

# **Física Experimental VI – 4300314**

**2º 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 Controle 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:**

**Pretende-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.**

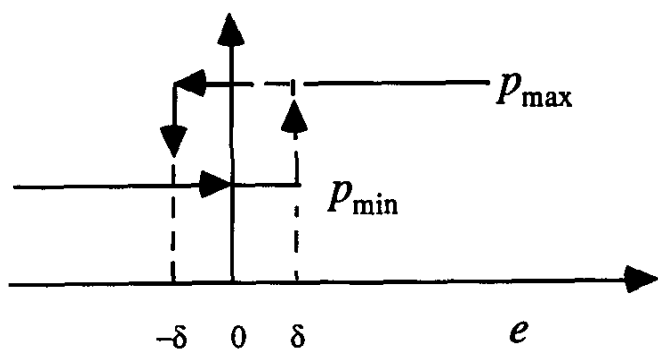
controla-se: **a altitude**

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.

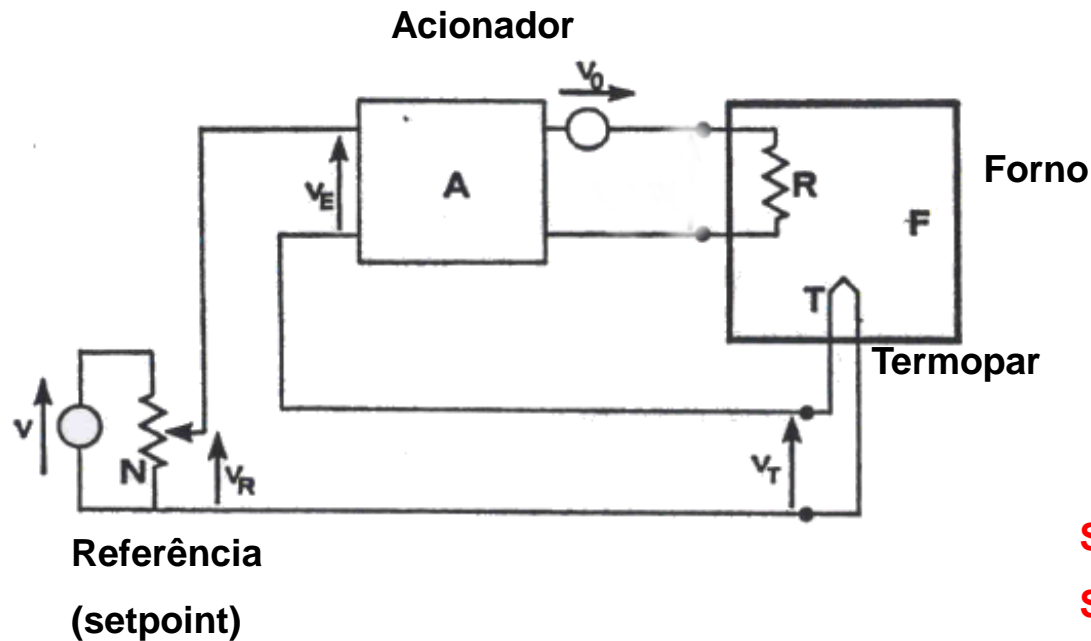


Este sistema nunca atinge um valor de equilíbrio.

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

# Sistemas de Contrô de Processos

Com Retroalimentação Negativa



Se  $V_E > 0 \Rightarrow$  liga

Se  $V_E < 0 \Rightarrow$  desliga

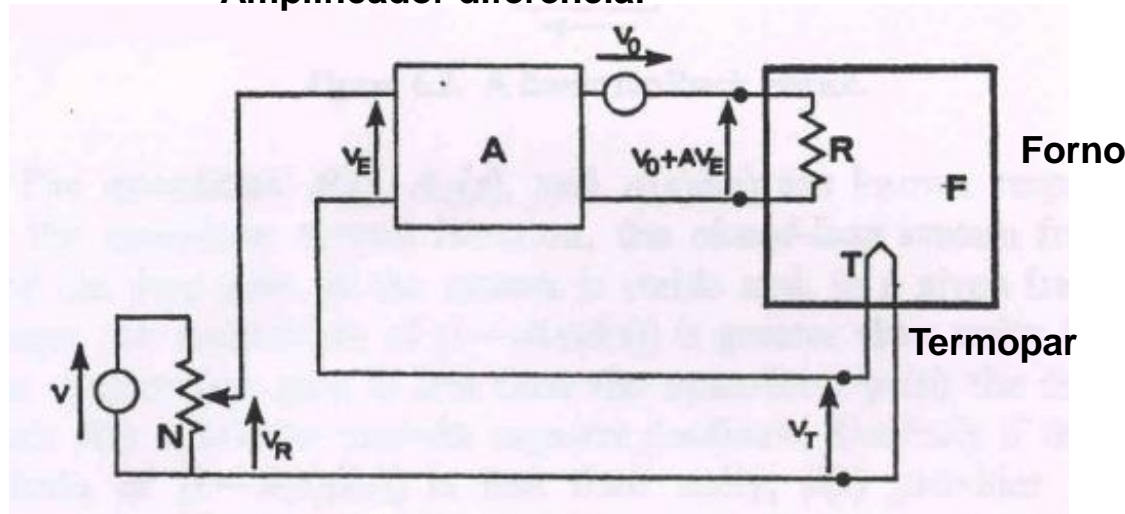
$$V_E = V_R - V_T$$

Controlador Liga/desliga

# Sistemas de Contrôlo de Processos

## Com Retroalimentação Negativa

### Amplificador diferencial



Referência  
(setpoint)

$$V = A V_E$$

Onde A é o ganho  
e  $V_E = V_R - V_T$

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)

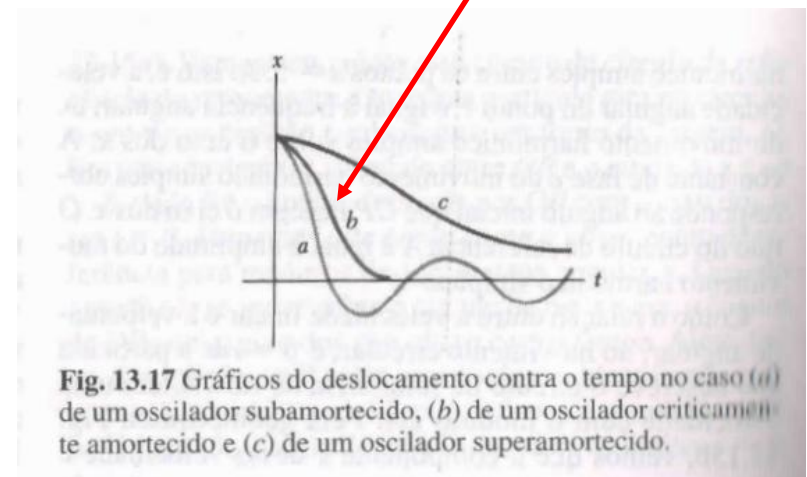
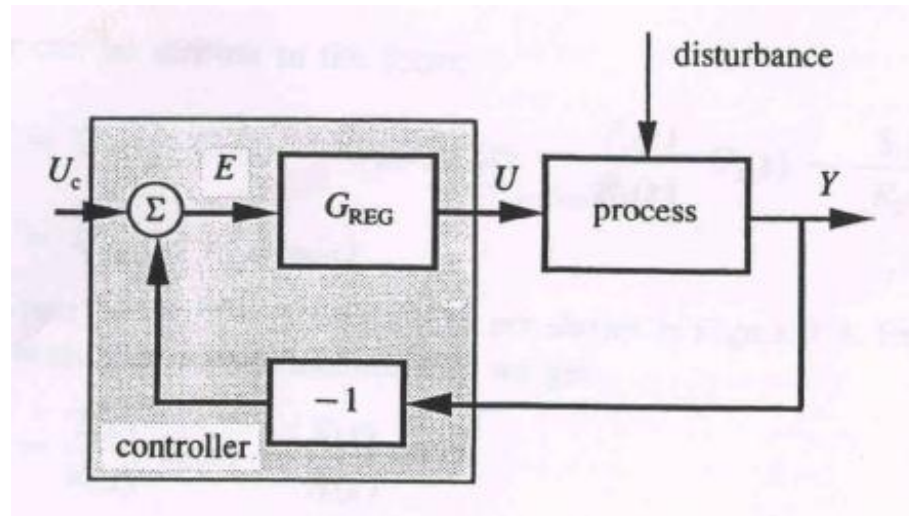


Fig. 13.17 Gráficos do deslocamento contra o tempo no caso (a) de um oscilador subamortecido, (b) de um oscilador criticamente amortecido e (c) de um oscilador superamortecido.

