



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – CCE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEL

Medidas Elétricas e Magnéticas

ELT210

AULA 12 – Medição de Grandezas Físicas por Meios Elétricos

Prof. Tarcísio Pizziolo

1. Introdução

As grandezas físicas podem ser medidas através da utilização de instrumentos eletro-eletrônicos os quais apresentam em suas escalas, ou *displays*, os valores relativos às medições.

Estas medições podem ser realizadas diretamente, tais como medições de corrente e tensões, ou indiretamente, tais como medições de temperatura, vazão, pressão, etc.

Quando uma grandeza física é medida indiretamente, é necessária a aplicação de um dispositivo denominado **Transdutor**. Este elemento converte a grandeza física a ser medida em sinais elétricos (**Ex.: °C em Volts => Termopar**)

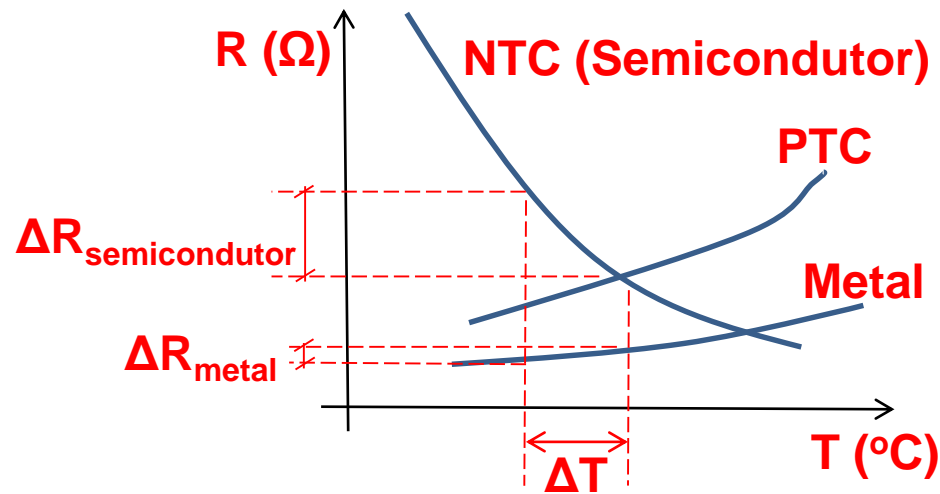
Também é necessário o elemento denominado **Sensor** para detectar as variações das grandezas físicas.

A combinação destes elementos possibilita a realização de medições de grandezas físicas de natureza não elétrica utilizando-se instrumentos eletro-eletrônicos.

2. Exemplo de Medição de Grandeza Física

2.1 Temperatura

A resistência elétrica de uma grande quantidade de materiais varia com a temperatura; de um modo geral, os metais aumentam a resistência com a temperatura, ao passo que semicondutores podem também diminuir a resistência com a temperatura, como está mostrado no gráfico a seguir..



Variação da resistência com a temperatura. Observa-se que para uma mesma variação de temperatura, a variação de resistência do metal (R_m) é significativamente menor do que o semicondutor no NTC (R_s).

O princípio de funcionamento deste termômetro é baseado na variação de resistência elétrica.

2.1 Temperatura

Os termômetros de resistência elétrica são considerados sensores de alta precisão e ótima repetibilidade de leitura.

No caso dos metais, o elemento sensor é normalmente feito de **Platina** com o mais alto grau de pureza e envolto em bulbo de cerâmica ou vidro.

As **termoresistências**, mais usadas são:

- Platina: PT-25,5 / PT-100 / PT-120 / PT-130 / PT-500.

Porém, o mais conhecido e usado industrialmente é o **PT-100**. Sua faixa de uso vai de **-200 °C a 650 °C**, conforme a norma ASTM E1137.

Geralmente, o bulbo de resistência é montado em um módulo de aço inox, preenchido com óxido de magnésio, de tal modo que haja uma ótima condução térmica e proteção do bulbo com relação a choques mecânicos. A isolação elétrica entre o bulbo e o módulo obedece à mesma norma ASTM E 1137.

2.1 Temperatura – O PT-100

Como o efeito **termoresistivo** consiste em explorar a variação da resistência elétrica produzida por uma determinada variação de temperatura, o valor da resistência elétrica de um **PT-100**, a uma temperatura “**t**” é dada por:

$$R_t = \begin{cases} R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \, \Omega & ; \text{ para } -200^{\circ} \leq t < 0^{\circ} \\ R_0(1 + At + Bt^2) \, \Omega & ; \text{ para } 0^{\circ} \leq t \leq 650^{\circ} \end{cases}$$

Onde **R₀** é o valor da resistência do material a **0°C** a qual para o **PT-100** é **100 Ω**.

Os valores de “**A**” e “**B**” para o **PT-100** (**Platinum Resistance Thermometers**) são:

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \, ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \, ^{\circ}\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \, ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

2.1 Temperatura

Exemplo 1: Qual será a resistência do PT-100 a -10 °C?

$$R_t = \begin{cases} R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \, \Omega & ; \text{ para } -200^\circ \leq t < 0^\circ \\ R_0(1 + At + Bt^2) \, \Omega & ; \text{ para } 0^\circ \leq t \leq 650^\circ \end{cases}$$

Utiliza-se a equação para $-200^\circ \leq t < 0^\circ$:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \, \Omega \Rightarrow R_t = 96,0859 \, \Omega$$

Exemplo 2: Qual será a resistência do PT-100 a 10 °C?

Utiliza-se a equação para $0^\circ \leq t \leq 650^\circ$:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \, \Omega \Rightarrow R_t = 103,9140 \, \Omega$$

2.1 Temperatura

O **Termômetro de Resistência** é um instrumento composto de um **elemento sensor** que apresenta uma **alteração na sua resistência elétrica** com qualquer mudança na temperatura e um **circuito condicionador**, responsável por converter a alteração na resistência elétrica do sensor em uma tensão elétrica correspondente.

