



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE
Prof. Ícaro Bezerra Queiroz de Araújo
icaro@ic.ufal.br



Roteiro de laboratório 2

Ações básicas de controle e controle de sistemas dinâmicos

Nas aulas anteriores:

- Definição de Sistemas de Controle;
- Análise de sistemas de 1ª e 2ª Ordem;
- Análise no plano s ;
- Estabilidade;
- Lugar Geométrico das Raízes;

Hoje:

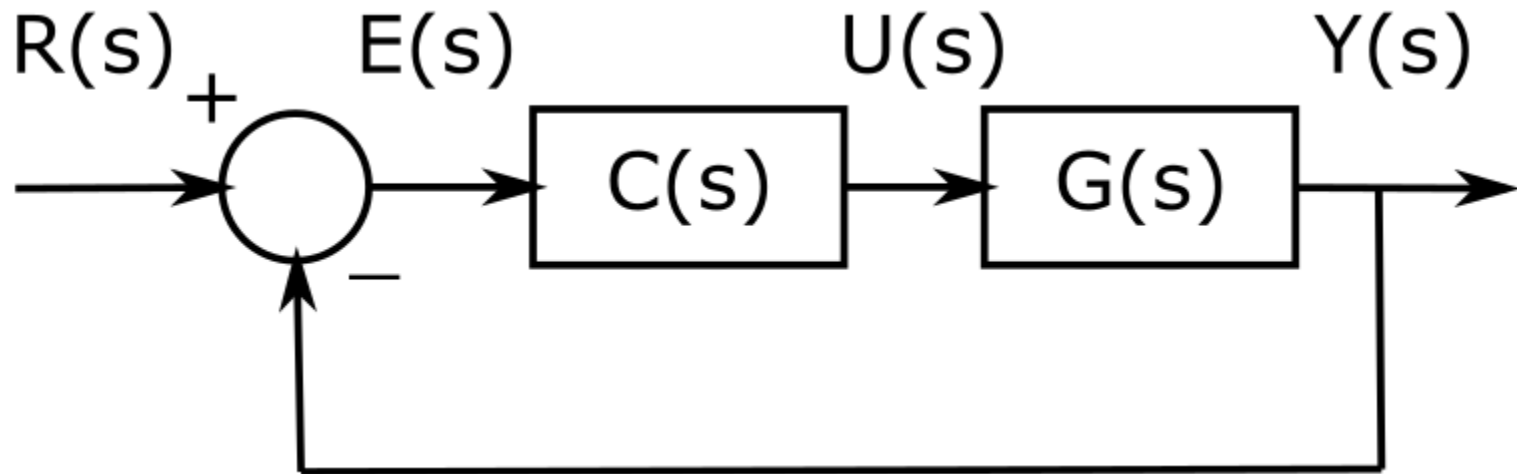
- Controladores
- Controle ON/OFF;
- Ações Básicas de Controle
 - Ação Proporcional;
 - Ação Integral;
 - Ação Derivativa
- Controlador PID e algumas variações.
- Controlador em cascata

Controladores



A função fundamental do sistema de controle é manipular a relação entrada/saída de energia ou material, de maneira que as variáveis do processo sejam mantidas dentro dos limites estabelecidos.

Controladores

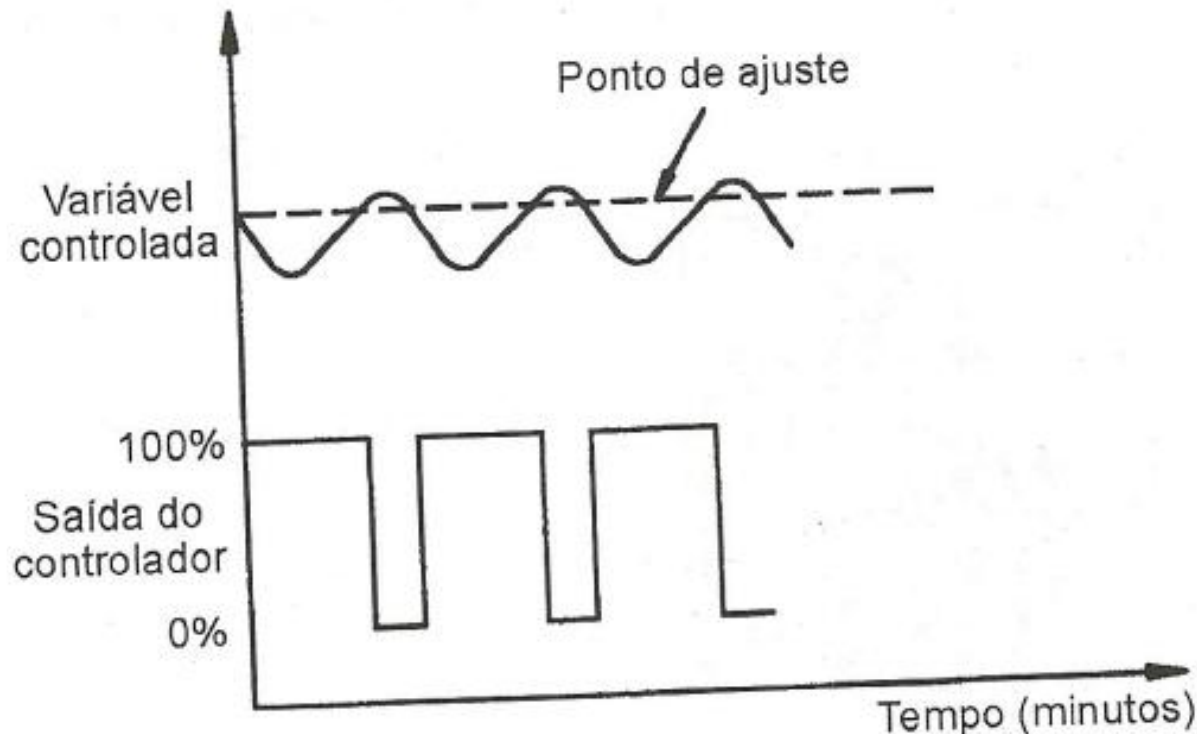


- $R(s)$ – Referência
- $E(s)$ – Erro
- $G(s)$ – Sistema
- $Y(s)$ – Saída
- $C(s)$ – Controle
- $U(s)$ – S. Controle