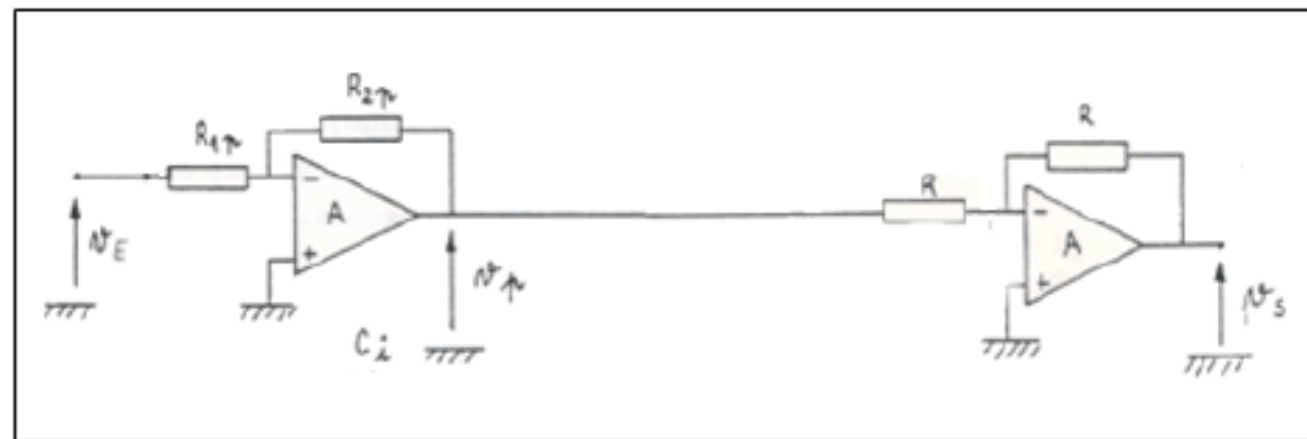
## Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa

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



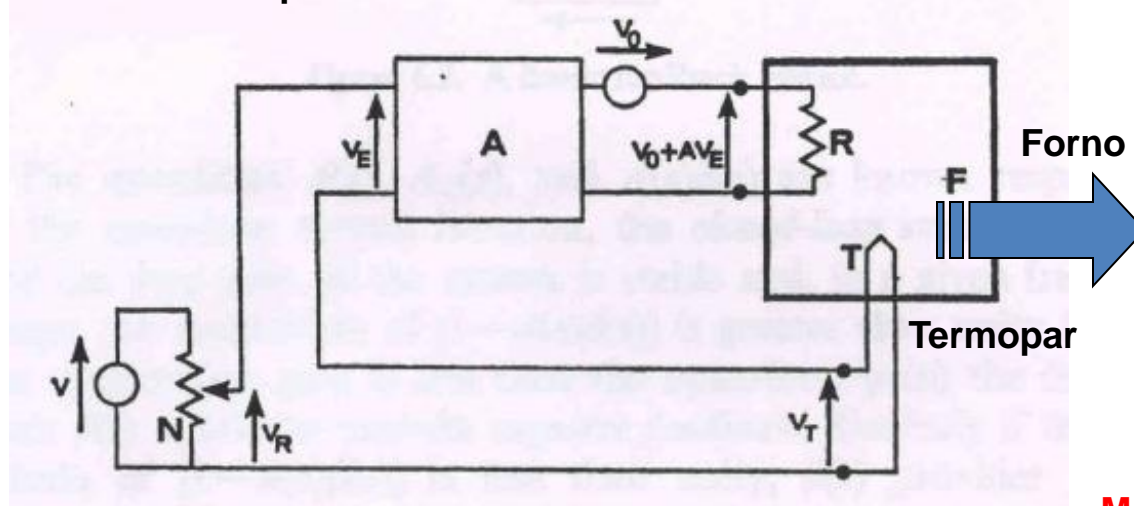
Controlador Proporcional (tipo P)



# 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:

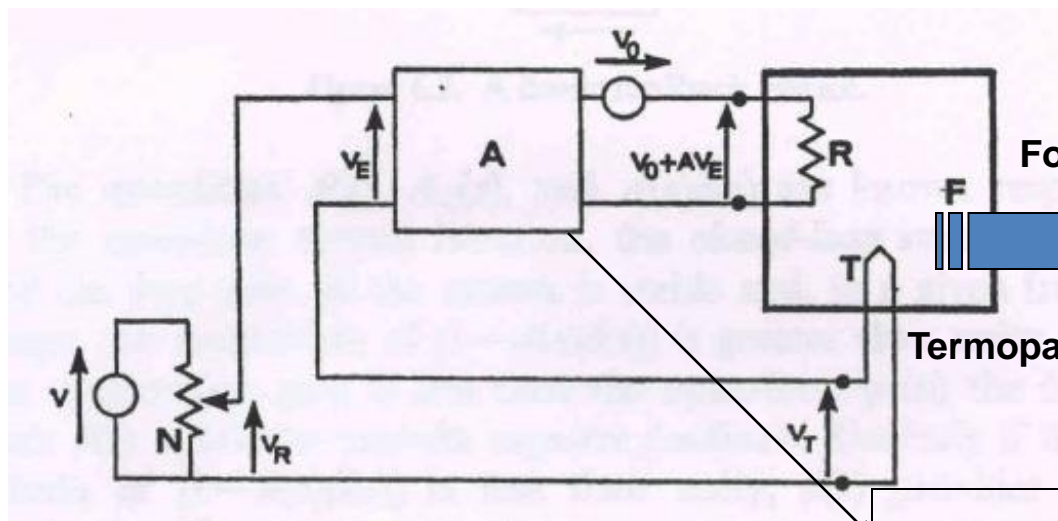
Acrescenta-se  $V_0$

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



# Sistemas de Contrôlo de Processos

Com Retroalimentação Negativa



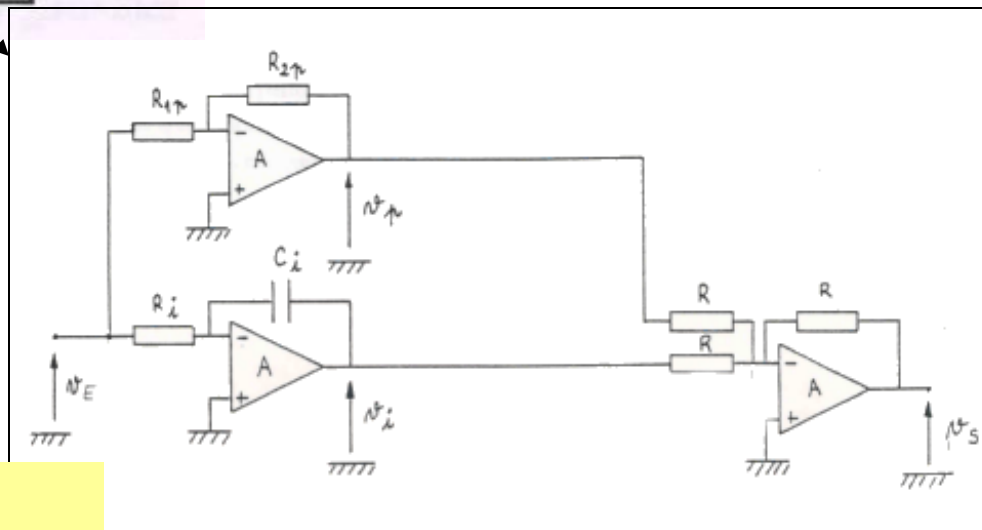
Forno

Termopar

Controlador Proporcional Integral (tipo PI)

