

# **PSI 2461**

## **ELETRÔNICA DE CONTROLE INDUSTRIAL**

**Notas de apoio didático**

**Profs. Adnei Melges de Andrade, Octávio Ferreira Affonso e  
Fernando Josepetti Fonseca**

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**2016**

## **PSI-2461 ELETRONICA DE CONTROLE INDUSTRIAL**

**Introdução à ação de medir e a ação de controlar. A instrumentação para medidas de grandezas físicas e de engenharia. Condicionamento do sinal e sua transmissão aos centros de controle. O planejamento de processos industriais e sua instrumentação.**

### **PROGRAMA:**

- **Relação entre a ação de medir e a função de controle.**
- **Elementos da malha de controle, o efeito da instrumentação.**
- **Terminologia e simbologia ISA (Instrument Society of America).**
- **Diagramas P&I.**
- **Elementos primários de medida; pressão, nível, vazão, temperatura, viscosidade, umidade, pH e analisadores.**
- **Sensores Discretos**
- **Elementos finais de controle- válvulas pneumáticas e elétricas.**

## OBJETIVOS DO CURSO

- **Relação medida/ controle**
- **Apresentação dos conceitos fundamentais da ação de medir**
- **Familiarização com a terminologia e a simbologia dos projetos de instrumentação**
- **Apresentação dos princípios fundamentais de operação dos instrumentos de medida industriais**
- **Discussão da natureza dos erros mais usuais em medida e dos modos de processar as medidas para diminuição dos efeitos destes erros.**

## BIBLIOGRAFIA:

- 1. Fraden, J - Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs and Applications” Springer, 3a. Ed. 2004.**
- 2. Moore, Ralph L. “ISA Basic Instrumentation Course Lecture Notes”, vols. 1 & 2, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1982.**
- 3. Doebelin Ernest O. “Measurement Systems, Applications & Design” Mc-Graw Hill, 4ª Ed. 1990.**
- 4. Morrison, R., “ Grounding and Shielding Techniques in Instrumentation” Wiley, 3ª Ed. 1986**
- 5. Artigos selecionados ( IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement; Trans. Of Instrument Society of America; Trans. Of Institute of Measurement and Control; Instrumentation Science and Technology)**

# HISTÓRICO

## 1 – Mecanização

- Pré-história

Roda, vela e máquinas elementares

- Antiguidade

Bombas elevatórias de água, catapultas

- Idade média

Moinho de água (velocidade)

Moinho de vento (orientação)

- Idade Moderna

**Máquinas a vapor:**

-Tração, movimento industrial (regul. velocidade)

-Comando de leme de embarcações

**Máquinas elétricas:**

-Controle das condições de geração e distribuição

-Comando e proteção de motores

**Máquinas de transferência:**

-Controle de dimensões das peças

O comando fica limitado pela falta de capacidade humana:

-Capacidade de observação

-Capacidade de força (acionamento)

-Capacidade de rápida resposta

## 2. CONTROLE (Automação)

- Orientação
  - > leme/bússola/freio
  - > moinho
- Nível/vazão
  - > vertedouro (fontes, relógios)
- Velocidade
  - > máquinas a vapor
- Temperatura
  - > calor
  - > frio
  - > refino de petróleo
- Piloto automático
- Controle de processos
  - > temperatura
  - > pressão
  - > vazão
  - > nível
  - ...
  - > densidade
  - > pH
  - > condutividade
  - > umidade

A associação medida / controle → toda medida está associada a um interesse de controle, mesmo quando se trata de acúmulo de dados para futuro uso.

## INSTRUMENTAÇÃO PARA CONTROLE DE PROCESSOS

~ 1800	Regulador de Watt
até 1930	Indicação de variáveis + Controle manual
década de 1930	Controle <b>mecânico</b> de temperatura
década de 1940	Controle <b>pneumático</b> de processos
década de 1950	Controle <b>eletrônico</b> de processos
década de 1970	Computadores para coordenação do controle >DAS – “Data Acquisition Systems” >SPC – “Set Point Control”
década de 1980 →	Controle Digital >CLP – “Controlador Lógico Programável” >SCD – “Sistema de Controle Distribuído” (DCS)

## NATUREZA LÓGICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE

**Malha aberta** > Programa temporal (partida estrela/triângulo)  
Programa seqüencial

(Fechamento da malha por operador humano)

