

1.5) Caracterização Estática

- ⌘ Relacionada com a caracterização de sistemas de ordem 0;
- ⌘ No caso de sensores reais, o tempo de resposta é finito (ordem >0)
- ⌘ A caracterização estática também se aplica a esses casos.
- ⌘ Para isso as medições devem ser feitas após o transiente inicial ou em faixas de frequências bem abaixo da frequência característica do equipamento.

1.5) Caracterização Estática

⌘ Série de figuras de mérito que definem quantitativamente a qualidade de um instrumento:

- faixa de medição
- faixa de indicação
- valor de uma divisão
- resolução
- limiar de mobilidade
- sensibilidade
- linearidade / erro de linearidade
- estabilidade do zero
- estabilidade do fator de escala
- erro sistemático
- erro aleatório
- incerteza
- precisão
- repetibilidade
- reprodutibilidade
- exatidão
- tolerância
- histerese
- confiabilidade

1.5) Caracterização Estática

⌘ Faixa de medição (*Measuring Range/Interval*):

- Conjunto de valores de grandezas da mesma natureza que pode ser medido por um dado instrumento de medição com incerteza de medição especificada, sob condições determinadas.
- Valores **máximo** e **mínimo** da grandeza para os quais o instrumento foi projetado para medir
- Exemplo: medidor de pressão
 - ⊗ Faixa de medição de 0 a 10 bar
 - ⊗ 10 bar = fundo de escala (*full scale – f.s.*)

1.5) Caracterização Estática

⌘ Faixa de medição (*Measuring Range/Interval*):

Applications

- For gaseous and liquid media that are not highly viscous or crystallising and will not attack copper alloy parts and polyamide
- Air pumps, compressors
- Plant protection
- Pneumatics
- Heating and sanitary industries

Special features

- Case and process connection one part (polyamide)
- Low weight
- Nominal size 40, 50 and 63
- Scale ranges 0 ... 2.5 to 0 ... 25 bar



Bourdon tube pressure gauge model 151.12

1.5) Caracterização Estática

⌘ Faixa de indicações (*Indication Range*):

- Conjunto de **valores** compreendidos entre duas **indicações** extremas
- Intervalo definido pelo **menor** e **maior** valor que pode **ser indicado** pelo dispositivo mostrador do instrumento.
- Pode ser igual à Faixa de Medição ou **MAIOR** do que ela
- **Indicação analógica**: intervalo delimitado pelos valores extremos da escala
- Exemplo: paquímetro mecânico
 - ☒ Faixa de medição de 0 a 150 mm
 - ☒ Faixa de indicações de 0 a 220 mm

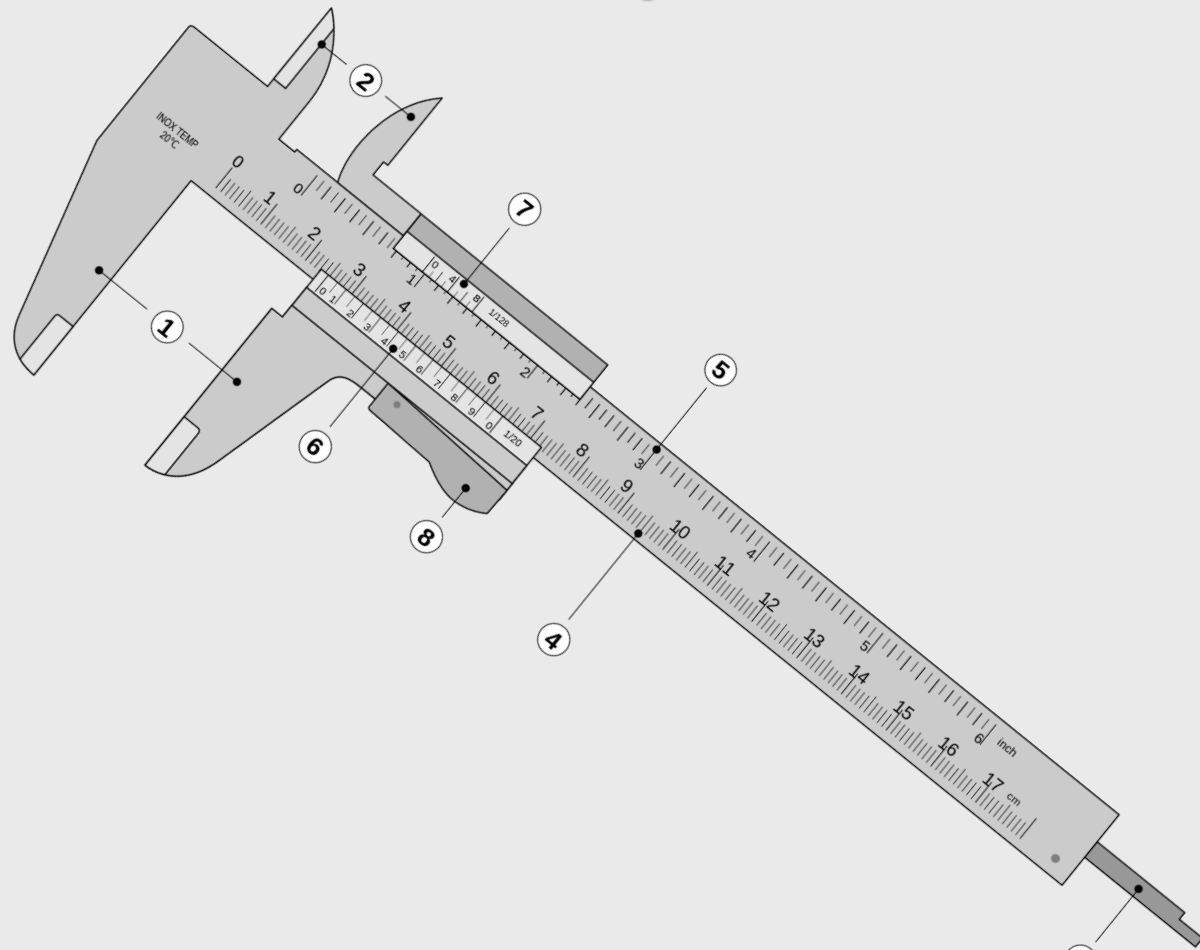
1.5) Caracterização Estática

⌘ Faixa de indicação (*Indication Range*):

- Conjunto de **valores** compreendidos entre duas **indicações** extremas
- Intervalo definido pelo **menor** e **maior** valor que pode **ser indicado** pelo dispositivo mostrador do instrumento.
- Pode ser igual à Faixa de Medição ou **MAIOR** do que ela
- **Indicação digital**: número de dígitos que podem ser mostrados
- Exemplo: micrômetro digital
 - ☒ Faixa de medição de 0 a 25 mm
 - ☒ Faixa de indicação de 0 a 99,999 mm (5 dígitos)
- Exemplo: voltímetro digital
 - ☒ Faixa de indicação de 0 a $\pm 1,999$ V (3 ½ dígitos)

1.5) Caracterização Estática

⌘ Faixa de indicações (*Indication Range*):



1.5) Caracterização Estática

⌘ Valor de uma Divisão

- Para instrumentos com mostradores analógicos, corresponde à diferença entre os valores da escala entre **duas marcas sucessivas**.
- Exemplos:
 - ☒ Escala milimétrica: $VD = 1 \text{ mm}$
 - ☒ Termômetro: $VD = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 - ☒ Velocímetro: $VD = 50 \text{ km/h}$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Resolução (*Resolution*):

- Suponha que o instrumento está medindo um **determinado valor** da grandeza de entrada, e que esta sofre alguma **variação**.
- A resolução é a **menor** variação da grandeza medida que causa uma variação **perceptível** na indicação correspondente no dispositivo mostrador.
- Duas definições ligeiramente diferentes:
 - ⊗ Instrumentos com mostradores analógicos
 - ⊗ Instrumentos digitais / com mostradores digitais

Exemplos de Resolução Analógica



1.5) Caracterização Estática

⌘ Resolução Digital (1):

- **Fator limitante:** número de bits de conversão A/D
- Indicação: **valor absoluto**
- Exemplo: conversor A/D
 - ⊗ Faixa de operação 0 V a 5 V
 - ⊗ 12 bits
 - ⊗ Resolução = $5 \text{ V} / 2^{12} \cong 1,22 \text{ mV}$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Resolução Digital (2):

- **Fator limitante:** número de dígitos no display
- Indicação: **valor absoluto**
- Exemplo: voltímetro digital
 - ⊗ Faixa de operação 0 V a 5 V
 - ⊗ 6 dígitos
 - ⊗ Indicação típica: 3,9344**5** V
 - ⊗ Resolução = $1 \times 10^{-5} \text{ V} \cong 10 \mu\text{V}$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Limiar de Mobilidade (*Discrimination Threshold*):

- **Maior** variação do **valor** de uma grandeza medida que **não causa variação detectável** na **indicação** correspondente do instrumento de medição, sendo a variação no sinal de entrada lenta e uniforme.
- Ao se aumentar gradualmente a quantidade medida, a indicação do instrumento **continua constante** até a entrada atingir um certo valor.
- Indicações:
 - ☒ valor absoluto
 - ☒ valor percentual do fundo de escala
- Exemplo: balança digital com resolução de 1 g
 - ☒ Indicação inicial de 50 g
 - ☒ Acrescentam-se pesos adicionais de 0,1 g (10% da resolução)
 - ☒ Após a adição de 9 pesos, a indicação muda para 51 g
 - ☒ O limiar de mobilidade é 0,9 g

Limiar de Mobilidade

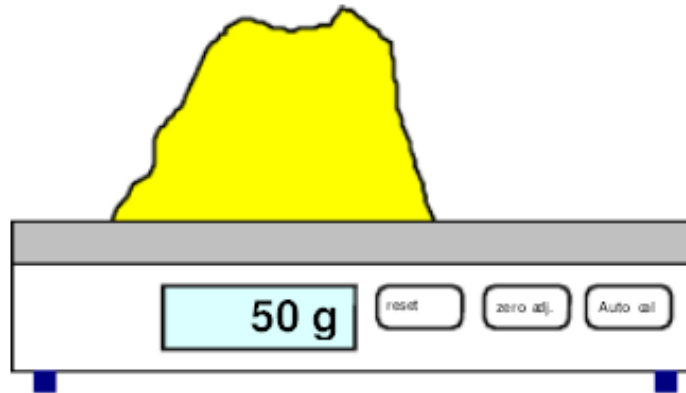


Figura 7.10 – Pesagem inicial

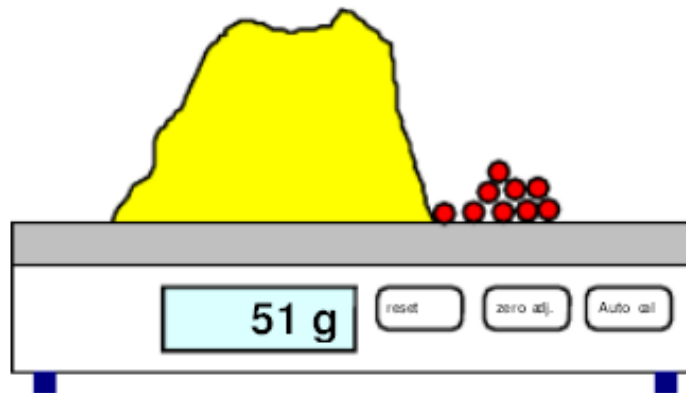


Figura 7.11 – Pesagem final

1.5) Caracterização Estática

⌘ Sensibilidade (*Sensitivity, Scale Factor*):

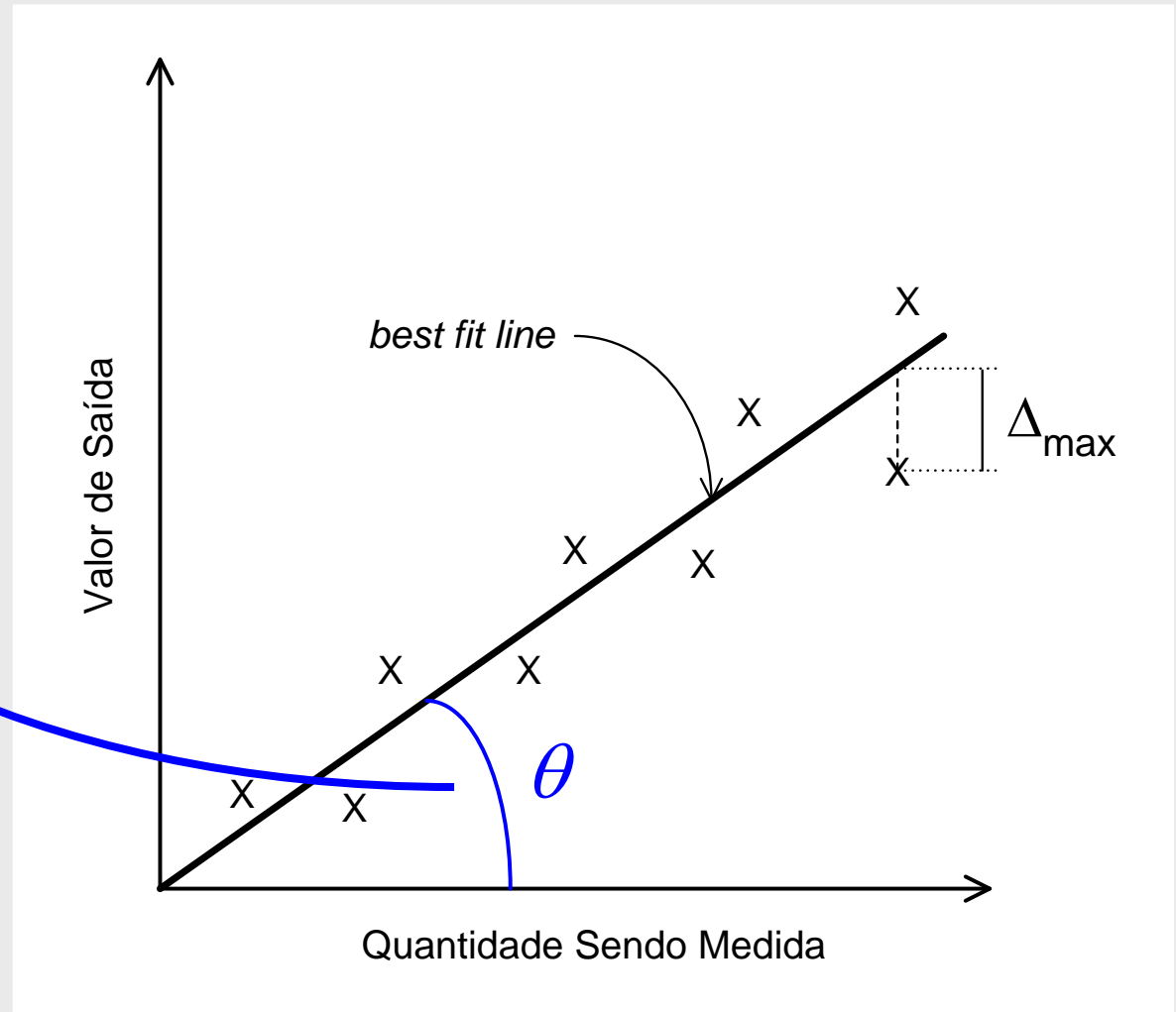
- Quociente entre a variação de uma **indicação** de um sistema de **medição** e a variação correspondente do **valor** da **grandeza** medida
- Também chamada de **Fator de Escala** ou **Fator de Conversão** (no caso de transdutores).
- Indica **o quanto a resposta do instrumento varia** quando o estímulo varia de uma certa quantidade.
- Indicação:
 - ⊗ razão de variações $S = \Delta \text{resposta} / \Delta \text{estímulo}$
- Exemplo: transdutor de pressão (manômetro analógico)
 - ⊗ Variação de pressão de 2 bar → Deflexão de 10 °
 - ⊗ Sensibilidade = 5 °/bar

1.5) Caracterização Estática

⌘ Sensibilidade

=

$\tan(\theta)$



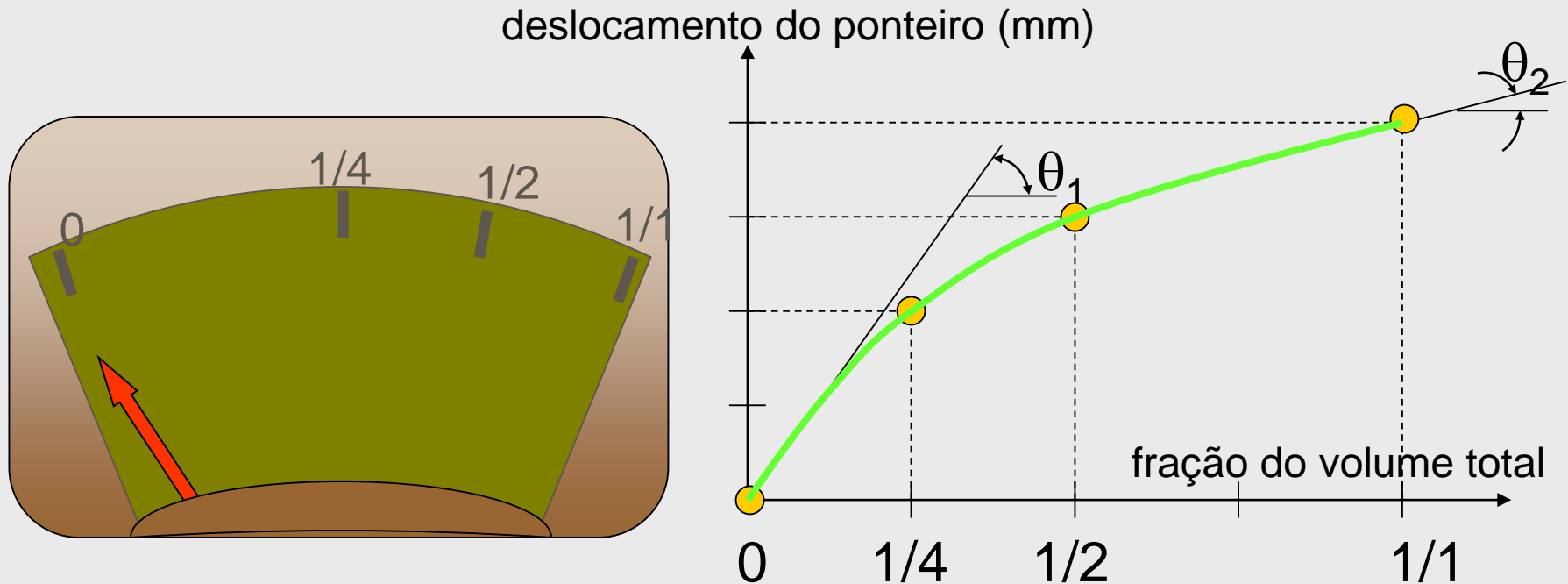
1.5) Caracterização Estática

⌘ Sensibilidade (*Sensitivity, Scale Factor*):

