

# **Física Experimental VI – 4300314**

**1º Semestre de 2017**

**Instituto de Física  
Universidade de São Paulo**

**Professor: Antonio Domingues dos Santos**

**E-mail: [adsantos@if.usp.br](mailto:adsantos@if.usp.br)**

**Fone: 3091.6886**

## Sistemas de Contrô de Processos

### Dinâmica e controle

#### Dinâmica: as coisas mudam

Em qualquer processo, as condições de operação estão sujeitas a mudanças ao longo do tempo. O nível de líquido em um equipamento, a pressão em um vaso, a vazão de um reagente ou sua temperatura; todas estas condições podem (e costumam) variar.

#### Controle: uma tentativa de influir no processo

Controlar um processo significa atuar sobre ele, ou sobre as condições a que o processo está sujeito, de modo a atingir algum objetivo - por exemplo, podemos achar necessário ou desejável manter o processo sempre próximo de um determinado estado estacionário, mesmo que efeitos externos tentem desviá-lo desta condição.

#### Objetivo de controle:

Preende-se um estado estacionário ou uma condição de operação desejável.

**Sistemas de malha aberta  
ou de malha fechada.**

## Sistemas de Contrôles de Processos

### Exemplos cotidianos

#### Manter um carro na estrada

monitora-se: **a trajetória/ velocidade/ tráfego**

atua-se: **sobre volante/ acelerador/ freio**

controla-se: **a trajetória**

segurança: **guard-rails/ muretas**

#### Tomar uma ducha quente

monitora-se: **temperatura/ vazão da água**

atua-se: **sobre as torneiras**

controla-se: **a temperatura (e vazão, se der)**

segurança: **box maior que o jato da ducha**

#### Controle de orçamento

monitora-se: **o saldo bancário**

atua-se: **sobre desembolsos**

controla-se: **o orçamento**

segurança: **poupança?**

#### Altitude de vôo de um avião

monitora-se: **tudo**

atua-se: **sobre manche, etc.**

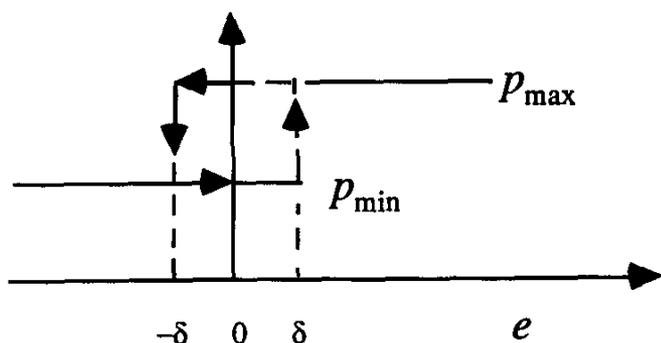
controla-se: **a altitude**

segurança: **. . .**

## Sistemas de Contrôlo de Processos

# Controladores liga-desliga

- Simples
- Baratos
- Usados em sistemas de refrigeração e aquecimento domésticos
- Uso limitado em processos industriais ou científicos  $\Rightarrow$  devido ao baixo rendimento e vida relativamente curta.

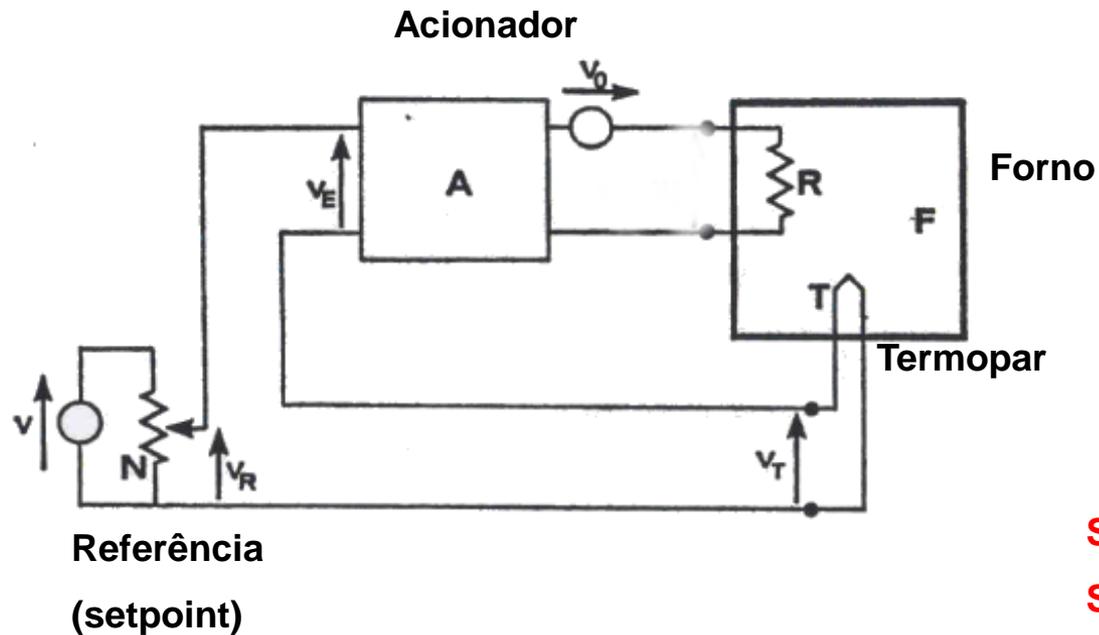


Este sistema nunca atinge um valor de equilíbrio.

$$p(t) = \begin{cases} P_{\max} & \text{for } e > \delta \\ P_{\min} & \text{for } e < -\delta \end{cases} \quad \delta = \text{tolerância}$$

## Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa



Se  $V_E > 0 \Rightarrow$  liga

Se  $V_E < 0 \Rightarrow$  desliga

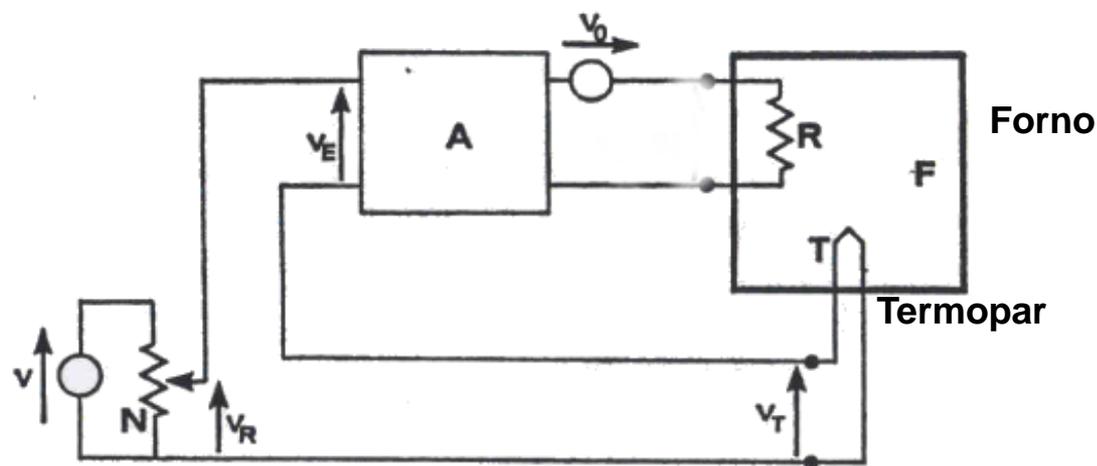
$$V_E = V_R - V_T$$

**Controlador Liga/desliga**

# Sistemas de Contrôlo de Processos

## Com Retroalimentação Negativa

Amplificador diferencial



Referência  
(setpoint)

$$V = A V_E$$

Onde A é o ganho

$$\text{e } V_E = V_R - V_T$$

( $V_E = \text{Erro}$ )

Para  $A \uparrow$  oscila

Para  $A \downarrow$  demora para estabilizar

Portanto, existe um A ideal para otimizar o sistema (chegar mais rápido na temperatura de equilíbrio).