exemplo: aquecimento de água para banho de nenê

**Malha fechada** > Determina o valor do erro e opera para reduzi-lo a zero da melhor forma possível:

- “feedback”/realimentação
- “feedforward”/antecipação

exemplo: aquecimento de água com vapor

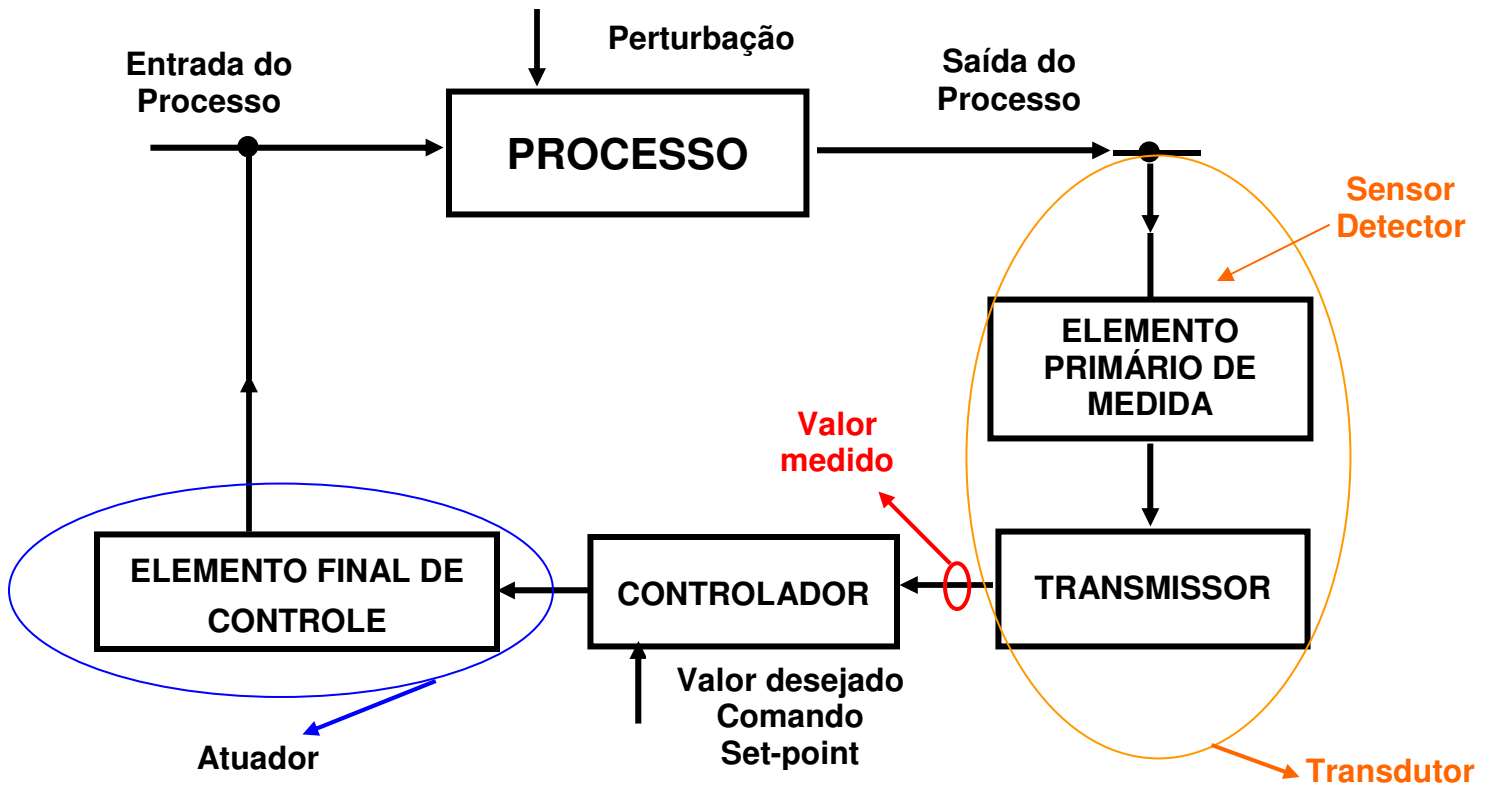
## **NATUREZA FÍSICA DOS SISTEMAS DE CONTROLE**

- **Mecânico**
- **Pneumático**
- **Elétrico - Analógico**
  - **Digital**
- **Hidráulico**

## **INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE DE PROCESSOS**

- **Sinais padronizados nos componentes:**
  - **pneumáticos**      - **3 a 15 psig**
  - **elétricos**            - **4 a 20mA**  
  **1 a 5 V**
- **Equilíbrio de força/movimento**
- **Supressão de zero**
- **Zero vivo**

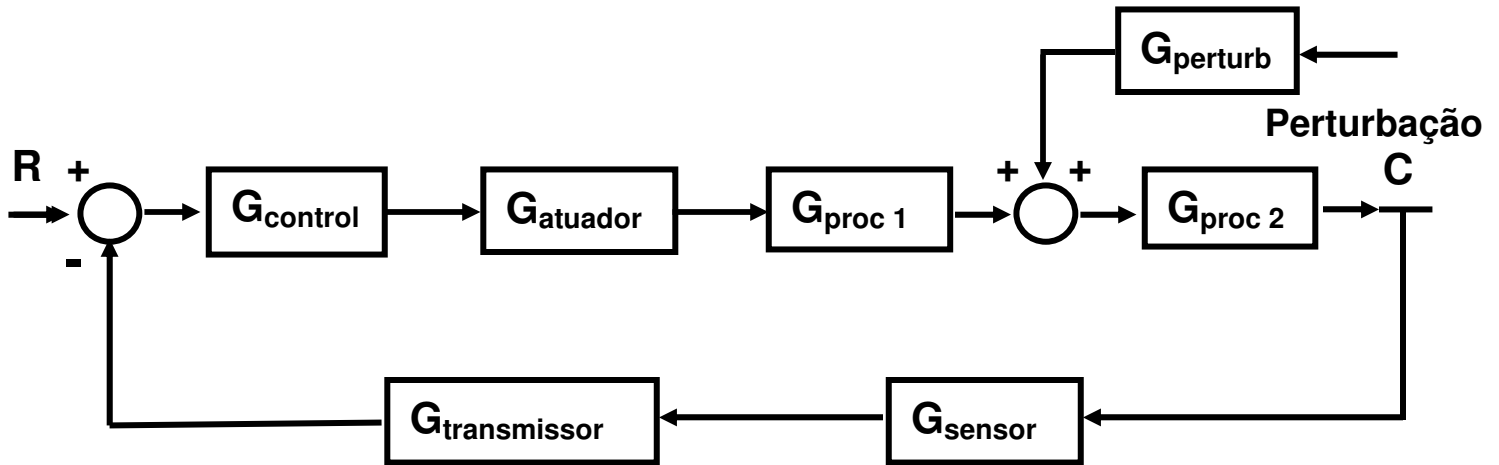
## ELEMENTOS COMPONENTES DA MALHA DE CONTROLE