- Alguns fabricantes indicam a Sensibilidade como:
 - 1 mV/V/bar 5 mV/V/°C
- Esta definição associa a **tensão de alimentação** do transdutor à sensibilidade.
- Se os transdutores forem alimentados por 5 V, as sensibilidades para os exemplos acima seriam:
 - 5 mV/bar 25 mV/°C
- Se os transdutores forem alimentados por 10 V, as sensibilidades para os exemplos acima seriam:
 - 10 mV/bar 50 mV/°C

1.5) Caracterização Estática

- Sensibilidade (variável): indicador do volume de combustível de um Fusca



1.5) Caracterização Estática

⌘ Linearidade (*Linearity*):

- Geralmente deseja-se que a saída de um instrumento seja **linearmente proporcional** à quantidade medida.
- Inicialmente, levantam-se **pares entrada-saída** ao longo da faixa de operação do instrumento.
- Em seguida, ajusta-se a **melhor reta** aos pontos obtidos.
- O **erro de linearidade** é dado pelo **desvio máximo** das saídas em relação à reta de ajuste (*best fit*)
- Indicações:

☒ desvio máximo

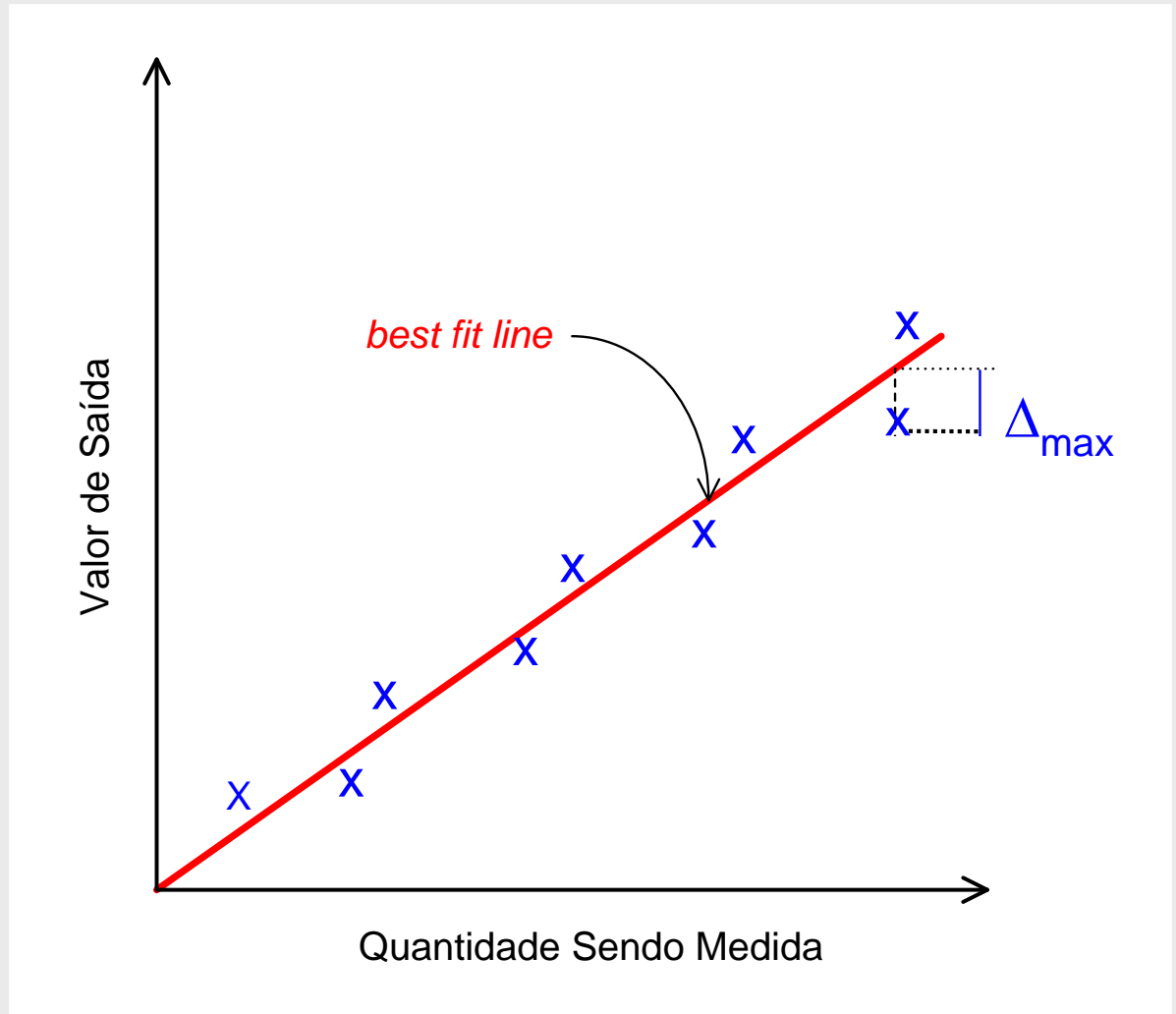
Δ_{\max}

☒ desvio máximo percentual

$100\% \times \Delta_{\max} / VFE$

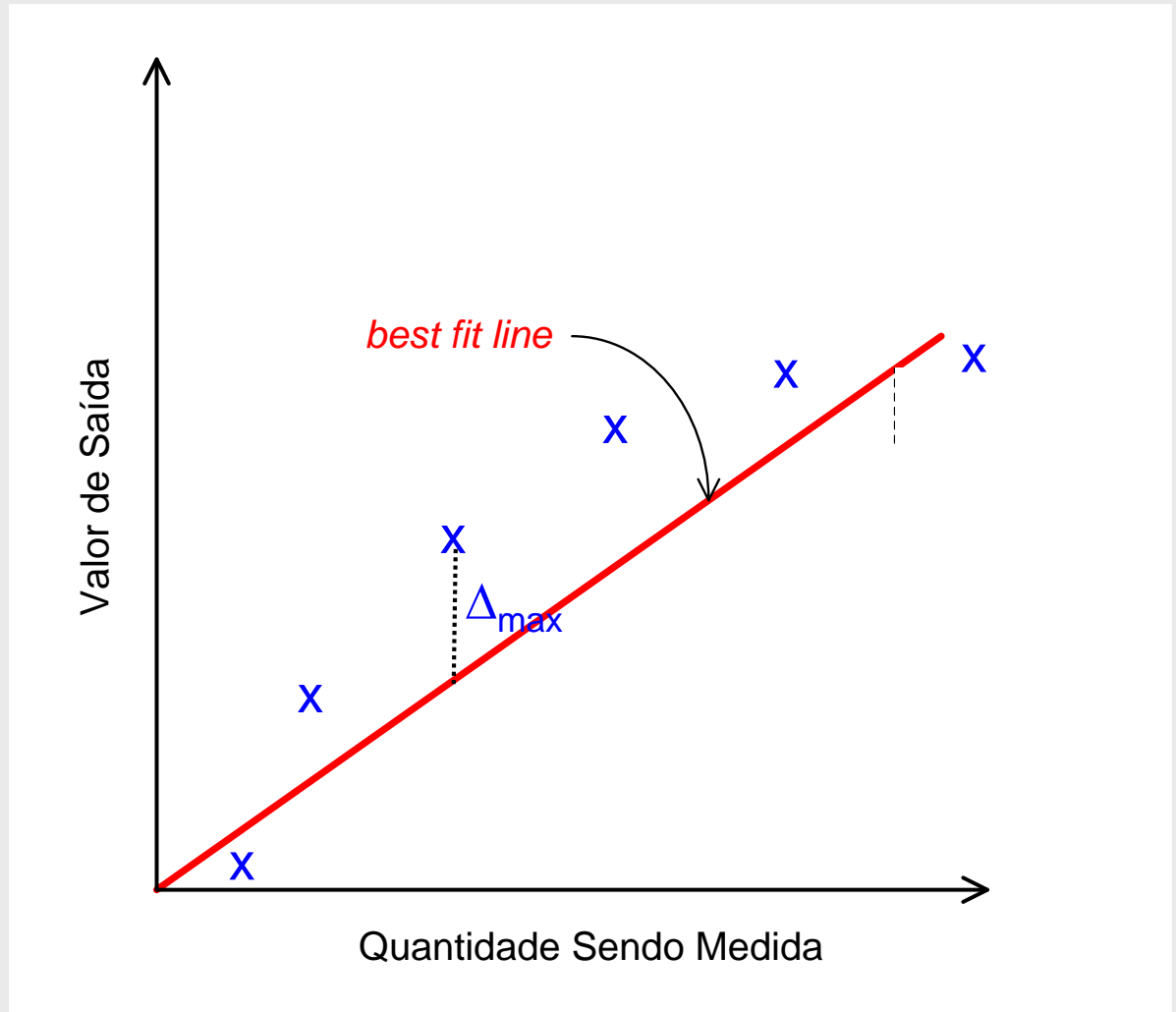
1.5) Caracterização Estática

⌘ Linearidade



1.5) Caracterização Estática

⌘ Linearidade



1.5) Caracterização Estática

⌘ Estabilidade do Zero (*Zero Drift, Null Drift*):

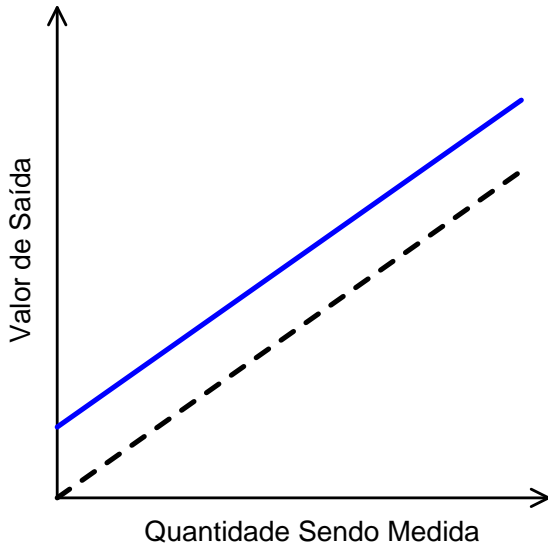
- Descreve o efeito de variações nas **condições ambientais** (ou do **envelhecimento**) sobre o erro sistemático ou tendência (*bias/offset*) do instrumento.
- Geralmente pode ser **ajustado** (zerado) por meio de um procedimento de **recalibração**
- Indicações:
 - ☒ desvio inicial por variação de temperatura $\Delta_i / \Delta^\circ\text{C}$
 - ☒ desvio inicial por tempo decorrido (x1000h) $\Delta_i / \Delta t$
- Exemplo: voltímetro
 - ☒ Variação de 10 mV / °C

1.5) Caracterização Estática

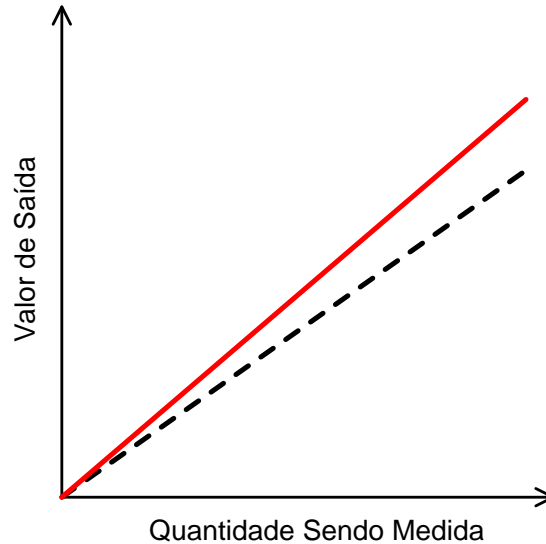
⌘ Estabilidade do Fator de Escala (*Sensitivity Drift, Scale Factor Drift*):

- Similar à estabilidade do **zero**
- Descreve o efeito de **variações nas condições ambientais** sobre o **fator de escala** (sensibilidade) do instrumento.
- Indicações:
 - ☒ variação na sensibilidade por variação de temperatura $\Delta S / \Delta^\circ\text{C}$
 - ☒ variação na sensibilidade por tempo decorrido $\Delta S / \Delta t$
- Exemplo: transdutor de pressão
 - ☒ Variação de 5 mV / bar / °C

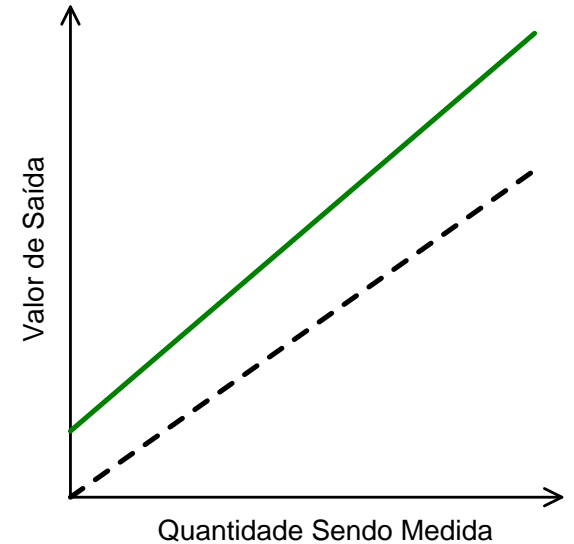
1.5) Caracterização Estática



Variação de Offset



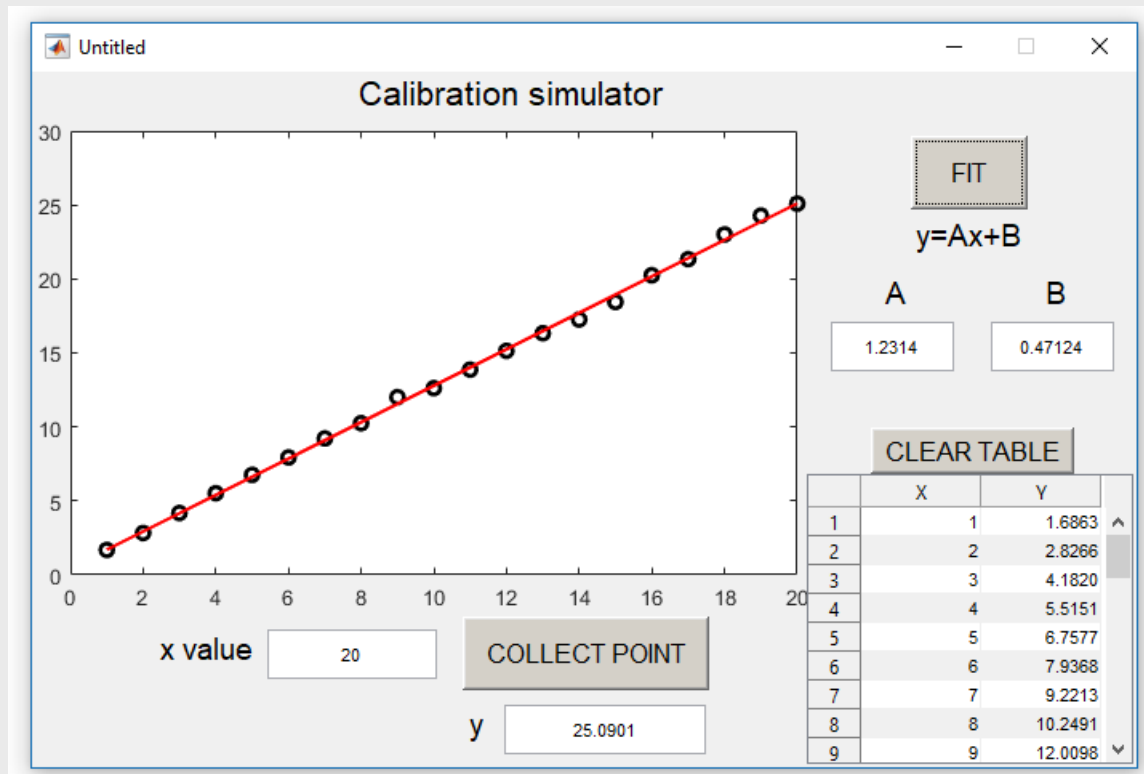
Variação de Sensibilidade



Variação de Offset e de Sensibilidade

1.5) Caracterização Estática

⌘ Exemplo com simulador de calibração



1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro de Medição (*Measurement Error*):

- Diferença entre o **valor medido** de uma grandeza e um **valor de referência**
- **Valor de referência** pode ser o Valor Verdadeiro (desconhecido) ou o Valor Convencional (conhecido)
- É a diferença entre a **indicação** pelo instrumento ou sistema de medição e o **valor de referência** do mensurando.
- Matematicamente: $E = I - VR$
 - E erro de medição
 - I indicação do sistema de medição
 - VR valor de referência do mensurando

1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro Sistemático (*Systematic Error or Deterministic*):

- É a **parcela previsível** do erro.
- A princípio é possível estimar este erro.
- No caso do erro determinístico ser constante, quanto maior o número de medições, melhor é a estimativa do desse erro
- Matematicamente: $Es = I_{\infty} - V$
 - Es erro sistemático de medição
 - I_{∞} média de um número infinito de indicações
 - V valor verdadeiro do mensurando

1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro Sistemático (*Systematic Error*):

- É a **parcela previsível** do erro. Corresponde ao **erro médio**
- Erro que se manifesta ao longo de **toda a faixa de medição**
- Geralmente pode ser **ajustado** (zerado) por meio de um procedimento de **calibração**
- Indicações:
 - ☒ erro absoluto Δ_i
 - ☒ erro percentual $100\% \times \Delta_i / VFE$
- Exemplo: balança de banheiro
 - ☒ Tipicamente desvio inicial de 1 kg, ajustável com parafuso
 - ☒ Pessoa de 70 kg → 71 kg Pessoa de 100 kg → 101 kg

1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro Aleatório (*Random Error*):

➤ É a **parcela imprevisível** do erro de medição, responsável pelas **variações** encontradas em medições repetidas.