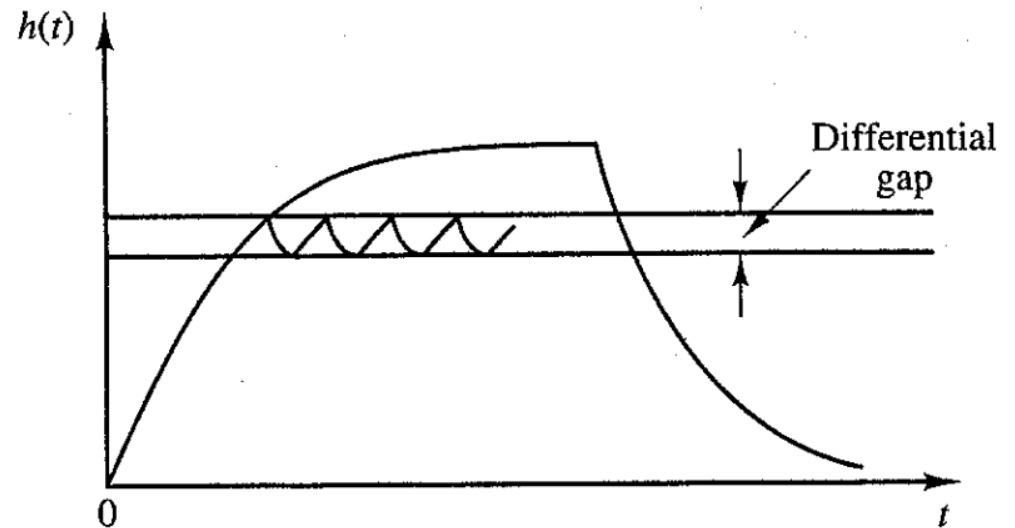
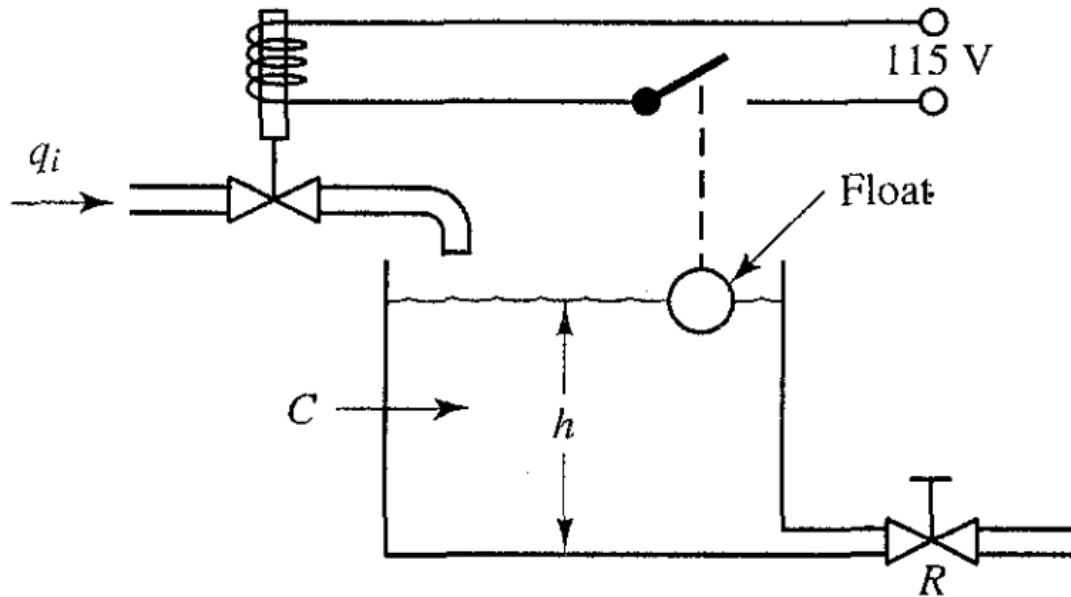
Controle ON/OFF

Também conhecido como controle Liga/Desliga, cuja saída é descrita por:

$$u(t) = \begin{cases} 100\% \leftrightarrow \text{para } e(t) \geq 0 \\ 0\% \leftrightarrow \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$



Controle ON/OFF



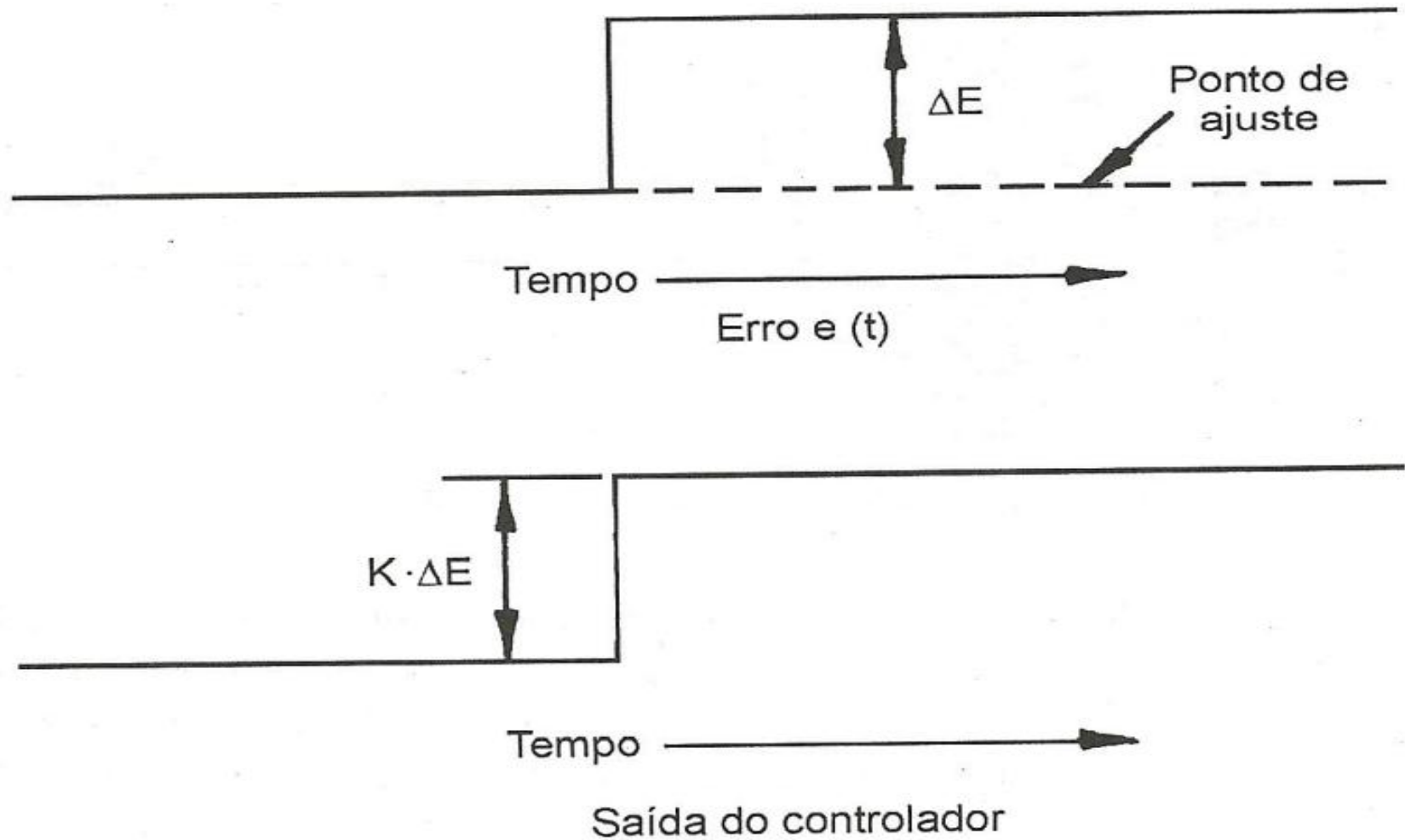
Ação de controle proporcional

Em um controlador com ação proporcional, a saída $u(t)$ é proporcional ao valor do erro $e(t)$, de forma que:

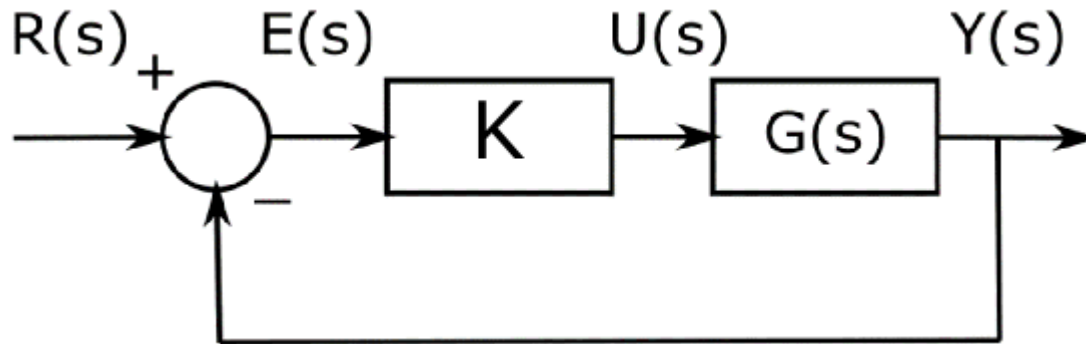
$$u(t) = K \cdot e(t) + b \quad \text{Ou} \quad U(s) = K \cdot E(s)$$