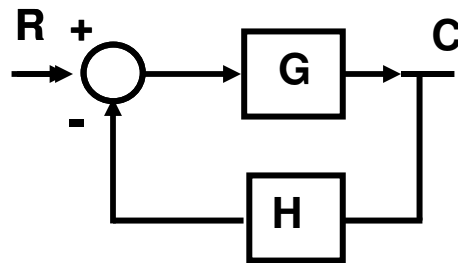
1. Elemento primário de medida
2. Transmissor
3. Controlador
4. Elemento final de controle



**EFEITO DA INSTRUMENTAÇÃO SOBRE A  
QUALIDADE DO CONTROLE**



Na expressão usual da malha, como



vale

$$\frac{C}{R} = \frac{G}{1 + GH} \quad \text{com } G = G_c \times G_a \times G_{p1} \times G_{p2} \text{ e } H = G_t \times G_s$$

Calculando a sensibilidade da  $FTMF = C/R = T = u/v$

com relação a  $G$ ;

a) Sensibilidade aritmética ( "Sistemas Lineares, 2º vol, L.Q.Orsini)

$$\frac{dT}{dG} = \frac{vu' - uv'}{v^2} = \frac{(1+GH)1 - GH}{(1+GH)^2} = \frac{1}{(1+GH)^2}$$

b) Sensibilidade geométrica

$$S_G^T = \frac{\frac{dT}{dG}}{\frac{T}{G}} = \frac{\frac{1}{(1+GH)^2}}{\frac{1}{1+GH}} = \frac{1}{1+GH}, \text{ que é } \ll 1 \text{ se } GH \gg 1$$

que é a condição para um bom sistema de controle de C

a sensibilidade de  $C/R$  com relação à  $H$  é  $S_H^T$  e de

$$\frac{dT}{dH} = \frac{(1+GH)zero - GxG}{(1+GH)^2} = \frac{G^2}{(1+GH)^2}, \text{ vem}$$

$$S_H^T = \frac{\frac{dT}{dH}}{\frac{T}{H}} = \frac{\frac{G^2}{(1+GH)^2}}{\frac{G}{(1+GH)H}} = \frac{GH}{1+GH} \cong 1, \text{ se } GH \gg 1$$

**CONCLUSÃO** – a qualidade do controle depende muito da precisão dos elementos de medida e pouco da precisão dos componentes restantes do sistema.

## EVOLUÇÃO DE UM PROJETO DE PROCESSO INDUSTRIAL

- estudo de viabilidade**
- 1 – Idéia
  - decisão de diretoria**
  - 2 – **Engenharia de produto** faz estudos de laboratório
  - 3 – **Marketing** avalia mercado e estabelece preço de venda
  - 4 – **Custos** estima o custo de produção
  - decisão de diretoria**
- projeto básico**
- 5 – **Engenharia de produto** monta planta-piloto
  - 6 – **Processos** (eng. de fábrica) define equipamentos
  - 7 – **Compras** pede orçamentos a possíveis fornecedores
  - 8 – **Custos** revisa o custo de produção e investimento
  - decisão de diretoria**
  - 9 – início do projeto de execução detalhado: civil/  
mecânico/elétrico/hidráulico/controle
- projeto de execução**
- 10 – Equipes de instrumentação/processos preparam:
    - diagramas P&I
    - listas de instrumentos
    - folhas de especificação de instrumentos
    - diagramas de interligação
    - listas de cabos
    - “run-out”, “lay-out” dos leitos dos cabos
  - contratação da montagem**
    - acompanhamento da montagem
    - inspeção final (ensaios funcionais e de segurança)
    - colocação em marcha (start-up)/
    - (comissionamento)

## EVOLUÇÃO DE UM PROJETO DE FABRICAÇÃO DE INSTRUMENTO

- 1 – Idéia  
decisão de diretoria
- estudo de 2 – **Engenharia de produto** faz estudos de laboratório  
viabilidade (“protoboards” e modelos)
- 3 – **Marketing** avalia mercado e preço de venda
- 4 – **Custos** estima o custo de produção  
decisão de diretoria
- estudos de 5 – **Engenharia de produto** projeta produto, prepara,  
desenvolvimento analisa e modifica (ou não) protótipo
- 6 – **Planejamento de produção** (engenharia industrial)  
estima custo de ferramental e equipamentos
- 7 – **Compras** pede orçamento a possíveis fornecedores
- 8 – **Custos** revisa o investimento e custos de produção  
decisão de diretoria
- projeto 9 – **Eng. de produto** emite desenhos e especificações  
final 10 – **Engenharia industrial** projeta ferramental e rearranjo  
de fábrica
- contratação da execução de ferramental e rearranjo da fábrica
  - abastecimento
  - inspeção das primeiras amostras
  - corrida-piloto

## NOMENCLATURA ANSI/ISA – 5.51.1 – 1979

### “Process Instrumentation Terminology”

Grandezas fundamentais para a especificação

- 1 – **Faixa de medida (“range”)** – a região compreendida entre os limites dentro dos quais a quantidade deve ser medida, recebida ou transmitida e é expressa pela indicação dos limites inferior e superior da faixa, p.ex.: 20° a 150°C.

