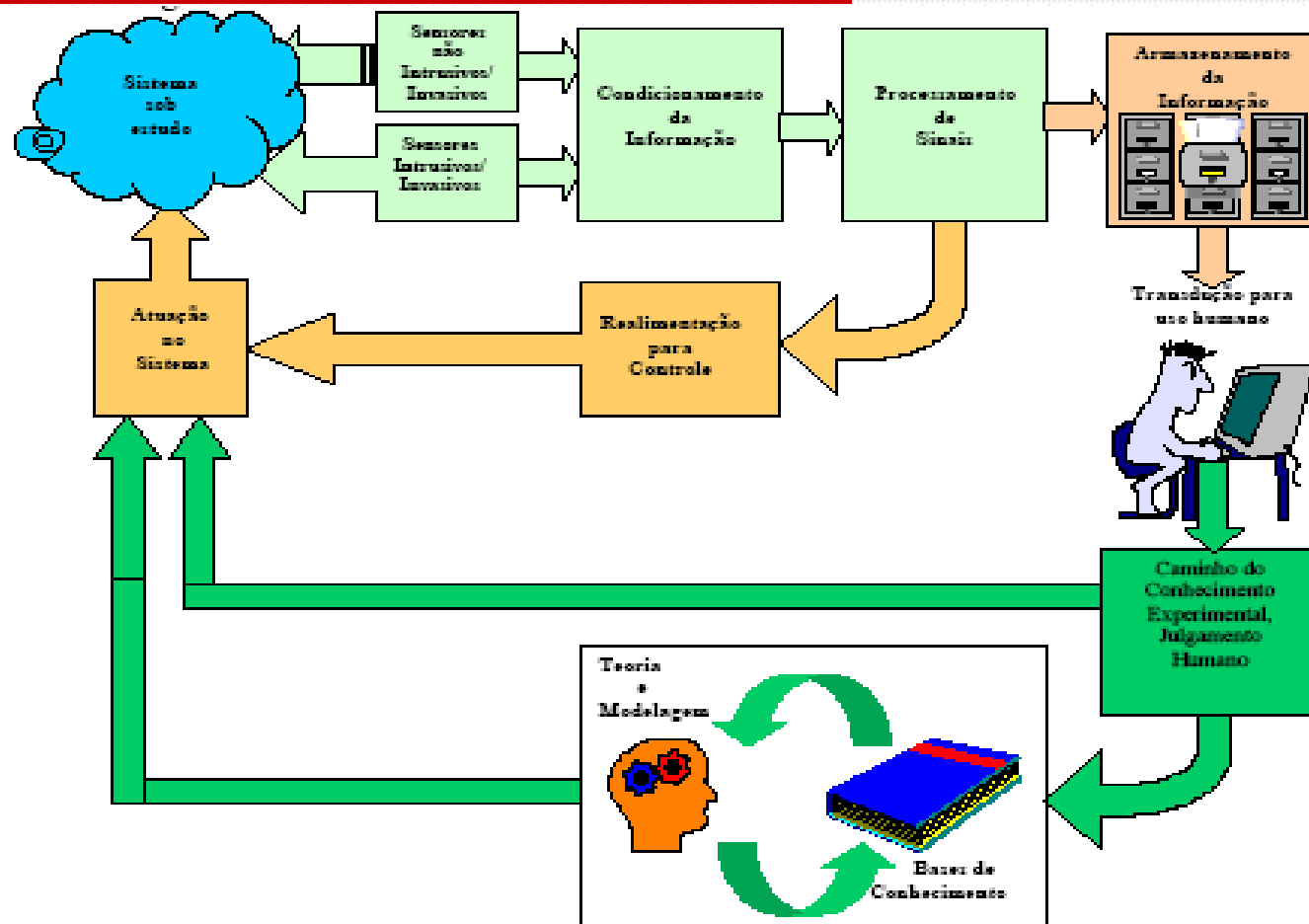
Ementa

- ✓ **UNIDADE I - Características e condicionamento de sinais.**
- ✓ **UNIDADE II - Interfaces de dados e aplicações.**
- ✓ **UNIDADE III - Linguagens de programação.**
- ✓ **UNIDADE IV - Protocolos de comunicação.**
- ✓ **UNIDADE V - Comunicação remota.**
- ✓ **UNIDADE VI - Projetos de interface de dados.**

Avaliações

- ✓ NP1
 - ✓ Avaliação – NP1.1
 - ✓ Avaliação – NP1.2
 - ✓ Prática – P1
 - ✓ Nota: $(NP1.1 + NP1.2 + P1)/3$
- ✓ NP2
 - ✓ Avaliação – NP2.1
 - ✓ Avaliação – NP2.2
 - ✓ Prática – P2
 - ✓ $(NP2.1 + NP2.2 + P2)/3$

Pesquisa Experimental em Engenharia



O que é informação

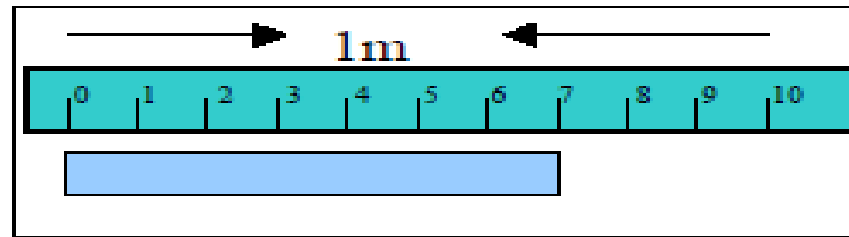
- ✓ Informação é aquilo que gera um significado na mente humana modificando nosso conhecimento.
- ✓ O termo informação tem dois usos principais:
 - ✓ Em **linguagem comum** ela relaciona uma coleção de fatos, idéias, entidades, conceitos e atributos que definem um sujeito ou objeto. (Ex. Enciclopédia).
 - ✓ Em **teoria de informação** se refere à quantidade transferida numa mensagem passando por um canal de comunicação.
 - ✓ Em **Instrumentação** aplicam-se os dois conceitos já que nos sistemas de medidas deve-se mapear a variável (isto é codificar a medida) e ainda transmiti-la através de um canal de comunicação.
 - ✓ Nas **ciências naturais** a informação pode ser quantificada , definido-se a menor quantidade de informação (Ex. bit), ela pode ser representada de diversas formas, mas sempre limitada a um certo tipo de portador de energia ou massa.

O que é informação - Portadores de Energia

- ✓ Existem cinco diferentes tipos de portadores de energia:
 - ✓ Radiação
 - ✓ Energia elétrica ou magnética
 - ✓ Calor
 - ✓ Energia Química
 - ✓ Energia Mecânica.

O que é medição

- ✓ É o processo empírico e objetivo de designação de números a propriedades de objetos ou eventos do mundo real de forma a descrevê-los.
- ✓ Outra forma de explicar este processo é comparando a quantidade ou variável desconhecida com um padrão definido para este tipo de quantidade, implicando então num certo tipo de escala, como mostrado pela Figura abaixo.



Representação de medição através de comparação

Tipos de medidas – 1/2

✓ Medida Nominal:

- ✓ Quando duas quantidades do mesmo tipo são comparadas para saber se são iguais (Ex. duas cores , acidez de dois líquidos)

✓ Medida Ordinal:

- ✓ Quando é necessário ter informação a tamanhos relativos (Ex. Classificação por peso e altura de uma turma))

✓ Medida em Intervalos:

- ✓ Quando deseja-se uma informação mais especifica, envolve-se então uma certa escala, sem incluir pontos de referência ou zero. (Ex. no caso anterior usar a escala de metros e quilogramas)

Tipos de medidas – 2/2

✓ Medidas Normalizadas:

- ✓ Define-se um ponto de referência e realiza-se a razão, dividindo cada medida pelo valor de referência, determinando as magnitudes relativas.
- ✓ Ex. O maior valor obtido será 1, quando foi escolhido como referência o valor máximo medido).