Solução:

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

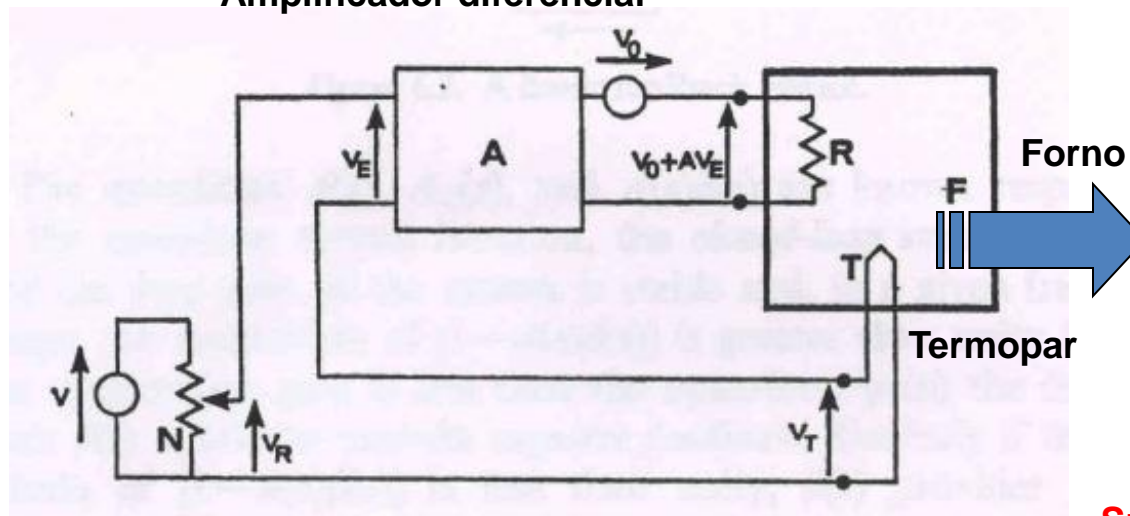


$$u(t) = -ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt'$$

## 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.

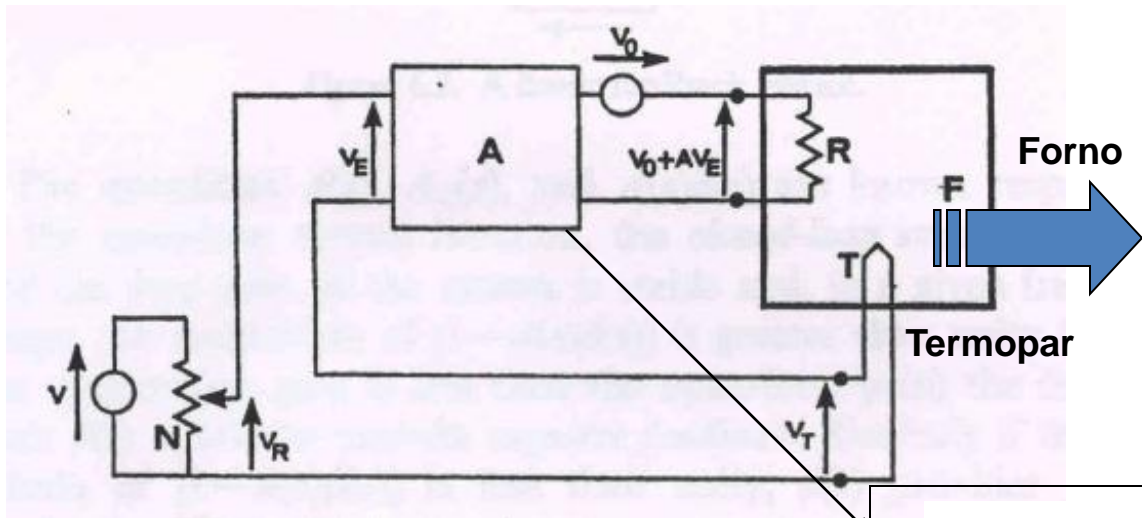
Ocorrerão defasagens e oscilações na temperatura.

Solução:

Acrescenta-se uma defasagem oposta

# Sistemas de Contrôlo de Processos

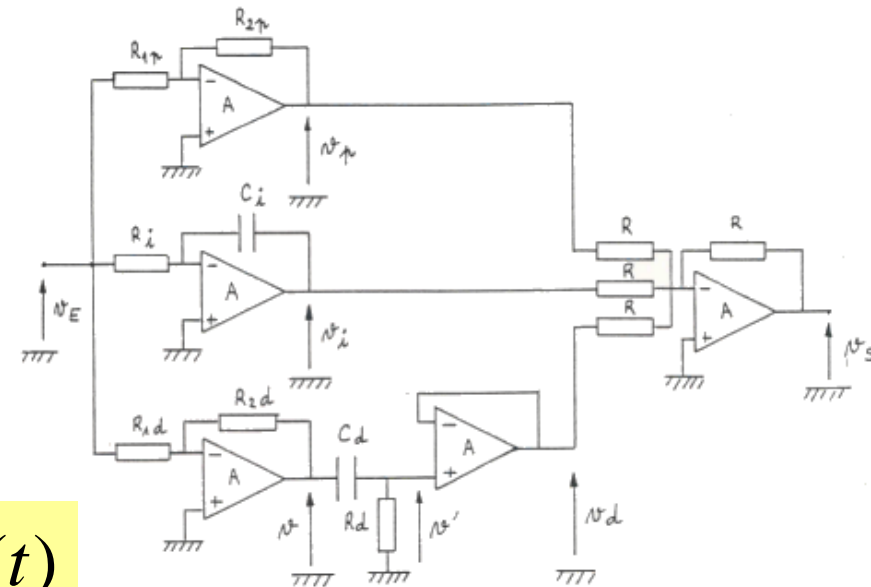
Com Retroalimentação Negativa



Controlador Proporcional Integral Diferencial (tipo PID)

Solução:

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

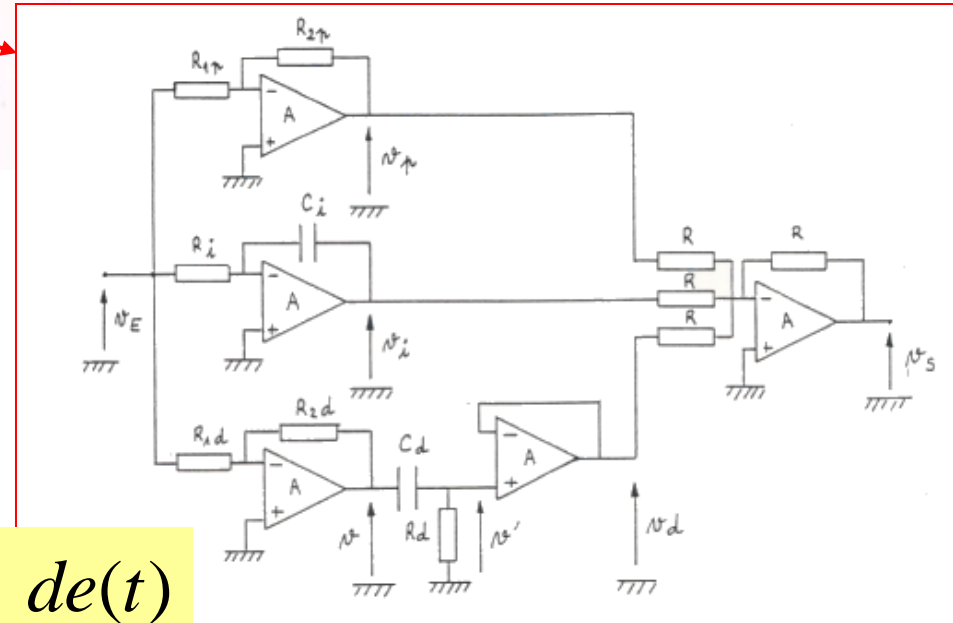
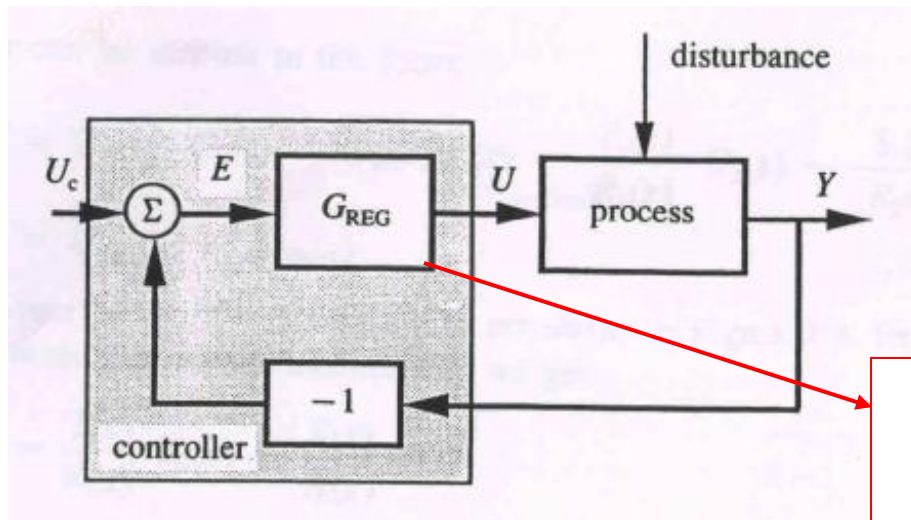


$$u(t) = -Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t') dt' - T_d \frac{de(t)}{dt}$$

# 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 ( $K_o, T_o$ )		
$R(s) = K_p$	$K_p = \frac{1}{aL}$			$K_p = 0,5 K_o$		
$R(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right)$	$K_p = \frac{0,9}{aL}$	$T_i = 3,3 L$		$K_p = 0,45 K_o$	$T_i = 0,83 T_o$	
$R(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_D \right)$	$K_p = \frac{1,2}{aL}$	$T_i = 2 L$	$T_D = 0,5 L$	$K_p = 0,6 K_o$	$T_i = 0,5 T_o$	$T_D = 0,125 T_o$

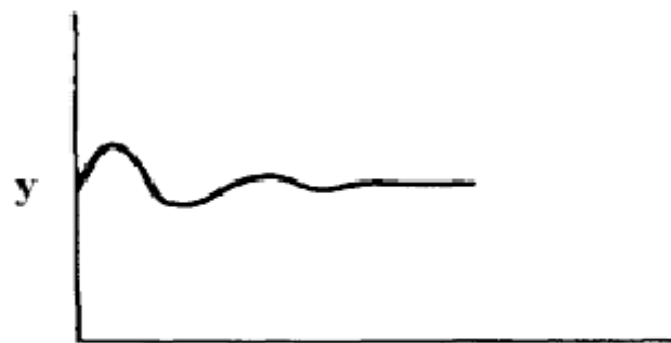
Malha aberta

Malha fechada

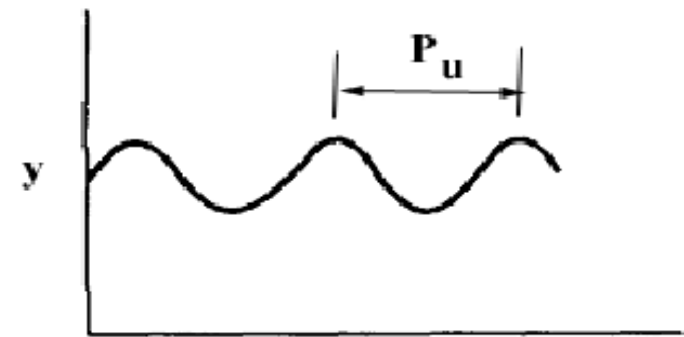
Método alternativo:

- 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  $T_D = T_i$

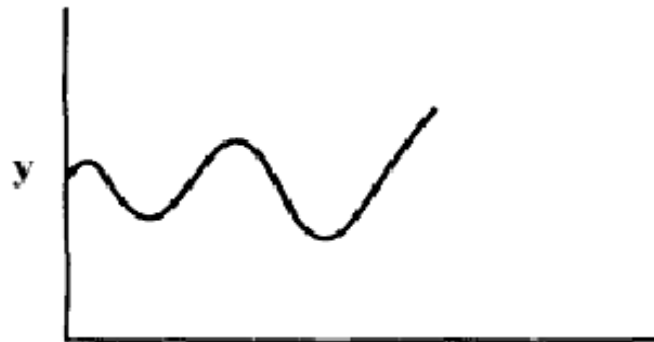
# Controller Tuning and Troubleshooting Control Loops



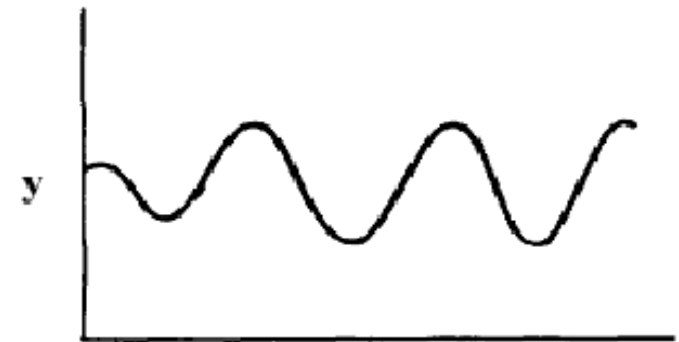
(a)  $K_c < K_{cu}$



(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?