*Nota 1 : a menos de indicação contrária, entende-se como faixa de medida da entrada.*

*Nota 2 : para componentes multi-faixa, a definição se aplica àquela faixa selecionada para a medida.*

- 2 – **Alcance (“span”)** – a diferença algébrica entre o limite superior e o limite inferior da faixa de medida, no exemplo = 130°C.

*Nota: podem ser usados termos compostos, como alcance da variável de medida, alcance do sinal medido, etc., com a devida consideração de unidades.*

- 2.b – **Rangeabilidade** - É a razão entre os valores máximo e mínimo da faixa de medição. Alguns métodos de medição têm limitações de Rangeabilidade, como a medição de vazão com placas de orifício, que está limitada a uma Rangeabilidade de 3 para 1, ou como costuma ser expressada, 3:1. Isso significa dizer, por exemplo, que, para uma vazão máxima de 150 m<sup>3</sup>/h, a vazão mínima será de um terço desse valor, ou 50 m<sup>3</sup>/h.

### 3 – **Erro**

- **estático**
- **dinâmico**

**erro = indicação – valor ideal**

**Erro** – em instrumentação de processos é a diferença algébrica entre a indicação e o valor ideal do sinal medido. É a quantidade que, ao ser subtraída da indicação, dá o valor ideal.

*Nota: um erro positivo significa que a indicação do instrumento é maior que o valor ideal.*

**Sinal de erro** – em uma malha fechada, o sinal resultante da subtração de um dado sinal de retorno do seu correspondente sinal de entrada.

**Desvio** – qualquer afastamento de um valor desejado ou comportamento ou valor esperado.

**Desvio do sistema** – em instrumentação de processos é a diferença resultante da subtração do valor instantâneo da variável diretamente controlada do valor de ajuste do controlador de malha (“set-point”).

**Desvio de regime** – o desvio do sistema depois de terminado o transitório.

**Desvio transitório** – em instrumentação de processos é a diferença entre o valor instantâneo da variável diretamente controlada e seu valor de regime.

### 4 – **Precisão (“accuracy”)** – em instrumentação de processos é o grau de conformidade de um valor indicado com relação a um valor reconhecido como padrão, ou valor ideal.

**Precisão medida (ou observada)** – o máximo desvio positivo ou negativo observado ao ensaiar um dispositivo por um método especificado e em condições especificadas.

*Nota 1 – é normalmente medido como imprecisão e expresso como precisão.*

*Nota 2 – é tipicamente expresso em termos da variável medida (+/- 1°C), porcentagem de limite superior da faixa (+/- 0,5% do limite superior em graus Celsius), porcentagem do alcance (+/- 0,5% do alcance), porcentagem do comprimento da escala ou porcentagem do valor lido.*

5 – **Resolução (“resolution”)** – o menor intervalo entre dois detalhes discretos adjacentes que podem ser distinguidos um do outro. Costuma ser expresso em termos da variável medida.

6 – **Sensibilidade (“Sensitivity”)** – a relação entre a variação do valor de saída e a variação do valor de entrada correspondente, depois de alcançado o regime estacionário.

Nota 1 – é expressa como uma relação com indicação das unidades de medida das duas grandezas. (Esta relação é constante ao longo da faixa de um dispositivo linear. Para um dispositivo não linear deve ser indicado o nível de entrada aplicável).

Nota 2 – o termo sensibilidade tem sido freqüentemente usado para significar “zona morta”. Seu uso com este sentido não é adequado.

7 – **Classe de precisão (“accuracy rating”)** – em instrumentação de processos, um número ou quantidade que define um limite que