✓ Medidas Cardinais:

- ✓ O ponto de referência é comparado com um padrão definido. Assim todo parâmetro físico pode ser medido contra uma referência padrão, como o Sistema Internacional de medidas SI.

Unidades Legais do SI

- ✓ As unidades legais do SI, são agrupadas em unidades de:
 - ✓ Espaço e tempo
 - ✓ Mecânica e acústica
 - ✓ Temperatura e calor
 - ✓ Eletricidade magnetismo e luz
 - ✓ Radiatividade, radiações ionizantes e física molecular

Sinais 1/4

- ✓ Sinais AC
- ✓ Corrente alternada é a corrente que constantemente muda em amplitude e que reverte a direção em intervalos regulares.
- ✓ Voltagem alternada pode ser aumentada ou diminuída por um transformador
- ✓ Podemos utilizar diversas grandezas para representa um sinal alternado:
 - ✓ Ciclo de repetição (período)
 - ✓ Frequência
 - ✓ Amplitude
 - ✓ Voltagem ou corrente pico-a-pico
 - ✓ Voltagem ou corrente média
 - ✓ Voltagem ou corrente instantânea
 - ✓ Voltagem ou corrente efetiva (eficaz)
 - ✓ Fase (comparada com uma referência)

Sinais 2/4

- ✓ Sinais DC
- ✓ Corrente constante é a corrente que somente em um sentido sem mudar a direção cuja amplitude depende da quantidade de elétrons que flui através de um ponto do circuito em um segundo.
- ✓ As grandezas utilizadas para representar um sinal DC são:
 - ✓ Voltagem
 - ✓ Corrente

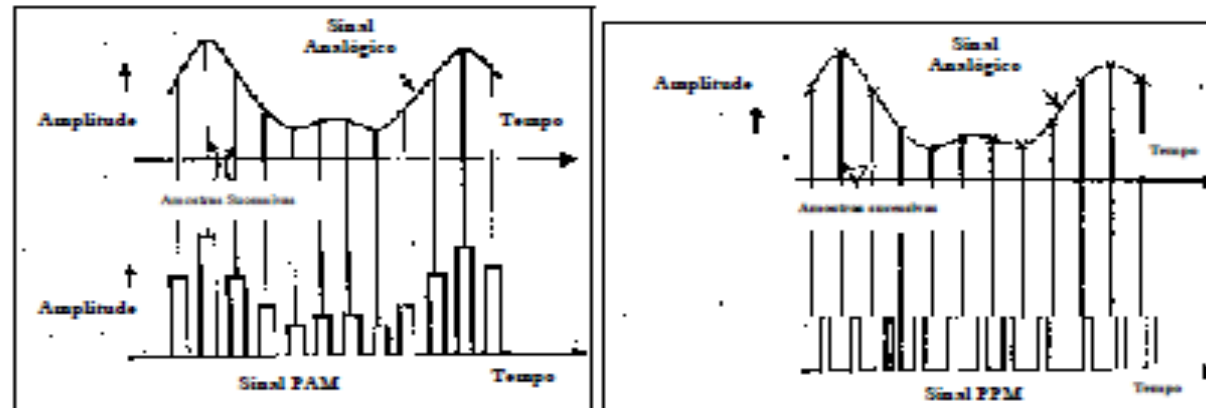
Sinais 3/4

- ✓ Nenhuma informação pode ser carregada desde uma fonte a um receptor sem algum transporte de energia ou massa, esta informação, vem como uma mudança de estado ou modulação da portadora de energia ou massa, isto é chamado de sinal.
- ✓ Sinais então podem tomar a forma de variações de parâmetros, como pressão , deflexão de um feixe de luz, deslocamentos mecânicos, etc.
- ✓ Quatro tipos de sinais podem ser identificados:
- ✓ Series temporais analógicas
 - ✓ Sinais cuja amplitude ou frequência varia analogicamente no tempo.
- ✓ Sinais periódicos
 - ✓ São sinais que podem transportar a informação através de uma modulação analógica da amplitude, frequência ou fase da portadora.

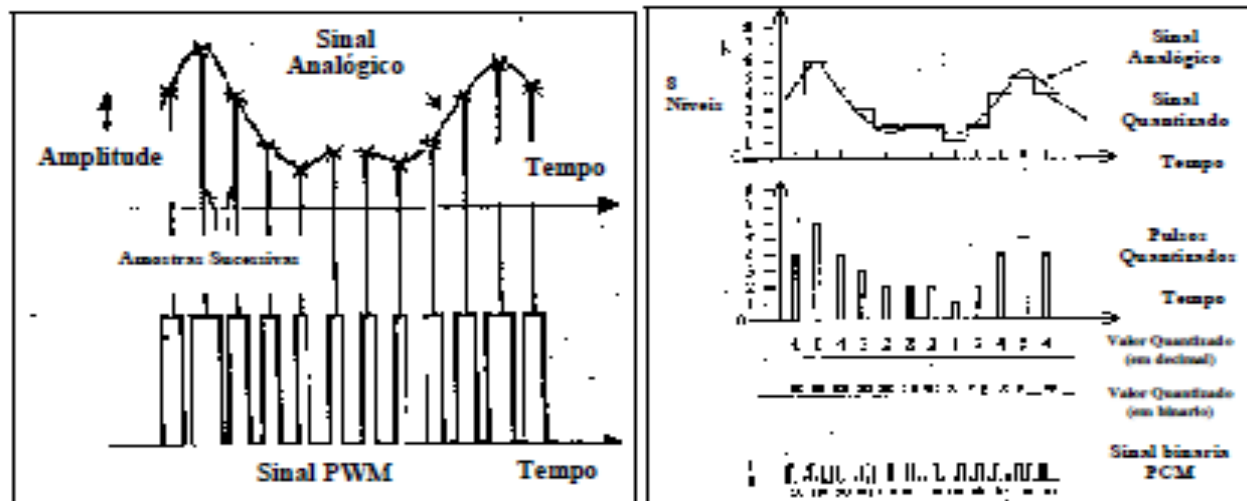
Sinais 4/4

- ✓ Sinais amostrados
 - ✓ São sinais que possuem valores discretos eqüidistantes no tempo, estes sinais podem ser multiplexados temporalmente podem realizar diversos tipos de modulação como:
 - ✓ PAM (Modulação por amplitude de pulso)
 - ✓ PWM (Modulação por largura de pulso)
 - ✓ PPM (Modulação pela posição do pulso)
 - ✓ PCM (Modulação por pulso codificado)
 - ✓ A/D (Conversão analógica/Digital)
- ✓ Sinais estocásticos
 - ✓ Neste caso o valor instantâneo do sinal é descrito por uma função densidade de probabilidade em relação ao espaço e tempo. (Ex. ruído branco)