- K – Ganho Proporcional
- b – Polarização (saída quando o erro for zero)

Ação de controle proporcional



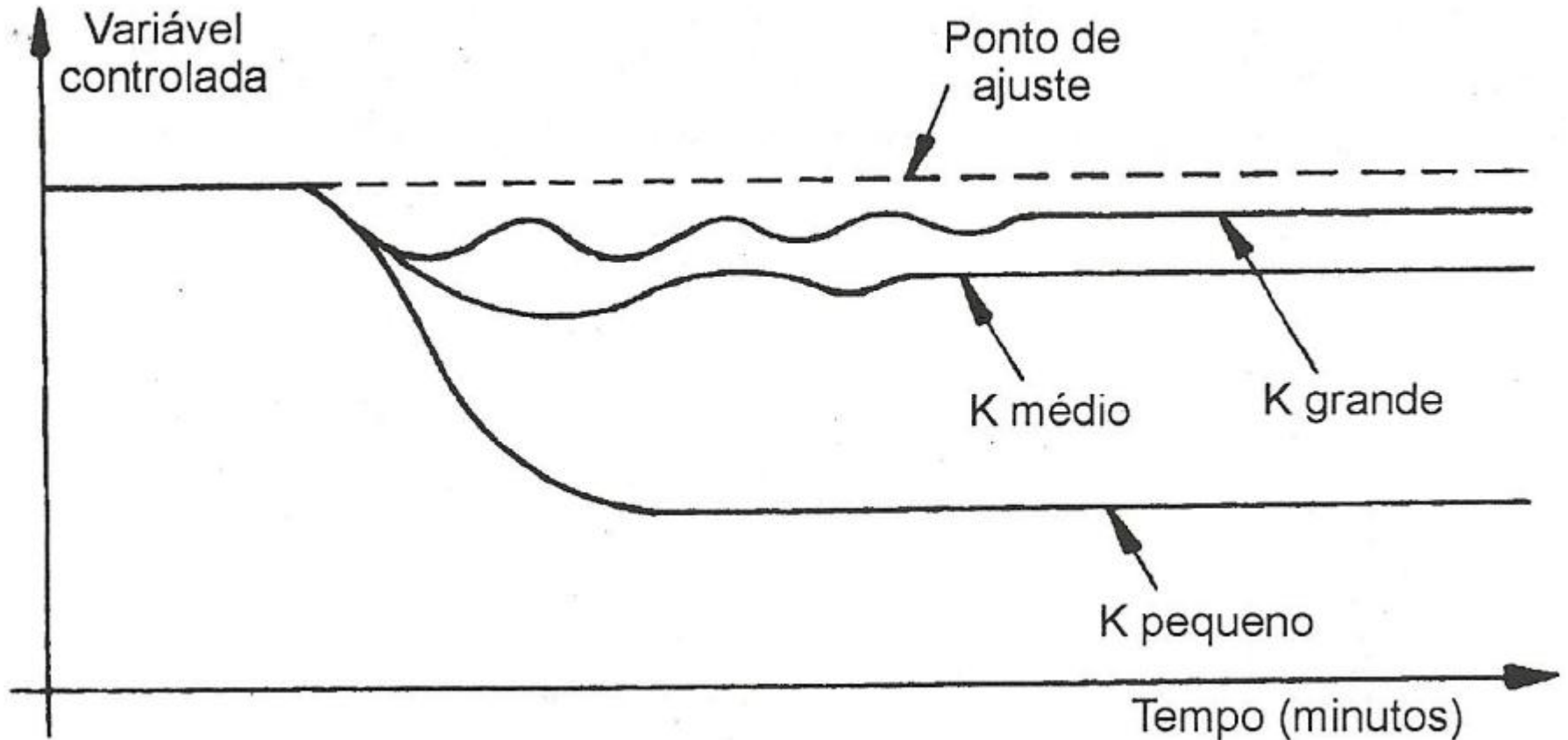
Ação de controle proporcional



Para entrada degrau unitário $\Rightarrow e_{ss} = \frac{1}{1 + K}$

O erro será nulo somente para $K \rightarrow \infty$, o que nem sempre é possível.

Ação de controle proporcional



Ação de controle proporcional

Resumindo:

- É um amplificador com ganho ajustável (K);
- O aumento do K diminui o erro de regime;
- Em geral, o aumento de K torna o sistema mais oscilatório, podendo instabilizá-lo;
- Melhora o regime permanente e piora o transitório, sendo bastante limitado;
- Não acrescenta polos nem zeros ao sistema principal.

Ação de controle integral

A saída do modo integral é função da integral do erro, ou seja, a velocidade de correção do elemento final de controle é proporcional ao erro $e(t)$.

A saída de um controlador integral (I) é representada por:

$$u(t) = \left(\frac{1}{T_i} \right) \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad U(s) = \left(\frac{1}{T_i} \right) \frac{E(s)}{s}$$