➤ Indicações:

☒ erro máximo

Δ_{\max}

☒ erro máximo percentual

$100\% \times \Delta_{\max} / VFE$

☒ erro máximo ppm

$10^6 \Delta_{\max} / VFE$

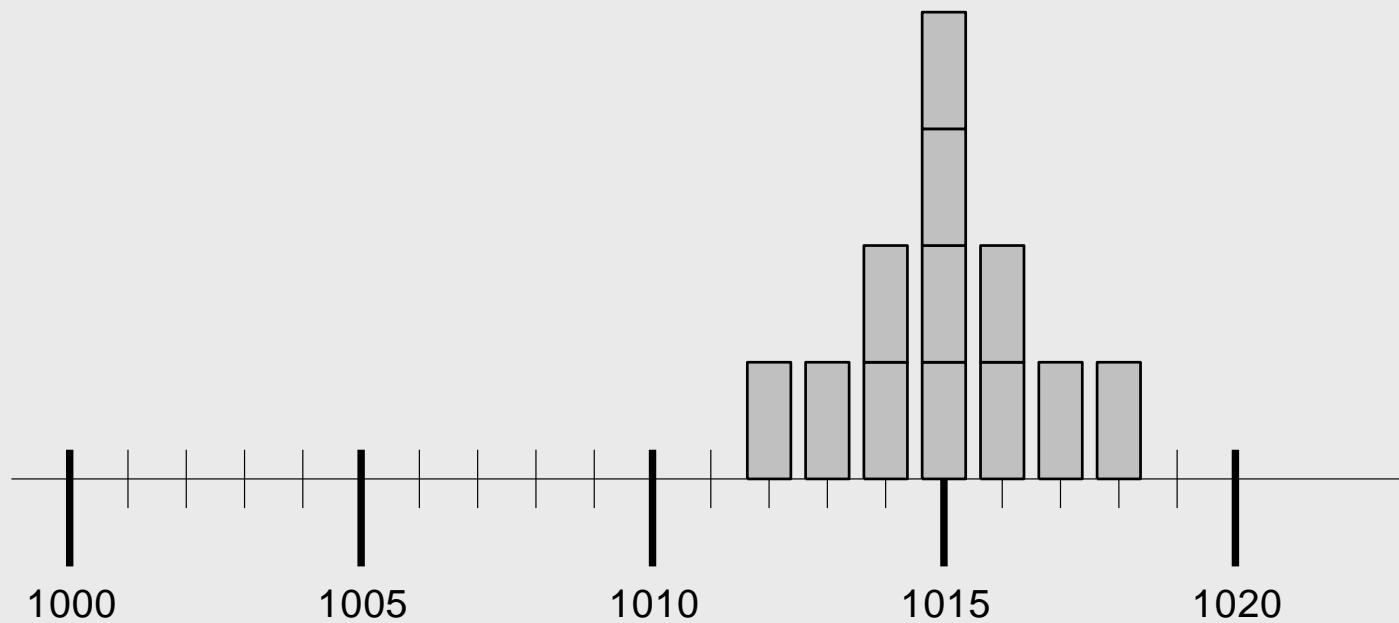
1.5) Caracterização Estática

⌘ Exemplo Prático: Medição de Massa

- Massa conhecida: $(1,00000 \pm 0,000001)$ kg
- Incerteza expandida de medição de 0,001 g, muito pequena no caso da balança em questão
- Valor convencional: 1000 g
- 12 indicações obtidas a partir de medições repetidas da massa padrão (valores em gramas):
 - 1014, 1015, 1017, 1012, 1015, 1018,
1014, 1015, 1016, 1013, 1016, 1015

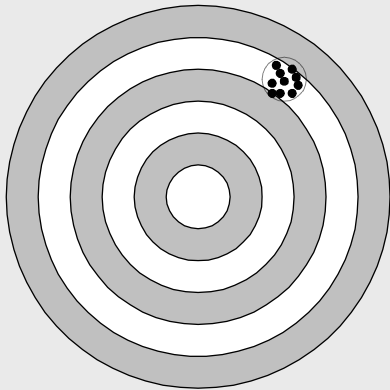
1.5) Caracterização Estática

⌘ Exemplo Prático: Medição de Massa

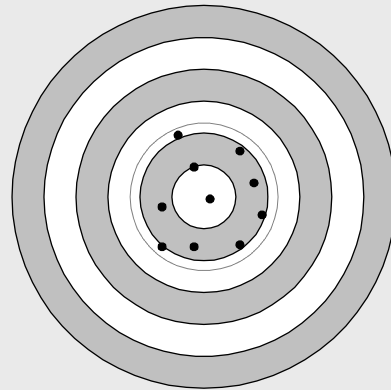


1.5) Caracterização Estática

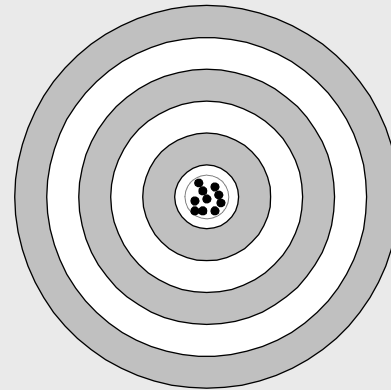
⌘ Tipos de Erros: Sistemático x Aleatório



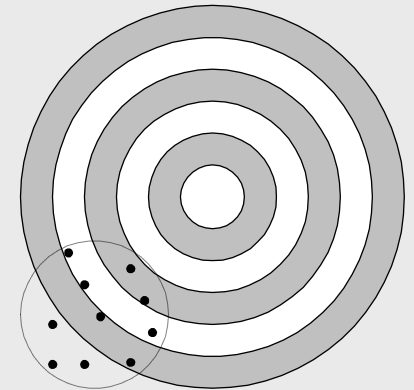
A



B



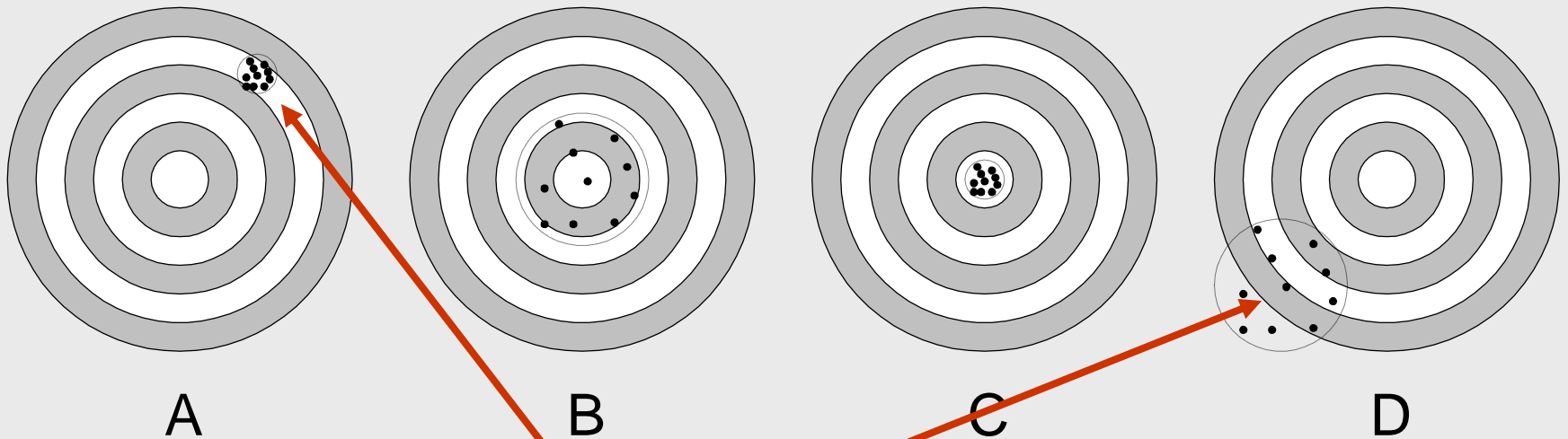
C



D

1.5) Caracterização Estática

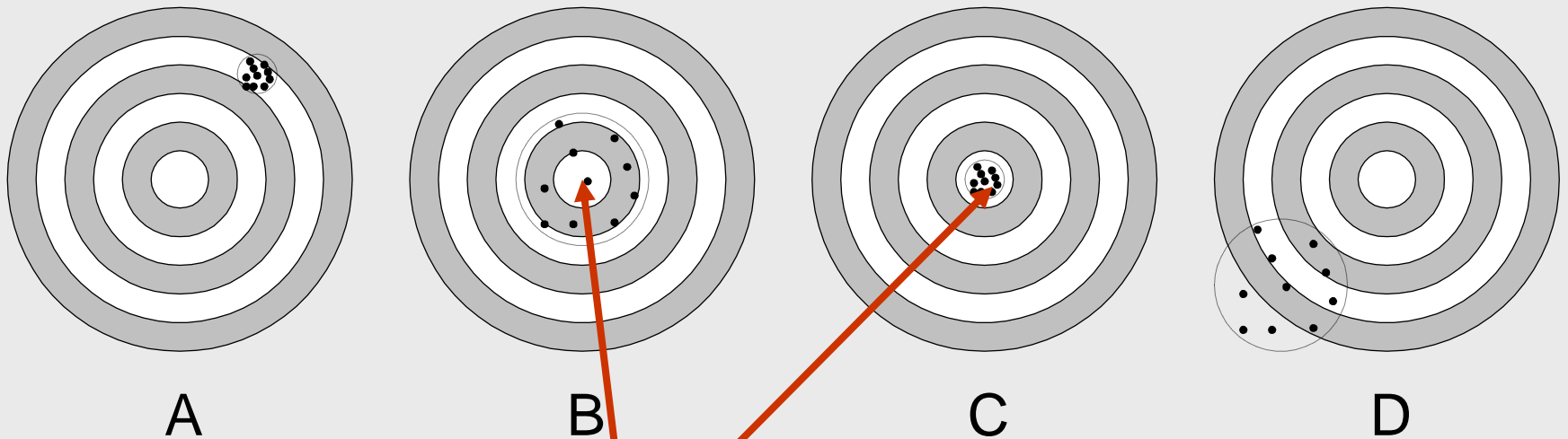
⌘ Tipos de Erros: Sistemático x Aleatório



Erros Sistemáticos GRANDES

1.5) Caracterização Estática

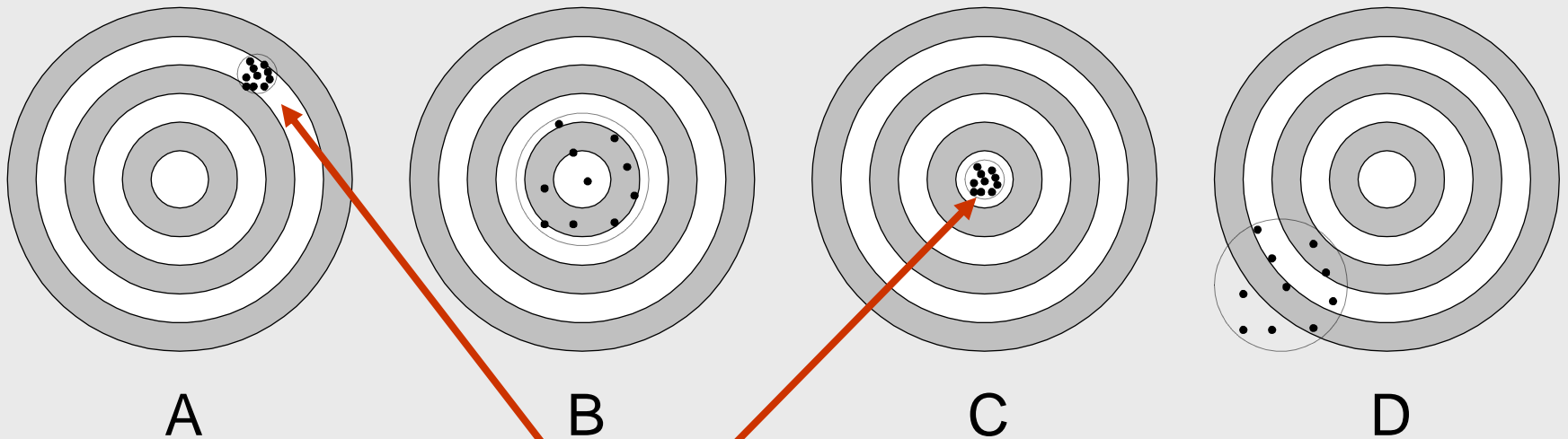
⌘ Tipos de Erros: Sistemático x Aleatório



Erros Sistemáticos PEQUENOS

1.5) Caracterização Estática

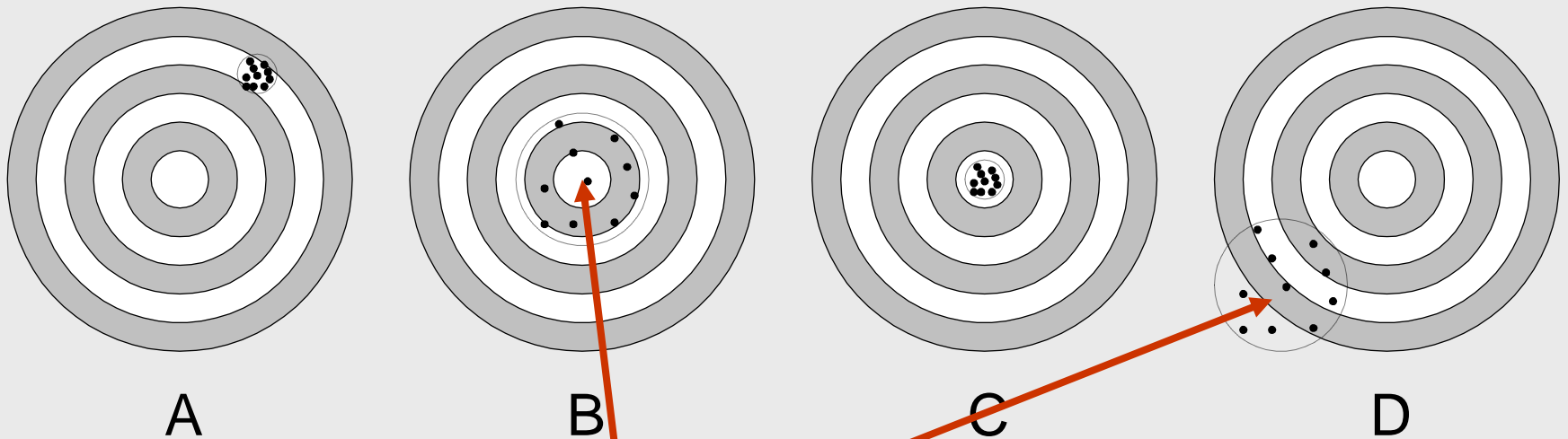
⌘ Tipos de Erros: Sistemático x Aleatório



Erros Aleatórios PEQUENOS

1.5) Caracterização Estática

⌘ Tipos de Erros: Sistemático x Aleatório



Erros Aleatórios GRANDES

1.5) Caracterização Estática

⌘ Tendência (*Bias, Offset*):

- É uma **estimativa** do Erro Sistemático
- Matematicamente: $Td = \bar{I} - VC$
 - Td tendência
 - \bar{I} média de um número finito de indicações
 - VC valor convencional do mensurando
- O VC é uma **estimativa suficientemente próxima** do valor verdadeiro do mensurando
- No exemplo da massa, $VC = 1000 \text{ g}$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Tendência (*Bias, Offset*):

- **IMPORTANTE:** A erro sistemático por ser corrigido/compensado, subtraindo-se a tendência
- **Indicação Corrigida:** É a indicação de um instrumento ou sistema de medição após a compensação dos erros sistemáticos