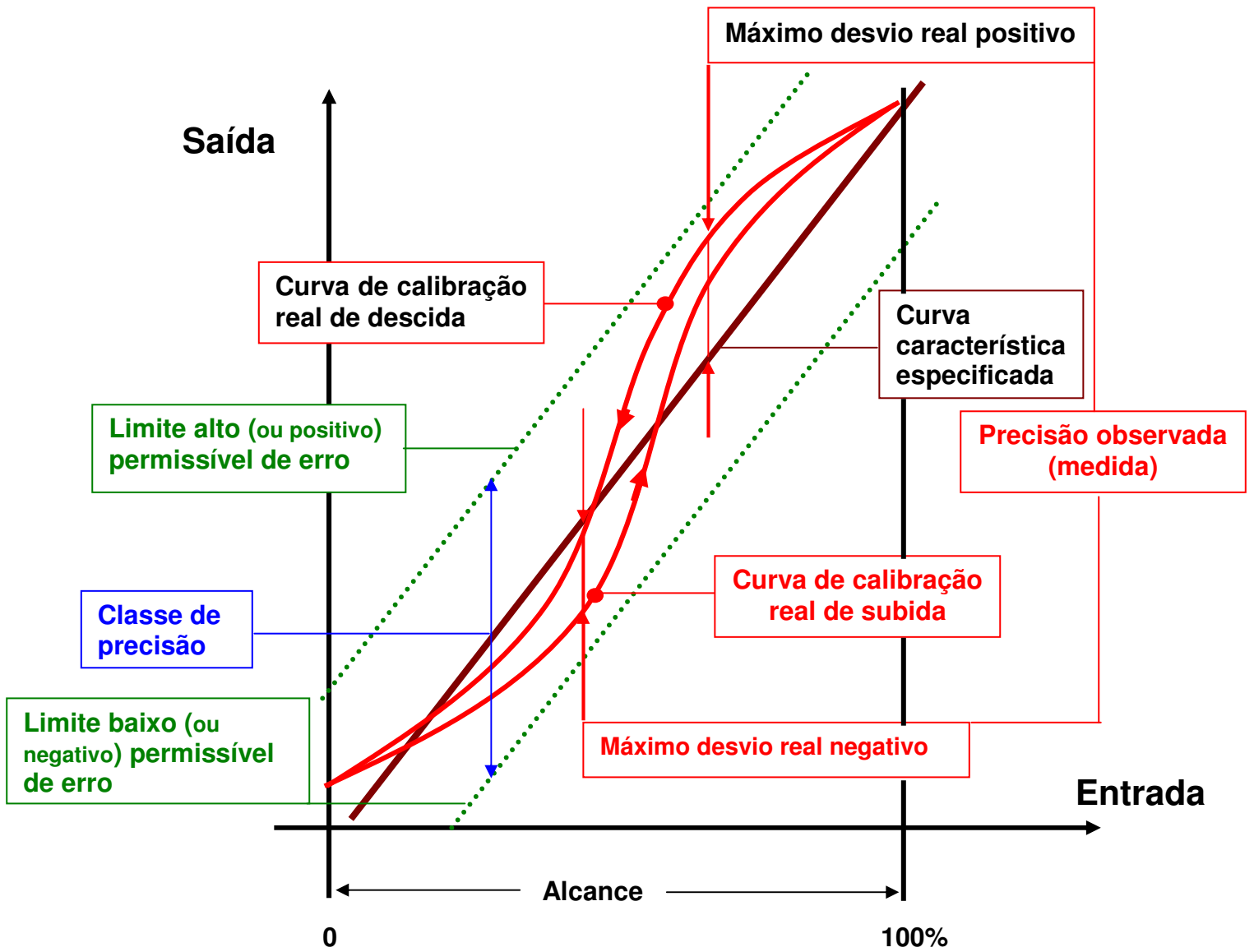
os erros não excedem quando um dispositivo é utilizado em condições de operação especificada.

*Nota 1\_– quando não são especificadas as condições de operação, devem ser usadas as condições de operação de referência.*

*Nota 2\_– como uma especificação de desempenho, precisão (ou precisão de referência) será entendida como significando classe de precisão do dispositivo quando usado nas condições de referência.*

*Nota 3 – a classe de precisão inclui os efeitos combinados dos erros de conformidade, histerese, zona morta e repetibilidade. As unidades usadas devem ser apresentadas explicitamente. É preferível que um sinal +/- preceda o número ou quantidade. A ausência de sinal é entendida como sinal +/-*





8 – **Conformidade** – de uma curva, é o grau de aproximação entre esta e uma curva especificada.(e.g. logarítmica, parabólica, linear, etc.)

*Nota 1 – é normalmente medida como não-conformidade e expressa como conformidade (e.g. o máximo desvio entre uma curva média e a curva especificada). O valor da **conformidade** é especificado para a saída, a menos de especificação em contrário.*

*Nota 2 – como especificação de desempenho, a **conformidade** deve ser expressa como **conformidade independente**, **conformidade terminal** ou **conformidade de base zero**. Quando expressa simplesmente como **conformidade** entende-se **conformidade independente**.*

**Conformidade independente** - o máximo desvio da curva de calibração (média das leituras de subida e de descida) com relação a uma curva característica posicionada de modo a minimizar o desvio máximo.

**Conformidade de base terminal** – o máximo desvio da curva de calibração (média das leituras de subida e de descida) com relação a uma curva característica especificada, posicionada para coincidir com a curva de calibração nos valores limites superior e inferior da faixa.

**Conformidade de base zero** – o máximo desvio da curva de calibração com relação a uma curva característica especificada posicionada de modo a coincidir com a curva de calibração no valor limite inferior da faixa.

- 9 – **Histerese (“hysteresis”)** – propriedade de um elemento evidenciada pela dependência do valor de saída, para um dado percurso de entrada, com a história de percursos anteriores e da direção do percurso atual.

*Nota 1 – é usualmente determinada pela subtração do valor da zona morta do máximo valor medido da separação entre as indicações de subida e de descida da variável medida (por meio de um percurso de faixa total, a menos de especificação em contrário) depois de terminados os transitórios. Esta medida é, às vezes, chamada de erro de histerese ou erro histerético.*

*Nota 2 – para qualquer inversão pequena da entrada deve-se esperar uma inversão de saída. Isto distingue a histerese da zona morta.*

**“dither”** – uma oscilação intencional, de pequena amplitude, que é usada para eliminar o efeito do atrito, da histerese ou do entupimento da pena de um registrador.

- 10 – **Zona morta (“dead band”)** em instrumentação de processos, é a faixa que o sinal de entrada deve percorrer, após uma inversão de direção, sem que se inicie uma variação observável do sinal de saída.