T_i – Tempo integrativo ou reset time

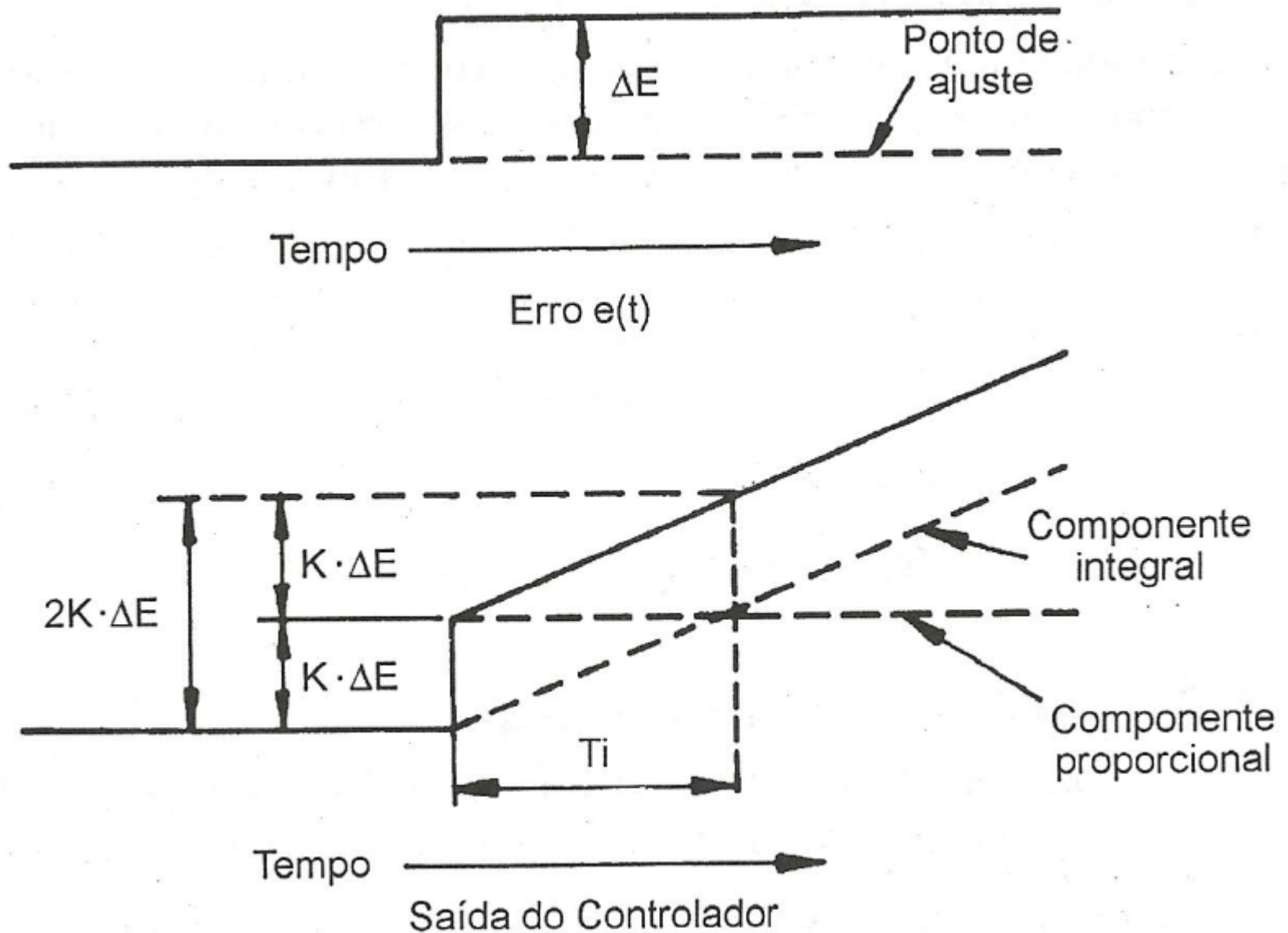
Ação de controle integral

A ação integral é normalmente utilizada em conjunto com a ação proporcional (**Controlador PI**), pois a velocidade de resposta da ação integral sozinha é muito lenta e seu tempo de estabilização é muito longo.

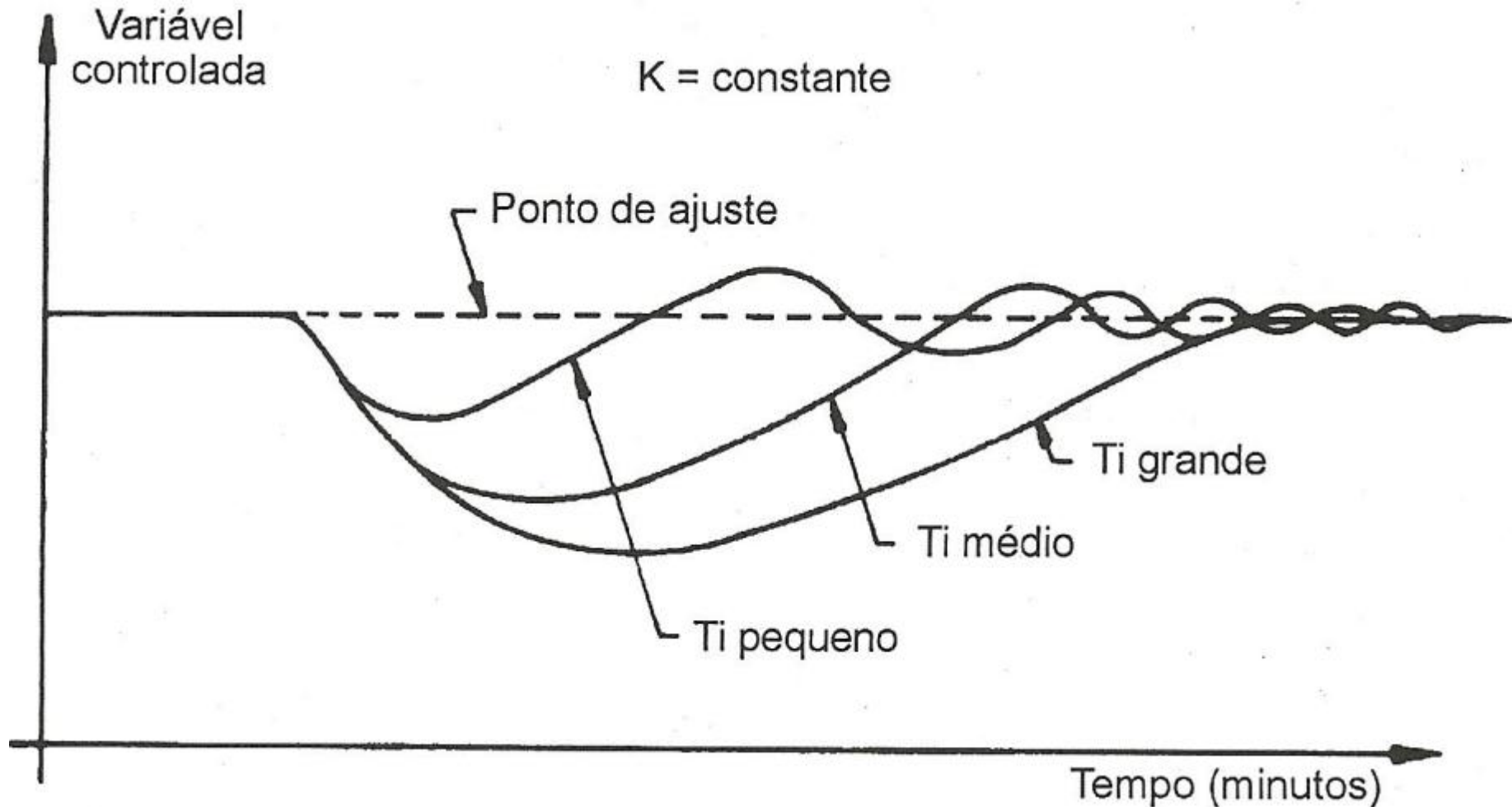
$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad K_p - \text{Ganho Proporcional}$$

$$U(s) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) E(s) \quad K_i = \frac{K_p}{T_i} = \text{Ganho integrativo}$$

Ação de controle integral



Ação de controle integral



Ação de controle integral

Resumindo:

- Tende a zerar o erro de regime, pois aumenta o tipo do sistema;
- Adiciona um polo na origem e um zero em $z = \frac{-K_i}{K_p}$;
- É utilizado quando a resposta transitória é aceitável e resposta em regime insatisfatória;
- Como aumenta a ordem do sistema, acrescenta possibilidades de instabilidade diferentes daquelas apresentadas pelo sistema original.