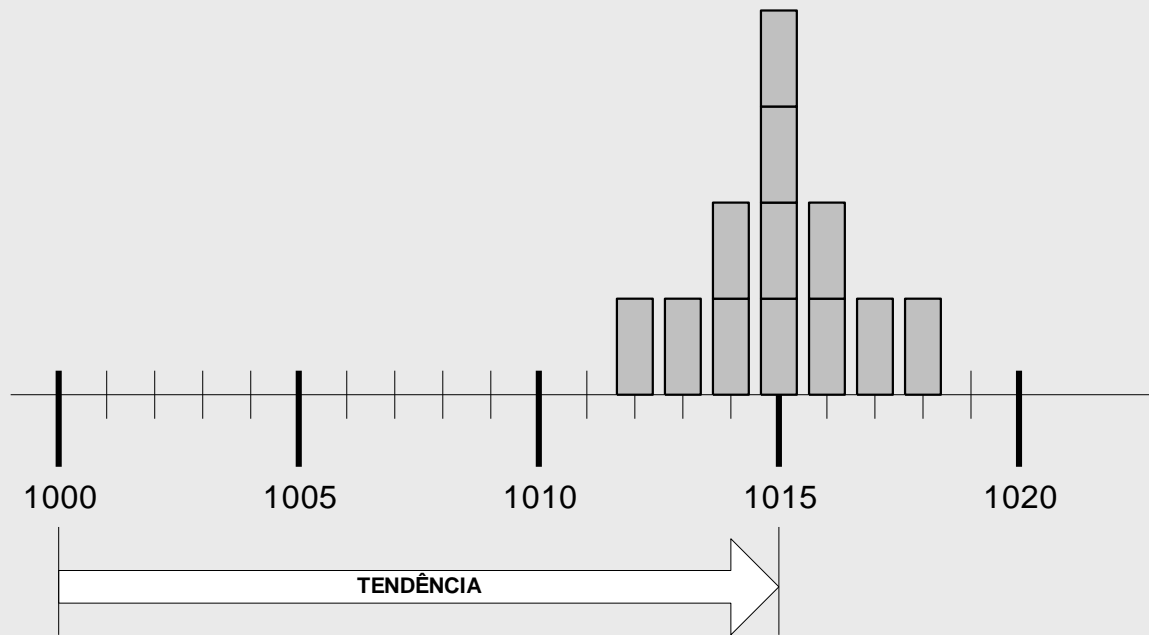
1.5) Caracterização Estática

⌘ Exemplo Prático: Medição de Massa

- Massa conhecida: $(1,00000 \pm 0,000001)$ kg
 - VC = 1000 g
 - 12 indicações obtidas a partir de medições repetidas da massa padrão (valores em gramas):
 - 1014, 1015, 1017, 1012, 1015, 1018,
1014, 1015, 1016, 1013, 1016, 1015
 - Valor médio das indicações = 1015 g
 - **Tendência: $T_d = 1015 - 1000 = +15$ g**
 - Correção: $-T_d = -15$ g
 - Indicações corrigidas:
 - 999, 1000, 1002, 997, 1000, 1003,
999, 1000, 1001, 998, 1001, 1000
- Valor médio das indicações corrigidas = 1000 g

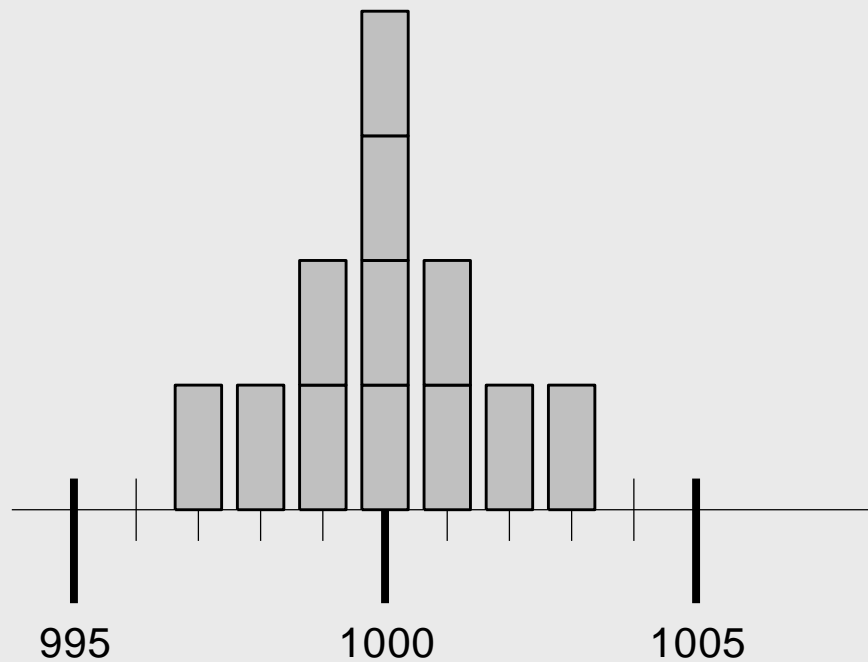
1.5) Caracterização Estática

⌘ Exemplo Prático: Medição de Massa



1.5) Caracterização Estática

⌘ Exemplo Prático: Medição de Massa



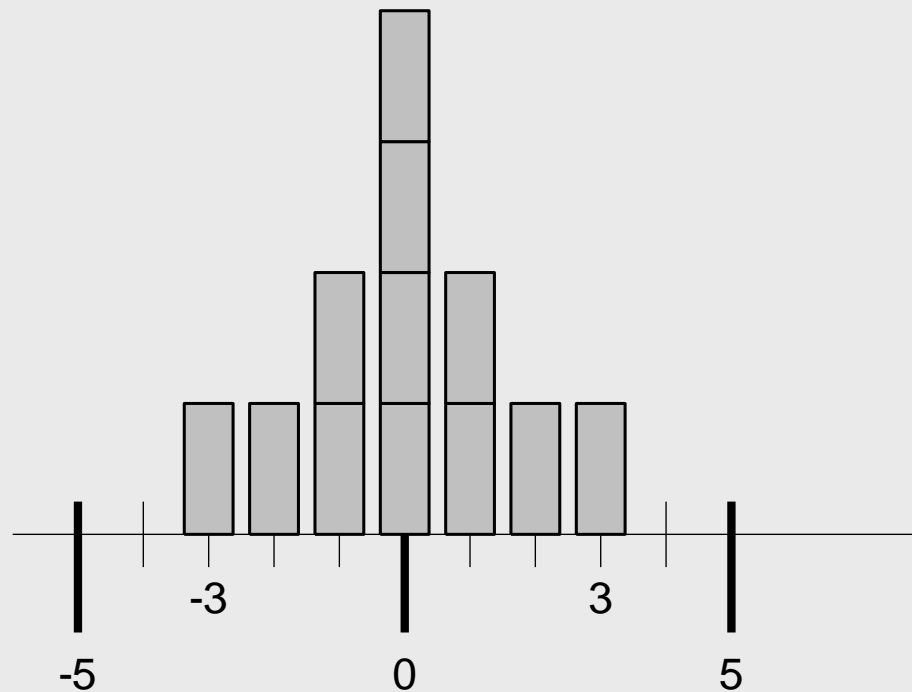
1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro Aleatório (*Random Error*):

- É a **parcela imprevisível** do erro de medição, responsável pelas **variações** encontradas em medições repetidas.
- Pode ser calculado como: $Ea_i = I_i - \bar{I}$
 - Ea_i erro aleatório da i-ésima indicação
 - I_i i-ésima indicação
 - \bar{I} média das indicações
- No exemplo da massa:
 - $Ea = [-1, 0, 2, -3, 0, 3, -1, 0, 1, -2, 1, 0]$
- **Valor médio** do Erro Aleatório é sempre **ZERO**

1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro Aleatório (*Random Error*):



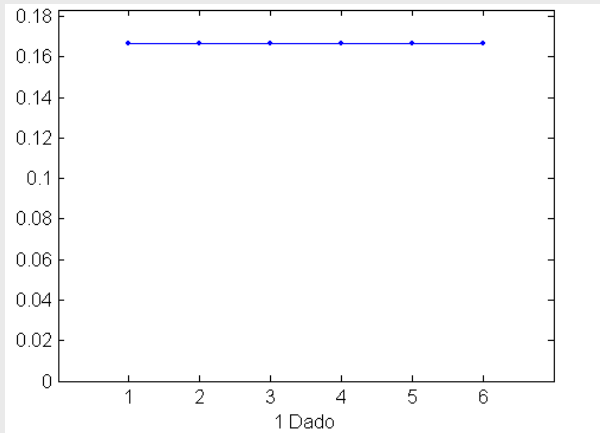
1.5) Caracterização Estática

⌘ Erro Aleatório: Distribuição Gaussiana

- Explicação: Teorema do Limite Central
- Quanto mais variáveis aleatórias são combinadas, mais o comportamento da combinação resultante se aproxima do comportamento de uma distribuição normal (ou gaussiana)
- Exemplo prático: distribuição de probabilidades do valor médio do lançamento de N dados ($N = 1, 2, 3, \dots$) de 6 lados, não viciados

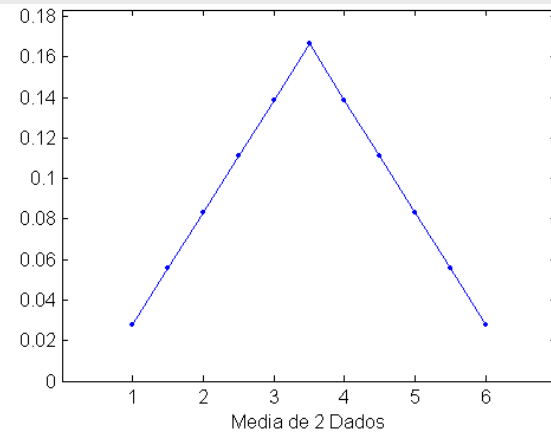
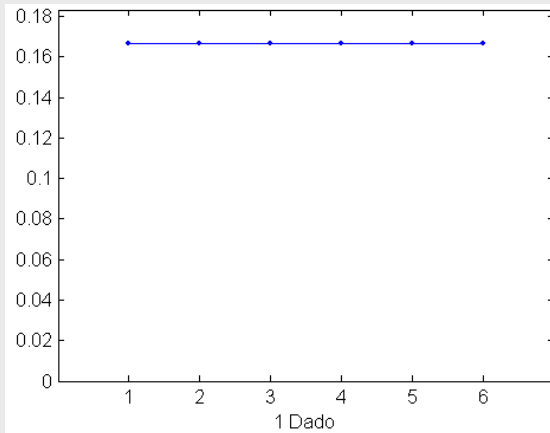
1.5) Caracterização Estática

⌘ Teorema do Limite Central



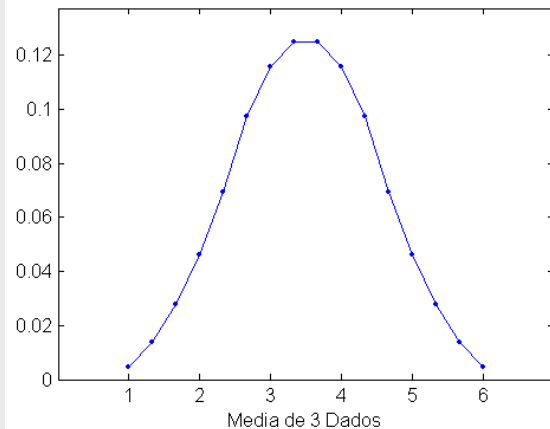
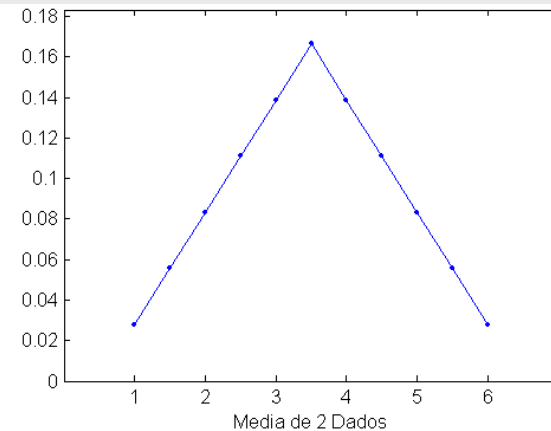
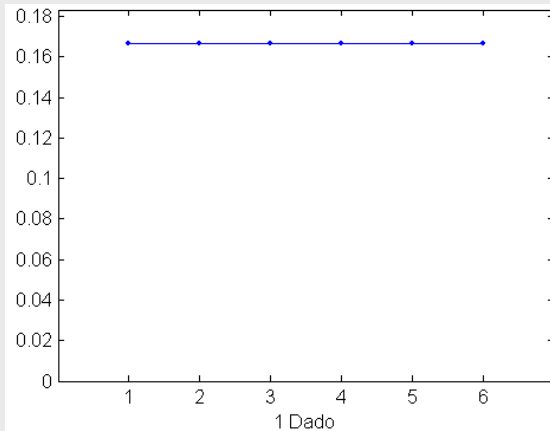
1.5) Caracterização Estática

⌘ Teorema do Limite Central



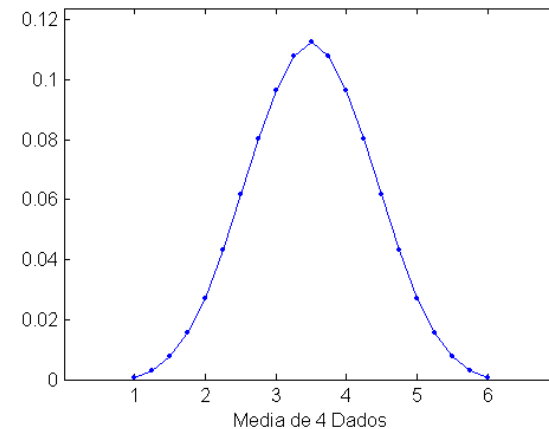
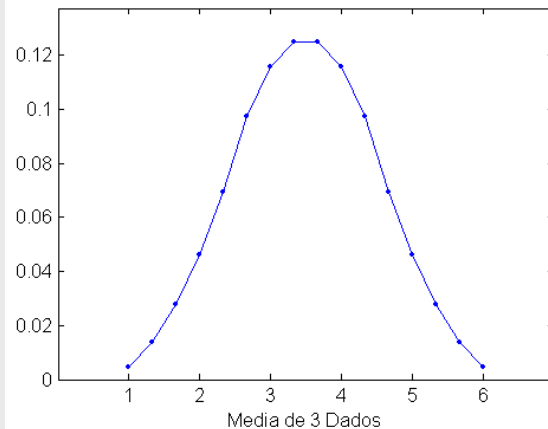
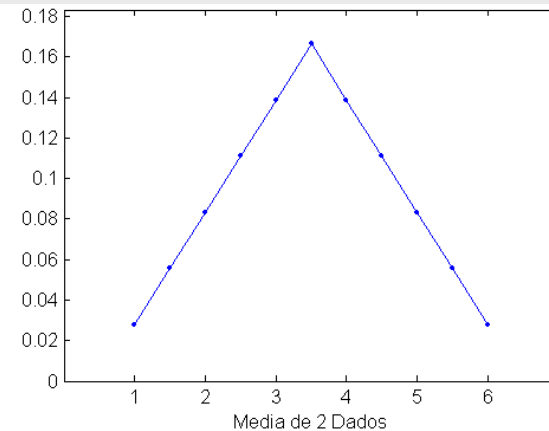
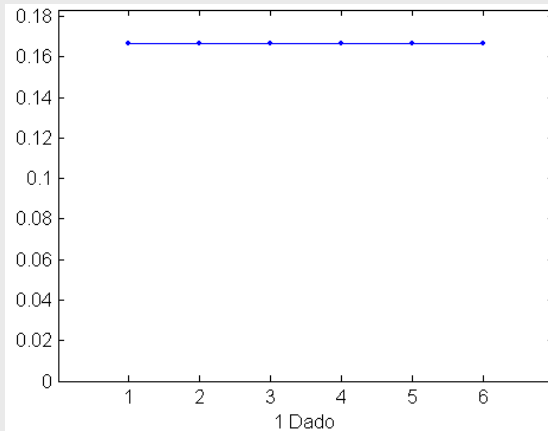
1.5) Caracterização Estática