*Nota 1 - existem relações de entrada e saída separadas e diferentes para sinais crescentes e decrescentes.*

*Nota 2 – a zona morta produz um atraso de fase entre saída e entrada.*

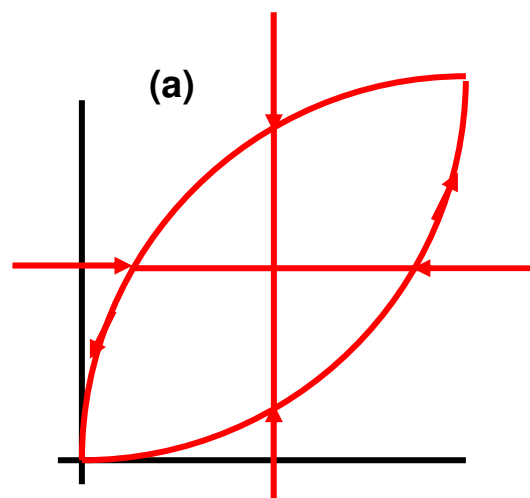
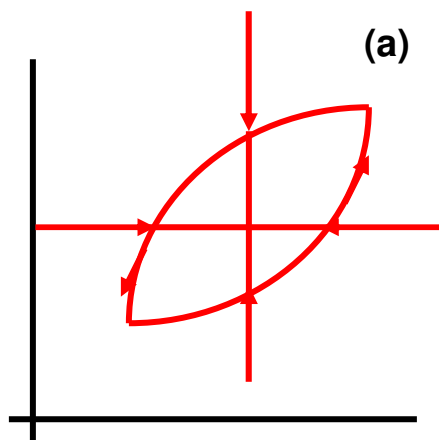
*Nota 3 – a zona morta é usualmente expressa em porcentagem do alcance.*

Variação de

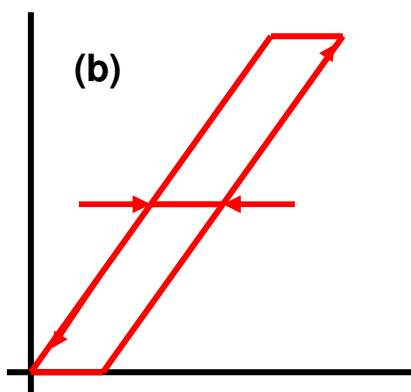
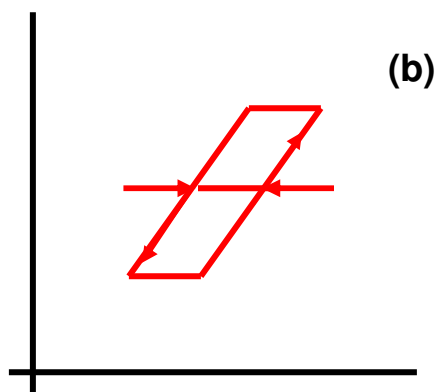
50% entrada

100% entrada

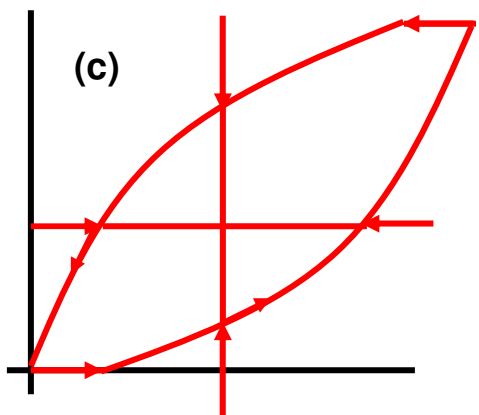
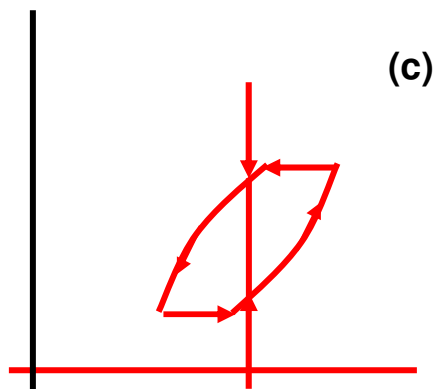
Histerese



Zona Morta



Histerese +  
Zona Morta



- 11 – **Repetibilidade (“Repeatability”)** – a proximidade de concordância entre um número de medidas consecutivas de saída para um mesmo valor de entrada, nas mesmas condições de operação, chegando da mesma direção, em percurso de faixa total.

*Nota – é usualmente medida como não-repetibilidade e expressa como repetibilidade, em porcentagem do alcance. Não inclui a histerese.*

- 12 – **Deriva (“drift”)**- variação não desejável da saída observada, em um período especificado de tempo, que não está relacionada com a entrada, o ambiente ou a carga.

**Deriva de ponto (“Point drift”)** – variação da saída num período de tempo especificado, para entrada constante e sob condições de operação de referência.

*Nota – a deriva de ponto é freqüentemente determinada para mais de uma entrada, e.g. 0%, 50% e 100% da faixa, o que permite o cálculo da deriva do alcance.*

Expressão típica – a deriva no meio da escala para temperatura ambiente (21 +/- 1°C) durante um período de 48h está dentro de 0,1% do alcance de saída.

- 13 – **Reprodutibilidade (“reproducibility”)** – em instrumentação de processos é a proximidade da concordância entre várias medidas repetidas da saída para o mesmo valor da entrada, sob as mesmas condições de operação, ao longo de um período de tempo, chegando de ambas as direções.