Ação de controle derivativa

A saída do modo proporcional é proporcional ao erro $e(t)$, enquanto que a saída derivativa é função da derivada do erro. Pode-se afirmar, então, que a saída de um controlador com ação derivativa é proporcional à inclinação da curva da variável controlada, ou que a saída é proporcional à velocidade de variação da variável controlada. Neste caso:

$$u(t) = T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$U(s) = T_d s E(s)$$

T_d – Tempo derivativo

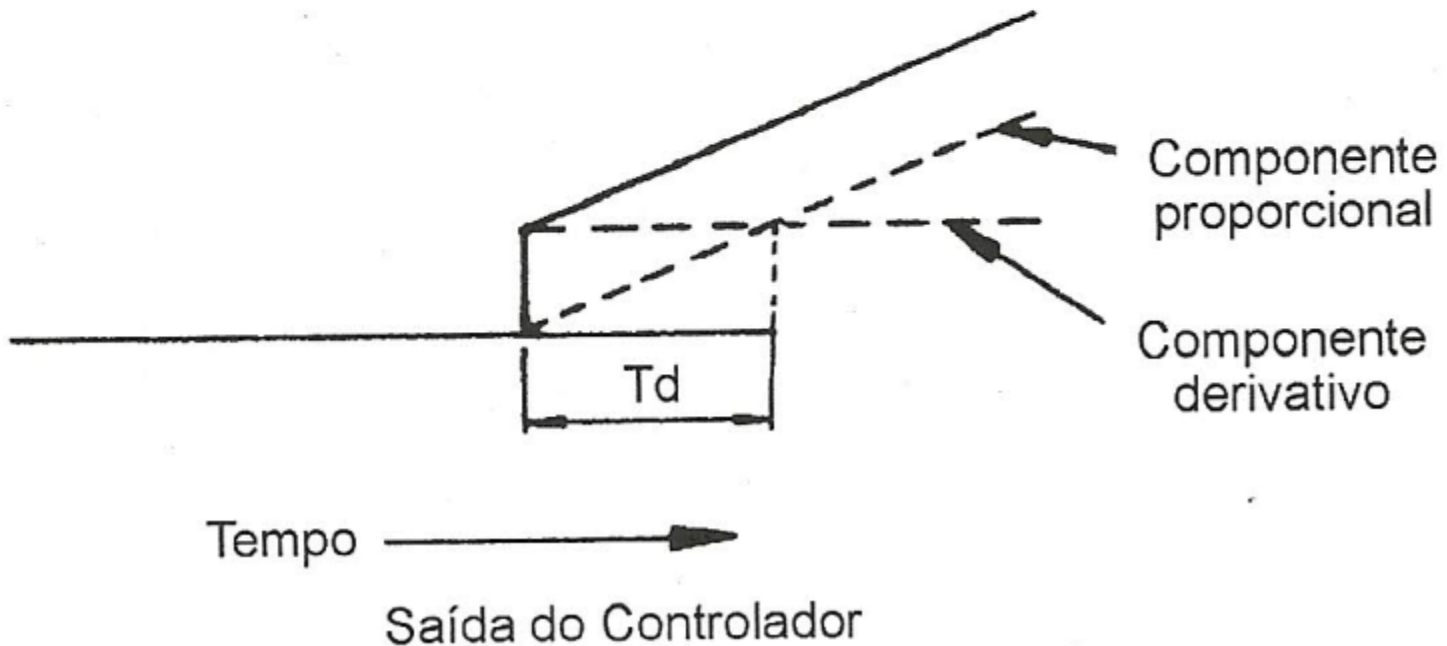
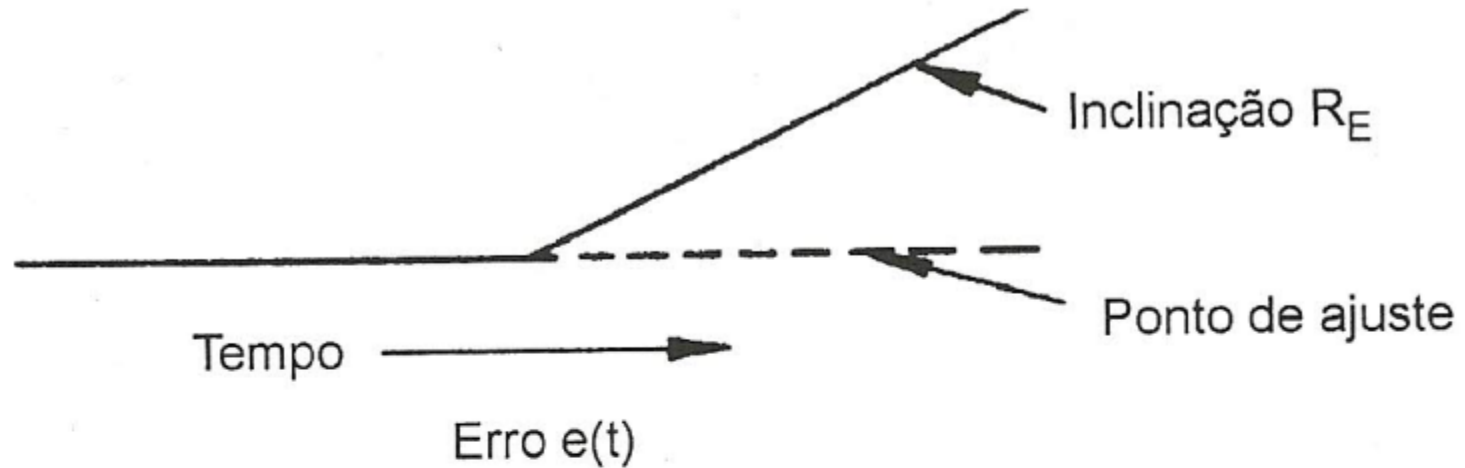
Ação de controle derivativa

O modo derivativo não pode ser utilizado sozinho. Na prática, ele está invariavelmente acoplado ao modo proporcional, dando o controlador proporcional mais **derivativo (PD)**.

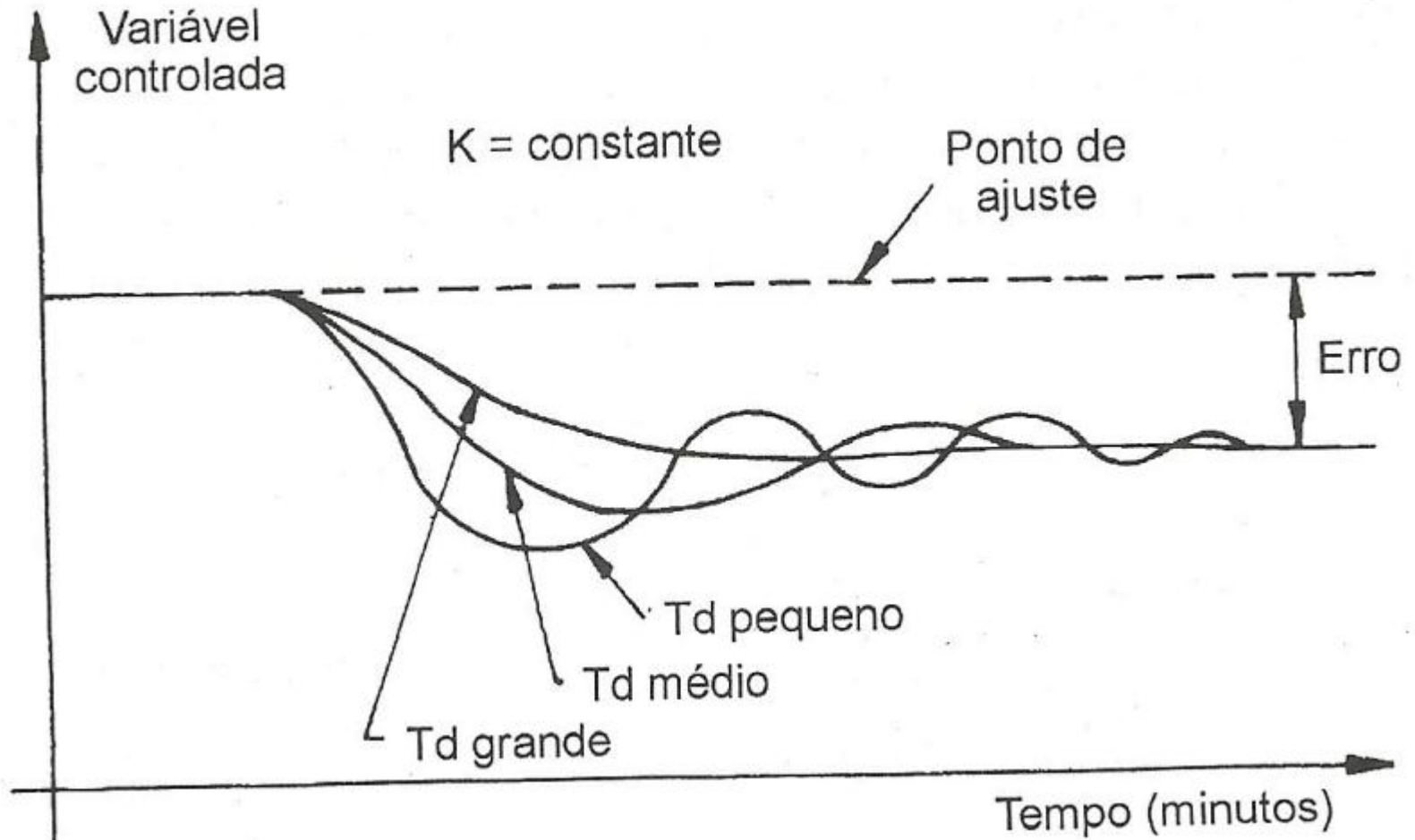
$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad \begin{array}{l} K_p - \text{Ganho} \\ \text{Proporcional} \end{array}$$