⌘ Teorema do Limite Central



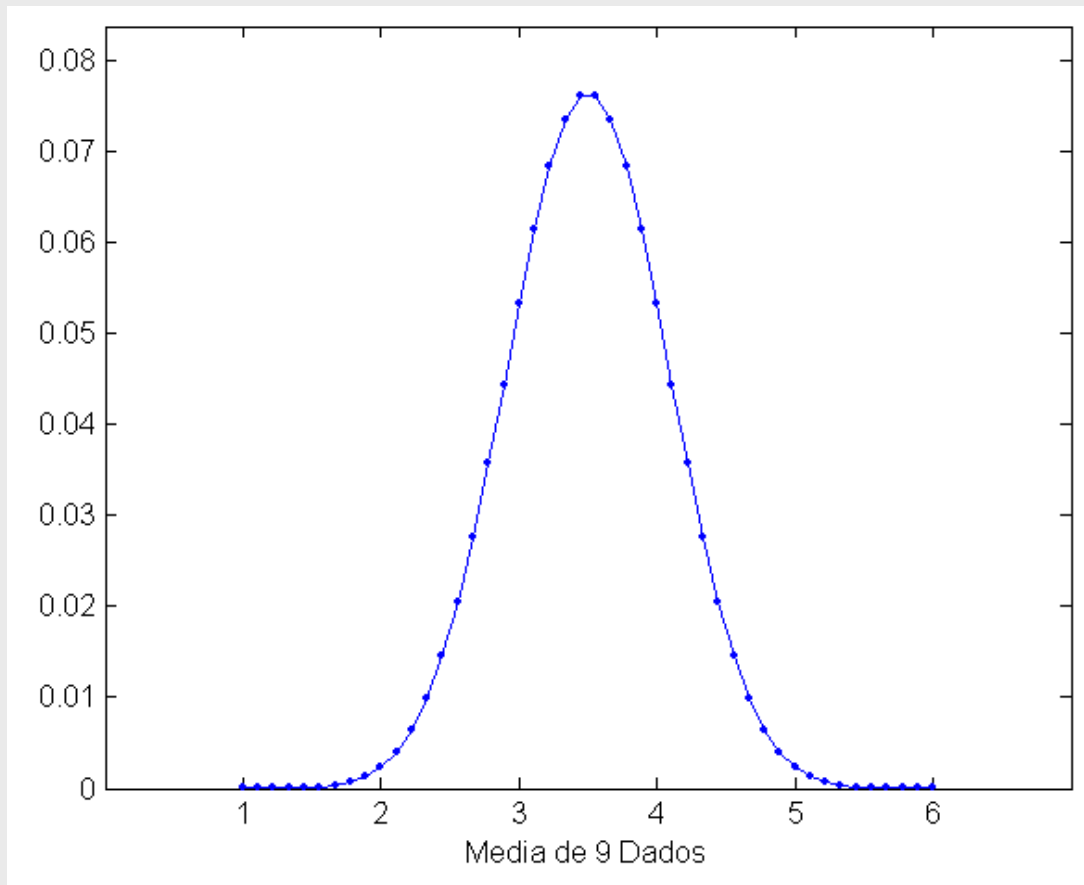
1.5) Caracterização Estática

⌘ Teorema do Limite Central



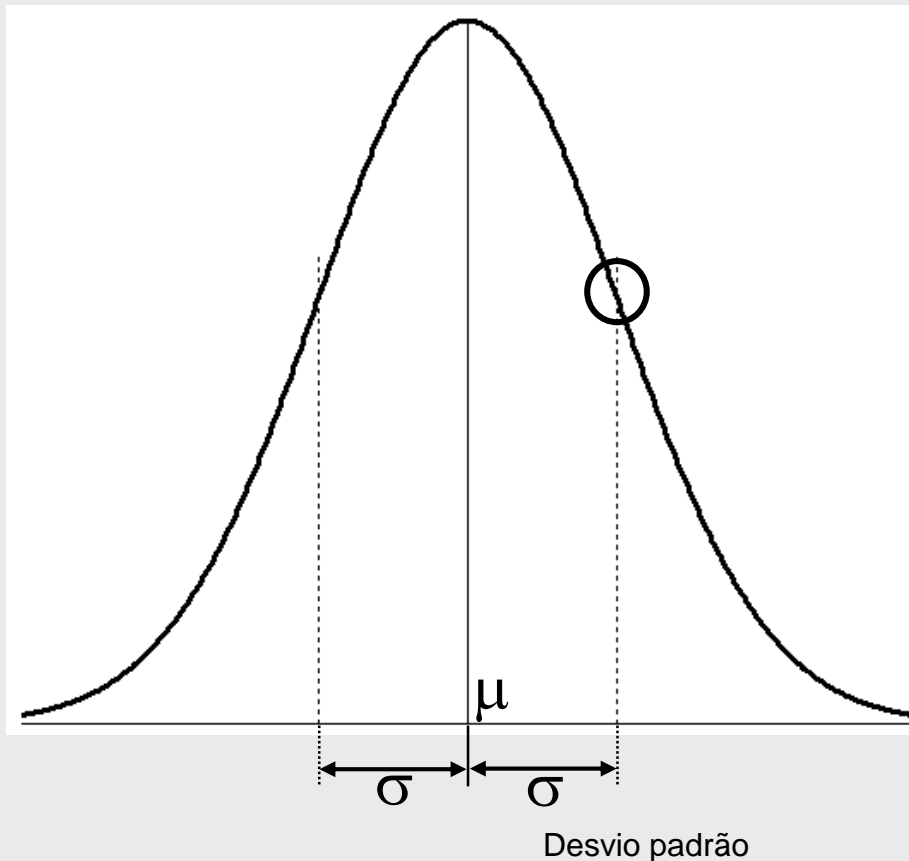
1.5) Caracterização Estática

⌘ **Teorema do Limite Central:** as médias de amostras grandes e aleatórias são aproximadamente normais



1.5) Caracterização Estática

⌘ Distribuição Normal ou Gaussiana



$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1 = 100\%$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Desvio Padrão:

- Desvio-padrão (standard deviation) de uma distribuição é uma medida do seu **grau de dispersão**

- Amostra infinita (população):

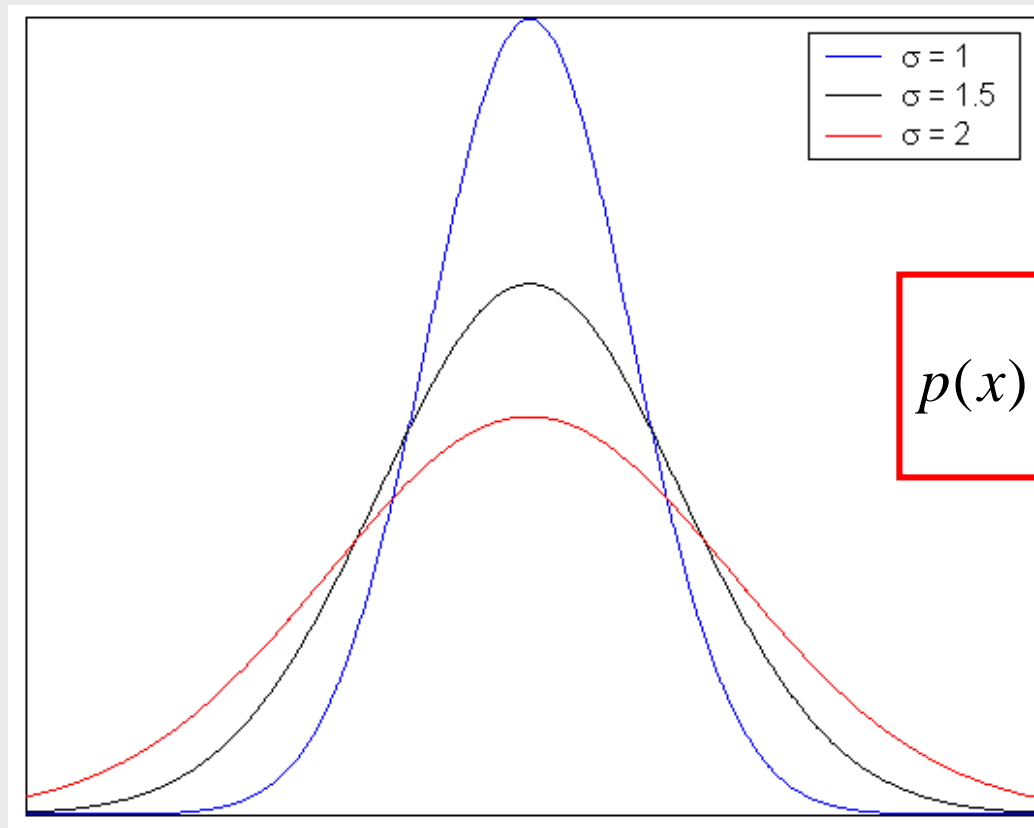
$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}}$$

- Amostra finita: **desvio padrão amostral**

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}}$$

1.5) Caracterização Estática

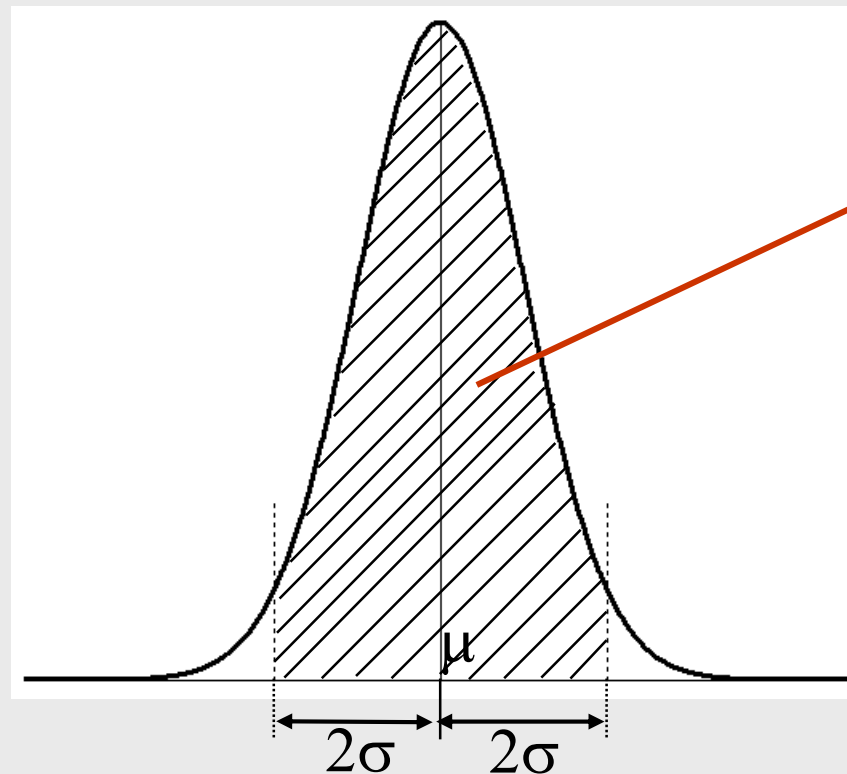
⌘ Distribuição Normal ou Gaussiana



$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Distribuição Normal ou Gaussiana



Área = 95,45%

1.5) Caracterização Estática

⌘ Distribuição Normal ou Gaussiana

- Faixas típicas de integração simétrica em torno da média, definindo uma **dada probabilidade** de ocorrência da variável aleatória em questão:

$\mu - \sigma$	até	$\mu + \sigma$	→	68,27%
$\mu - 2\sigma$	até	$\mu + 2\sigma$	→	95,45%
$\mu - 1,96\sigma$	até	$\mu + 1,96\sigma$	→	95,00%
$\mu - 2,58\sigma$	até	$\mu + 2,58\sigma$	→	99,00%
$\mu - 3,00\sigma$	até	$\mu + 3,00\sigma$	→	99,73%

1.5) Caracterização Estática

⌘ Incerteza Padrão (*Standard Uncertainty*):

- Incerteza de medição expressa na forma de **um desvio-padrão em um intervalo de confiança**
- Incerteza-padrão (u) é uma medida da incerteza na estimação da média de uma amostra.
- Para uma amostra finita, temos:

$$u = \sqrt{\frac{s^2}{n}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ No exemplo Prático: Medição de Massa

- Massa conhecida: $(1,00000 \pm 0,000001)$ kg
- 12 indicações obtidas a partir de medições repetidas da massa padrão (valores em gramas):
 - 1014, 1015, 1017, 1012, 1015, 1018,
1014, 1015, 1016, 1013, 1016, 1015

Valor médio das
indicações = 1015 g

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (I_i - 1015)^2}{12 - 1}} / \sqrt{12} = 0,48 \text{ g}$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Incerteza Expandida (*Expanded Uncertainty*):

- Medida de incerteza U , calculada pela **multiplicação da incerteza padrão u por um Fator de Abrangência k_p**
- Também é uma medida da intensidade da **componente aleatória do erro de medição.**
- Define um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma **extensa fração da distribuição de valores** que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.
- Incerteza padrão abrange somente **68,27%** dos valores possíveis.

1.5) Caracterização Estática

⌘ Fator de Abrangência:

- Para distribuição **Normal**, de acordo com o **nível da confiança** desejado:

Nível da confiança p (por cento)	Fator de abrangência k_p
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

1.5) Caracterização Estática

⌘ Fator de Abrangência:

- Na prática, como a incerteza-padrão é **estimada** pelo desvio-padrão da amostra, deve-se definir o **fator de abrangência** com base na distribuição t de Student
- **Distribuição de Probabilidades t de Student** é uma família de distribuições parametrizada pelo número de **graus de liberdade** (ν)

1.5) Caracterização Estática

⌘ Graus de Liberdade (*Degrees of Freedom*):

- O número de graus de liberdade (ν) reflete o **grau de segurança** com que a estimativa da incerteza-padrão é conhecida
- Se o desvio-padrão σ (e portanto a incerteza-padrão) é conhecido **exatamente**, o número de graus de liberdade é considerado **infinito**
- Se a incerteza-padrão é estimada pelo **desvio-padrão de uma amostra com n indicações**, o número de graus de liberdade é $\nu = n - 1$

1.5) Caracterização Estática

⌘ No exemplo Prático: Medição de Massa

- Massa conhecida: $(1,00000 \pm 0,000001)$ kg
- 12 indicações obtidas a partir de medições repetidas da massa padrão (valores em gramas):
 - 1014, 1015, 1017, 1012, 1015, 1018,
1014, 1015, 1016, 1013, 1016, 1015

Valor médio das
indicações = 1015 g

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (I_i - 1015)^2}{12 - 1}} \quad \Big/ \quad \sqrt{12} \quad = 0,48 \text{ g}$$

$v = 12 - 1 = 11$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Fator de Abrangência:

- Para distribuição *t* de Student, de acordo com o nível da confiança desejado, com 11 graus de liberdade:

Nível da confiança p (por cento)	Fator de abrangência k_p
68,27	1,048
90	1,796
95	2,201
95,45	2,255
99	3,106
99,73	3,850

Normal:

1,000
1,645
1,960
2
2,576
3

1.5) Caracterização Estática

⌘ No exemplo Prático: Medição de Massa

- Massa conhecida: $(1,00000 \pm 0,000001)$ kg
- 12 indicações obtidas a partir de medições repetidas da massa padrão (valores em gramas):
 - 1014, 1015, 1017, 1012, 1015, 1018,
1014, 1015, 1016, 1013, 1016, 1015

Valor médio das
indicações = 1015 g

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (I_i - 1015)^2}{12 - 1}} \Big/ \sqrt{12} = 0,48 \text{ g}$$
$$v = 12 - 1 = 11$$
$$k_p = t = 2,255$$

Para nível da confiança $p = 95,45\%$

1.5) Caracterização Estática

⌘ No exemplo Prático: Medição de Massa

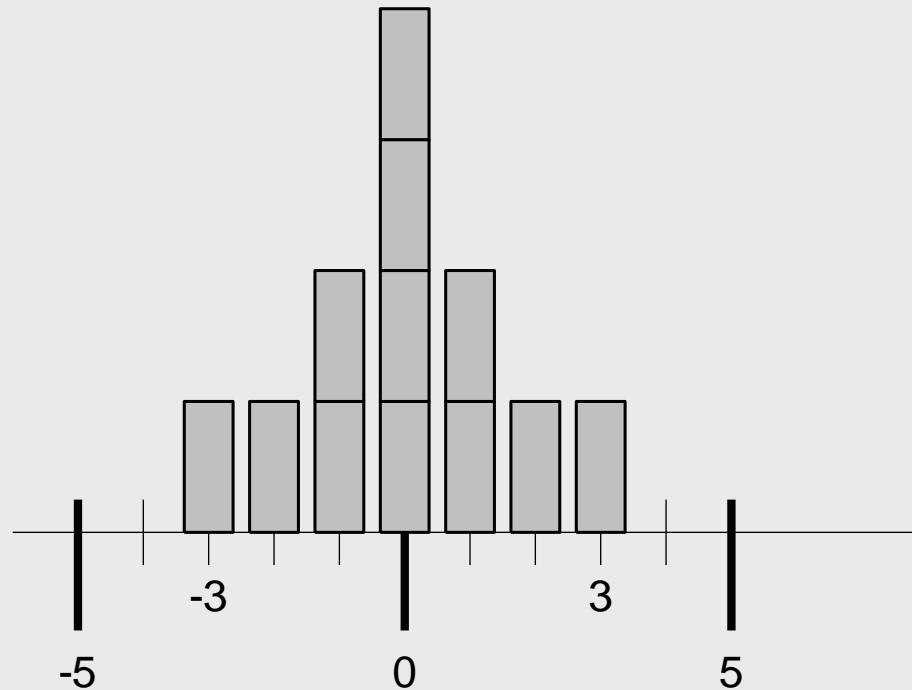
- Fator de abrangência para 95,45% de Probabilidade e 11 graus de liberdade, $k_p = 2,255$
- Assim, a **incerteza expandida** é:

$$U = k_p \cdot u = 2,255 \cdot 0,48 \text{ g} = 1,07 \text{ g}$$

- O **intervalo de abrangência** definido por $\pm 1,07 \text{ g}$ corresponde ao intervalo dentro do qual espera-se obter uma média da população (real) com 95,45% de probabilidade.

1.5) Caracterização Estática

⌘ No exemplo Prático: Medição de Massa



1.5) Caracterização Estática

⌘ Incerteza Expandida (Expanded Uncertainty):

➤ Exemplo: termômetro caseiro de mercúrio

☒ Incerteza expandida de $0,5\text{ °C}$, com nível da confiança de $95,45\%$

☒ Se a medida da temperatura ambiente for 20 °C , a figura de mérito acima implica que a temperatura real pode ser qualquer valor entre $19,5\text{ °C}$ e $20,5\text{ °C}$

☒ Como o corpo humano não consegue discriminar variações tão pequenas de temperatura, este erro intrínseco é **adequado**

☒ No caso de um processo químico, por exemplo, este erro já seria **inaceitável**, e outro instrumento seria necessário.

1.5) Caracterização Estática

⌘ Incerteza Expandida (Expanded Uncertainty):

- Exemplo: medidor de pressão
 - ⊗ Faixa de operação de 0 a 10 bar
 - ⊗ Incerteza expandida de 1,0% f.s.
 - ⊗ 1,0% do valor de fundo de escala (*full scale*)
 - ⊗ Fundo de escala = 10 bar
- Erro aleatório máximo esperado em qualquer medida é 0,1 bar
 - ⊗ Valor real = 9,0 bar → 8,9 bar ≤ Valor medido ≤ 9,1 bar
 - ⊗ Erro aleatório máximo $\cong 1,1\%$

 - ⊗ Valor real = 1,0 bar → 0,9 bar ≤ Valor medido ≤ 1,1 bar
 - ⊗ Erro aleatório máximo = 10% !!!