Controlador Proporcional (tipo P)

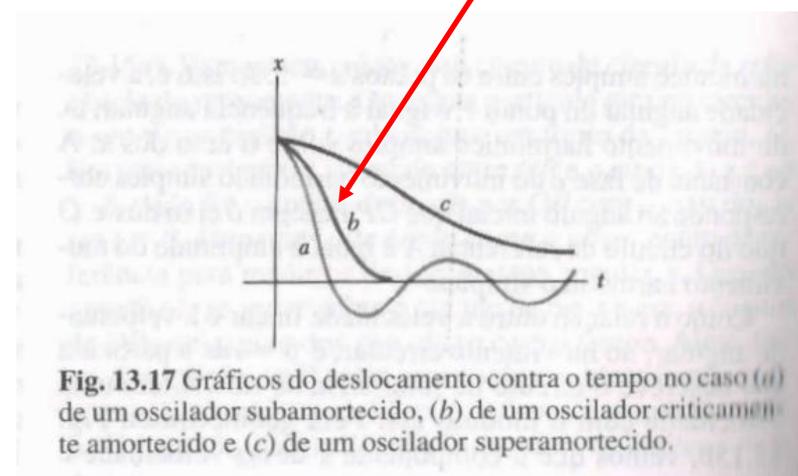


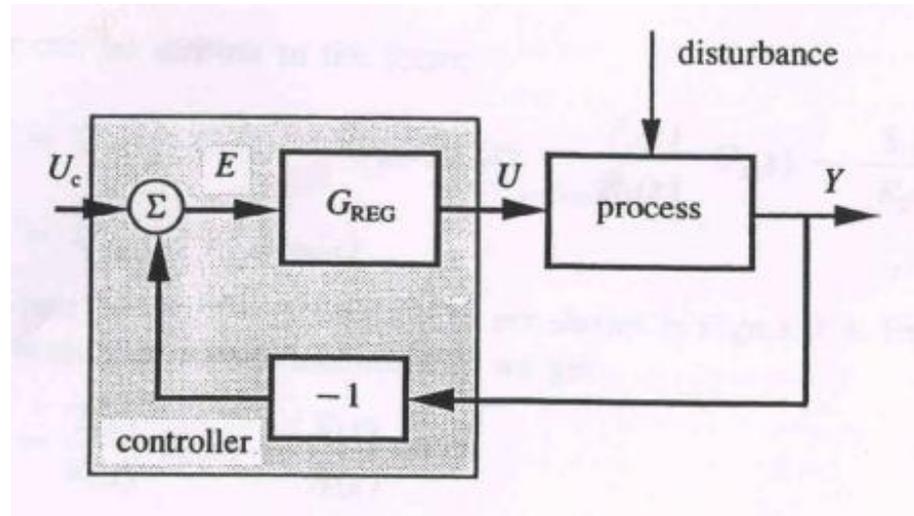
Fig. 13.17 Gráficos do deslocamento contra o tempo no caso (a) de um oscilador subamortecido, (b) de um oscilador criticamente amortecido e (c) de um oscilador superamortecido.

## Sistemas de Contrôlo de Processos

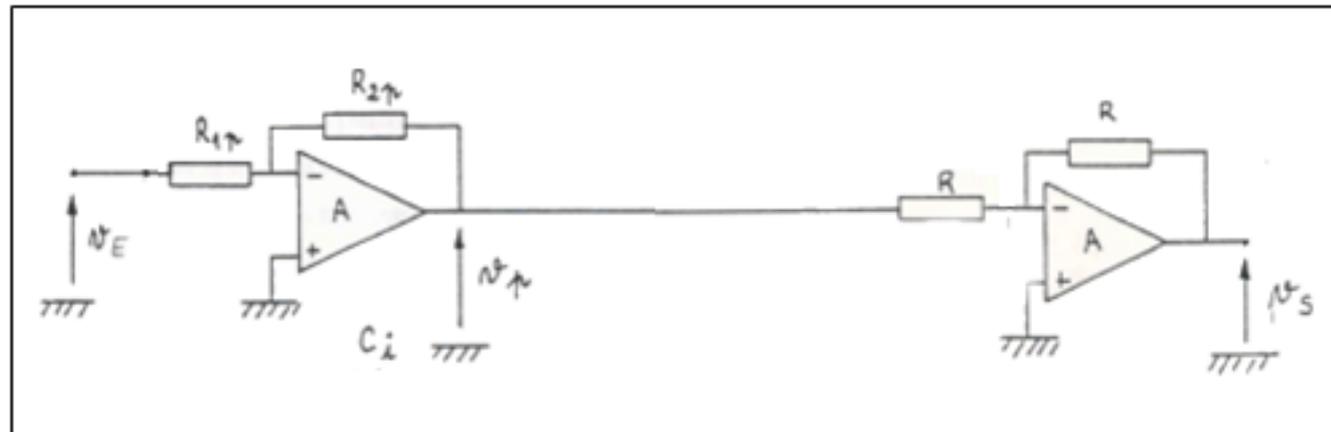
Com Retroalimentação Negativa

$$u(t) = -ke(t)$$

Set-point



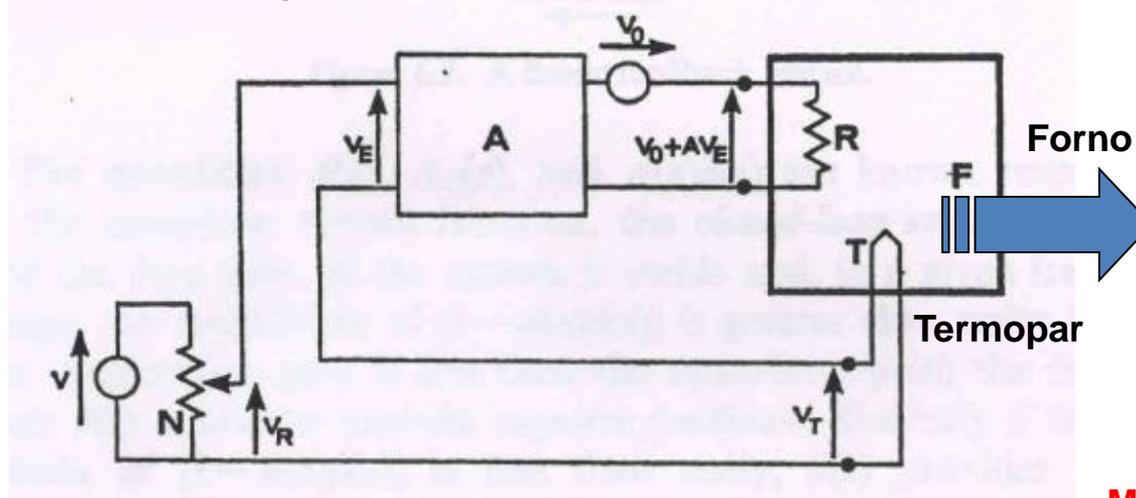
Controlador Proporcional (tipo P)



# Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa

Amplificador diferencial



Referência  
(setpoint)

Fuga de calor  
(isolamento ruim)

Mesmo para um A ideal, o setpoint não vai ser atingido.