Sinais Amostrados

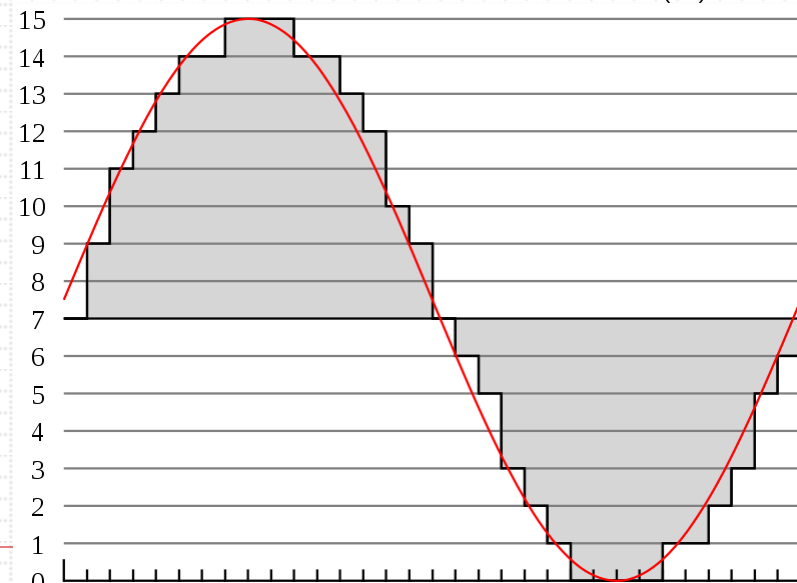
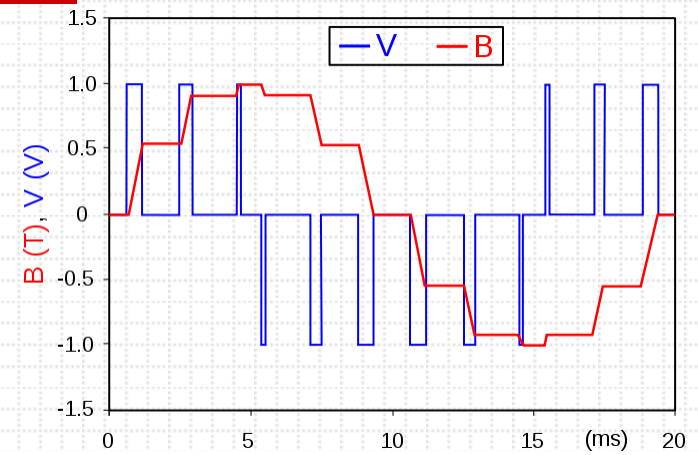
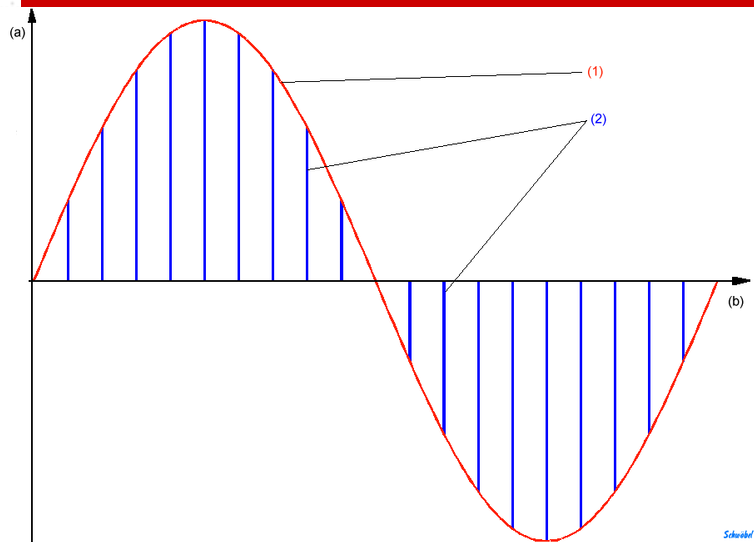


Sinais amostrados tipo PAM e PPM



Sinais amostrados tipo PWM, PCM e A/D

Sinais Amostrados



Conceitos de medição

- ✓ Sensibilidade de um instrumento
 - ✓ A razão entre a mudança na saída causada por uma mudança na entrada:
- ✓ Ganho de um sistema ou instrumento
 - ✓ A saída dividida pela entrada

Conceitos de medição

✓ Exatidão

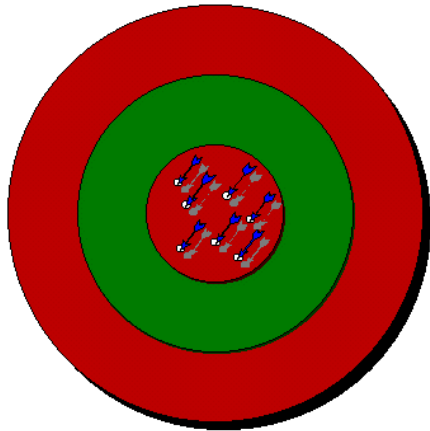
- ✓ Qualidade da medição que assegura que a medida coincida com o valor real da grandeza considerada. O valor representativo deste parâmetro é o valor médio.
- ✓ Quando o valor real ou correto é conhecido, a exatidão garante a rastreabilidade da medição. Isso significa que o valor pode passar de um laboratório para outro, sempre mantendo a medida exata. Este parâmetro é expresso, em geral como porcentagens do fundo de escala

✓ Precisão

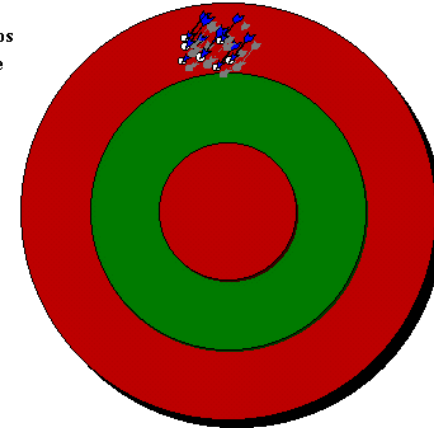
- ✓ Qualidade da medição que representa a dispersão dos vários resultados, correspondentes a repetições de medições quase iguais, em torno do valor central. É usualmente associado ao erro padrão. Este parâmetro é expresso, em geral como porcentagens do fundo de escala