1.5) Caracterização Estática

⌘ Incerteza Expandida e Erro Aleatório

- É importante escolher o instrumento adequado de acordo com a **magnitude esperada** dos valores a serem medidos!
- Se os valores esperados estão entre **0 e 1 bar**, **não se deve** utilizar um instrumento cuja faixa de operação seja de **0 a 10 bar**.

1.5) Caracterização Estática

⌘ Precisão de Medição (*Measurement precision*):

- **Grau de concordância** entre indicações ou valores medidos, obtidos por **medições repetidas**, no mesmo objeto ou em objetos similares, **sob condições especificadas**.
- Juntamente com o erro sistemático (ou tendência), dá uma indicação da **qualidade** (ou, eventualmente, da estabilidade) do instrumento.
- Tem relação com o **desvio padrão** das indicações, enquanto que o **erro sistemático** tem relação com o **erro médio** das indicações
- É geralmente expressa **numericamente** por características como o desvio-padrão, a variância ou a **incerteza expandida**, sob condições especificadas de medição

1.5) Caracterização Estática

⌘ Repetibilidade de Medição (*Measurement Repeatability*):

- **Conceito quantitativo** que indica a qualidade de um instrumento ou sistema de medição
- **Precisão de medição** sob um conjunto de **condições de repetibilidade**

1.5) Caracterização Estática

⌘ Condições de Repetibilidade de Medição:

- Condição de medição em um conjunto de condições, as quais incluem:
 - mesmo procedimento de medição,
 - mesmos operadores,
 - mesmo sistema de medição,
 - mesmas condições de operação,
 - mesmo local, e
 - medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo

1.5) Caracterização Estática

⌘ Reprodutibilidade de Medição (*Measurement Reproducibility*):

- **Conceito quantitativo** que indica a qualidade de um instrumento ou sistema de medição
- **Precisão de medição** sob um conjunto de **condições de reprodutibilidade**

1.5) Caracterização Estática

⌘ Condições de Reprodutibilidade de Medição:

- Condição de medição em um conjunto de condições, as quais incluem :
 - diferentes locais
 - diferentes operadores,
 - diferentes sistemas de medição (que podem utilizar procedimentos de medição diferentes), e/ou
 - medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares.

1.5) Caracterização Estática

⌘ Incerteza Combinada (*Combined Uncertainty*):

- A incerteza-padrão considera **somente** os erros aleatórios introduzidos pelo **instrumento** ou sistema de medição
- Há **outras fontes de erro** quase sempre presentes: erros do operador, influência de fatores ambientais, etc
- Todas essas fontes de erro podem ser agregadas de modo a calcular a **incerteza combinada de medição**
- **Fora do escopo desta disciplina → (Métodos Experimentais)**

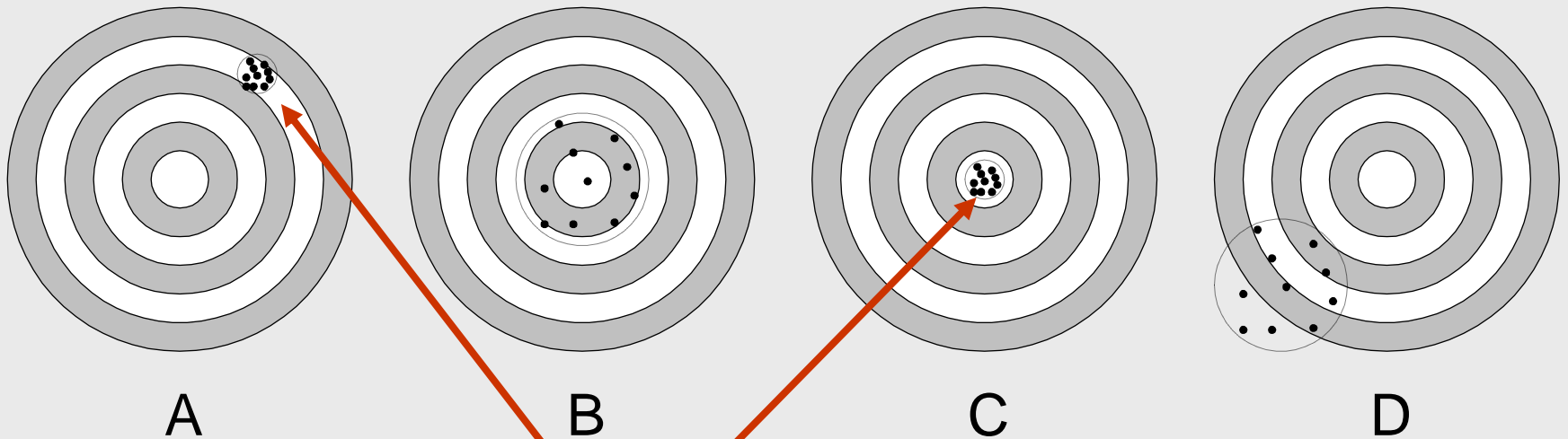
1.5) Caracterização Estática

⌘ Exatidão de Medição (*Measurement Accuracy*):

- Grau de concordância entre um **valor medido** e um **valor verdadeiro** de um mensurando
- Também chamada de **acurácia**
- É um conceito **qualitativo**. Não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita **mais exata** quando fornece um erro de medição menor.
- Frequentemente é erroneamente confundida com a **Precisão**

1.5) Caracterização Estática

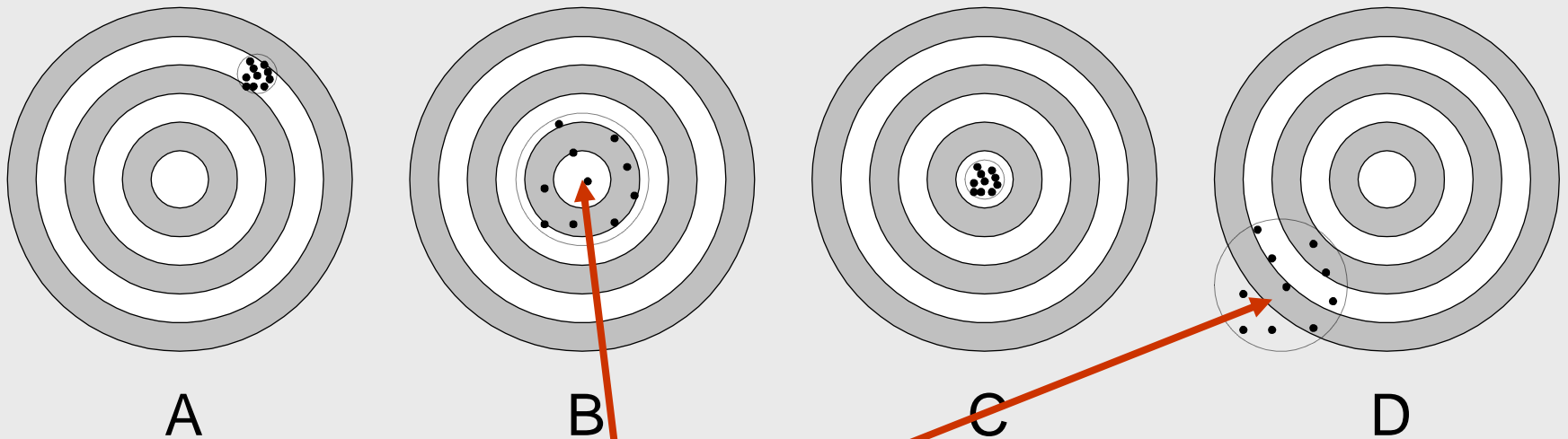
⌘ Precisão x Exatidão



ALTA Precisão (muito preciso)

1.5) Caracterização Estática

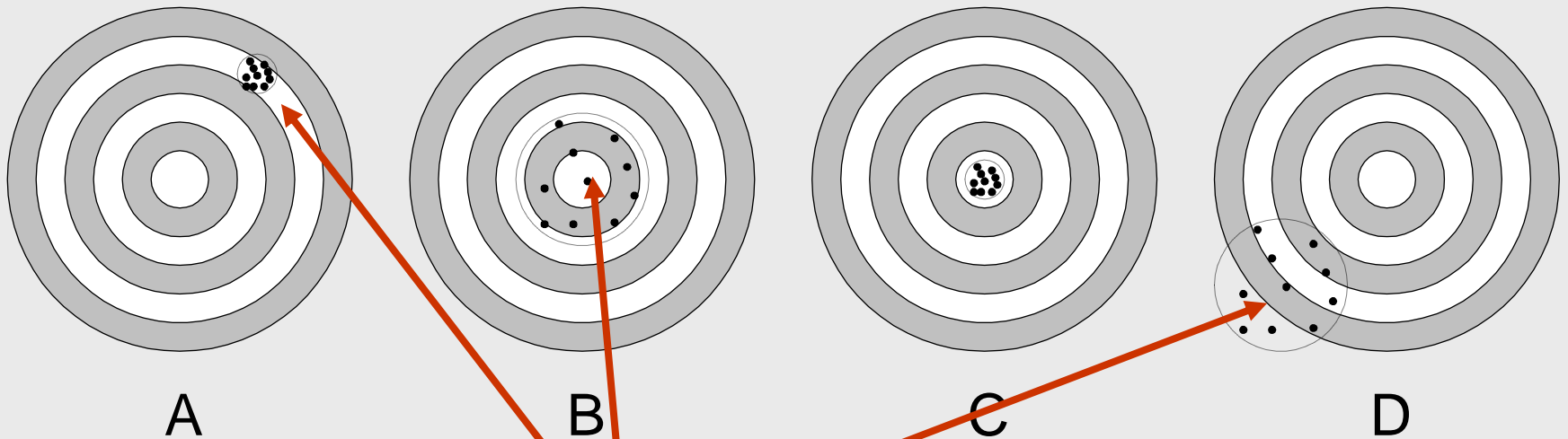
⌘ Precisão x Exatidão



BAIXA precisão (pouco preciso)

1.5) Caracterização Estática

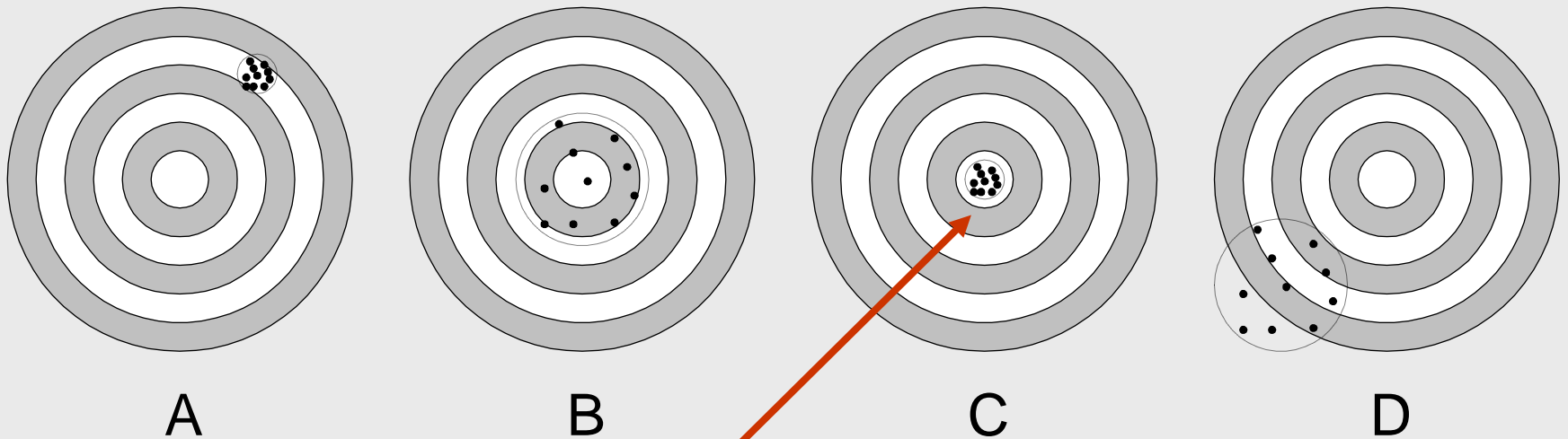
⌘ Precisão x Exatidão



PEQUENA Exatidão (pouco exato)

1.5) Caracterização Estática

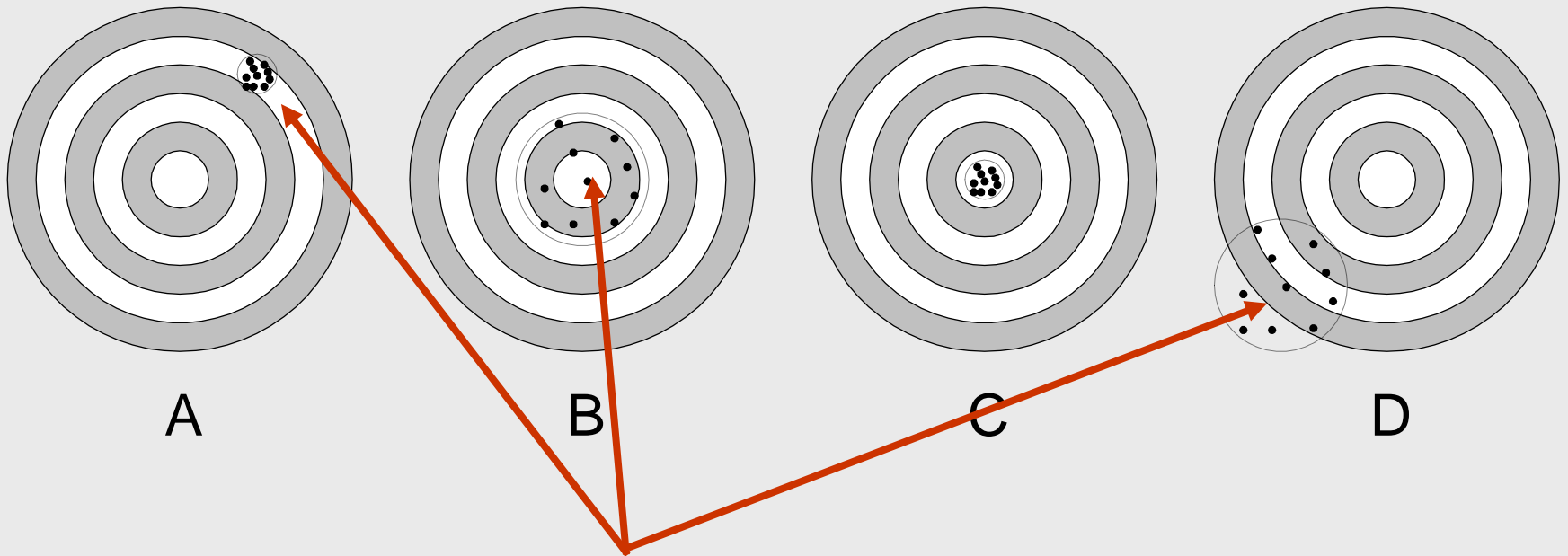
⌘ Precisão x Exatidão



GRANDE exatidão (muito exato)

1.5) Caracterização Estática

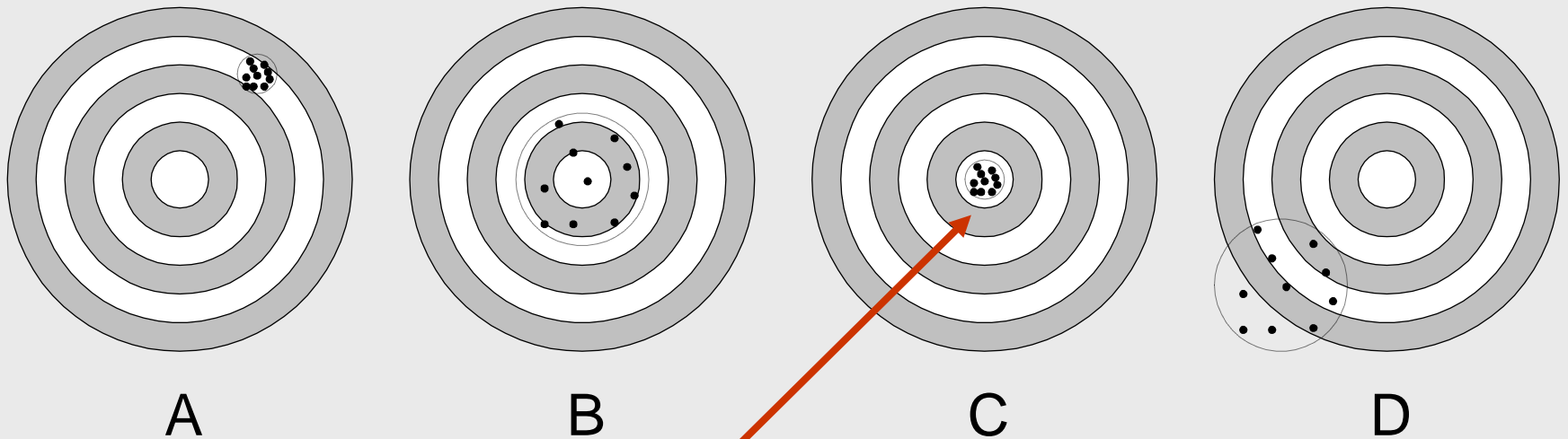
⌘ Exatidão x Veracidade



PEQUENA Exatidão (pouco exato)