$$U(s) = (K_p + K_d s) E(s) \quad \begin{array}{l} K_d = K_p T_d = \text{Ganho} \\ \text{derivativo} \end{array}$$

Ação de controle derivativa



Ação de controle derivativa



Ação de controle derivativa

Resumindo:

- Leva em conta a taxa de variação do erro;
- Adiciona um zero em $z = \frac{-K_p}{K_d}$;
- Introduz um efeito de antecipação no sistema, fazendo com que o mesmo reaja não somente à magnitude do sinal de erro, como também à sua tendência para o instante futuro, iniciando, assim, uma ação corretiva mais cedo;
- A ação derivativa tem a desvantagem de amplificar os sinais de ruído, o que pode causar um efeito de saturação nos atuadores do sistema.

Controlador PID

O PID une as ações proporcional, integral e derivativa num só controlador, atuando tanto no regime transitório quanto no regime permanente.

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \left(\frac{1}{T_i} \right) \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right\}$$

Ou

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$$

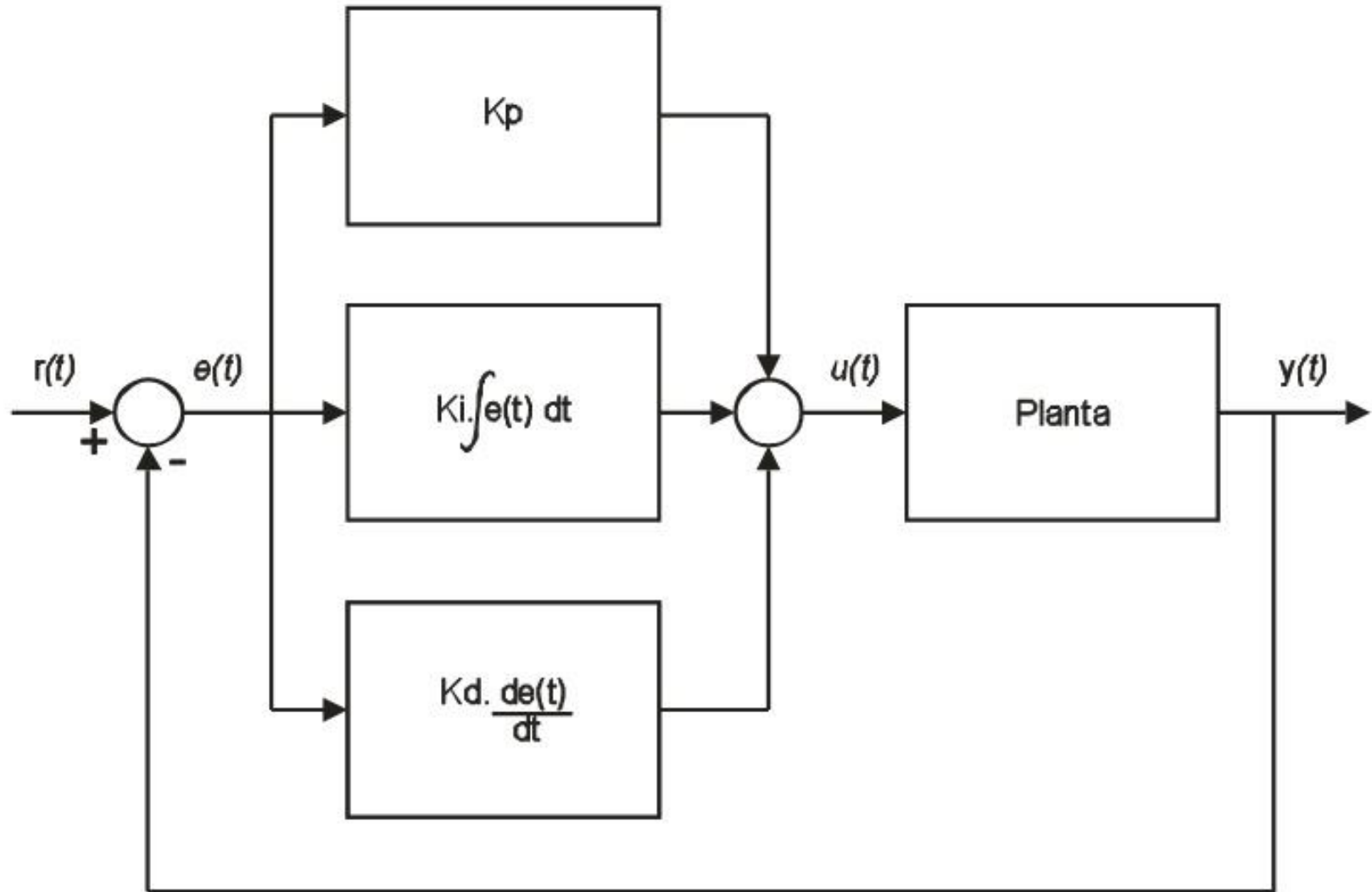
Controlador PID

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$$

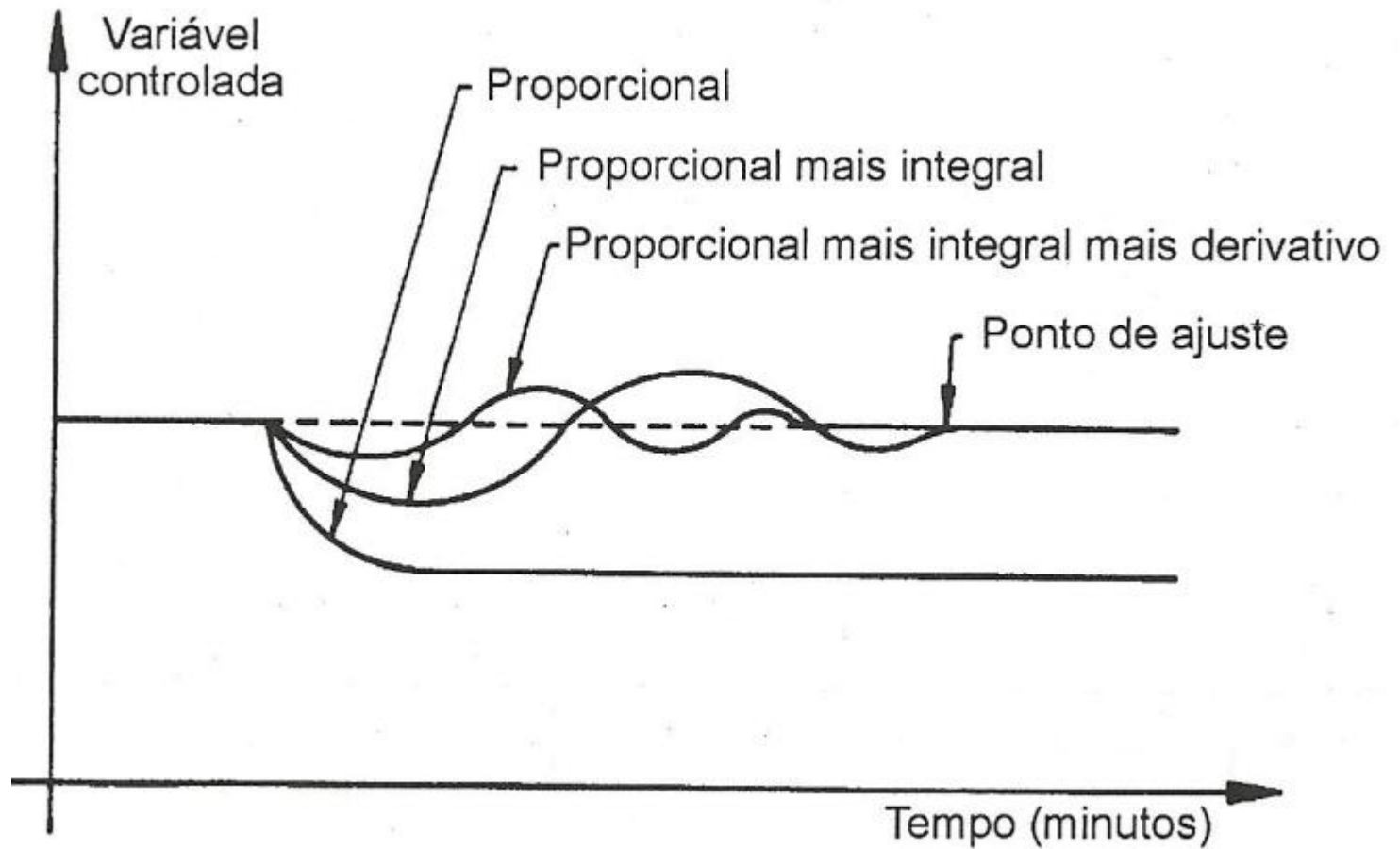
Ou