A temperatura vai se estabilizar no valor em que o calor fornecido por R ( $\propto v_E$ ) for igual a fuga de calor.

$$T \neq T_{ref}$$

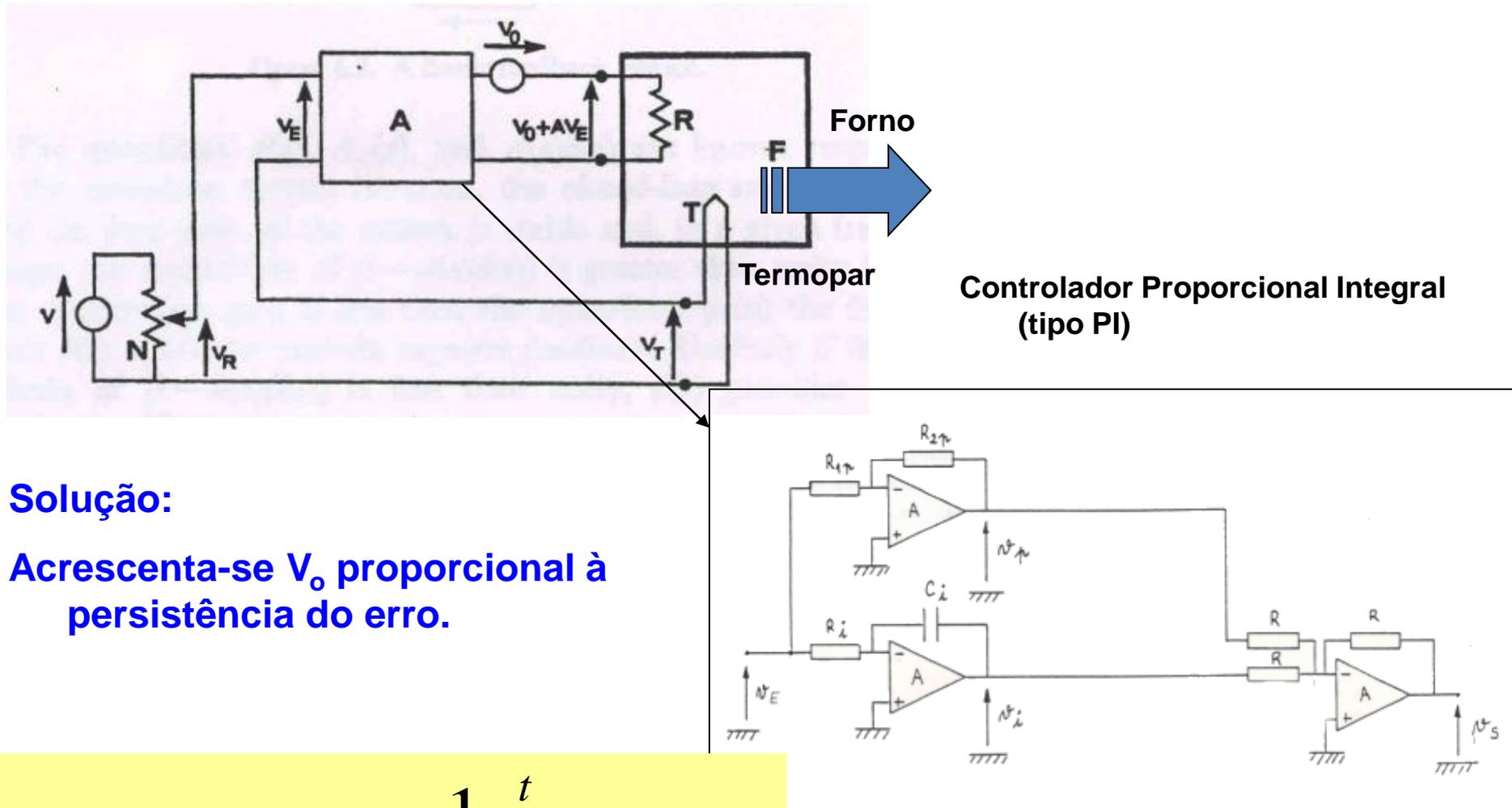
Solução:

Acrescenta-se  $V_0$

Mas,  $V_0$  deve ser função de  $T_{ref}$

## Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa

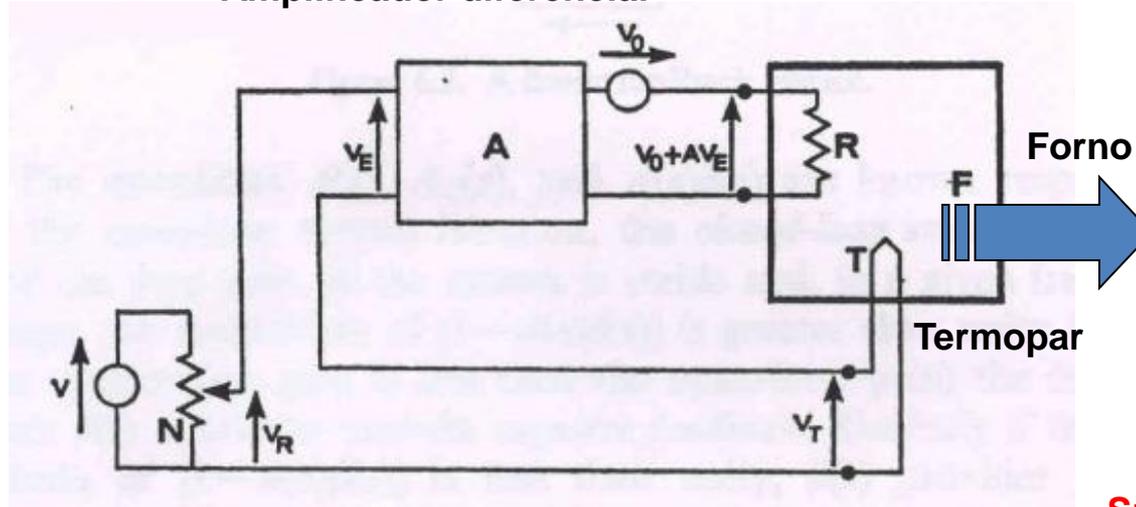


$$u(t) = -ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt'$$

## Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa

Amplificador diferencial



Referência  
(setpoint)

Fuga de calor  
(isolamento ruim)

Suponha que a propagação do calor da resistência até o sensor seja demorada.