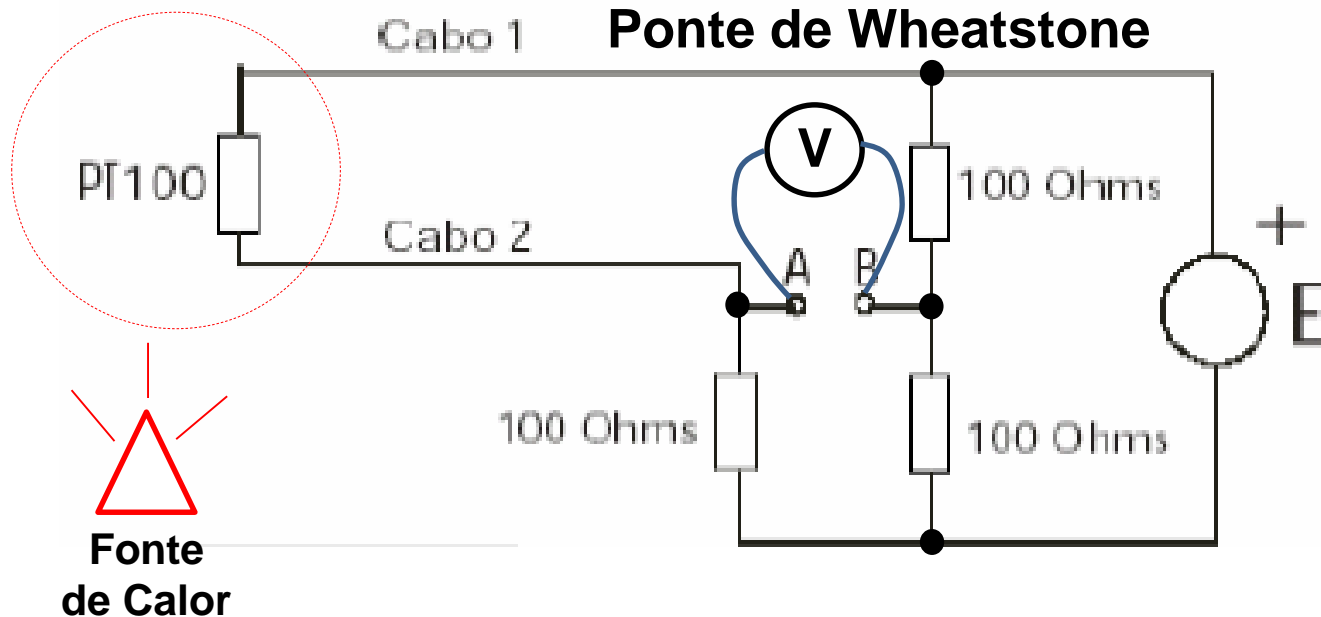
As resistências elétricas dos cabos, dos contatos, etc., podem alterar o resultado da medida ao se somarem à resistência do sensor.

Desta maneira, existem vários tipos de montagens que podem ser realizadas buscando minimizar as alterações dos resultados medidos. As mais aplicadas são:

- a) dois fios
- b) três fios
- c) quatro fios.

2.1 Temperatura

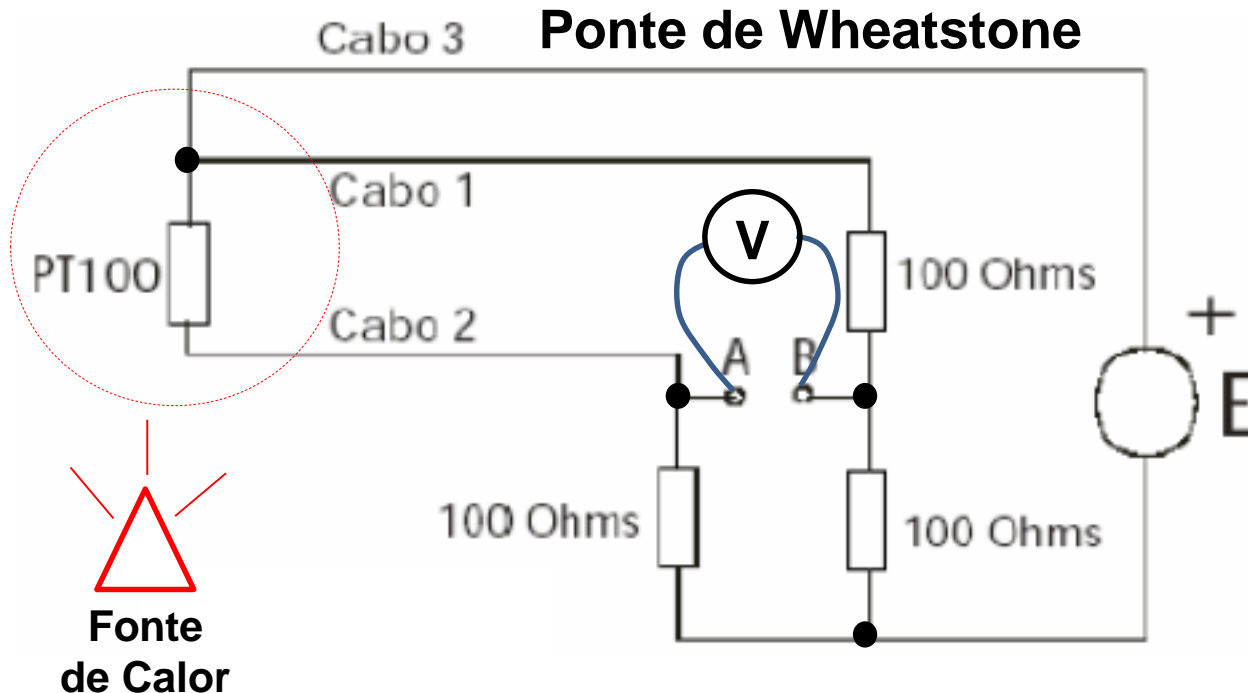
O circuito abaixo mostra a montagem em dois fios (essa montagem tem uma ligação para cada terminal do bulbo).



Esta montagem é aplicada em locais onde o comprimento do cabo do sensor até ao instrumento não ultrapassa 3,0 m utilizando uma bitola de 0,5 mm².