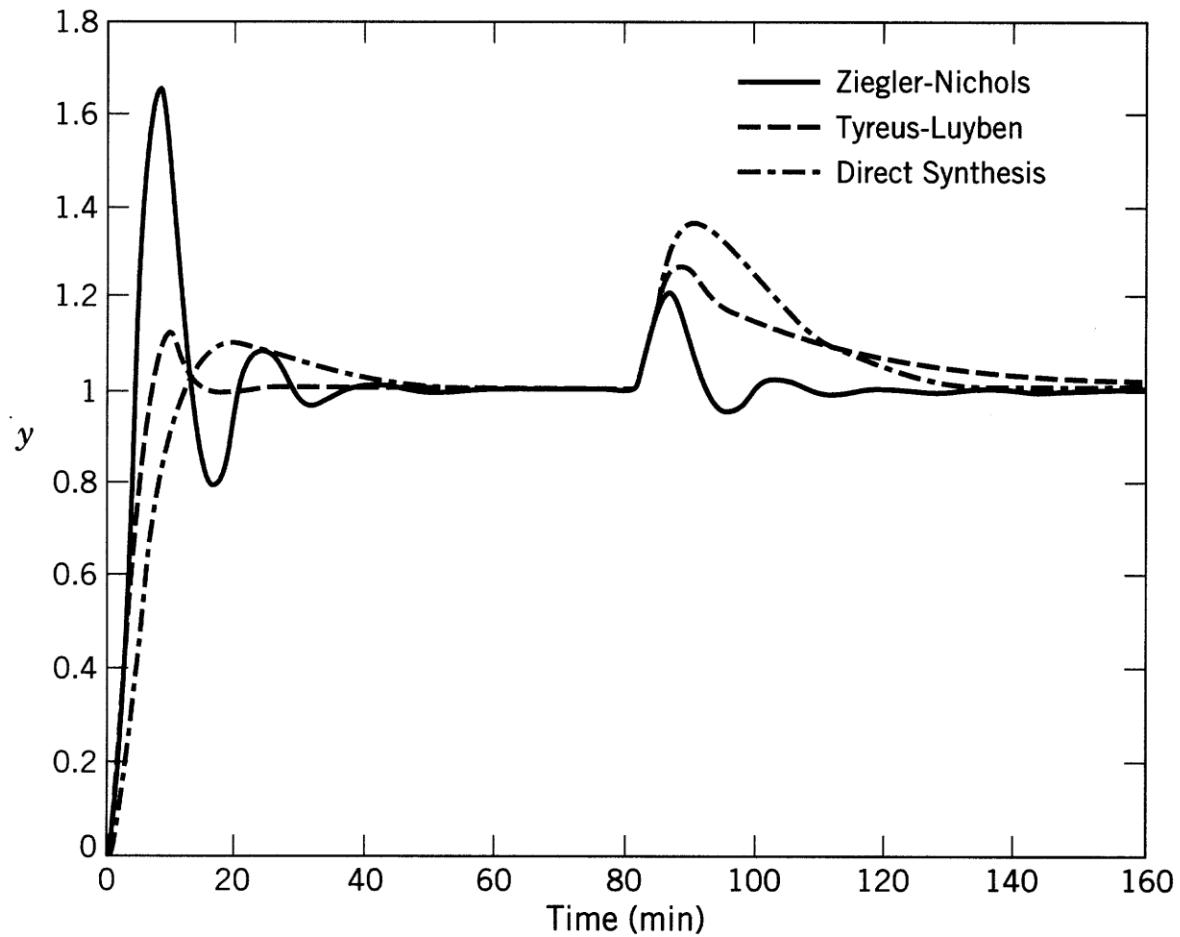
## Modified Z-N settings for PID control

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,

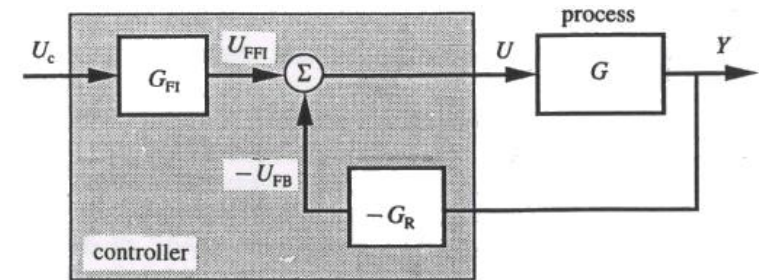
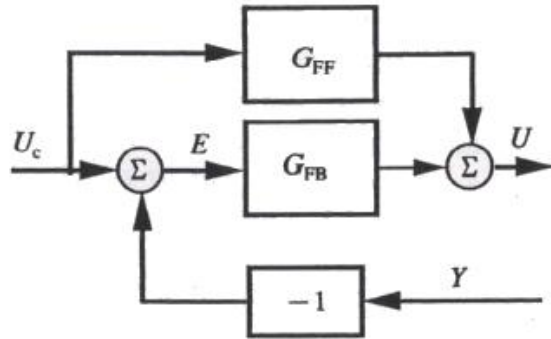
$\Delta t$  = the sampling period (the time between successive samples of the controlled variable)

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

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

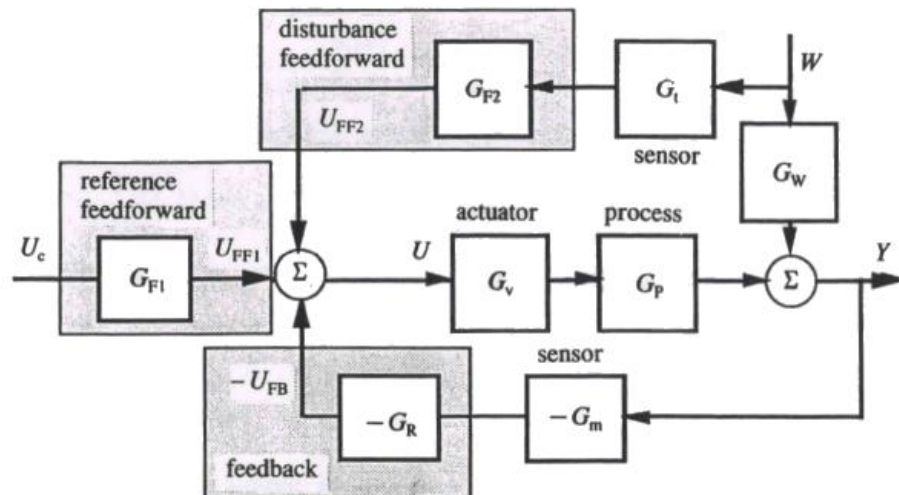
# Sistemas de Controle de Processos

Com Retroalimentação Negativa e  
alimentação adiantada



Melhora a resposta a variações na referência

Forma alternativa



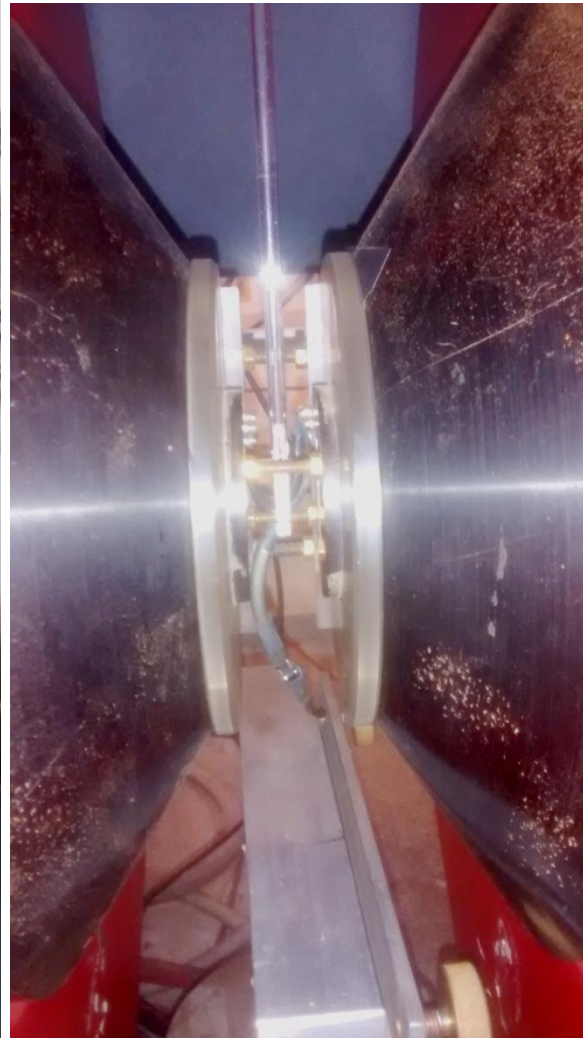
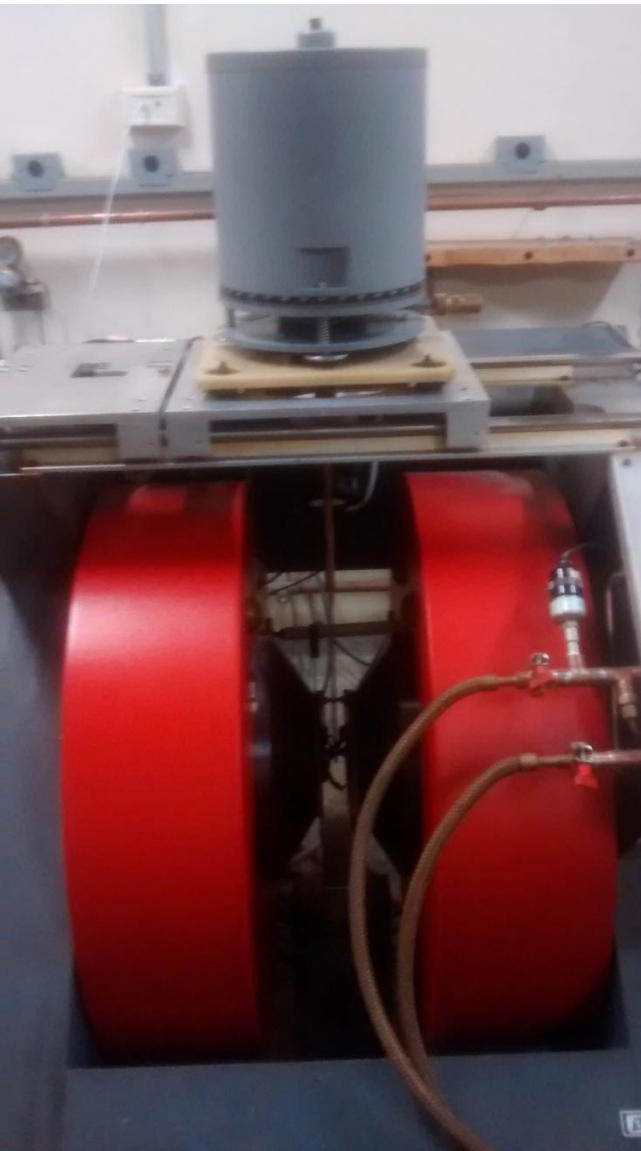
Melhora a resposta a variações nas  
perturbações externas