Conceitos de medição

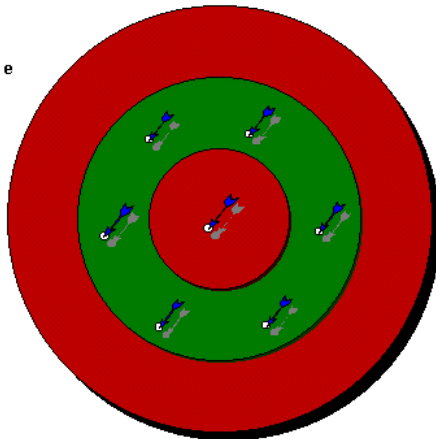
Resultados
Precisos e
Exatos



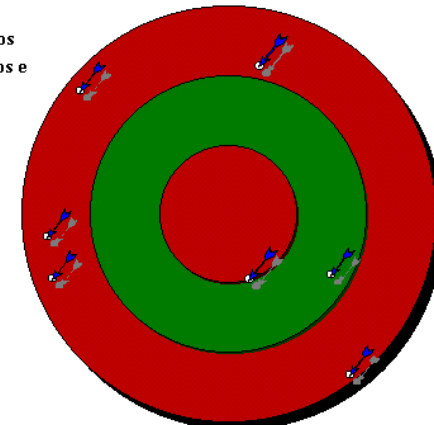
Resultados
Precisos e
Inexatos



Resultados
Imprecisos e
Exatos



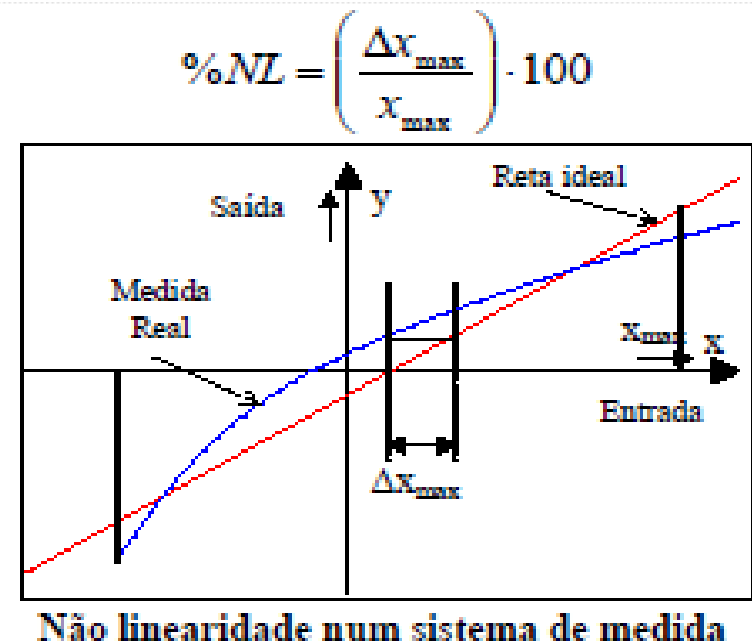
Resultados
Imprecisos e
Inexatos



Conceitos de medição

✓ Linearidade

- ✓ A linearidade de um instrumento indica a máxima aproximação da relação entrada – saída, com uma determinada linha reta. Geralmente quantifica-se a não-linearidade expressando-se como porcentagem do fundo de escala mostrado na Figura ao lado.

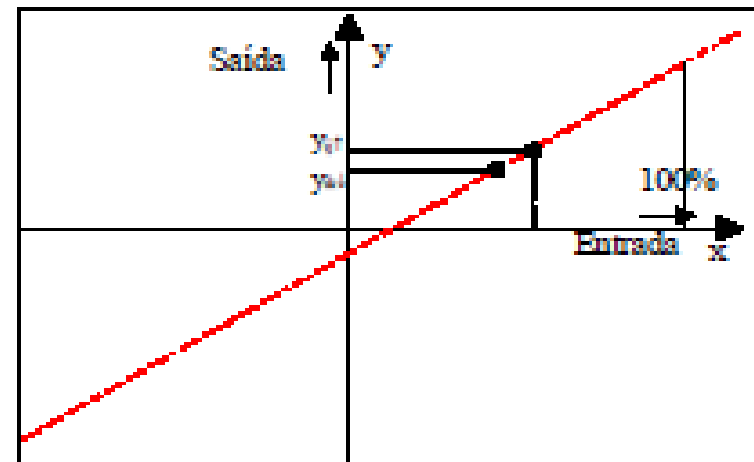


Conceitos de medição

- ✓ **Offset** - define-se como o desvio de zero do sinal de saída quando a entrada é zero
- ✓ **Drift ou deriva do zero** - descreve a mudança da leitura em zero do instrumento com o tempo.
- ✓ **Repetibilidade**
 - ✓ É a capacidade do instrumento de reproduzir as mesmas saídas, quando as mesmas entradas são aplicadas, na mesma seqüência e nas mesmas condições ambientais

- ✓ Este valor é expresso como sendo o valor pico da diferença entre saídas, em referência ao fundo de escala e em porcentagem, veja Figura abaixo.

$$\% \text{repetibilidade} = \left(\frac{\text{Valor_Pico_de}(y_{ij\uparrow} - y_{ik\downarrow})}{F.S.} \right) \cdot 100$$



Repetibilidade em sistemas de medida

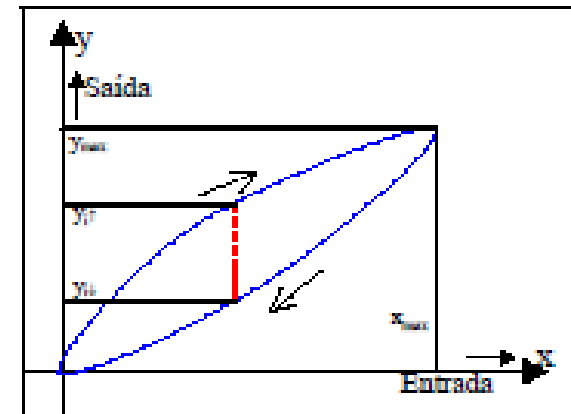
Conceitos de medição

✓ Histerese

✓ Quando um certo valor de entrada é atingido, a primeira vez quando os valores de entrada estão aumentando, e a segunda vez quando eles estão diminuindo, a diferença das saídas é chamada de histerese, a qual pode ter diversas causas físicas.

✓ Calcula-se este parâmetro como sendo o valor de pico da diferença das saídas, em referência ao fundo de escala e em porcentagem, veja Figura ao lado

$$\%histerese = \left(\frac{\text{Valor_Pico_de}(y_{\uparrow} - y_{\downarrow})}{F.S.} \right) \cdot 100$$



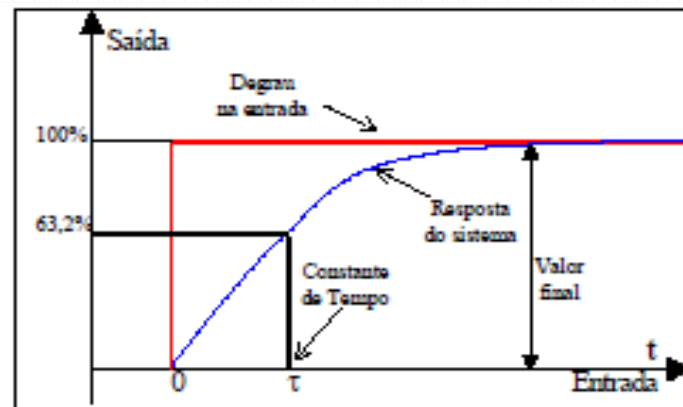
Histerese em sistemas de medida

Conceitos de medição

- ✓ Banda de erro estática
 - ✓ Para levar em conta todos os efeitos que causam desvios em relação a um instrumento ideal, ou seja histerese, não-linearidade, repetibilidade, variações com outros parâmetros (Ex. Temperatura) define-se banda de erro estática , onde os valores admissíveis de erro estão dentro de uma faixa limitada por duas retas paralelas, onde os valores mais prováveis são indicados por uma reta mediana à esta faixa.
- ✓ Conceito de incerteza
 - ✓ Sabe-se que uma medição é um processo não repetitivo, portanto o resultado não é único. Assim mesmo que se tomem todos os cuidados para diminuir os erros inerentes das medidas sempre existe a chamada incerteza ou tolerância da medida.
 - ✓ Define-se incerteza como uma faixa de valores que pode ser associada a um certo nível de confiança e que deve ser calculada para cada método experimental adotado.
 - ✓ A incerteza deve ter sempre a mesma natureza que o valor básico. Ex. $0,876 \text{ L} \pm 0,003 \text{ L}$

Conceitos de medição

- ✓ Constante de tempo
 - ✓ Quando um sistema é submetido a uma entrada que apresenta uma variação abrupta (Ex. degrau), a saída toma um certo tempo para atingir seu valor final. A constante de tempo (τ) de um sistema é definida como o tempo que esse sistema toma para atingir 63,2% do seu valor final, como mostrado na Figura abaixo.

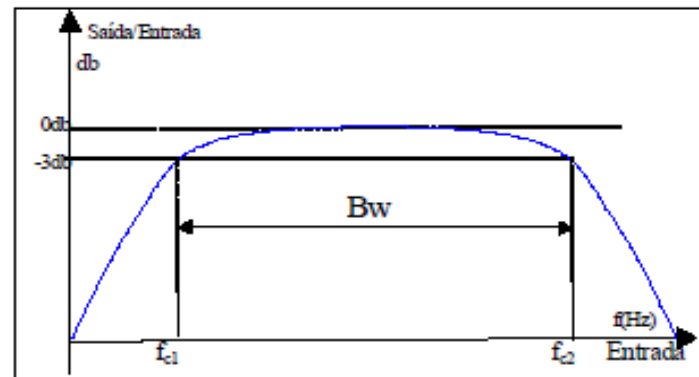


Constante de tempo de sistema de primeira ordem para excitação degrau

Conceitos de medição

- ✓ Resposta em frequência (Largura de Banda)
 - ✓ Quando o sinal aplicado a um instrumento apresenta uma variação com a frequência, chama-se resposta em frequência deste instrumento, a mudança da relação saída / entrada do instrumento, usualmente dado em dB (decibéis).
 - ✓ Define-se também largura de banda (Bw) como a faixa de frequência cuja relação (Saída/entrada) normalizada encontra-se entre 0 e -3 dB, veja Figura abaixo.