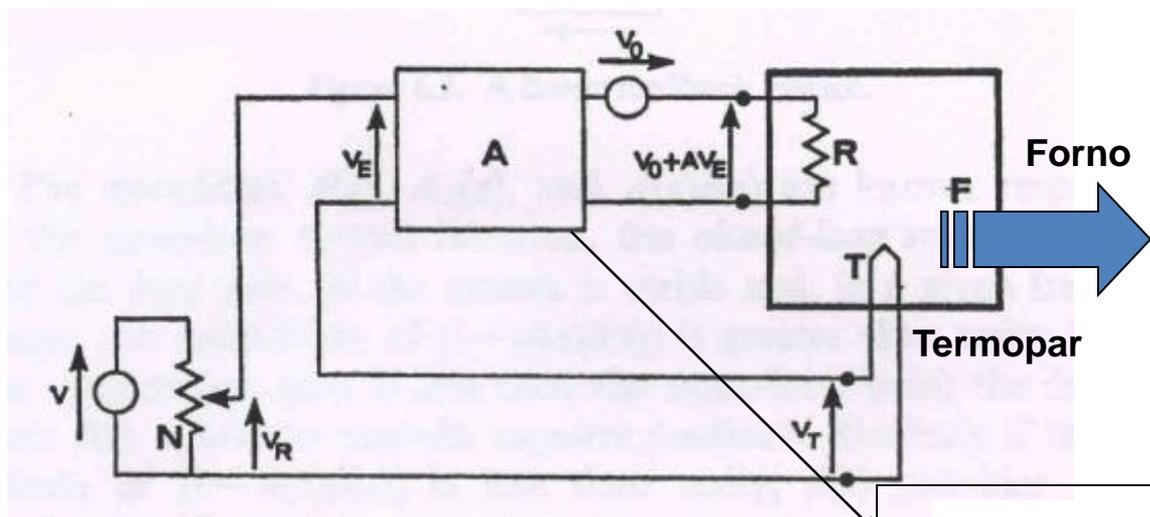
Ocorrerão defasagens e oscilações na temperatura.

Solução:

Acrescenta-se uma defasagem oposta

# Sistemas de Contrôlo de Processos

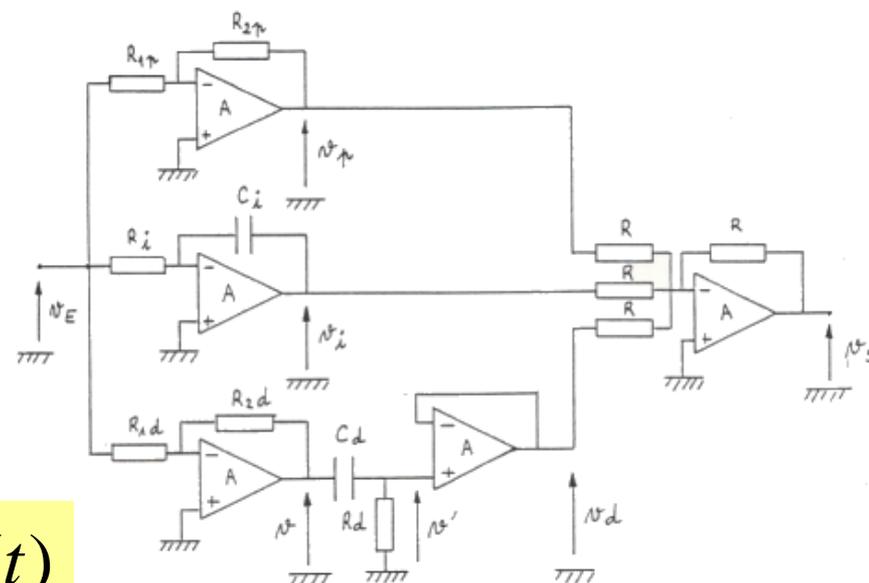
Com Retroalimentação Negativa



Controlador Proporcional Integral Diferencial (tipo PID)

Solução:

Acrescenta-se  $V_0$  proporcional à variação do erro.

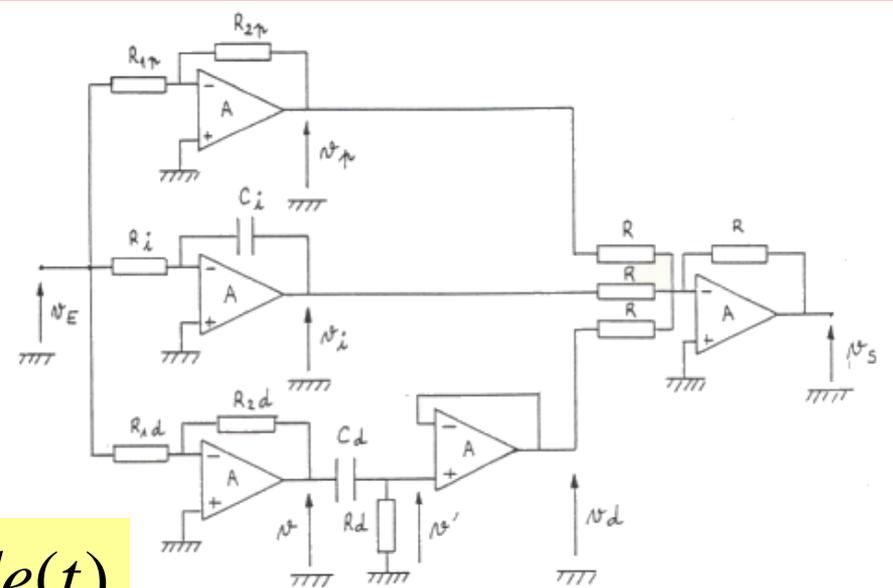
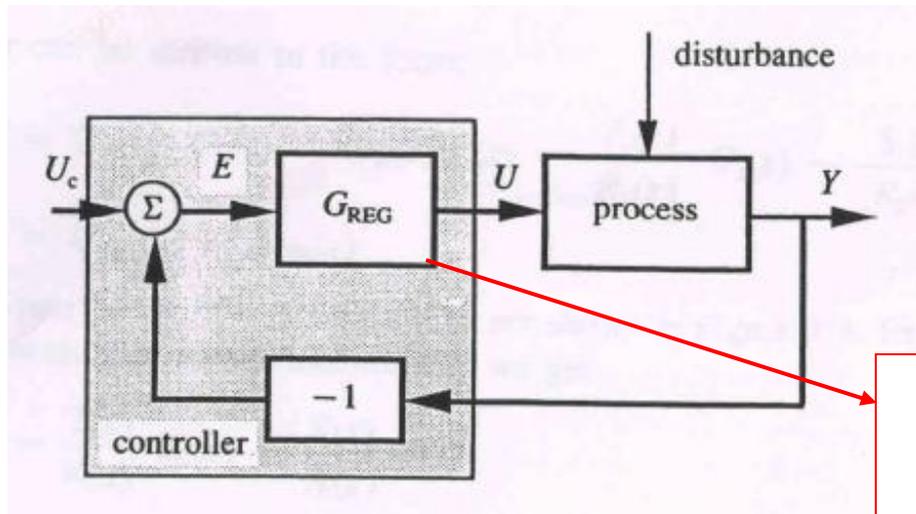


$$u(t) = -Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt' - T_d \frac{de(t)}{dt}$$

## Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa

### Controlador Proporcional Integral Diferencial (tipo PID)



$$u(t) = -Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt' - T_d \frac{de(t)}{dt}$$

# Sistemas de Controle de Processos

## Com Retroalimentação Negativa

## Controlador Proporcional Integral Diferencial (tipo PID)

**Table 8.2** Key Characteristics of Commercial PID Controllers

Controller Feature	Controller Parameter	Symbol	Units	Typical Range*
<b>Proportional mode</b>	<i>Controller gain</i>	$K_c$	Dimensionless [%/%, mA/mA]	0.1–100
	<i>Proportional band</i>	$PB$ $= 100\%/K_c$	%	1–1000%
<b>Integral mode</b>	<i>Integral time (or reset time)</i>	$\tau_I$	Time [min, s]	0.02–20 min 1–1000 s
	<i>Reset rate</i>	$1/\tau_I$	Repeats/time [min <sup>-1</sup> , s <sup>-1</sup> ]	0.001–1 repeats/s 0.06–60 repeats/min
	<i>Integral mode “gain”</i>	$K_I$	Time <sup>-1</sup> [min <sup>-1</sup> , s <sup>-1</sup> ]	0.1–100
<b>Derivative mode</b>	<i>Derivative time</i>	$\tau_D$	Time [min, s]	0.1–10 min. 5–500 s
	<i>Derivative mode “gain”</i>	$K_D$	Time [min, s]	0.1–100
	<i>Derivative filter parameter</i>	$\alpha$	Dimensionless	0.05–0.2
<b>Control interval (Digital controllers)</b>		$\Delta t$	Time [s, min]	0.1 s–10 min

\*Based on McMillan (1994).

# Sistemas de Contrôles de Processos

## Com Retroalimentação Negativa

### Controlador Proporcional Integral Diferencial (tipo PID)

Há vários métodos práticos para o ajuste de um controlador PID a um processo dado; pode-se dizer que são regras práticas para compensação de servo-sistemas.

$$G_c(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$$

1.º método:

- 1.º) Ajuste  $T_D$  e  $1/T_i$  em zero;
- 2.º) Aumente lentamente o ganho  $k_c$  até que se instale no sistema uma oscilação periódica;
- 3.º) Seja  $k_u$  este valor do ganho e  $P_u$  o período da oscilação;
- 4.º) Escolha os parâmetros do compensador de acordo com a tabela abaixo:

Transmittance du régulateur	Valeurs des paramètres du régulateur selon Ziegler et Nichols					
	Essai indiciel (a,L)			Limite de pompage ( $K_o, T_o$ )		
$R(s) = K_p$	$K_p = \frac{1}{aL}$			$K_p = 0,5 K_o$		
$R(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right)$	$K_p = \frac{0,9}{aL}$	$T_i = 3,3 L$		$K_p = 0,45 K_o$	$T_i = 0,83 T_o$	
$R(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_D \right)$	$K_p = \frac{1,2}{aL}$	$T_i = 2 L$	$T_D = 0,5 L$	$K_p = 0,6 K_o$	$T_i = 0,5 T_o$	$T_D = 0,125 T_o$

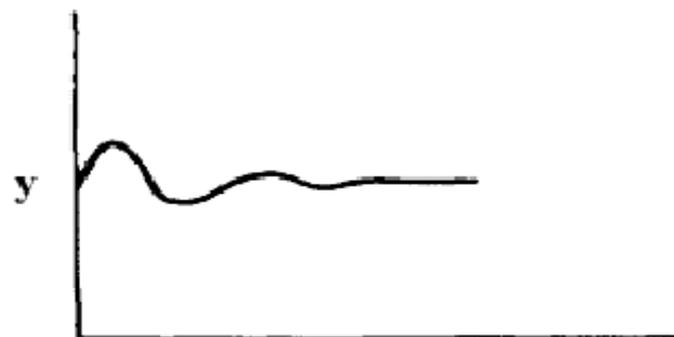
Malha aberta

Malha fechada

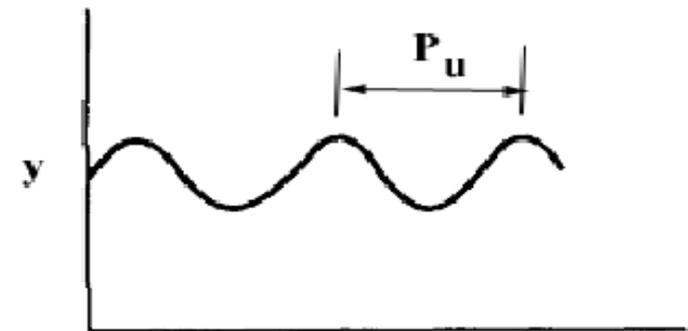
Método alternativo:

- 1) Ajuste  $T_D$  e  $1/T_i$  em zero
- 2) Aumente o ganho até oscilar
- 3) Reduza o ganho à metade
- 4) Diminua  $T_i$  até oscilar
- 5) Duplique  $T_i$  e faça  $T_D = T_i$

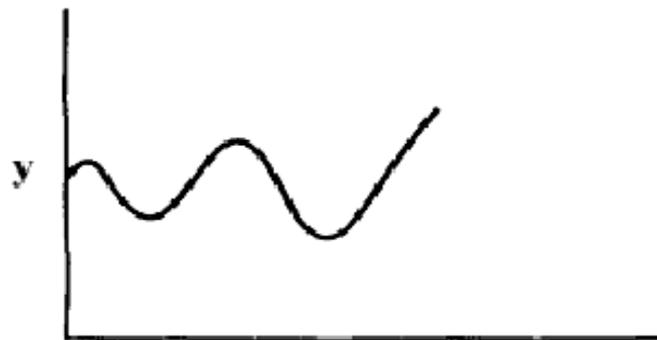
# Controller Tuning and Troubleshooting Control Loops



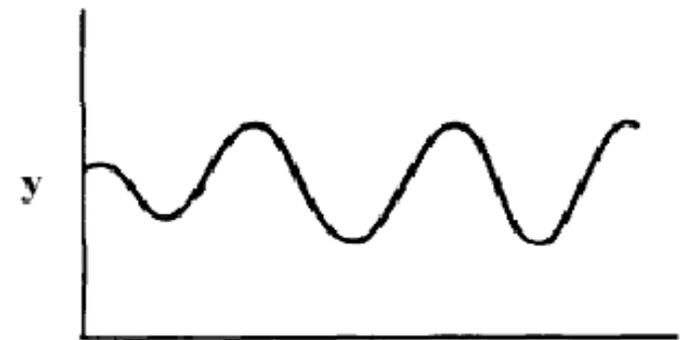
(a)  $K_c < K_{cu}$



(b)  $K_c = K_{cu}$



(c)  $K_c > K_{cu}$  (without saturation)



(d)  $K_c > K_{cu}$  (with saturation)

**Figure 12.12.** Experimental determination of the ultimate gain  $K_{cu}$ .

## Ziegler-Nichols Rules:

These well-known tuning rules were published by Z-N in 1942:

controller	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
P	$0.5 K_{CU}$	-	-
PI	$0.45 K_{CU}$	$P_U/1.2$	-
PID	$0.6 K_{CU}$	$P_U/2$	$P_U/8$

Z-N controller settings are widely considered to be an "industry standard".