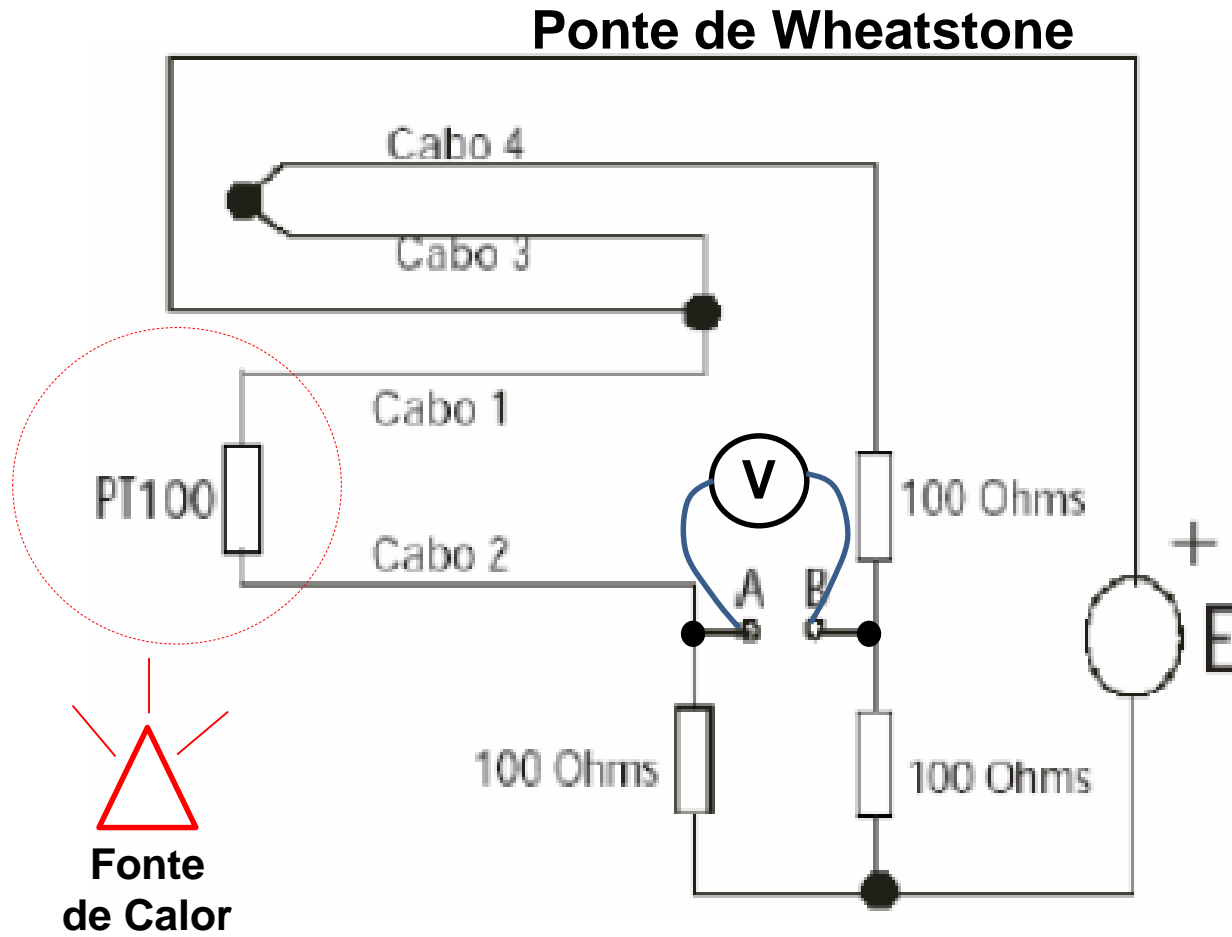
2.1 Temperatura

O circuito abaixo mostra a montagem em três fios. Nesse tipo de montagem, que é a mais utilizada industrialmente, haverá uma compensação da resistência elétrica pelo terceiro fio.



2.1 Temperatura

Na montagem a quatro fios existem duas ligações para cada lado da ponte, anulando os efeitos dos cabos.



2.1 Temperatura

Termistores são sensores fabricados com materiais **semicondutores** como óxido de magnésio ou cobalto; em aplicações que exigem alta precisão, o semicondutor utilizado pode ser o silício ou o germânio, dopados com algum outro material.

Por serem construídos de material semicondutor, possuem a grande vantagem de poderem ser fabricados em um tamanho físico muito pequeno.

O termistor de coeficiente negativo de temperatura (**NTC**) é um sensor muito conhecido e encontrado no mercado com uma variedade muito grande no tipo construtivo e nos valores de resistência.

O termistor de coeficiente positivo (**PTC**), é mais raro de ser encontrado, dada sua complexidade no aspecto construtivo.

A resistência destes elementos sensores segue uma variação exponencial com a temperatura.

2.1 Temperatura

Uma equação adequada e muito comum para descrever o comportamento de um termistor é dada por:

$$R = R_0 e^{[\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})]}$$

- R_0 é a resistência à temperatura de referência T_0 .
- β é uma constante determinada experimentalmente (entre 3.500 e 4.600 K, dependendo do material do termistor e da temperatura).

O termistor é um sensor muito sensível (erros de até 0,01 °C podem ser alcançados com calibração adequada).

Mesmo sendo muito sensível tem a desvantagem de ser **não linear**, o que obriga a utilização de um sistema para prover o ajuste da temperatura em função da resposta do mesmo, geralmente implementado na forma de programação de um sistema de aquisição de dados.

Os termistores NTC **diminuem sua resistência elétrica** com o aumento da temperatura.