$$U(s) = \left(\frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \right) E(s)$$

Controlador PID



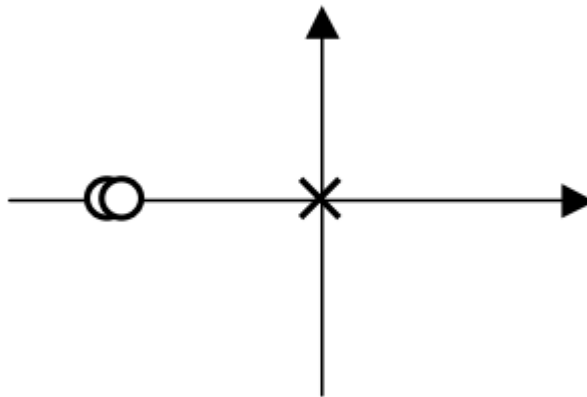
Controlador PID



Controlador PID

Resumindo:

- É utilizado quando temos resposta transitória e em regime insatisfatórias;
- Adiciona um polo na origem e 2 zeros, que dependem dos parâmetros do controlador;
- Geralmente os dois zeros são reais e iguais.



Implementação Computacional

a) Ação Proporcional (P):

$$P(t) = K_P e(t) \xrightarrow{\text{Laplace}} P(s) = K_P E(s) \xrightarrow{\text{Euler}} P(z) = P(s) \bigg|_{s = \frac{1-z^{-1}}{h}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P(z) = K_P E(z) \Rightarrow P(k) = K_P e(k)$$

Implementação Computacional

a) Ação Integral (I):

$$I(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \xrightarrow{\text{Laplace}} I(s) = \frac{K_i}{s} E(s) \xrightarrow{\text{Euler}} I(z) = I(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{h}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I(z) = z^{-1}I(z) + (K_i \cdot h \cdot E(z)) \Rightarrow I(k) = I(k-1) + (K_i \cdot h \cdot e(k))$$

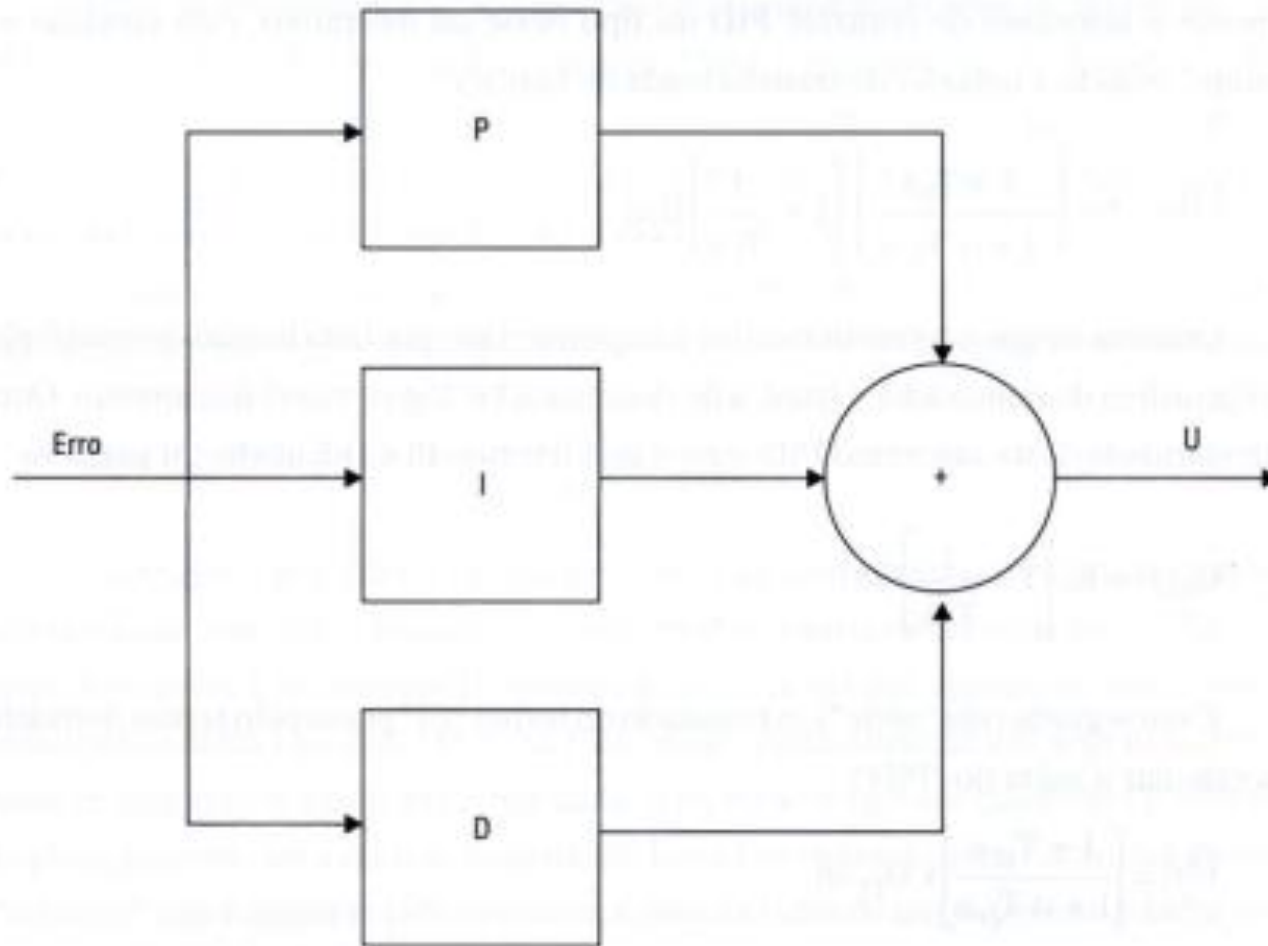
Implementação Computacional

a) Ação Derivativa (D):