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{valor}}{\text{valor}_{\max}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) = -3$$



Resposta em frequência de um sistema passa-banda e largura de banda

Conceitos de medição

- ✓ Frequência natural
 - ✓ É a frequência de oscilação livre (ω_n) do sistema em questão, um instrumento deve ser projetado para ter sua frequência natural 5-10 vezes superior à máxima frequência de trabalho do instrumento.
- ✓ Razão de amortecimento
 - ✓ É a característica de dissipação de energia (ξ) do sistema que junto com a frequência natural determina o limite da resposta em frequência do instrumento ou sistema.
- ✓ Funções de transferência de sub-sistemas
 - ✓ Em sistemas lineares as funções de transferência podem ser classificadas de acordo com sua complexidade em sistemas de ordem (0,1,2..), em instrumentação para caracterização da informação divide-se o sistema em sub-sistemas mais simples, especificando as funções de transferência básicas.

Interferência 1/2

- ✓ Ruído

- ✓ O termo ruído se usa geralmente para sinais indesejadas que aparecem durante o processo de medição e podem interferir com o sinal sendo medido, existem dois tipos básicos de ruído:

- ✓ Ruído de Interferência

- ✓ Acontece devido à interação entre campos magnético ou elétricos externos com o sistema de medida, Ex. ruído produzido pela rede AC.

- ✓ Ruído Aleatório

- ✓ Este ruído é devido ao movimento aleatório de elétrons e outros portadores de carga em componentes e sistemas eletrônicos.

Interferência 2/2

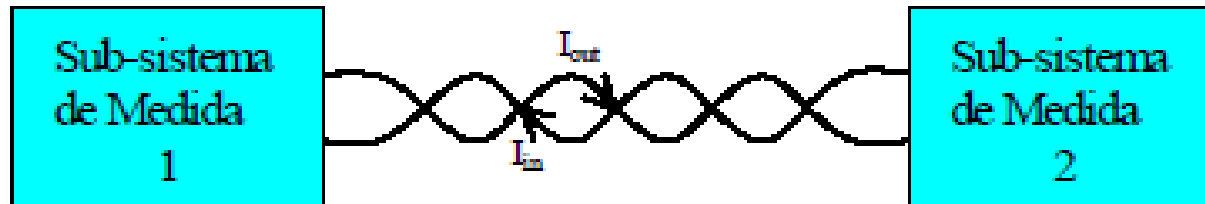
- ✓ Fontes de Interferência
 - ✓ Mudanças de temperatura
 - ✓ Choques mecânicos
 - ✓ Equipamentos que possuem sistemas de ignição
 - ✓ Equipamentos que possuem circuitos digitais ou que trabalham com sinais pulsados
 - ✓ Chaveamentos em sistemas de distribuição elétrica
 - ✓ Motores elétricos AC e DC e inversores para o seu controle
 - ✓ Altas tensões e descargas corona
 - ✓ Descargas em gases ionizados
 - ✓ Geradores de RF ou microondas
 - ✓ Outras fontes com alto conteúdo de frequências
 - ✓ Materiais semicondutores em geral

Tipos de interferência

- ✓ Existem vários tipos de interferência, a seguir listamos os principais:
 - ✓ Acoplamento galvânico: Quando diversos circuitos apresentam um acoplamento direto de interferências, através do mesmo terra.
 - ✓ Acoplamento indutivo: também chamado de acoplamento magnético ou eletromagnético. Neste caso uma corrente elétrica circulando num circuito próximo gera um campo magnético que varia, e que induz uma corrente no sistema de interesse.
 - ✓ Acoplamento capacitivo: Os cabos de energia, terra e condutores do sistema estão separados por um dielétrico que é o ar, assim podem existir capacitâncias entre estes elementos, que permitem o acoplamento com o sistema de sinais de ruído.
 - ✓ Terras múltiplos: Se um instrumento apresenta diversas conexões para o terra, isto permitira a produção de uma interferência no sistema de medida
 - ✓ Acoplamentos por RF ou Microondas: Ruído pode ser acoplado através de ondas de rádio e microondas

Formas de Redução da interferência 1/3

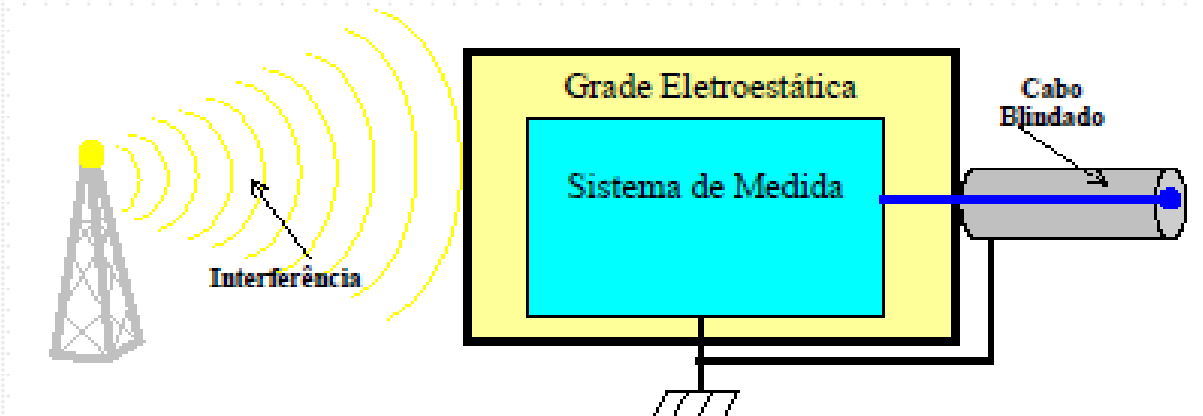
- ✓ Existem diversos métodos para reduzir interferências, entre eles:
 - ✓ Utilização de pares trançados: diversos elementos de um sistema de medida podem ser conectados com pares trançados, assim o ruído induzido poderá se cancelar devido a direção das correntes já que os campos induzidos se cancelam, veja Figura abaixo.



Redução de interferência usando par trançado

Formas de Redução da interferência 2/3

- ✓ **Grade Eletrostática:** Com este método todo tipo de acoplamento capacitivo e magnético é evitado, já que o sistema de medida encontra-se cercado por uma grade metálica aterrada, este método pode apresentar o problema de múltiplos terras, veja Figura abaixo.