Z-N settings were developed to provide 1/4 decay ratio -- too oscillatory?

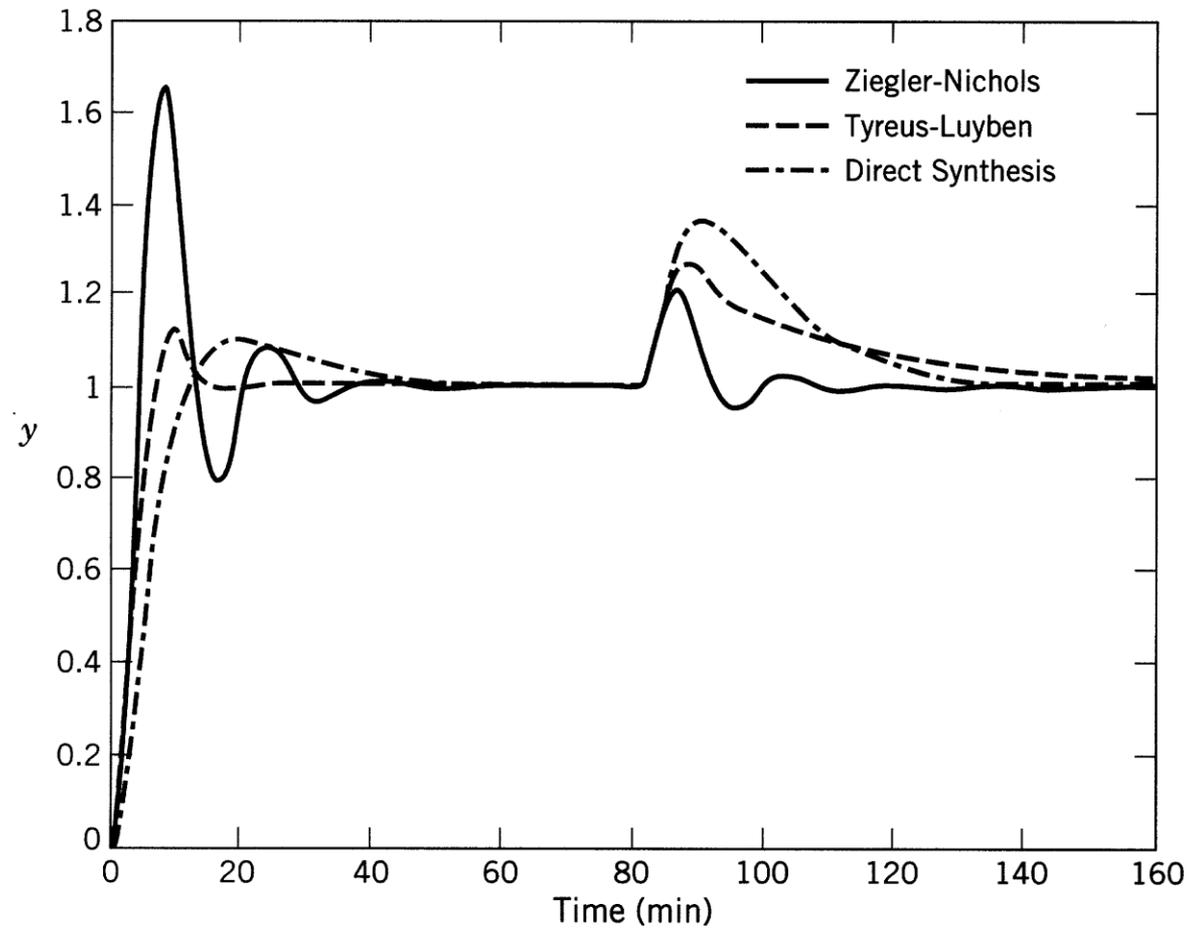
## Modified Z-N settings for PID control

controller	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
original	$0.6 K_{CU}$	$P_U/2$	$P_U/8$
Some overshoot	$0.33 K_{CU}$	$P_U/2$	$P_U/3$
No overshoot	$0.2 K_{CU}$	$P_U/3$	$P_U/2$

**Table 12.6 Controller Settings based on the Continuous Cycling Method**

Ziegler-Nichols	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
P	$0.5K_{cu}$	—	—
PI	$0.45K_{cu}$	$P_u/1.2$	—
PID	$0.6K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$
Tyreus-Luyben†	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
PI	$0.31K_{cu}$	$2.2P_u$	—
PID	$0.45K_{cu}$	$2.2P_u$	$P_u/6.3$

† Luyben and Luyben (1997).



**Figure 12.13** Comparison of PID controllers for Example 12.7.

## Digital PID Controller

$$p_n = \bar{p} + K_c \left[ e_n + \underbrace{\frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{k=1}^{n-1} e_k}_I + \underbrace{\frac{\tau_D}{\Delta t} (e_n - e_{n-1})}_D \right]$$

finite difference approximation

where,

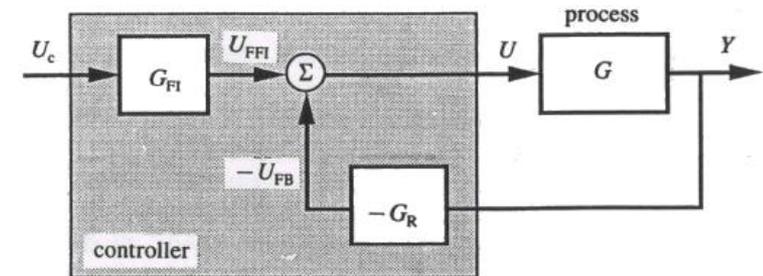
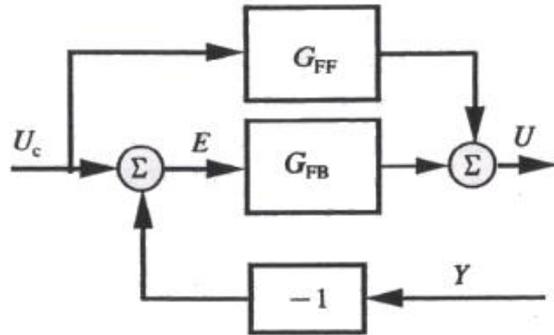
$\Delta t$  = the sampling period (the time between successive samples of the controlled variable)