## Alguns exemplos - FORNOS





## Alguns exemplos - MAGNETÔMETROS



## Alguns exemplos – Sistema de Sputtering



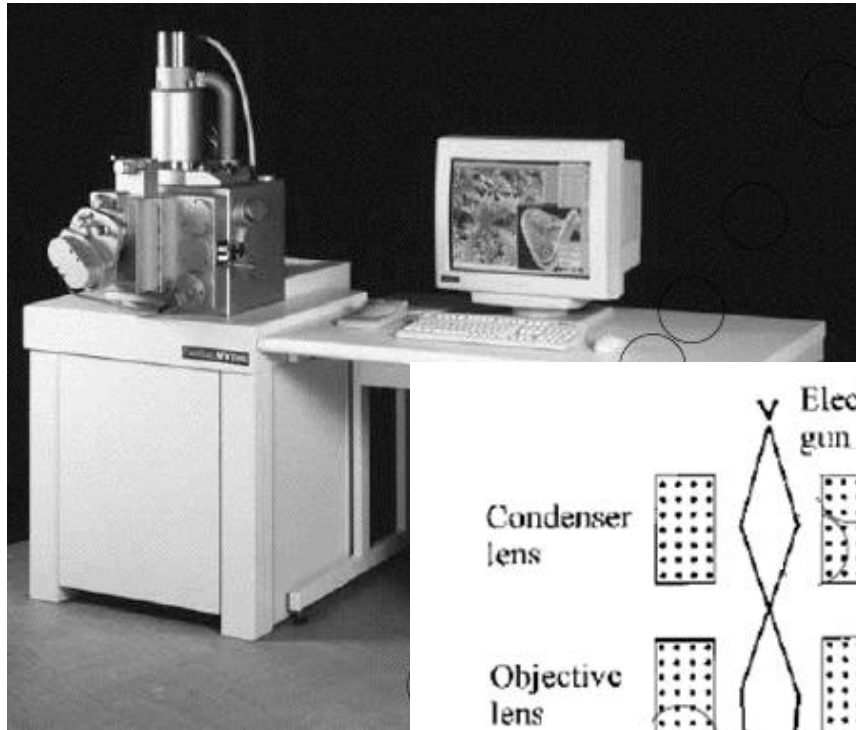


## Alguns exemplos – Sistema de Sputtering



# Caracterização dos Materiais

# Feixe de elétrons



## Microscopia Eletrônica de Varredura

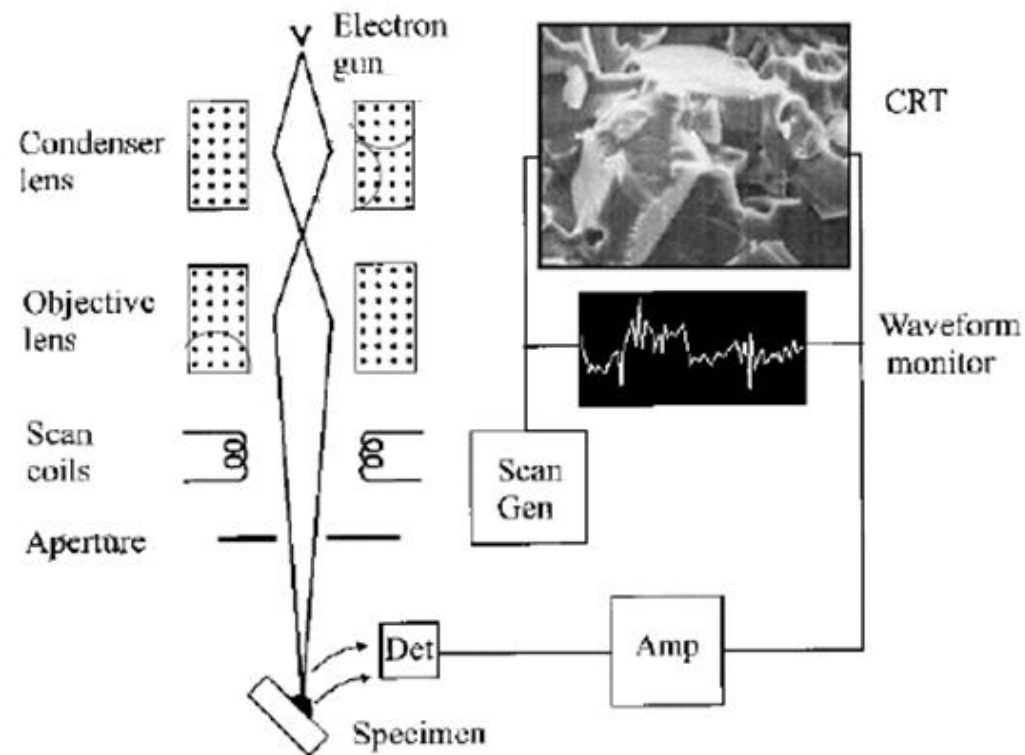
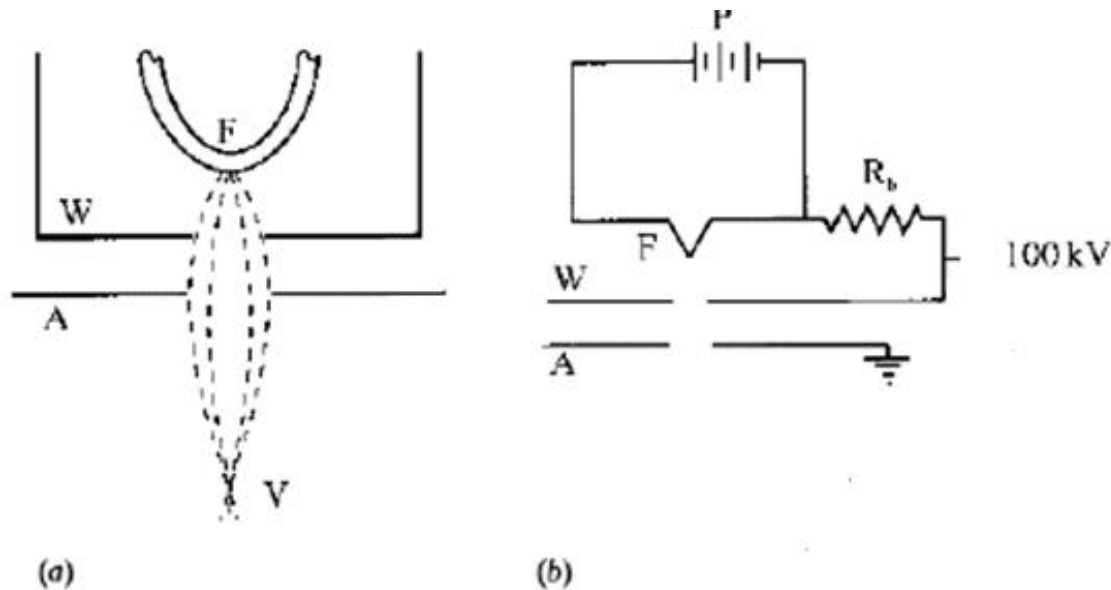


Figure 5.2 Schematic diagram showing the main components of a scanning electron microscope.