Redução de interferência usando grade eletrostática

Formas de Redução da interferência 3/3

- ✓ Cabos blindados: Trata-se de uma extensão do método anterior mas aplicado à transmissão das informações
- ✓ Terra único: definindo um único ponto de terra no sistema de medida evita-se o problema de terras múltiplos.
- ✓ Filtragem do sinal: Com esta técnica a largura de banda do sistema de medida é modificada para rejeitar o sinal de interferência.
- ✓ Utilização de isolamento galvânica: permite o desacoplamento de dois circuitos de forma a evitar certos tipos de interferências.
- ✓ A utilização de amplificadores diferenciais e de instrumentação: permitem eliminar a interferência quando esta se encontra em modo comum

Ruído aleatório

- ✓ O ruído aleatório podem aparecer de formas diversas:
- ✓ **Ruído Térmico:** Este ruído é gerado pelo movimento randômico dos elétrons e outros portadores de carga em resistores e semicondutores. A tensão RMS de ruído para uma certa largura de banda é dado por:

Com : k = Constante de Boltzmann
 R = Resistência do material
 T = Temperatura Absoluta
 ΔF = Faixa de frequência

$$v_n = \sqrt{4.k.R.T.\Delta f}$$

- ✓ Distribuição em frequência é plana; daí o nome branco
- ✓ Note que seu valor independe da corrente ou tensão medida, o que o torna tão mais importante quanto menor for o valor medido.
- ✓ Portanto, quanto mais rápido o sinal a ser medido pior será a qualidade da medida
- ✓ Também chamado de **Ruído Johnson ou Branco**

Ruído aleatório

- ✓ **Ruído “Shot” ou Quântico:** Este ruído é devido a flutuações randômicas na taxa de difusão de portadores de carga através das barreiras de potencial em junções P-N. A tensão RMS de ruído é dada por:

$$v_{ns} = \sqrt{2.k.T.r_d.\Delta f}$$

Com: r_d = Resistência diferencial do diodo $\cong 26/I_d(\text{mA})$

- ✓ **Se deve à natureza quântica da passagem de elétrons em junções de materiais.**
- ✓ **Neste caso o valor do ruído depende da presença de uma corrente elétrica.**
- ✓ **O valor absoluto cresce com a corrente mas em termos relativos se torna menos relevante com o aumento do valor a ser medido**

Ruído aleatório

- ✓ **Ruído (1/f):** O ruído (1/f) ou “Flicker noise” deve-se ao fluxo de portadores de carga em meios descontínuos e fica predominante em frequências muito baixas, apresenta uma tensão RMS de ruído inversamente proporcional à frequência.
- ✓ Na realidade não se trata de uma fonte bem definida de ruído e sim uma combinação de fatores não controláveis que podem variar lentamente.
- ✓ Está incluído nele o envelhecimento dos componentes, variações de umidade e outras condições ambientais entre muitos outros fatores.
- ✓ Pode-se dizer que a deriva não previsível em equipamentos de medição, que leva à necessidade de recalibração periódica, se deve a este tipo de ruído.
- ✓ **Más conexões:** Ruído pode resultar de más conexões devido a sujeira em contatos, contatos mecânicos mal feitos ou soldas frias.

Rejeição de ruído

- ✓ Trata-se da capacidade de um sistema rejeitar ruído e pode ser quantificada para duas formas típicas de ocorrência de ruído:
- ✓ **Ruído em modo normal:** corresponde a aquele ruído que ocorre junto ao sinal medido, o sistema de medida não consegue discriminar esta forma de ocorrência;
- ✓ **Ruído em modo comum:** corresponde a aquele ruído que aparece entre o terminal de terra e um outro terminal do sistema de medida. Existem métodos (utilização de amplificadores diferenciais) que permitem a redução do ruído que ocorre desta forma.
- ✓ Define-se razão de rejeição em modo comum (CMRR) como a habilidade do sistema de medida reduzir o erro na medida introduzido por um ruído que ocorre desta forma, assim:

com:

$$CMRR(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_{cm}}{V_e} \right)$$

V_{cm} = O valor pico do ruído em modo comum

V_e = O valor pico do erro produzido na medida a uma certa frequência

Relação sinal - ruído

- ✓ Define-se razão sinal-ruído como a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído no sistema de medida. A partir deste cálculo será possível saber que tipo de instrumento é necessário para realizar a medida desejada.
- ✓ Para o caso de um resistor R temos então:

$$S / N(dB) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_s}{V_n} \right)$$

Com:

V_s = Tensão do sinal

V_n = Tensão de ruído

Erros

- ✓ Os erros em instrumentação basicamente podem ser classificados como:
- ✓ **Erros randômicos:** são aqueles que variam de forma aleatória entre medidas sucessivas da mesma quantidade
- ✓ **Erros sistemáticos:** são aqueles que não variam de uma leitura para outra
- ✓ **Erros absolutos:** são definidos como a diferença entre o valor atual medido e o valor livre de erro (Padrão).

$$\delta X_a = X_i - X_s$$

- ✓ com: X_i = valor atual da medida
 X_s = valor correto da medida
- ✓ **Erros relativos:** são definidos como os erros absolutos normalizados, ou seja o erro absoluto dividido por uma quantidade de referência, Ex. erros percentuais

$$\% \delta X_r = \left(\frac{X_i - X_s}{X} \right) \cdot 100$$

com: X = valor de referência

Fontes de erro

- ✓ As fontes de erro em sistemas de medidas são de acordo a classificação anterior:
- ✓ Erros randômicos
 - ✓ Erros de operação: podem ter varias causas como erros de parallax e de incerteza nas medidas, dependendo principalmente do operador
 - ✓ Erros ambientais: como mudanças de temperatura, interferência eletromagnética, etc.
 - ✓ Erros estocásticos: como resultado de processos de ruído em materiais e componentes do instrumento.
 - ✓ Erros dinâmicos: são erros devidos a múltiplos fatores que modificam o comportamento dinâmico do instrumento, como carregamentos dinâmicos variáveis.

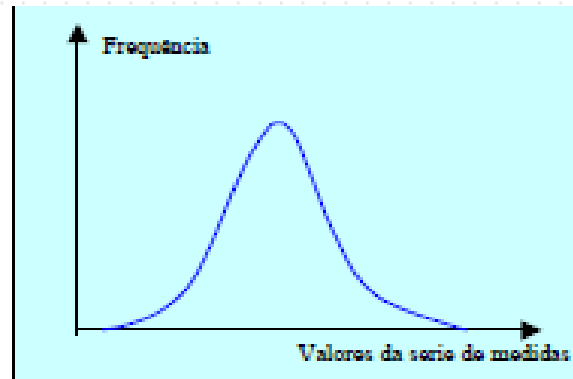
Fontes de erro

✓ Erros Sistemáticos:

- ✓ Erros de construção: Erros durante a fabricação do instrumento, problemas com tolerâncias de dimensões ou componentes fora de valor, etc.
- ✓ Erros de aproximação: devida a suposições, como linearidade entre duas variáveis
- ✓ Erros de envelhecimento: Erros resultantes de variações, em materiais e componentes integrantes do instrumento, com o tempo. Componentes se deterioram e variam seu valor ou materiais com processos de fadiga mudam suas características mecânicas variando sensibilidades, etc.
- ✓ Erros de inserção: São erros de carregamento, que acontecem quando o instrumento é inserido em certos locais para realizar medidas, como voltímetros, amperímetros, etc.
- ✓ Erros aditivos: são erros superpostos ao sinal de saída do instrumento e não dependem do valor numérico da saída, portanto provocam somente uma modificação no valor de zero no instrumento
- ✓ Erros multiplicativos: estes erros são caracterizados pela multiplicação da variável de entrada por um valor, Ex. variações de sensibilidade com diversos fatores.

Estatística de erro

- ✓ Os resultados de uma serie de medições da mesma quantidade podem ser plotados como uma distribuição de frequência, sendo que frequência neste caso é o número de vezes que um valor particular ou faixa de valores ocorrem.. Esta distribuição mostra como os valores obtidos durante a medição variam, veja Figura abaixo. O espalhamento desta distribuição é uma indicação da imprecisão da medida.