$P_n$  = controller output at the  $n$ th sampling instant,  $n=1,2,\dots$

$e_n$  = error at the  $n$ th sampling unit

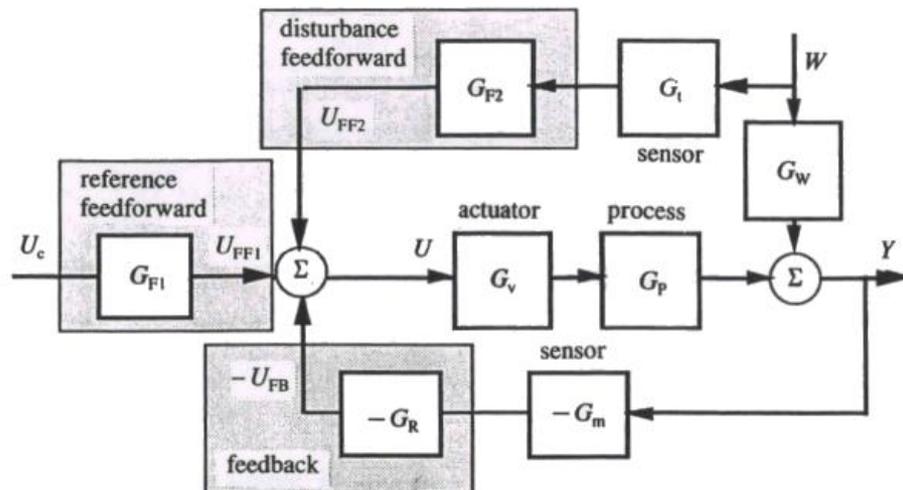
# Sistemas de Controle de Processos

Com Retroalimentação Negativa e  
alimentação adiantada



Melhora a resposta a variações na referência

Forma alternativa

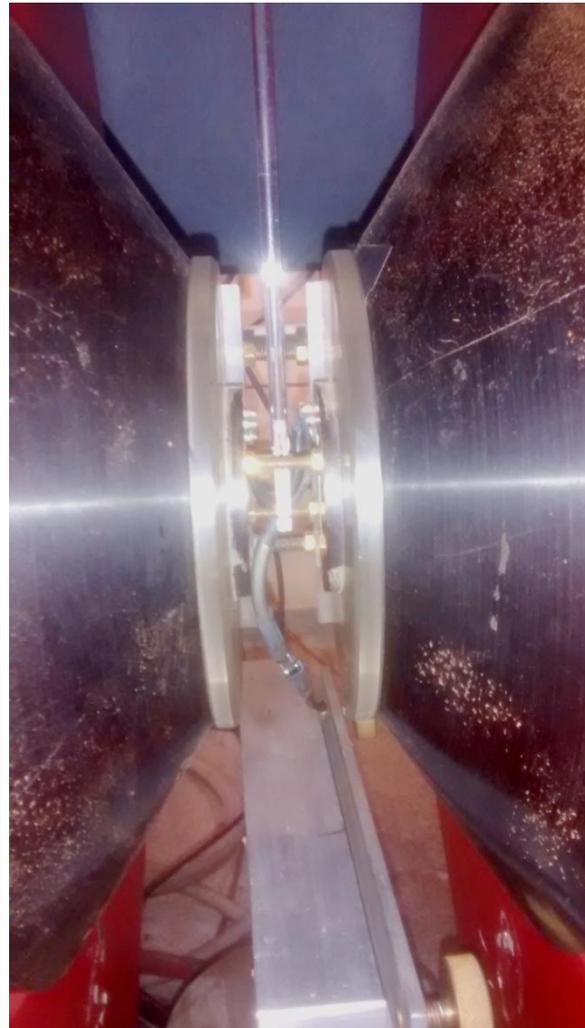
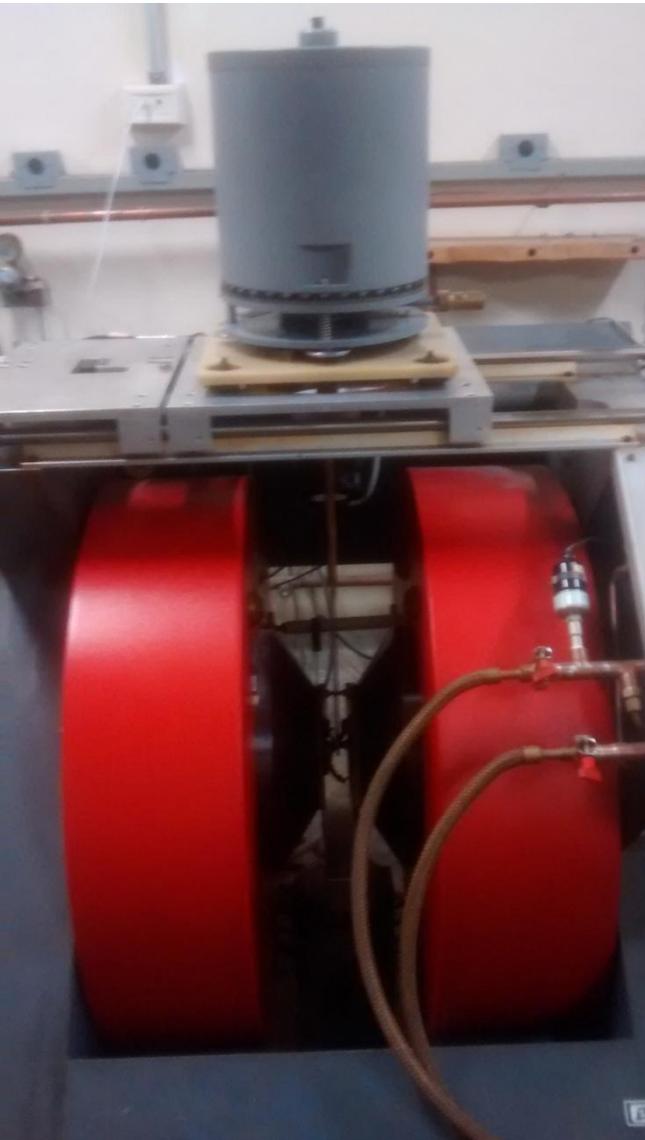