1.5) Caracterização Estática

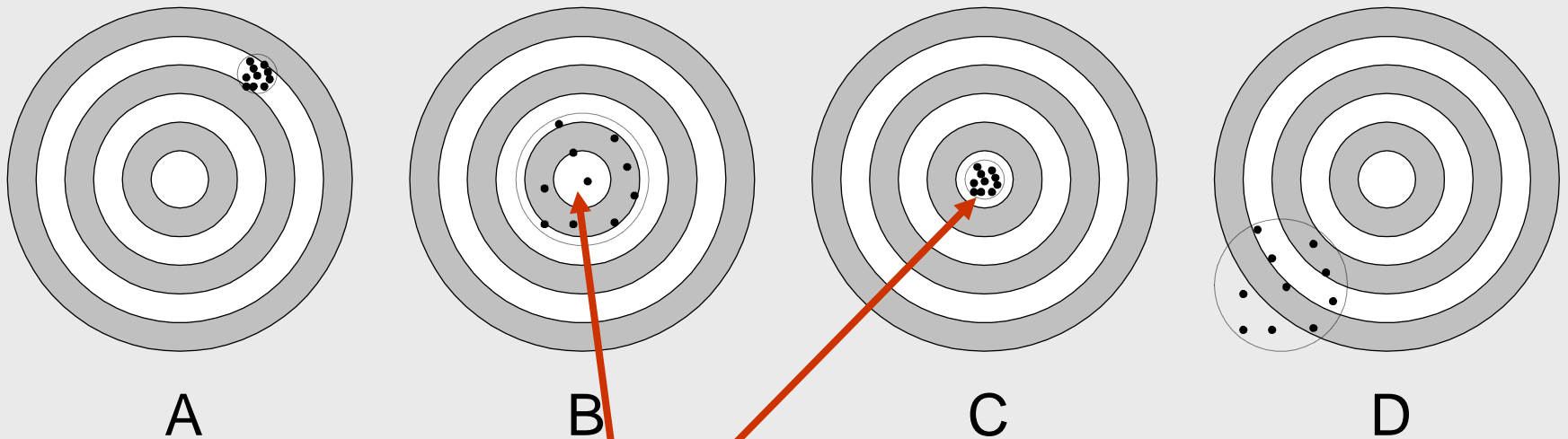
⌘ Exatidão x Veracidade



GRANDE exatidão (muito exato)

1.5) Caracterização Estática

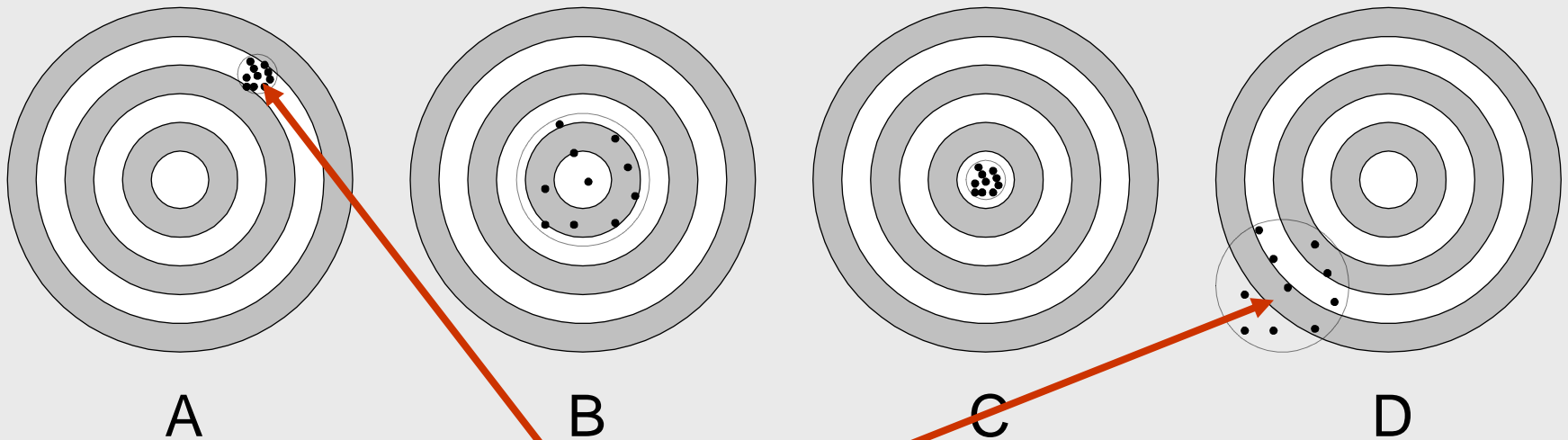
⌘ Exatidão x Veracidade



ALTA veracidade

1.5) Caracterização Estática

⌘ Exatidão x Veracidade



BAIXA veracidade

1.5) Caracterização Estática

BAIXA VERACIDADE

BAIXA PRECISÃO

PEQUENA EXATIDÃO

BAIXA VERACIDADE

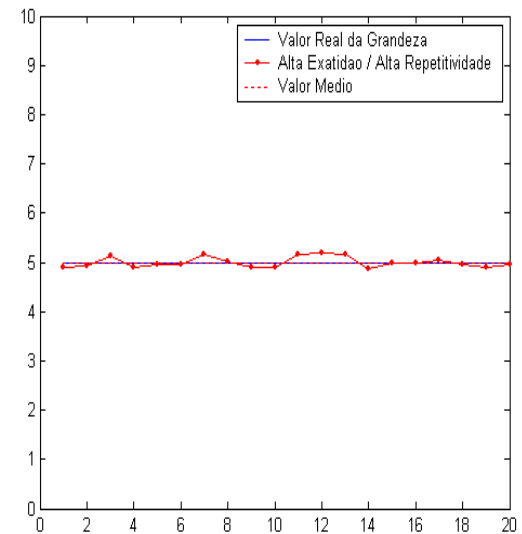
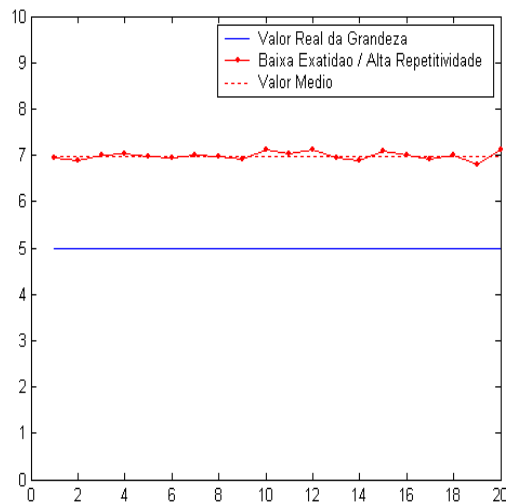
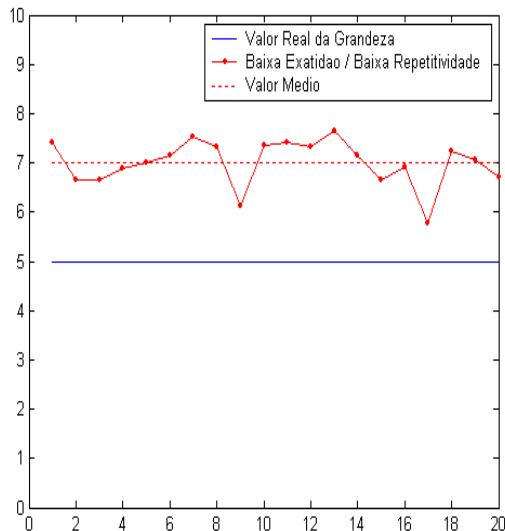
ALTA PRECISÃO

PEQUENA EXATIDÃO

ALTA VERACIDADE

ALTA PRECISÃO

GRANDE EXATIDÃO



1.5) Caracterização Estática

⌘ Tolerância (*Tolerance*):

- Não é um conceito metrológico.
- Muito usado para **componentes eletrônicos** que são caracterizados por um parâmetro elétrico:
 - Resistor: resistência R
 - Capacitor: capacitância C
 - Indutor: indutância L
- Os valores R, L e C selecionados em um projeto são os valores nominais (V_{NOM}).
- Contudo, o processo de fabricação apresenta **imperfeições** que levam a **desvios** em relação aos valores nominais

1.5) Caracterização Estática

⌘ Tolerância (*Tolerance*):

- Indica os **limites da faixa de valores** onde se situa o valor real do componente individual utilizado.
 - Expresso geralmente em valores percentuais (%) ou em ppm.
 - $V_{MÁX} = V_{NOM} * (1 + Tol\% / 100)$
 - $V_{MÍN} = V_{NOM} * (1 - Tol\% / 100)$
 - Ex: Um resistor de **4,7 kΩ** com tolerância de $\pm 10\%$ apresentará um valor real de resistência entre **4,2 kΩ** e **5,2 kΩ**
- **Importante:** a tolerância **não indica** uma **variação temporal dos valores** do componente. Cada unidade de um determinado componente terá um **valor real fixo**, situado na faixa definida pelo valor nominal e pela tolerância.

1.5) Caracterização Estática

⌘ Tolerância (*Tolerance*):

- Quanto menor a tolerância de um determinado componente:
 - melhor é o processo de fabricação,
 - melhor é sua qualidade, e
 - maior é seu custo.
- Comercialmente, tolerâncias desde $\pm 0,01\%$ até $\pm 50\%$.
- Há componentes com faixa de variação **assimétrica**
 - Por exemplo, alguns tipos de capacitores têm tolerância de -20% e $+50\%$, ou -0 e $+100\%$ etc.
- A tolerância é um fator crítico em um componente eletrônico, uma vez que todo sistema eletrônico possuirá, inevitavelmente, uma **tolerância maior que a tolerância do pior componente utilizado**.

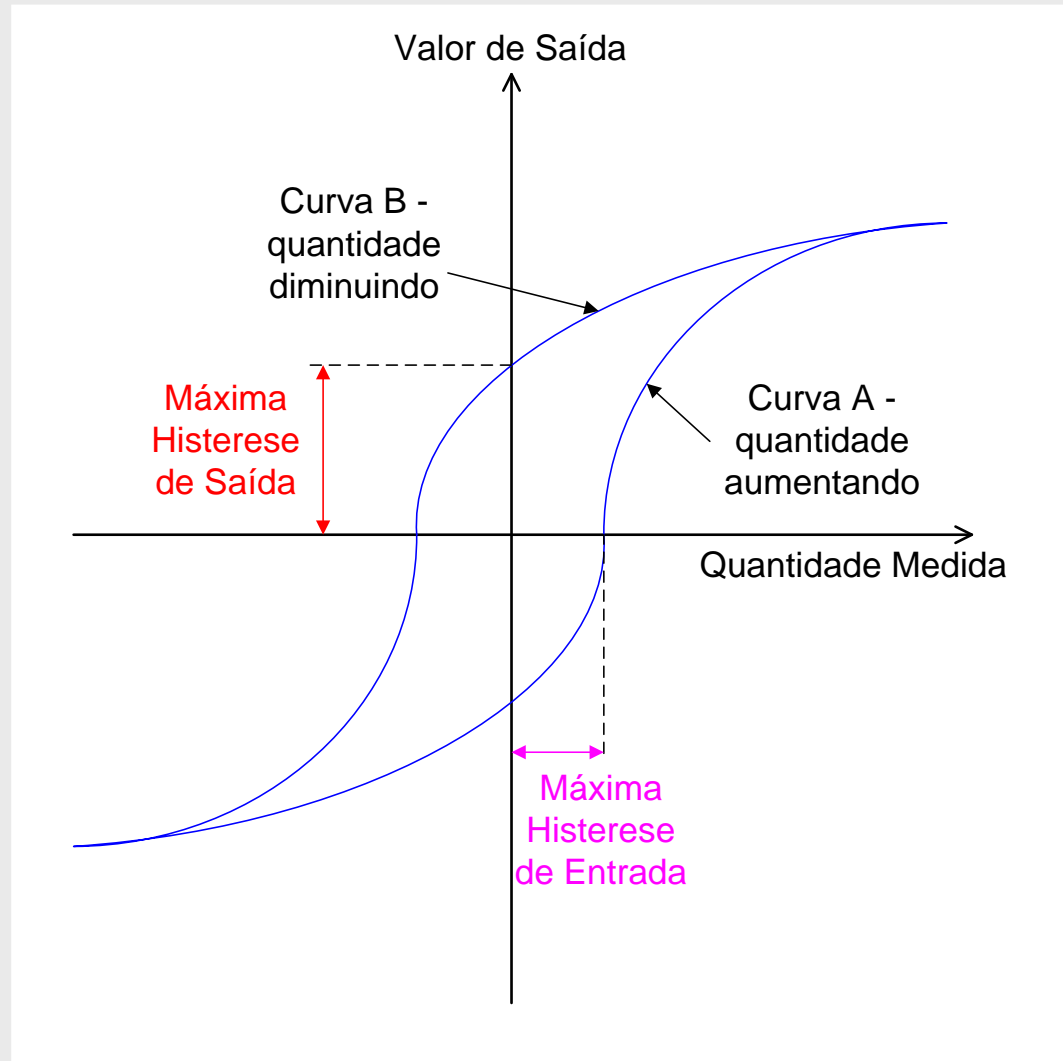
1.5) Caracterização Estática

⌘ Histerese (*Hysteresis*):

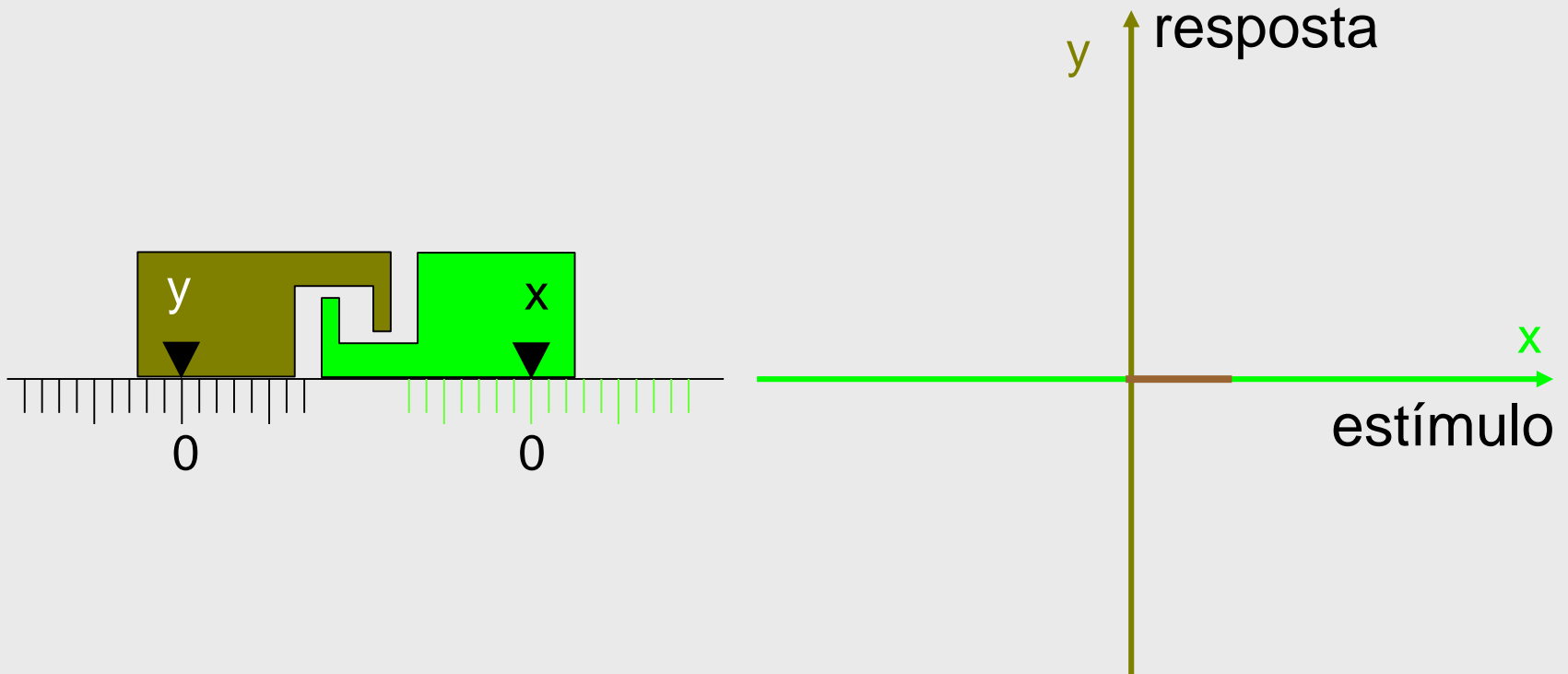
- Ocorre quando o instrumento reage de **maneira distinta** a **incrementos** e **decrementos** na quantidade medida.
- Traduz a não-concordância entre as curvas de “**carregamento**” e “**descarregamento**” do instrumento.
- Indicação:
 - ☒ diferença máxima percentual $100\% \times \Delta_{\max} / VFE$
- Exemplo: transdutor de pressão
 - ☒ Histerese de 1,0% f.s.