2.1 Temperatura

Fundamentos Teóricos sobre Termopares

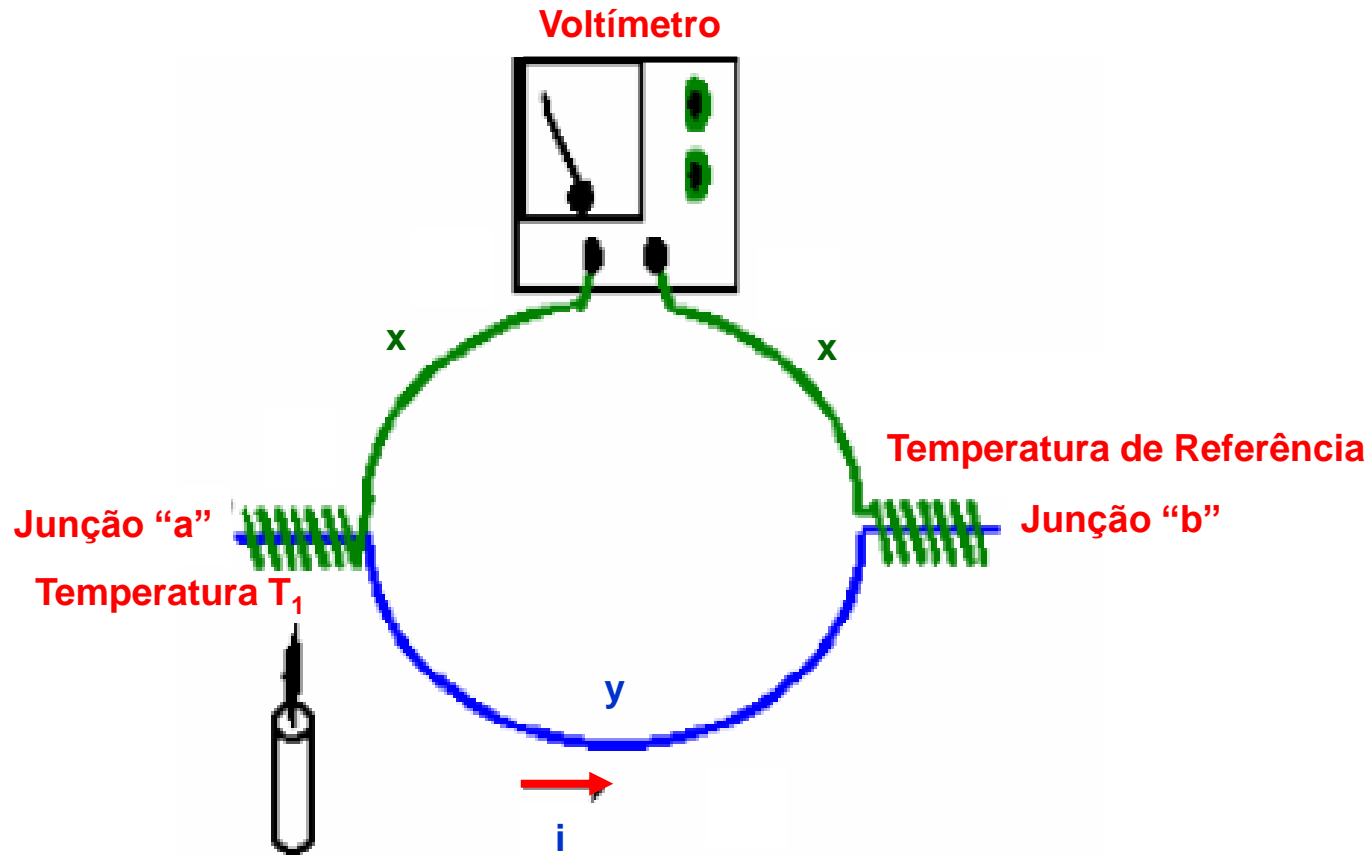
Em 1821, o físico alemão Thomas Johann Seebeck observou que, unindo as extremidades de dois metais diferentes “x” e “y” e submetendo as junções “a” e “b” a diferentes temperaturas T_1 e T_2 , surge uma f.e.m. (força eletromotriz, normalmente da ordem de mV) entre os pontos a e b, denominada “**tensão termoelétrica**”. Este fenômeno é conhecido por “**Efeito Seebeck**”.

Ou seja, ao se conectar dois metais diferentes (ou ligas metálicas) tem-se um circuito tal que, se as junções “a” e “b” forem mantidas em temperaturas diferentes T_1 e T_2 , surgirá uma f.e.m. termoelétrica e uma corrente elétrica “i” circulará pelo chamado “**par termoelétrico**” ou “**termopar**”.

Qualquer ponto deste circuito poderá ser aberto e nele inserido o instrumento (**Voltímetro**) para medir a f.e.m. Uma consequência imediata do **Efeito Seebeck** é o fato de que, conhecida a temperatura de uma das junções pode-se, através da f.e.m. produzida, saber a temperatura da outra junção.

2.1 Temperatura

O esquema abaixo ilustra um circuito contendo um termopar e um Voltímetro conectado para a medição da temperatura T_1 .



2.1 Temperatura

| Termopar: Faixa de uso aconselhada | Algumas Aplicações | Vantagens | Desvantagens |
|---|--|---|--|
| J ferro, constantã -190 a 870 °C | 1) têmperas 2) recozimento 3) fornos elétricos | 1) baixo custo | 1) devem ser usados tubos de proteção para $T > 480\text{ °C}$ |
| K Cromel, alumei -18 a 1370 °C | 1) tratamento térmico 2) fornos 3) fundição 4) banhos | 1) adequado para atmosfera oxidantes 2) boa resistência mecânica em altas temperaturas | 1) vulnerável a atmosfera redutoras |
| T Cobre, constantã -190 a 370 °C | 1) estufas 2) banhos 3) fornos elétricos p/ baixa temperatura | 1) resiste a atmosferas corrosivas 2) resiste a atmosferas redutoras e oxidantes 3) utilizável em temperaturas negativas | 2) oxidação do cobre acima de 315 °C |
| R - Pt - Pt 13% Rh S - Pt - Pt | 1) vidros 2) fornos ($T > 1300\text{ °C}$) | 1) pode operar em atmosfera oxidante | 1) contamina facilmente em |
| 10% Rh -18 a 1540 °C | 3) fundição 4) alto-forno | 2) opera numa faixa maior que o tipo K. | atmosfera não oxidante 2) fragiliza em altas temperaturas |

3. Instrumentação Industrial

O **objetivo** de se medirem e controlarem as diversas variáveis físicas em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, a custos compatíveis com as necessidades do mercado consumidor.