*Nota 1 – usualmente medida como não-reprodutibilidade e expressa como reprodutibilidade em % do alcance para um*

*período especificado de tempo. Este período é normalmente longo para incluir o efeito da deriva.*

*Nota 2 – a reprodutibilidade inclui histerese, zona morta, deriva e repetibilidade.*

*Nota 3 – entre as várias medidas a entrada pode variar ao longo da faixa e as condições de operação dentro das condições de operação normal.*

- 14 - **Condições de operação (“operating conditions”)** – condições que influenciam o desempenho de um dispositivo, com a exclusão da variável medida pelo dispositivo.

Exemplos de condições de operação incluem – pressão ambiente, temperatura ambiente, campos eletromagnéticos, força gravitacional, inclinação, variações da fonte de alimentação (tensão, frequência, harmônicas), radiação, choque e vibração. Devem ser consideradas as variações estáticas e dinâmicas destas condições.

- 15 – **Condições normais de operação** – a faixa de condições de operação dentro da qual um dispositivo é projetado para funcionar e para o qual as influências de operação são definidas.

- 16 - **Condições de operação de referência** – a faixa de condições de operação de um dispositivo dentro da qual as influências de operação são desprezíveis.

- 17 - **Faixa com zero suprimido** (“suppressed-zero range”) – uma faixa em que o valor zero da variável medida é menor que o valor limite inferior da faixa ( o zero não aparece na escala).

*Nota 1 – por exemplo : 20 a 100*

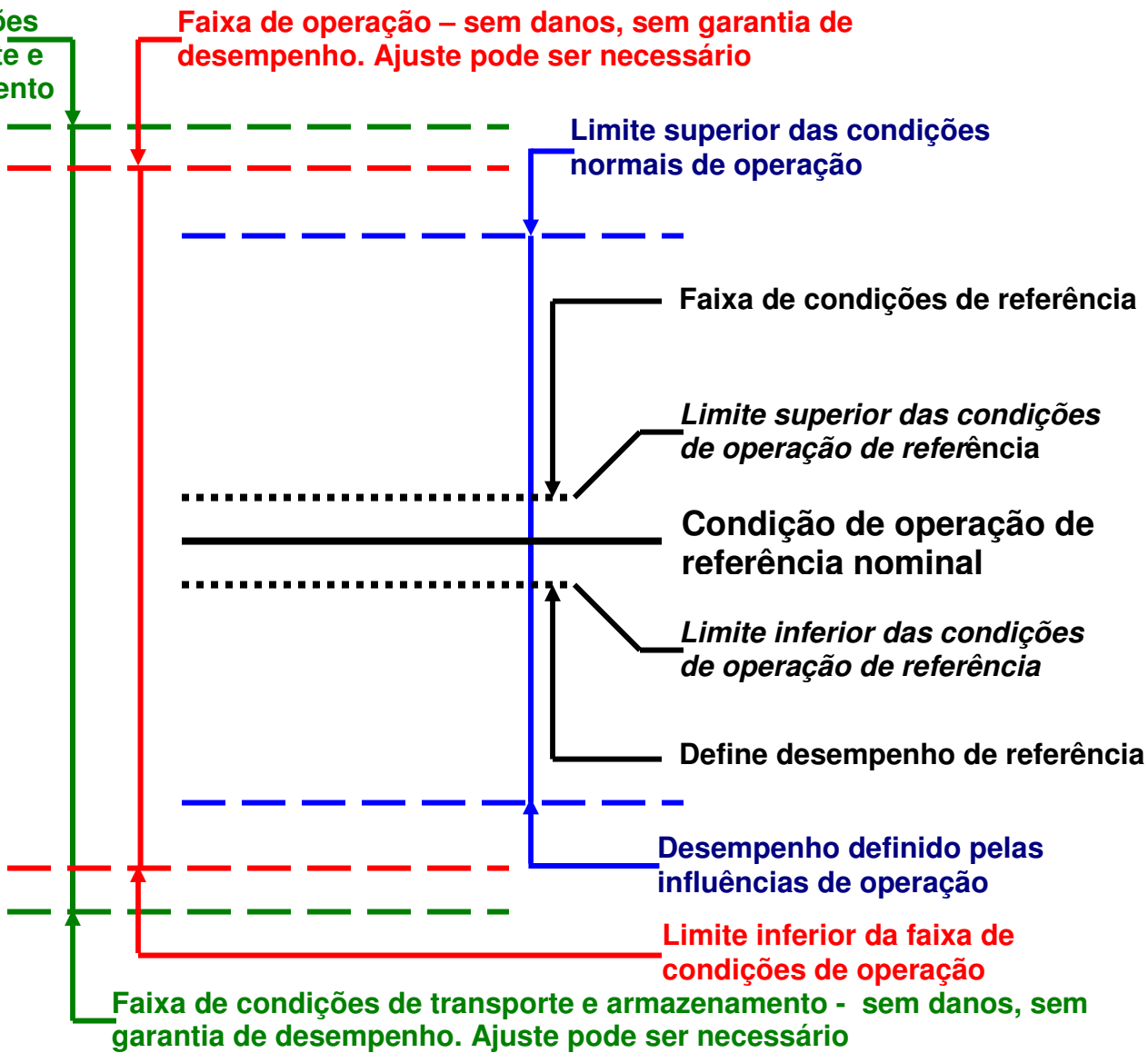
*Nota 2 – os termos “elevação”, “faixa elevada”, “alcance elevado”, são freqüentemente usados para exprimir a condição em que o zero da variável medida é menor que o limite inferior da faixa. O termo “faixa com zero suprimido” é preferido.*

- 18 – **Faixa com zero elevado** (“elevated-zero range”) – uma faixa na qual o valor zero da variável medida, sinal medido, etc., é maior que o valor limite inferior da faixa.