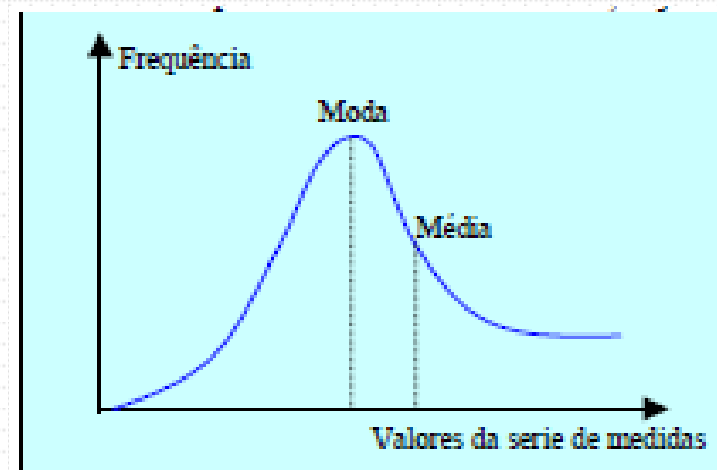
Distribuição de frequência para uma medida

Estatística de erro

- ✓ A representação de um número de medidas de uma certa quantidade pode tomar as seguintes formas:
- ✓ **Média Aritmética** (\bar{X}): Representa-se como a soma de todos os resultados dividida pelo número (n) de resultados considerados.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

- ✓ **Moda:** É o valor com maior frequência, se a distribuição de frequência é simétrica então a média e a moda apresentarão o mesmo valor, veja Figura ao lado.



Moda e Média

Estatística de erro

- ✓ **Mediana:** É o valor que divide a distribuição de frequência em duas áreas iguais
- ✓ **Desvio Padrão:** A medida da precisão ou seja, o espalhamento da distribuição de frequência pode ser medido com a raiz do desvio quadrático médio ou desvio padrão (σ). O desvio de uma medida (d) é a diferença entre o valor medido e a média aritmética:

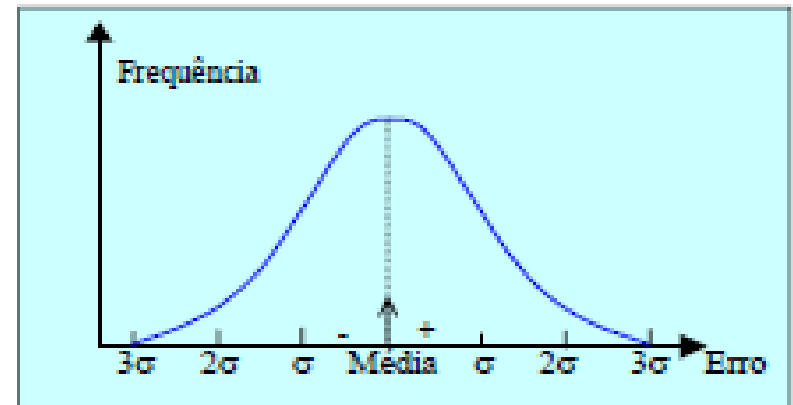
$$d_i = X_i - \bar{X}$$

então o desvio padrão define-se:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n-1}}$$

Erro provável

- ✓ A distribuição de frequência de um conjunto de medidas mostra os desvios das várias medidas em relação à média. Como a distribuição de frequência freqüentemente toma a forma de uma distribuição Gaussiana, veja Figura, cuja medida mais freqüente é a média e não apresenta erro.
- ✓ Numa distribuição gaussiana a possibilidade de uma medida estar a um σ da média é de 68,3%, dentro de 2σ da média 95,5% e dentro de 3σ da média 99,7%, então a possibilidade de uma medida estar em $0,6745\sigma$ da média é de 50%. Define-se então como erro provável $0,6745\sigma$ da média.



Distribuição gaussiana

- ✓ Isto significa que se tomamos uma medida qualquer, da série de medidas, esta terá 50% de chance de apresentar um erro não maior que $0,6745\sigma$ da média.

Confiabilidade de uma medida

- ✓ Define-se confiabilidade de uma medida como a possibilidade que o sistema ou elemento do sistema opere com um certo nível de desempenho (Ex. 1% de exatidão) , num certo período de tempo (Ex. 1 ano), em certas condições ambientais (Ex. 20°C).
- ✓ A confiabilidade depende do uso, ambiente e local onde o instrumento está em operação, assim os seguintes fatores devem ser considerados:
 - ✓ Conseqüências da falha em termos de risco para outros equipamentos ou pessoal
 - ✓ Custo ou produção perdida resultante da falha
 - ✓ Custo e tempo necessário para o reparo
 - ✓ Custos das rotinas de teste e manutenção
- ✓ Assim confiabilidade é uma variável estatística que depende do tempo $R(t)$ e geralmente é expressa de forma exponencial.

$$R(t) = \exp(-\lambda t)$$

com: (λ) = taxa de falhas

Falhas (MTBF)

- ✓ Define-se falha quando o instrumento sai de um especificado nível de desempenho. Se N itens foram testados durante um tempo t e os itens que falharam foram reparados e colocados de novo em funcionamento, então se durante esse tempo aconteceram N_f falhas, o tempo médio entre falhas é definido por:

$$MTBF = \frac{N.t}{N_f}$$

- ✓ Define-se ainda taxa de falhas (λ) o valor médio de falhas ou seja:

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

- ✓ Uma taxa de falhas de 1/100000 por hora não significa que se 100000 itens foram observados durante uma hora 1 falhará, somente indica a probabilidade deste falhar.

Falhas (MTBF)

- ✓ Na Tabela seguinte apresentam-se valores típicos de taxa de falhas.

Componente	Taxa de falhas x 10^{-5} por hora
Resistor de carvão	0.05
Resistor de fio	0.01
Capacitor de papel	0.1
Capacitor de filme plástico	0.01
Transistor de silício de potência	0.08
Transistor de silício de baixa potência	0.008
Conexão com solda	0.001
Conexão com fio enrolado	0.0001

Disponibilidade

- ✓ A disponibilidade de um sistema é a probabilidade deste sistema estar funcionando corretamente durante um tempo específico, define-se assim:

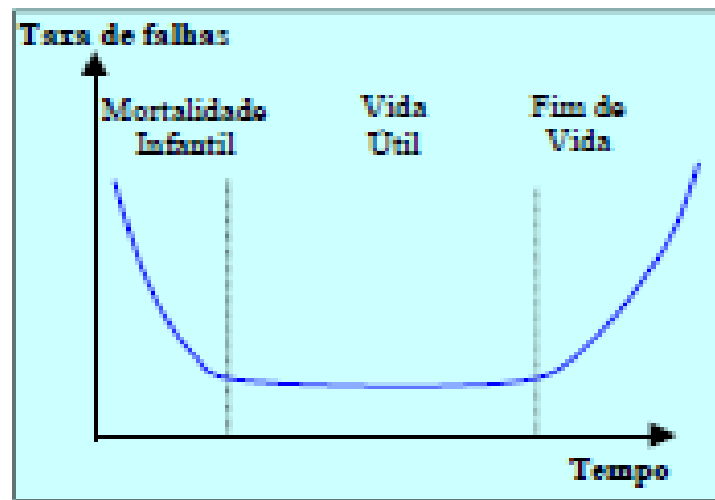
$$Disponibilidade = \frac{tempo_operacional}{tempo_operacional + tempo_não_operacional}$$

$$Disponibilidade = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

com: $MTTR$ = tempo médio de reparo.

Curva da Banheira

- ✓ Um instrumento ou sistema de medida típico apresenta uma taxa de falhas em função do tempo com três fases bem definidas, como mostrado na Figura abaixo:



Curva da banheira

Curva da Banheira

- ✓ Mortalidade infantil: A taxa de falhas cai exponencialmente até estabilizar num valor, estas falhas acontecem devido a problemas na manufatura, materiais e componentes, esta fase pode ser superada antes do instrumento sair da fabrica através de um período de "Burn-In".
- ✓ Vida útil: é a fase de vida normal do instrumento onde a taxa de falhas é baixa e constante e basicamente as falhas são eventos aleatórios.
- ✓ Fim de vida: Nesta fase a taxa de falhas aumenta exponencialmente principalmente por problemas de desgaste nos componentes e materiais.