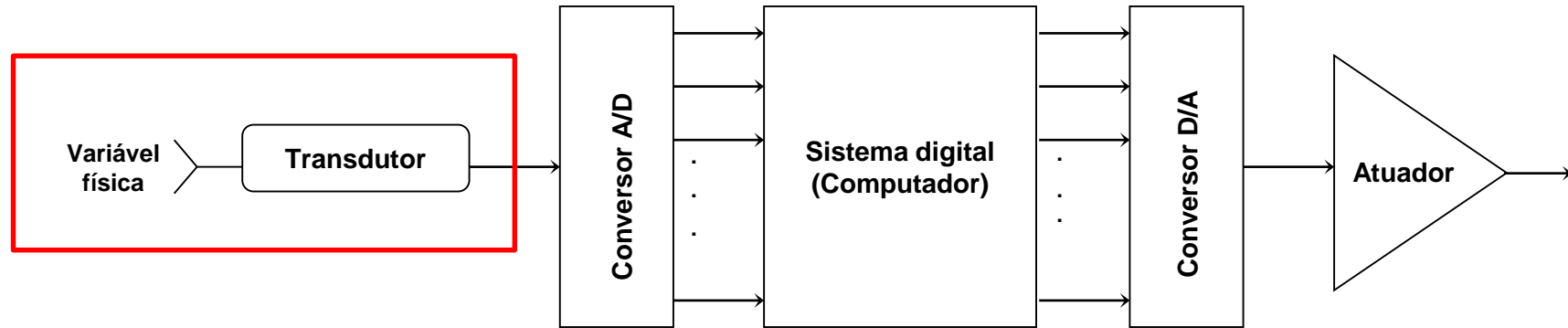
As indústrias em geral utilizam equipamentos, cujo funcionamento com qualidade dos processos industriais exige um controle permanente, sendo necessário manter constantes algumas variáveis (**pressão, vazão, temperatura, nível, pH, condutividade, velocidade, umidade etc.**).

Os sensores e atuadores são amplamente utilizados na automação de processos industriais;

O elemento que "sente" o que ocorre no processo, fornecendo informações sobre o estado da variável monitorada é chamado de **sensor**, ou parte sensível do transdutor.

O elemento que executa a tarefa designada pelo controlador é chamado de **atuador**.

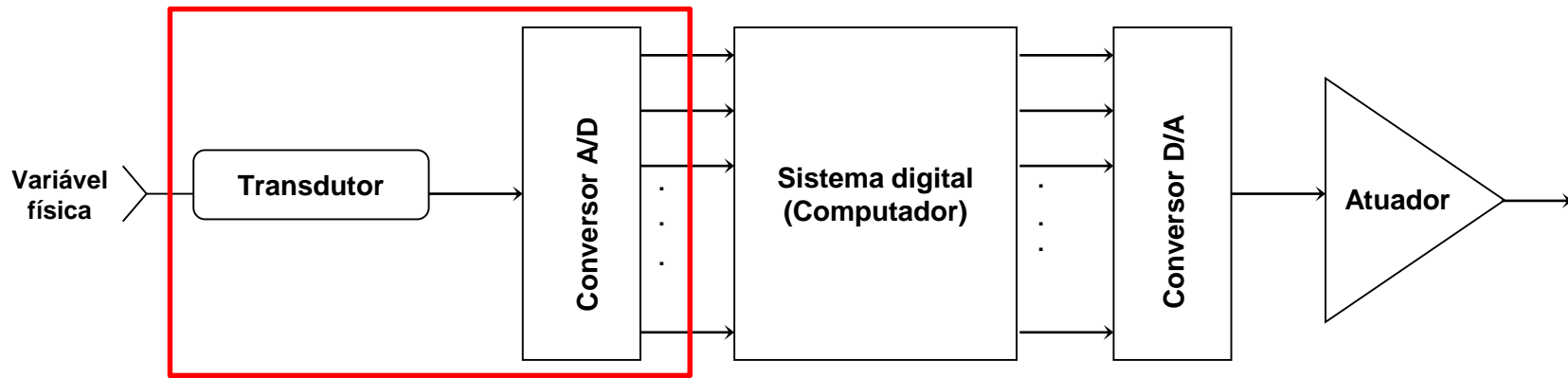
3. Instrumentação Industrial



Transdutor: A variável física é geralmente uma grandeza não-elétrica. Um transdutor é um dispositivo que converte a variável física em uma variável elétrica. E essa saída elétrica (tensão ou corrente analógica) é proporcional à variável física monitorada.

Exemplo: **variável física** = **temperatura** da água de um grande tanque que está sendo abastecido por tubos de água quente e fria. Se a temperatura da água varia de **20°C a 50°C**, um **termistor (transdutor)** irá converter tal temperatura para uma tensão na faixa de **200 a 500 mV**, ou seja a cada **1°C** gera uma variação na saída de **10 mV**.