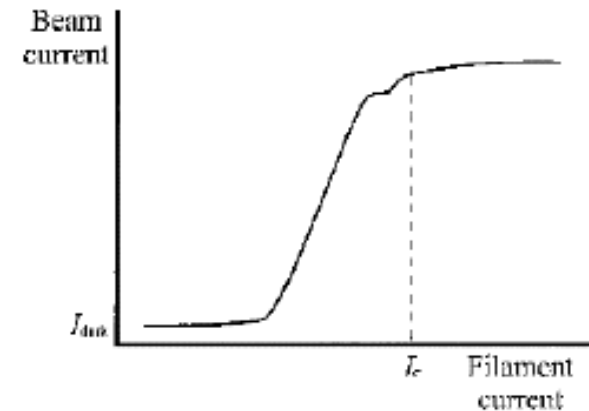
# Caracterização dos Materiais

# Feixe de elétrons

## Microscopia Eletrônica de Varredura

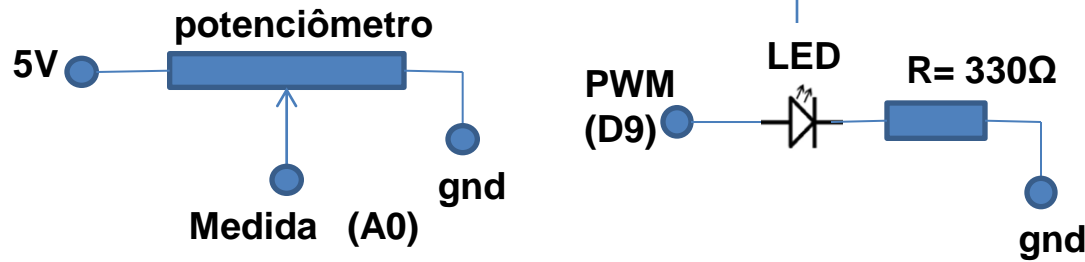


- 2.2 The geometry and electrical layout of a thermionic triode electron gun. (a) The electrons are emitted from a small region at the tip of a heated tungsten filament (F) and are accelerated towards the anode (A). The fields generated between the filament and the anode, modified by the Wehnelt cylinder (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  $R_b$ .

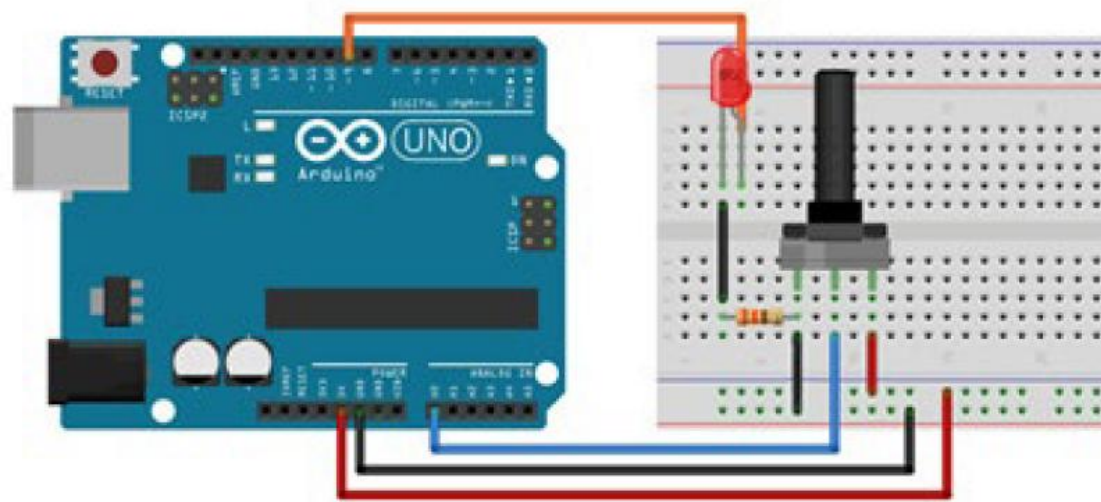
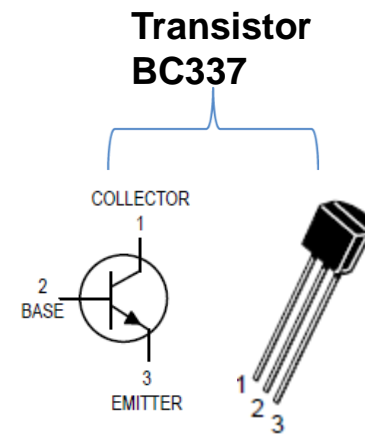
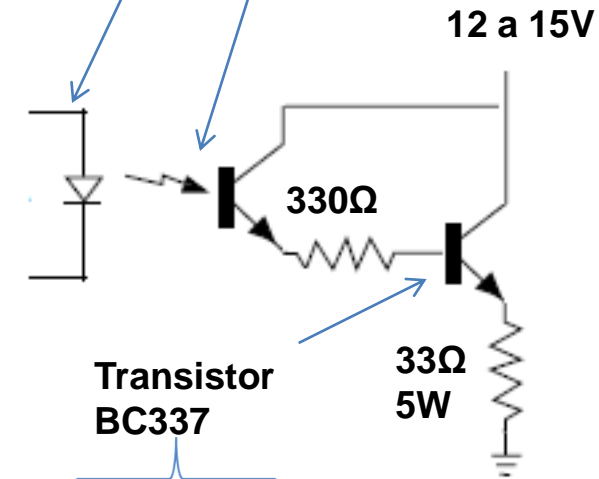
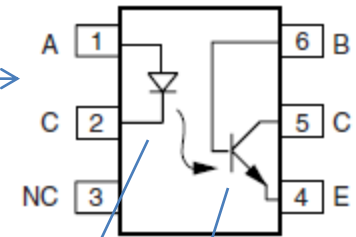