Projeto de sistemas com alta Confiabilidade

- ✓ Vários fatores devem ser considerados durante o projeto de um instrumento para obter sistemas com alta confiabilidade:
 - ✓ O instrumento deve possuir o mínimo número de componentes necessários para realizar a função desejada.
 - ✓ Os componentes usados devem possuir uma história conhecida de confiabilidade.
 - ✓ O uso de integração em larga escala aumenta a confiabilidade do instrumento, já que a confiabilidade de um circuito integrado depende muito pouco de sua complexidade.
 - ✓ Os componentes devem estar operando nas faixas permitidas, a confiabilidade cai rapidamente quando aumenta o “stress”, temperatura, umidade, tensão, vibração, etc.
 - ✓ Os componentes devem ter um período de “Burn-In” para ultrapassar o estágio de mortalidade infantil.
 - ✓ O equipamento deve ter sido testado em condições rigorosas, antes de entrar em serviço.
 - ✓ O equipamento deve ser operado nas melhores condições possíveis.

Redundância

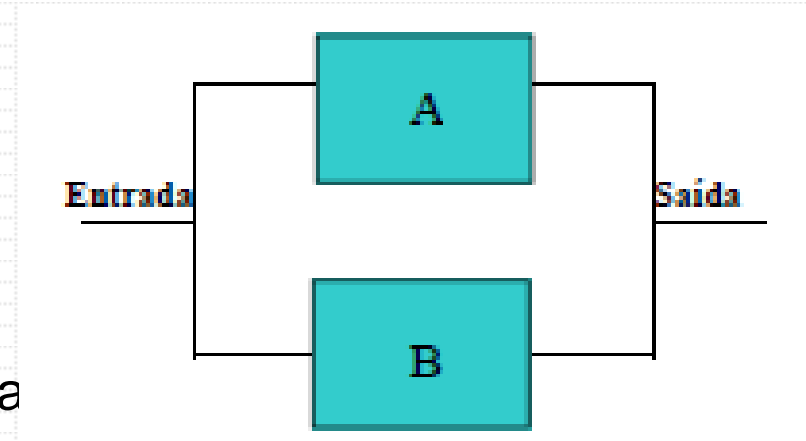
- ✓ A confiabilidade de um instrumento pode ser aumentada usando componentes confiáveis, outra forma é introduzir no sistema redundância de algum tipo, isto é usando dois ou mais componentes, grupos de componente ou sistemas de maneira que o instrumento continue a funcionar mesmo que parte dele falhe.

Tipos de redundância em instrumentos

✓ A redundância em instrumentação apresenta os seguintes tipos:

✓ **Redundância paralela**

✓ No caso o sistema ou parte deste é operado usando dois ou mais componentes, grupos de componente ou sistemas em paralelo de maneira que o instrumento continue a funcionar mesmo que parte dele falhe, veja Figura ao lado. Ex. Contatos de um relê ou contator em paralelo.



Redundância paralela

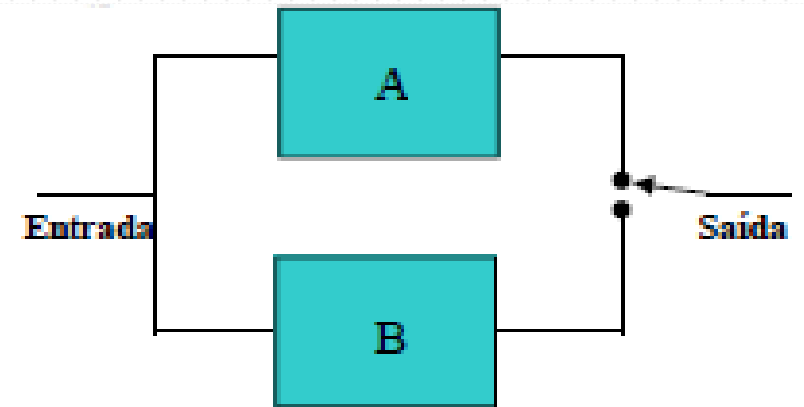
✓ Neste caso a confiabilidade do sistema é dada por :

$$R_p = R_A + R_B - R_A R_B$$

$$\text{Se } R_A = R_B = 0.9 \text{ então } R_p = 0.99$$

Tipos de redundância em instrumentos

- ✓ **Redundância “Stand-by”**
- ✓ Neste caso existem dois sub-sistemas idênticos, um deles o **A** está ligado à saída através de uma chave. Se o sistema **A** falha a chave muda de estado e o sistema **B** entra em funcionamento, veja Figura ao lado. É necessário decidir que o sistema **A** falhou para tomar a ação de chaveamento.



Redundância “Stand-by”

- ✓ Neste caso a confiabilidade do sistema é dada por :

$$R_{SB} = R.(1 - \ln(R))$$

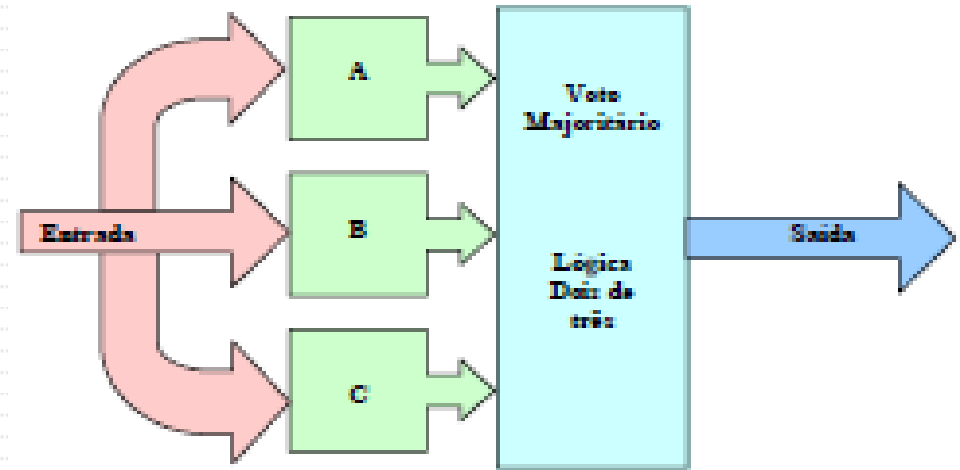
$$\text{Se } R_A=R_B=0.9 \text{ então } R_{SB}=0.9948$$

Tipos de redundância em instrumentos

- ✓ **Redundância por voto majoritário**
- ✓ Quando é difícil ou impossível de decidir se a medida que está sendo realizada está correta, adicionando mais uma leitura ao sistema, somente será possível decidir que uma das medidas está errada, porém não dar para decidir qual medida está certa.
- ✓ Em sistemas de alta confiabilidade implementa-se o esquema de votação majoritária, que contém pelo menos três sub-sistemas idênticos realizando a mesma leitura em conjunto com um dispositivo de votação majoritária, sendo então possível garantir uma medida confiável, veja Figura no próximo slide.

Tipos de redundância em instrumentos

- ✓ Neste caso supondo que todos os sub-sistemas possuem confiabilidade R e o sistema de voto majoritário é perfeitamente confiável então a confiabilidade total do sistema dois de três é dada por :



Redundância por voto majoritário

$$R_p = 3.R^2 - 2.R^3$$

Se $R_A = R_B = 0.9$ então $R_p = 0.972$