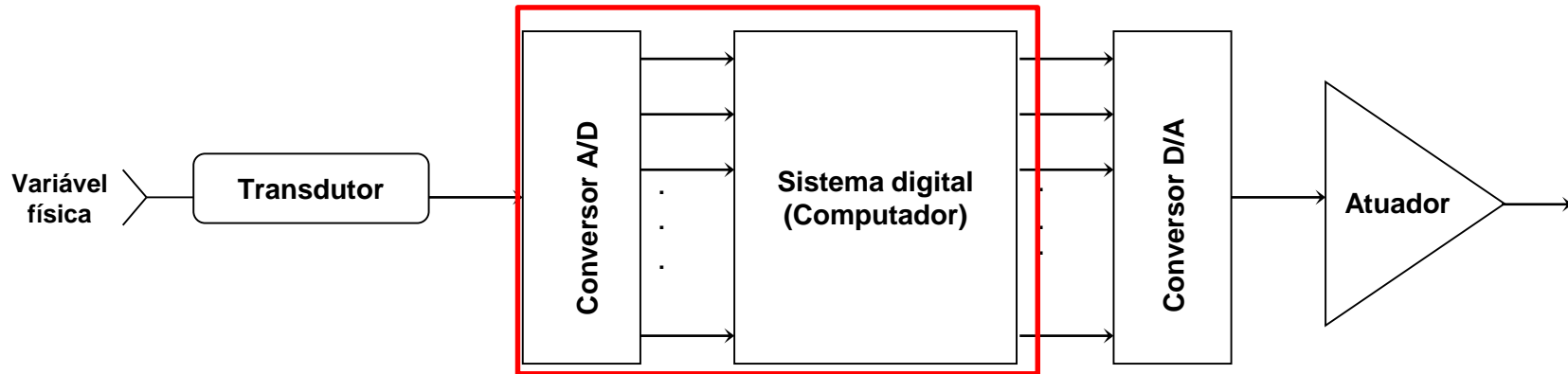
3. Instrumentação Industrial



Conversor Analógico-Digital (A/D): A saída elétrica analógica do transdutor serve como entrada analógica do A/D. Este **converte a entrada analógica em sinal digital**, que consiste de um número de **bits** que representam o valor da entrada analógica.

Exemplo: O A/D poderia converter os valores analógicos de 200 a 500 mV para valores binários na faixa de **10100 (20)** a **110010 (50)**. Assim, cada unidade de saída digital representa 10 mV.

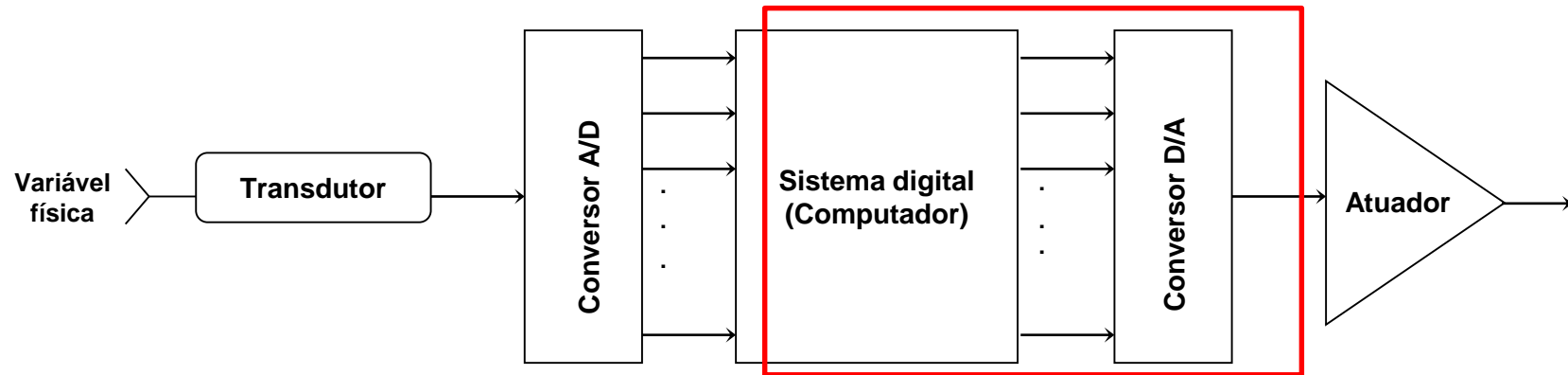
3. Instrumentação Industrial



Computador: A representação digital da variável é transmitida do A/D para o computador, que armazena o valor digital e o processa de acordo com as instruções do programa que está sendo executado.

Exemplo: O programa poderia realizar cálculos ou outras operações sobre as representações digitais da temperatura para gerar uma **saída digital** que acabará sendo usada para controlar a temperatura (ações de controle PID).

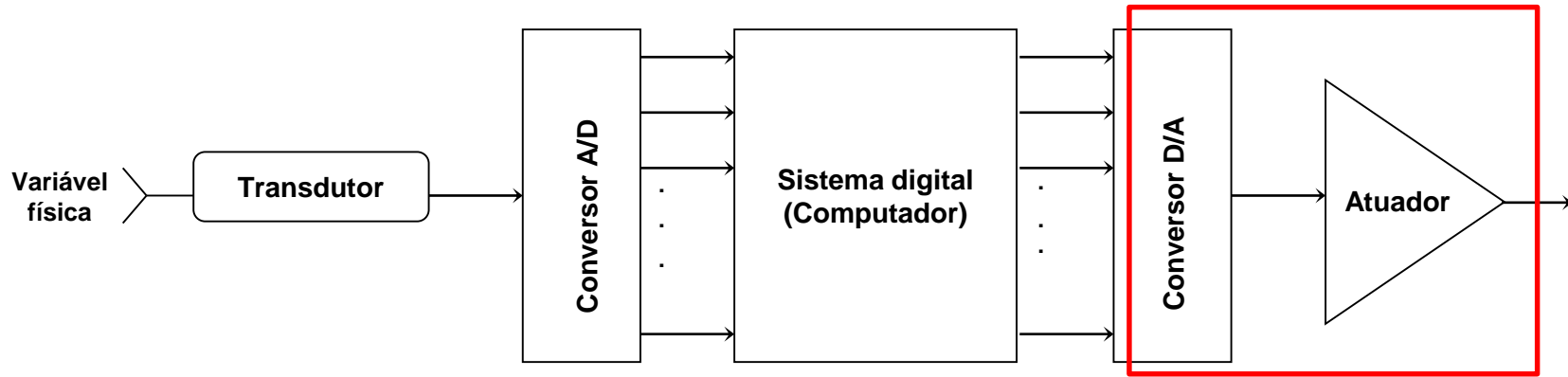
3. Instrumentação Industrial



Conversor Digital-Analógico (D/A): Essa saída digital do computador está conectada a um DA, que a converte em uma tensão ou corrente analógica proporcional.

Exemplo: o computador poderia gerar uma saída digital na faixa de **00000000 a 11111111**, que o D/A converteria para a faixa de tensão de **0 a 10 V**.