Melhora a resposta a variações nas  
perturbações externas

## Alguns exemplos - FORNOS



## Alguns exemplos - MAGNETÔMETROS



## Alguns exemplos – Sistema de Sputtering

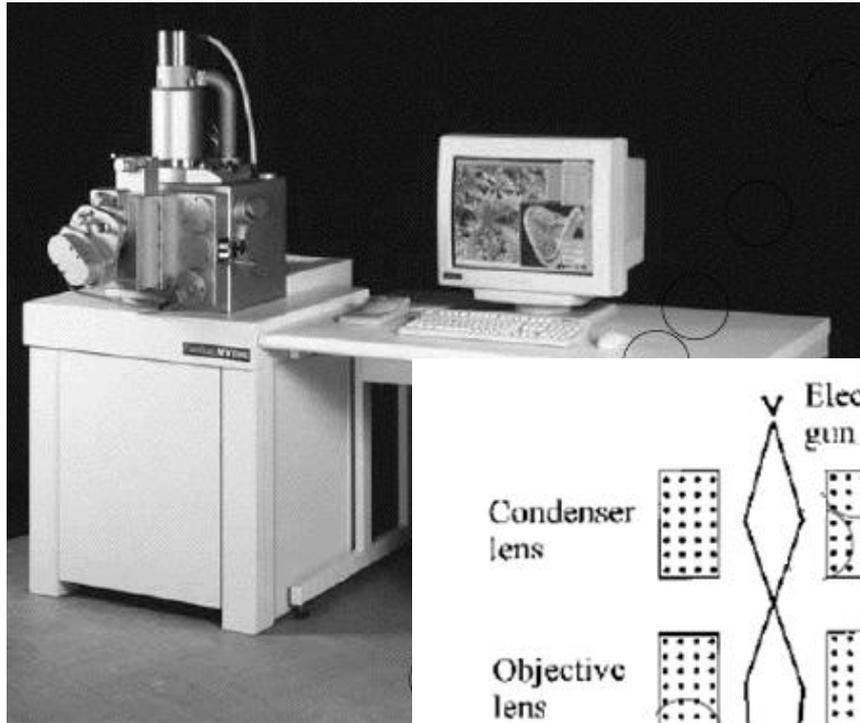


## Alguns exemplos – Sistema de Sputtering



# Caracterização dos Materiais

# Feixe de elétrons



## Microscopia Eletrônica de Varredura

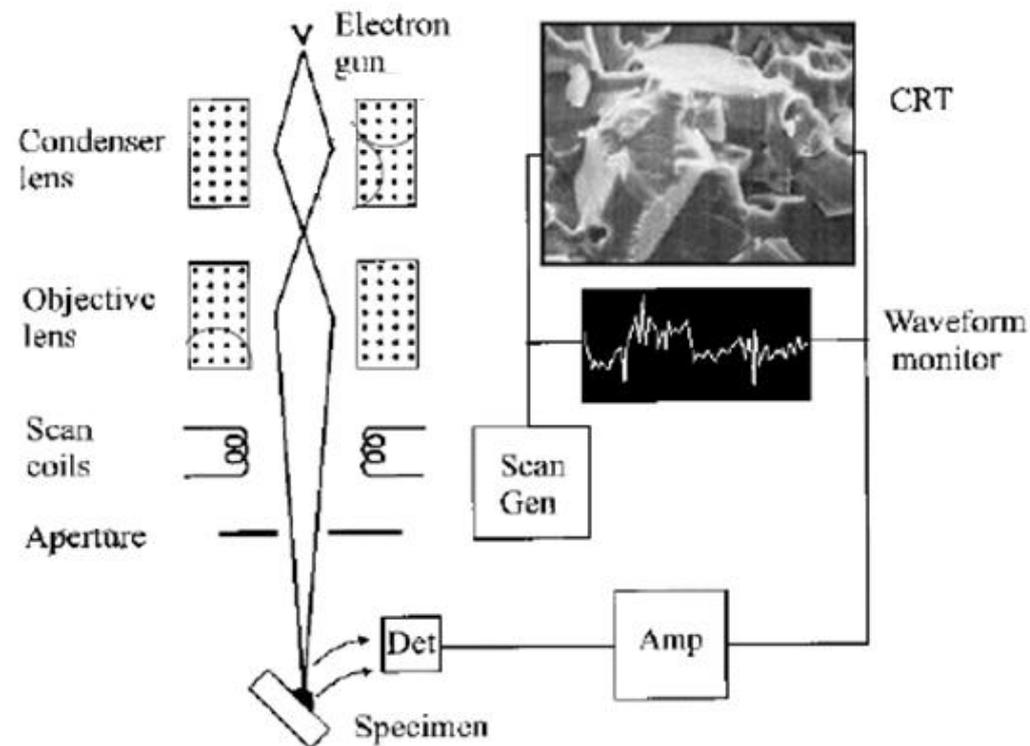
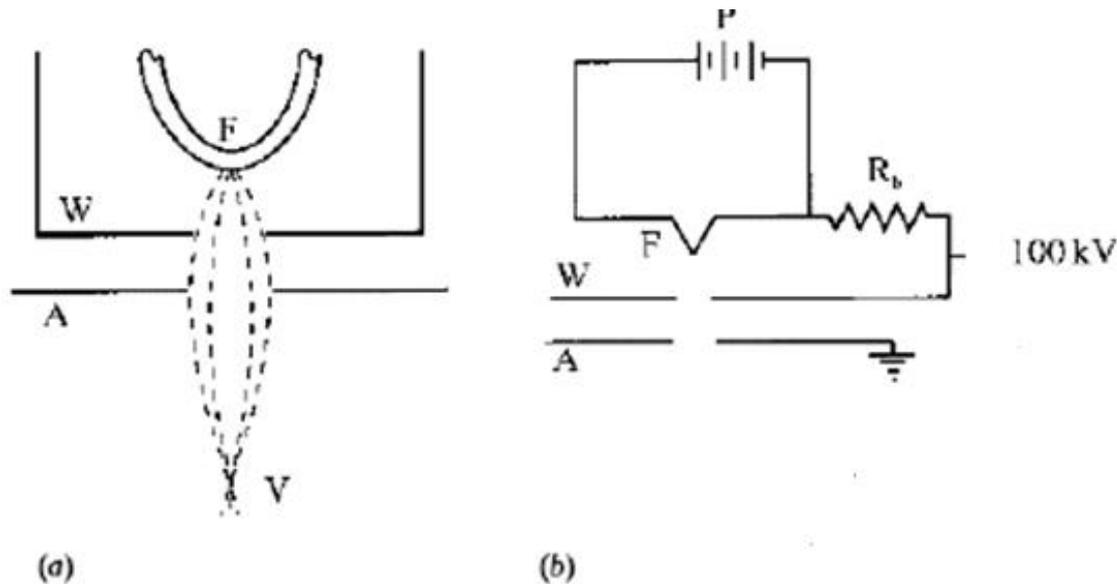


Figure 5.2 Schematic diagram showing the main components of a scanning electron microscope.

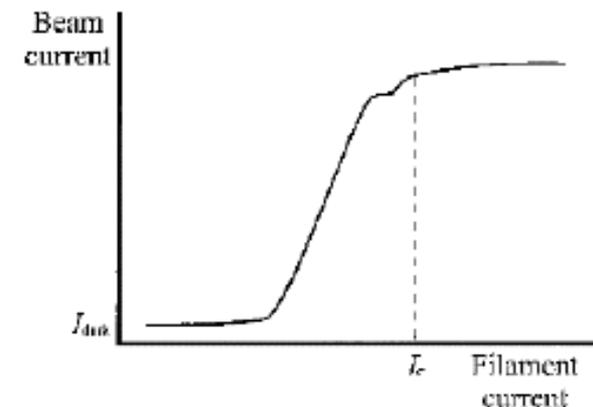
## Caracterização dos Materiais

## Feixe de elétrons

### Microscopia Eletrônica de Varredura



- 2.2 The geometry and electrical layout of a thermionic triode electron gun. (a) The electrons are emitted from a small region at the tip of a heated tungsten filament (F) and are accelerated towards the anode (A). The fields generated between the filament and the anode, modified by the Wehnelt cylinder (W) acting as a grid, cause the electrons to be focused at V, which is known as the virtual source. (b) The filament is heated by the passage of a current from the power supply P and the voltage on the grid is determined by the bias resistor  $R_b$ .



### Canhão de elétrons termoiônico