## Canhão de elétrons termoiônico

# Aquecedor de Água



## Acoplador óptico (4N37)



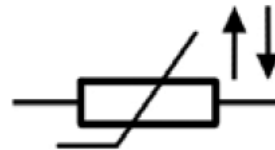


# Arduino

## Termistor (NTC – 1kΩ)

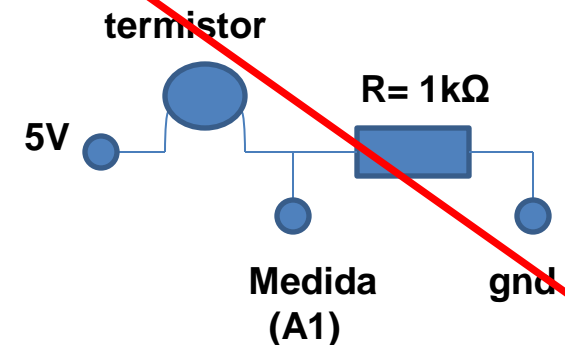
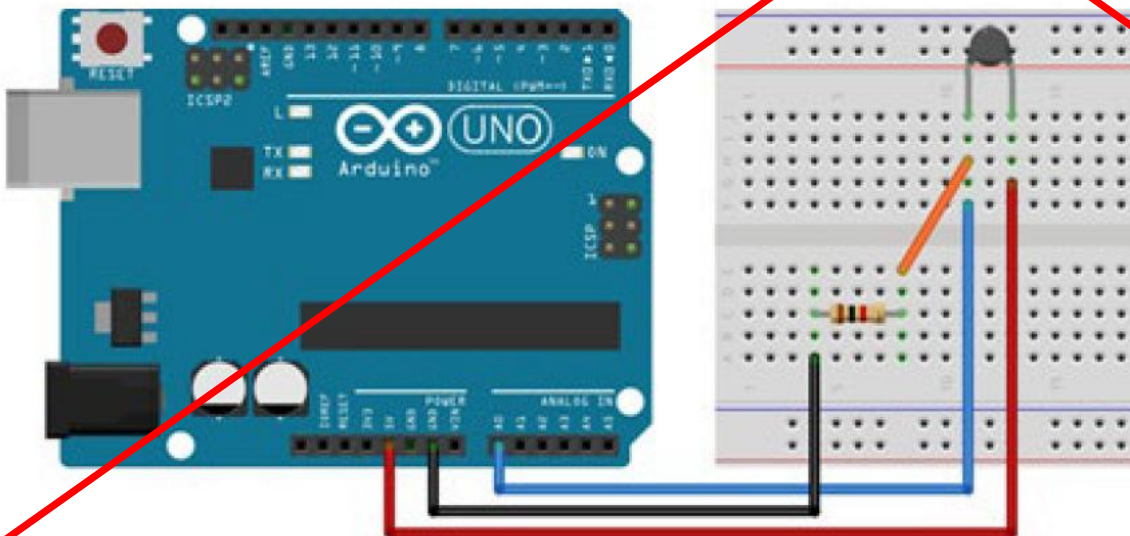


Símbolo



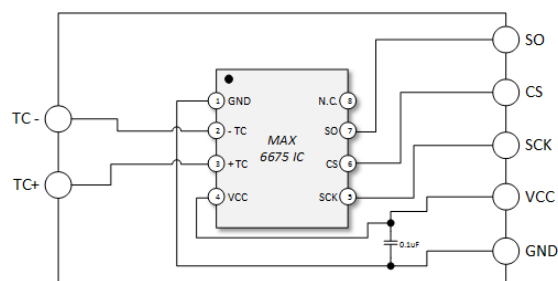
T [°C]	R_Nom [Ω]	R_Min [Ω]	R_Max [Ω]	ΔR_Nom [%]	[±°C]
-55	59 147,00	48 631,00	69 664,00	17,80	2,70
-50	42 661,00	35 521,00	49 781,00	16,70	2,60
-45	31 088,00	26 207,00	36 869,00	15,70	2,50
-40	22 903,00	19 530,00	26 276,00	14,70	2,50
-35	17 062,00	14 700,00	19 405,00	13,80	2,40
-30	12 827,00	11 210,00	14 482,00	12,90	2,30
-25	9 746,00	8 572,00	10 920,00	12,00	2,20
-20	7 477,00	6 638,00	8 316,00	11,20	2,20
-15	5 790,00	5 106,00	6 394,00	10,40	2,10
-10	4 533,00	4 086,00	4 981,00	9,70	2,00
-5	3 564,00	3 246,00	3 883,00	8,90	1,90
0	2 832,00	2 599,00	3 065,00	8,20	1,80
5	2 267,00	2 096,00	2 438,00	7,50	1,70
10	1 829,00	1 703,00	1 965,00	6,80	1,60
15	1 486,00	1 393,00	1 578,00	6,30	1,50
20	1 215,00	1 146,00	1 283,00	5,60	1,40
<b>25</b>	<b>1 000,00</b>	<b>950,00</b>	<b>1 050,00</b>	<b>5,00</b>	<b>1,30</b>
30	828,20	781,60	874,70	5,60	1,50
35	689,90	647,20	732,50	6,20	1,70
40	577,80	539,10	616,60	6,70	1,90
45	486,60	461,40	521,80	7,20	2,10
50	411,80	380,00	443,70	7,70	2,40
55	350,20	321,40	379,00	8,20	2,60
60	299,20	273,20	325,20	8,70	2,80
65	256,70	233,20	280,20	9,20	3,00
70	221,20	200,00	242,40	9,60	3,30
75	191,40	172,20	210,60	10,00	3,50
80	166,20	148,80	183,60	10,50	3,80
85	144,80	129,10	160,60	10,90	4,00
90	126,70	112,40	140,90	11,30	4,30
95	111,20	98,22	124,10	11,70	4,50
100	97,87	86,10	109,60	12,00	4,80
105	86,43	75,72	97,14	12,40	5,00
110	76,55	66,79	86,31	12,80	5,30
115	67,99	59,09	76,90	13,10	5,60
120	60,56	52,42	68,89	13,40	5,90
125	54,07	46,63	61,52	13,80	

O termistor NTC (do inglês *Negative Temperature Coefficient*) é um componente eletrônico semicondutor sensível à temperatura, utilizado para controle, medição ou polarização de circuitos eletrônicos. Possui um coeficiente de variação de resistência que varia negativamente conforme a temperatura aumenta, ou seja, a sua resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura.



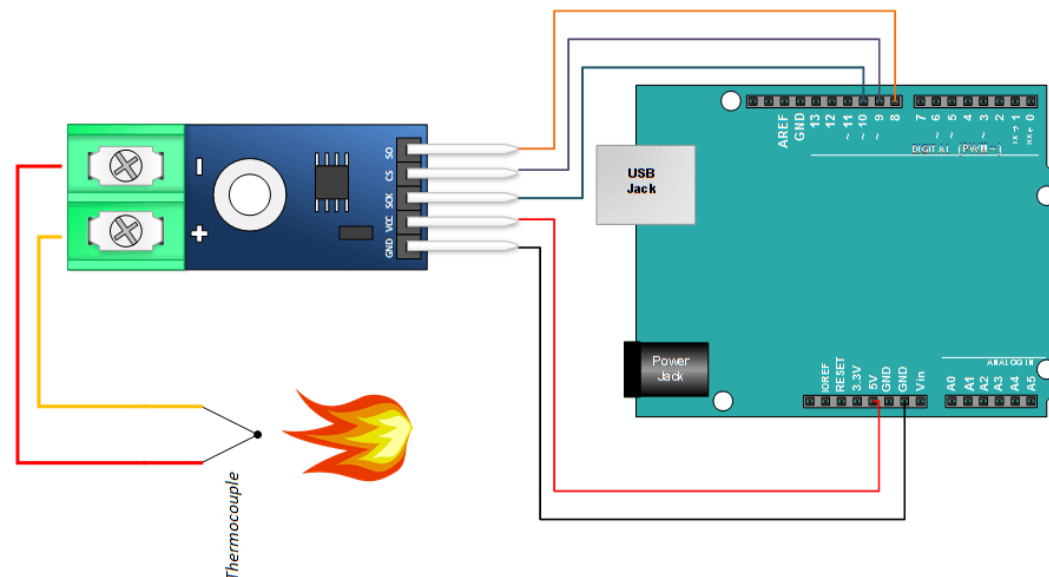
# Arduino – Termopar do tipo K e módulo Max6675

## Protocolo de comunicação SPI



Supply Voltage	3.3. to 5 VDC
Operating Current	about 50mA
Measurement Range	0 to 1024 deg C (32 deg F to 1875 F)
Measurement Resolution	+/- 0.25 Deg C (+/- 0.45 Deg F)
Output	Uses a SPI Interface
Required SENSOR	K Thermocouple

Um pino para cada unidade.



**SO**: The module's serial output. Your Arduino will read this output.

**CS**: Chip Select. Setting low, selects the Module and tells it to supply an output that is synchronize with a clock.

**SCK**: The Serial Clock... an input from your Arduino.

**VCC**: 5V supply.

**GND**: Ground.

- : The K thermocouple minus input (Az).

+ : The K Thermocouple plus input (Vm).