1.5) Caracterização Estática

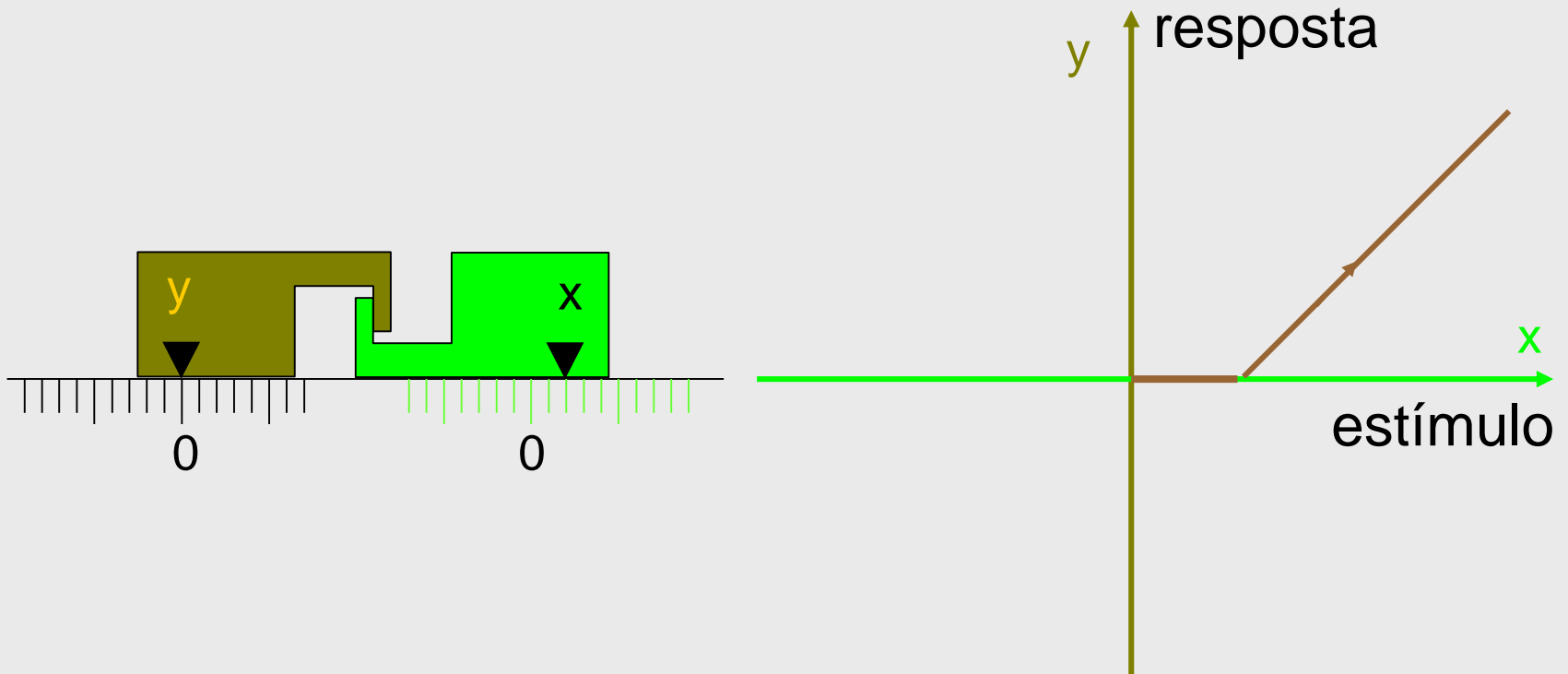
⌘ Histerese



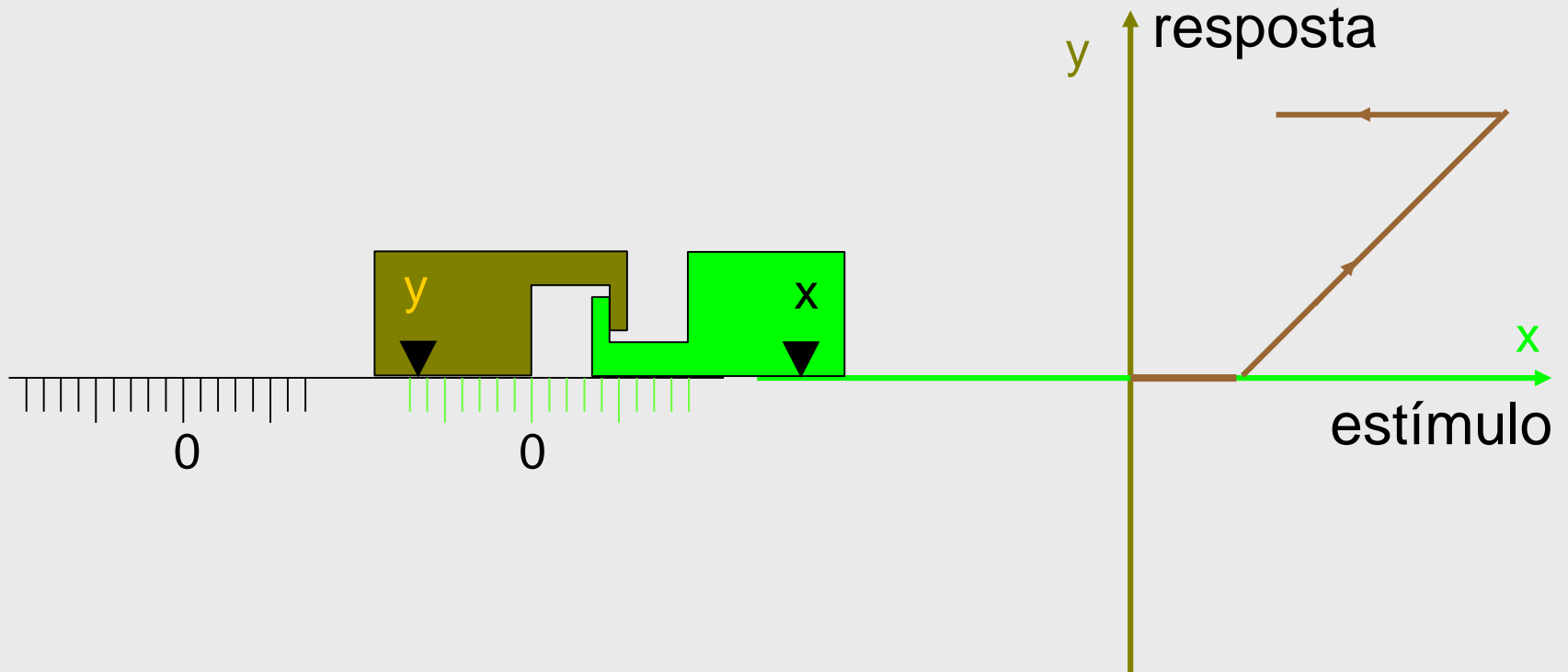
Histerese Mecânica



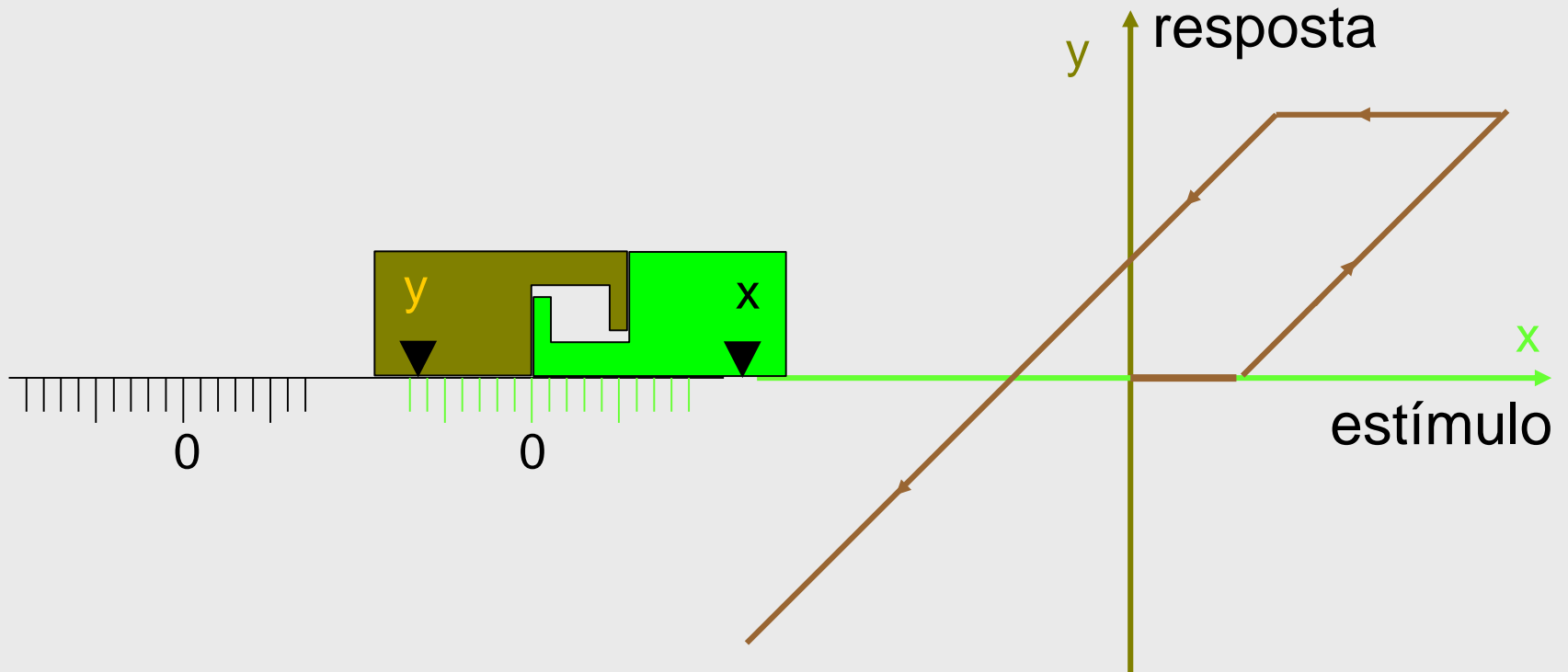
Histerese Mecânica



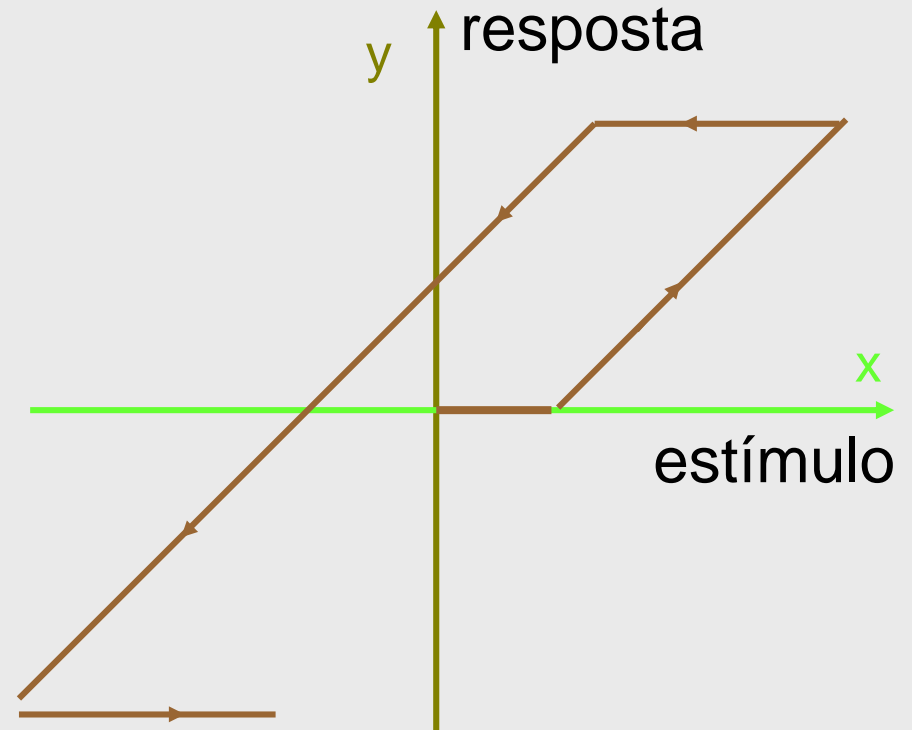
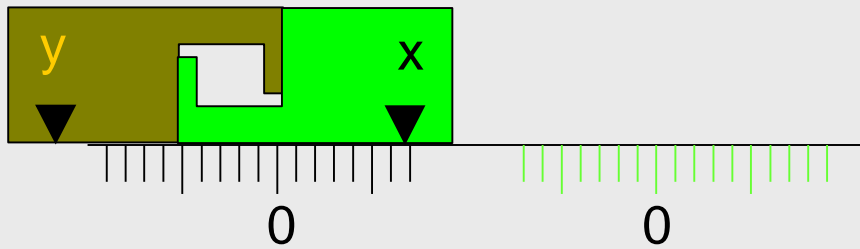
Histerese Mecânica



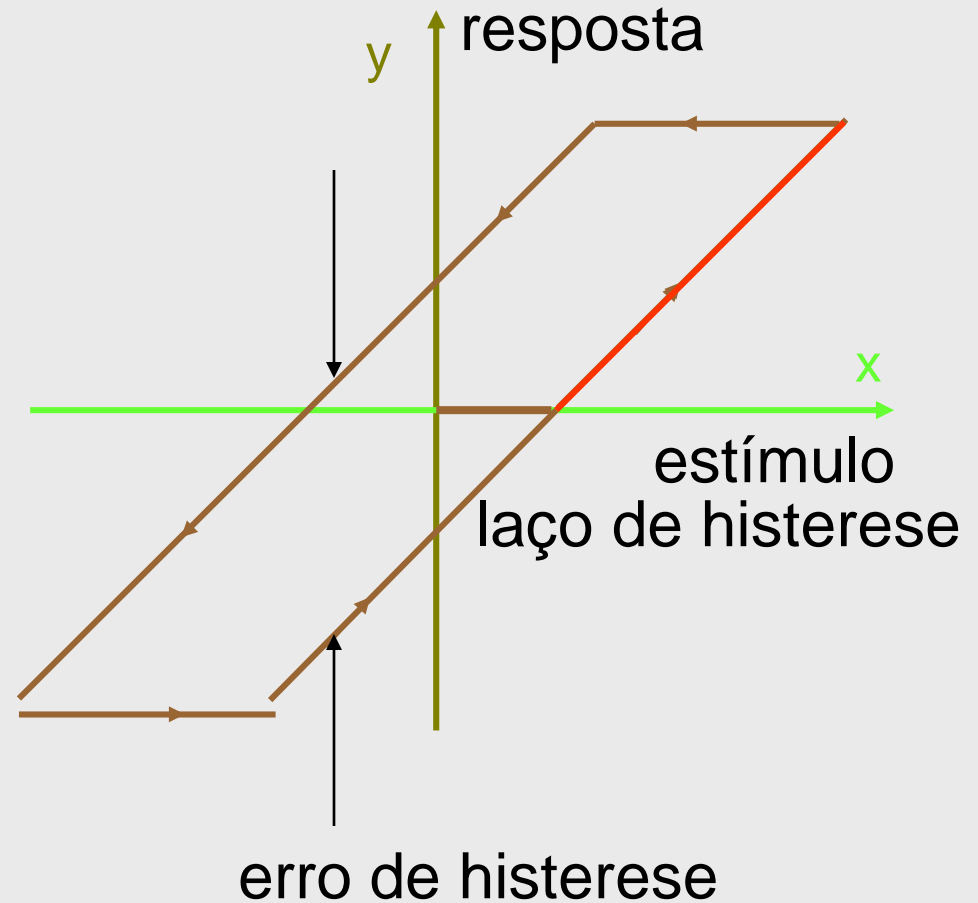
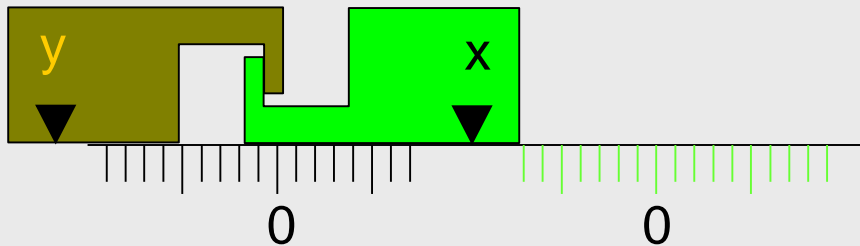
Histerese Mecânica



Histerese Mecânica



Histerese Mecânica



1.5) Caracterização Estática

⌘ Confiabilidade (*Reliability*):

- Indica **quantitativamente** a **qualidade** do instrumento ou componente.
- **Várias figuras de mérito** são utilizadas para indicar a confiabilidade de um instrumento ou componente:
 - ☒ Taxa de falhas
 - ☒ MTBF
 - ☒ MTTF
 - ☒ MTTR

1.5) Caracterização Estática

⌘ **Confiabilidade:** Taxa de Falhas

$$\lambda = \frac{\#falhas / \#unidades\ testadas}{tempo\ de\ teste}$$

$$\lambda = \frac{\%falhas}{tempo\ de\ teste}$$

➤ Normalmente o tempo é normalizado por 1000h ou 10⁶h

➤ Exemplo:

⊗ 100 instrumentos

⊗ teste durante 10000 horas

⊗ 2 falhas

$$\lambda = \frac{2/100}{10000h} = 0.2\%/1000h$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Confiabilidade: MTBF

- Equipamentos: Mean Time Between Failures
- Componentes: Mean Time Before Failures

$$\text{MTBF} = \frac{\text{tempo de teste} \times \# \text{unidades testadas}}{\# \text{falhas}} = \frac{1}{\lambda}$$

➤ Exemplo:

- ⊗ 100 instrumentos
- ⊗ teste durante 10000 horas
- ⊗ 2 falhas

$$1/\lambda = \frac{10000 \times 100}{2} = 500000h$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ Confiabilidade: Composição de MTBF's

- Suponha que um equipamento é composto por n componentes, cujas figuras de confiabilidade são conhecidas
- Suponha ainda que a falha de qualquer componente acarreta a falha do equipamento

$$\frac{1}{\text{MTBF}} = \frac{1}{\text{MTBF}_1} + \frac{1}{\text{MTBF}_2} + \dots + \frac{1}{\text{MTBF}_n}$$

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

1.5) Caracterização Estática

⌘ **Confiabilidade:** MTTF, MTTR

⌘ **MTTF** (*Mean Time To Failure*)

- Utilizada para componentes e equipamentos que não podem ser reparados.
- A definição é idêntica à da MTBF.

⌘ **MTTR** (*Mean Time To Repair*)

- Utilizada para componentes e equipamentos que podem ser reparados.
- A definição também é idêntica à da MTBF.