3. Instrumentação Industrial



Atuador: O sinal analógico do D/A é freqüentemente conectado a **algum dispositivo ou circuito que serve como um atuador para controlar a variável física.**

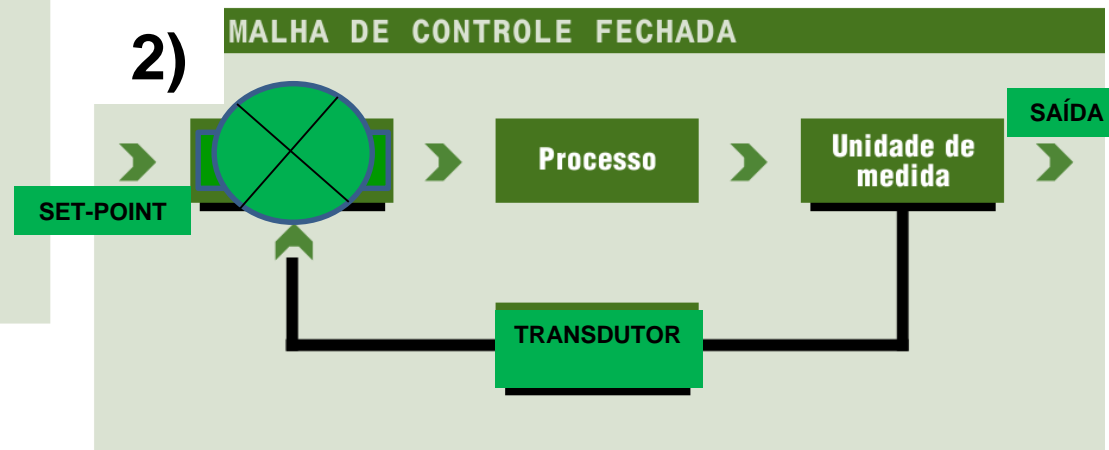
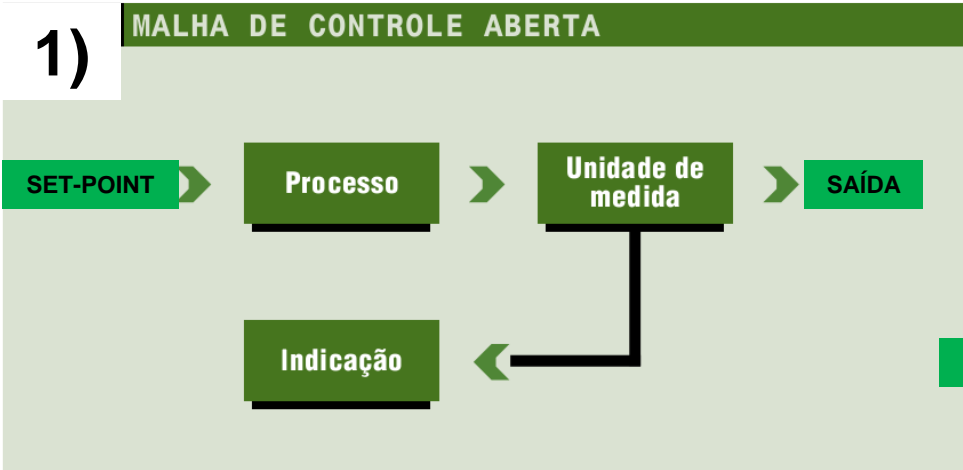
Exemplo: uma válvula controlada eletricamente que regula o fluxo de água quente para o tanque de acordo com a **tensão analógica do D/A**. Assim, a velocidade do fluxo poderia variar proporcionalmente, sendo **0 V não produzindo fluxo e 10 V produzindo fluxo máximo.**

3. Controle de Processo Industrial

O sistema de controle de um processo industrial permite manter as variáveis próximas aos valores desejados, comparando o valor da variável do processo com o valor desejado e tomando uma atitude (**Lei de Controle**) de correção de acordo com o desvio existente (**erro**).

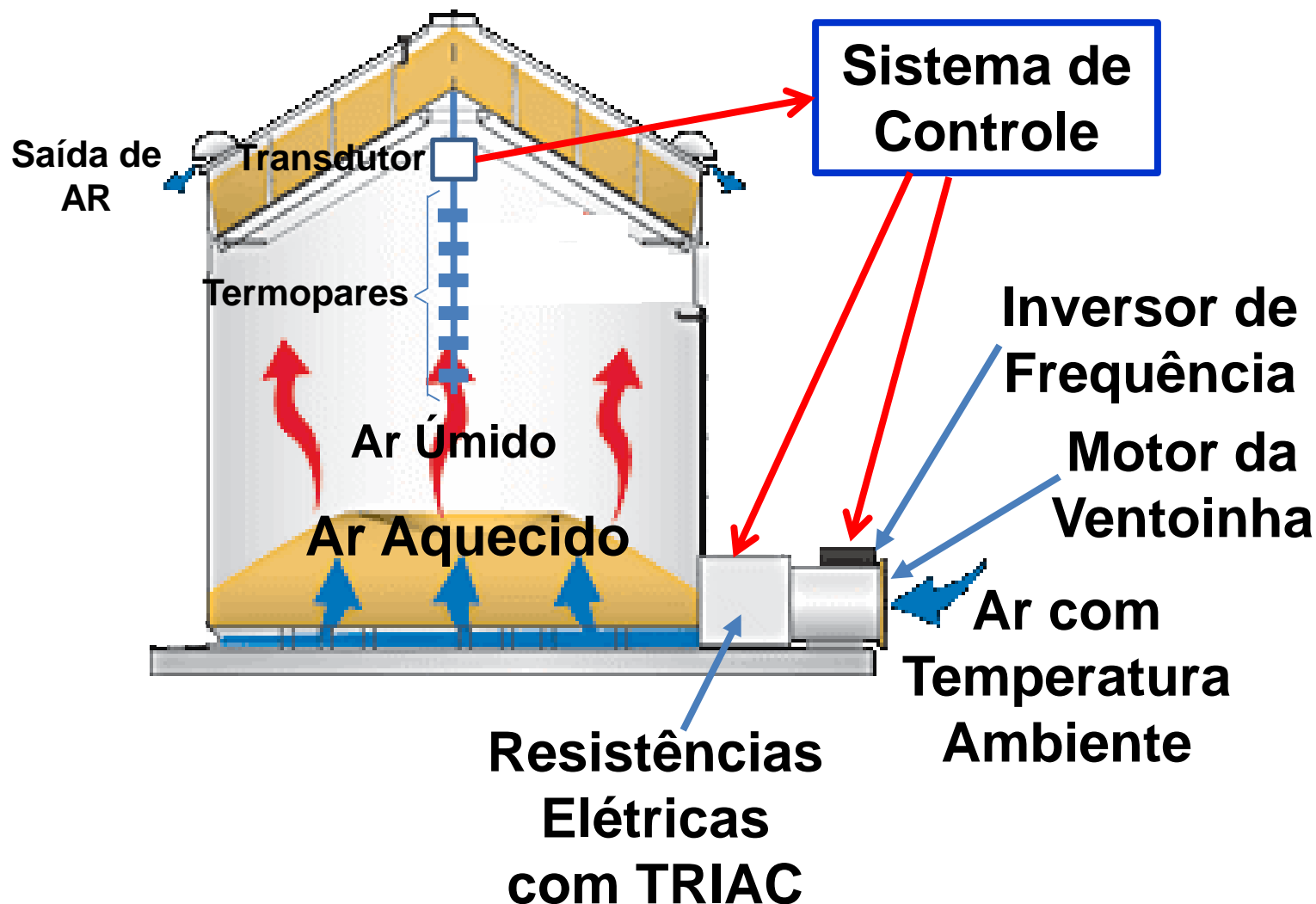
O controle de um processo industrial poderá ser em:

- 1) Malha Aberta (saída não influencia a entrada!)
- 2) Malha Fechada (saída influencia a entrada!)



4. Exemplo de Controle de Processo Agro-Industrial

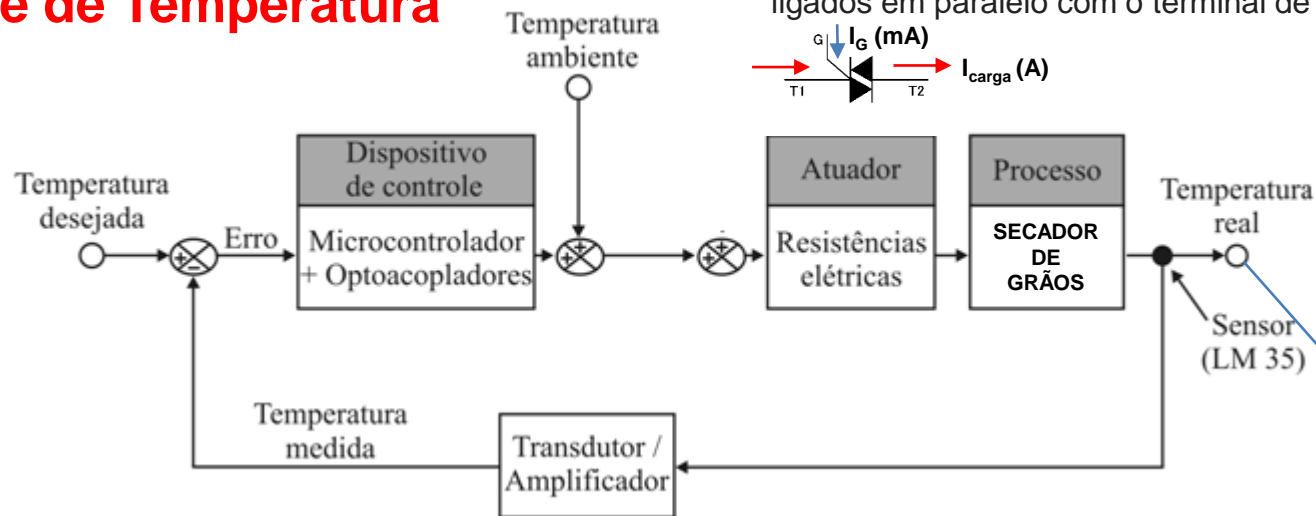
Seja o Secador de Grãos dado pelo esquema abaixo.



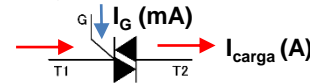
4. Exemplo de Controle de Processo Agro-Industrial

Exemplo de Controle de Temperatura de Secagem e Velocidade do Motor da Ventoinha de um Secador de Grãos

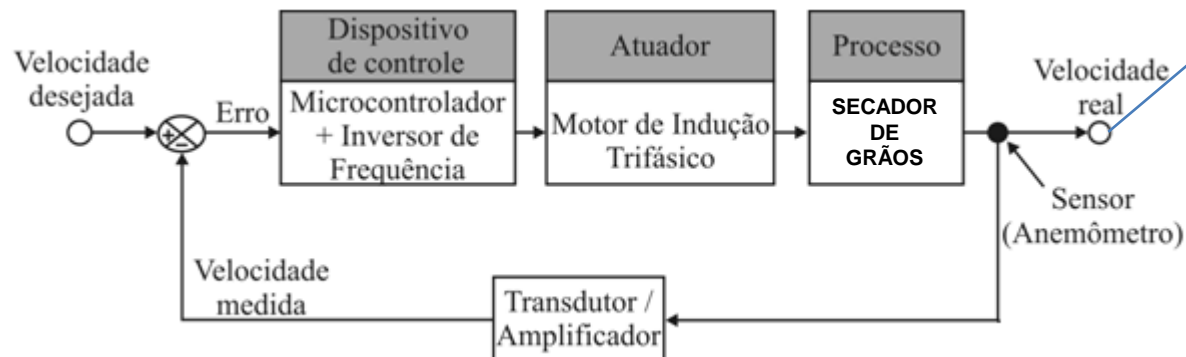
Controle de Temperatura



TRIAC (TRIode for Alternating Current): componente eletrônico equivalente a dois retificadores controlados de silício (SCR/tiristores) ligados em paralelo com o terminal de disparo (gatilho ou gate).



Controle de Velocidade



SECADOR DE GRÃOS