*Nota 1 – o zero pode estar entre os valores limites da faixa, no limite superior ou acima do limite superior.*

*Nota 2 – os termos “supressão”, faixa suprimida”, “alcance suprimido” são usados para exprimir a condição na qual o zero da variável medida é maior que o limite inferior da faixa. O termo “faixa com zero elevado” é preferido.*

Limite superior  
Das condições  
de transporte e  
armazenamento



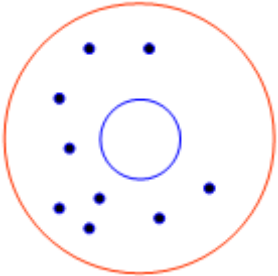
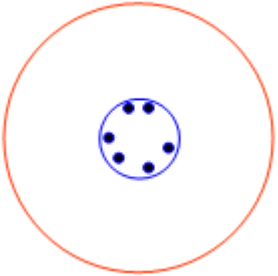
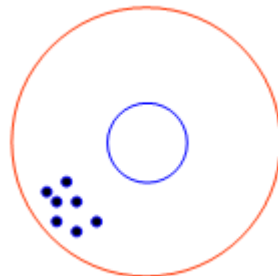
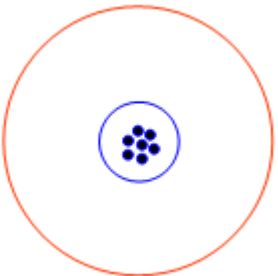


**Observação:** Dois conceitos importantes, muitas vezes considerados como sinônimos mas, de significado muito distinto no contexto estatístico, estão relacionados com os resultados desse processo:

**Acurácia:** proximidade da medida relativamente ao verdadeiro valor da variável.

**Precisão\*:** proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de mensuração.

Assim, quanto mais acurado o processo de mensuração mais próximo está o resultado da medida do valor verdadeiro, de modo que a acurácia está ligada à presença de tendenciosidade<sup>i</sup>, enquanto que a precisão diz respeito à repetibilidade das medidas e quanto maior a precisão menor a variabilidade<sup>ii</sup> entre as medidas.

	<b>Acurácia</b>	
<b>Precisão</b>	Baixa	Alta
Baixa		
Alta		

\* Definição utilizada com relação ao termo “acurácia”

## USO DOS TERMOS “VARIÁVEL MEDIDA” E “SINAL MEDIDO”

FAIXA TÍPICA	TIPO DE FAIXA	FAIXA	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	ALCANCE
Termopar ( tipoK) 0                      2000 ┌──────────────────┐ │                      °C │	Variável medida	0 a 2000°C	0°C	2000°C	2000°C
-0,68                      +44,9 ┌──────────────────┐ │                      mV │	Sinal medido	-0,68 a +44,9mV	-0,68mV	+44,9mV	45,6mV
0                              20 ┌──────────────────┐ │                      x100°C │	Escala	0 a 2000°C	0°C	2000°C	2000°C
medidor de vazão 0                              10.000 ┌──────────────────┐ │                      l/h │	Variável medida	0 a 10.000l/h	0 l/h	10.000l/h	10.000l/h
0                              100 ┌──────────────────┐ │                      cm.H <sub>2</sub> O │	Sinal medido	0 a 100 cm.H <sub>2</sub> O	0 cm.H <sub>2</sub> O	100 cm.H <sub>2</sub> O	100 cm.H <sub>2</sub> O
0                              10 ┌──────────────────┐ │                      x1.000 l/h │	Escala	0 a 10.000l/h	0 l/h	10.000l/h	10.000l/h
tacômetro 0                              500 ┌──────────────────┐ │                      rpm │	Variável medida	0 a 500 rpm	0 rpm	500 rpm	500 rpm
0                              5 ┌──────────────────┐ │                      V │	Sinal medido	0 a 5V	0 V	5V	5V
0                              30 ┌──────────────────┐ │                      m/s │	Escala	0 a 30 m/s	0 m/s	30 m/s	30 m/s

<sup>i</sup> **[Tendenciosidade | Bias [Estimação]**

I. Uma parcialidade ou tendência que impede ou prejudica uma consideração objetiva de um assunto ou situação. II. Diferença entre o valor médio das medidas repetidas de uma característica em uma unidade e o valor verdadeiro. III. Quantidade medida por  $E(t)-\theta$ , sendo  $t$  o estimador do parâmetro  $\theta$  e  $E()$  o valor esperado. Veja também: estimador não tendencioso, tendenciosidade intrínseca, tendenciosidade extrínseca. Tópico relacionado: **Estimação por ponto**

<sup>ii</sup> **[Variabilidade | Variability | [Estatística]** Palavra derivada do latim *variabile* + *dade* que possui o mesmo significado de variação.

**[Variação | Variation | [Estatística]** Palavra originária do latim *variatione* que significa o ato ou efeito de variar, de modificar-se, de ser inconstante ou ter variabilidade. Veja também: variância, variável.