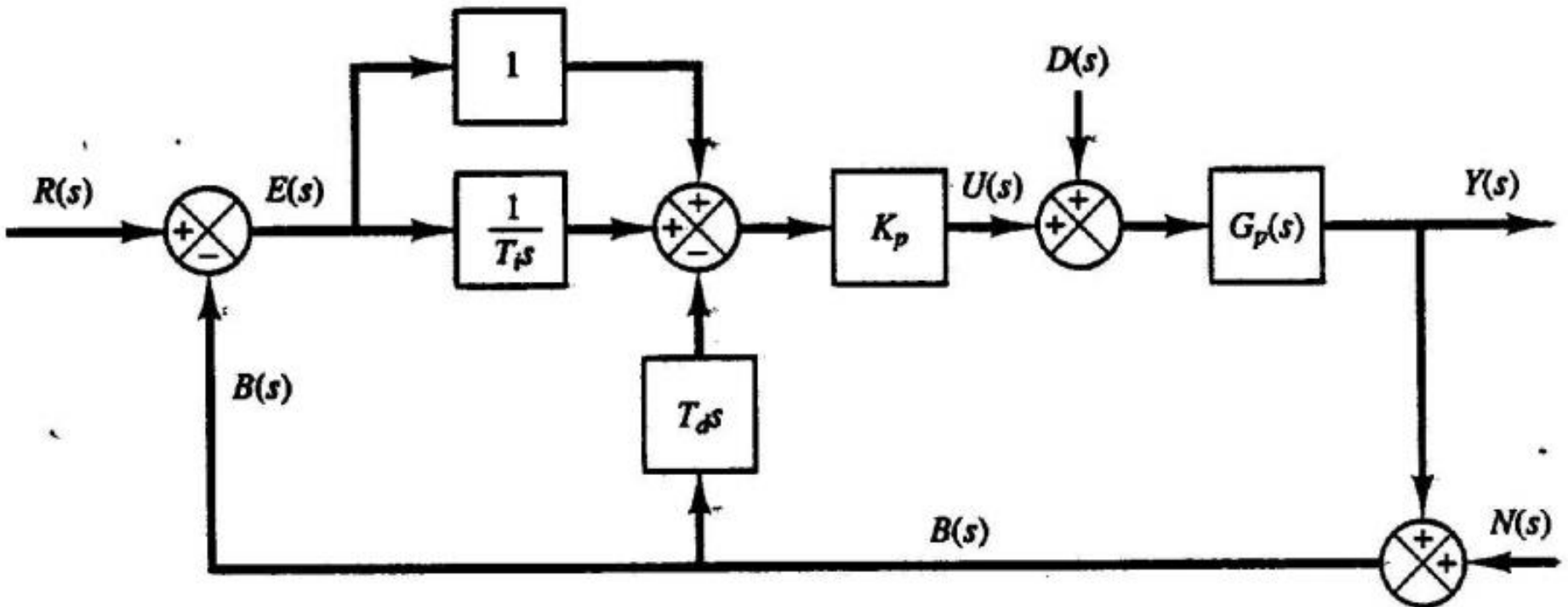
$$D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{\text{Laplace}} D(s) = sK_d E(s) \xrightarrow{\text{Euler}} D(z) = D(s) \Big|_{s=\frac{1-z^{-1}}{h}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow D(z) = K_d \frac{(1 - z^{-1})E(z)}{h} \Rightarrow D(k) = K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{h}$$

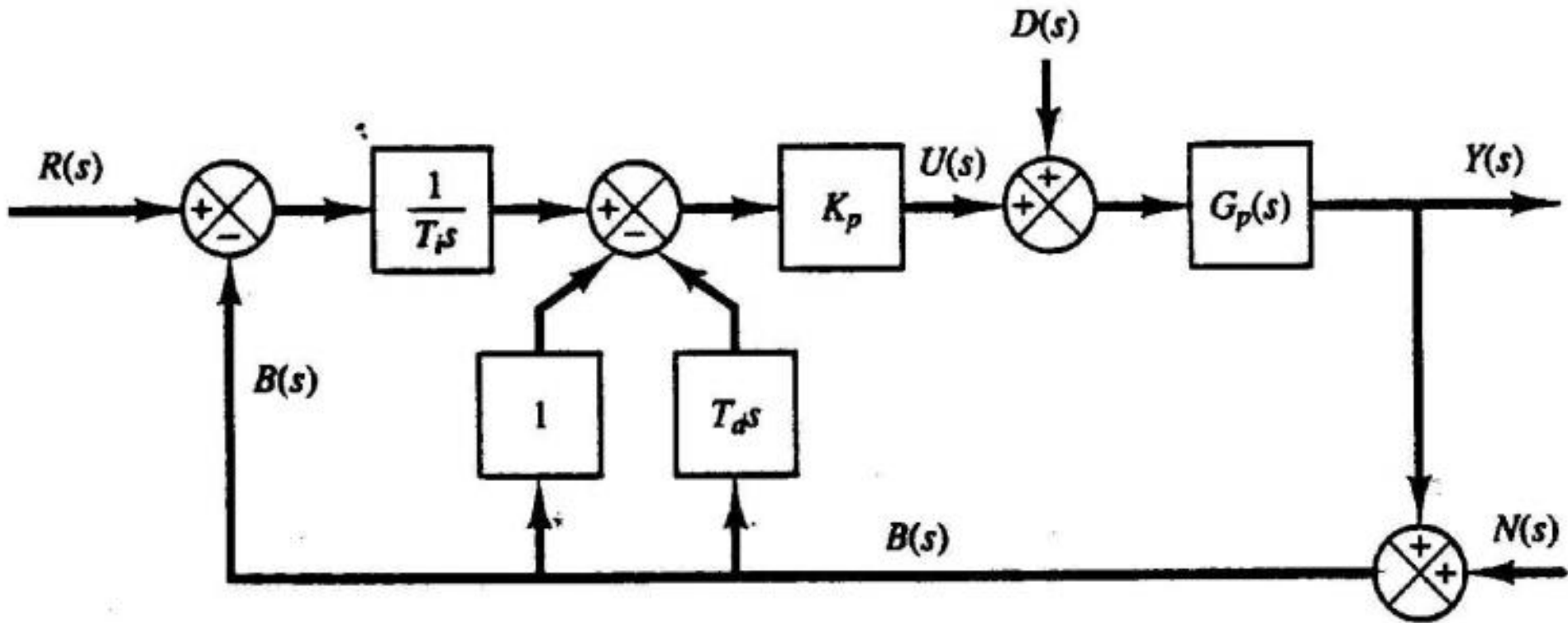
Configurações Controlador PID (paralelo)



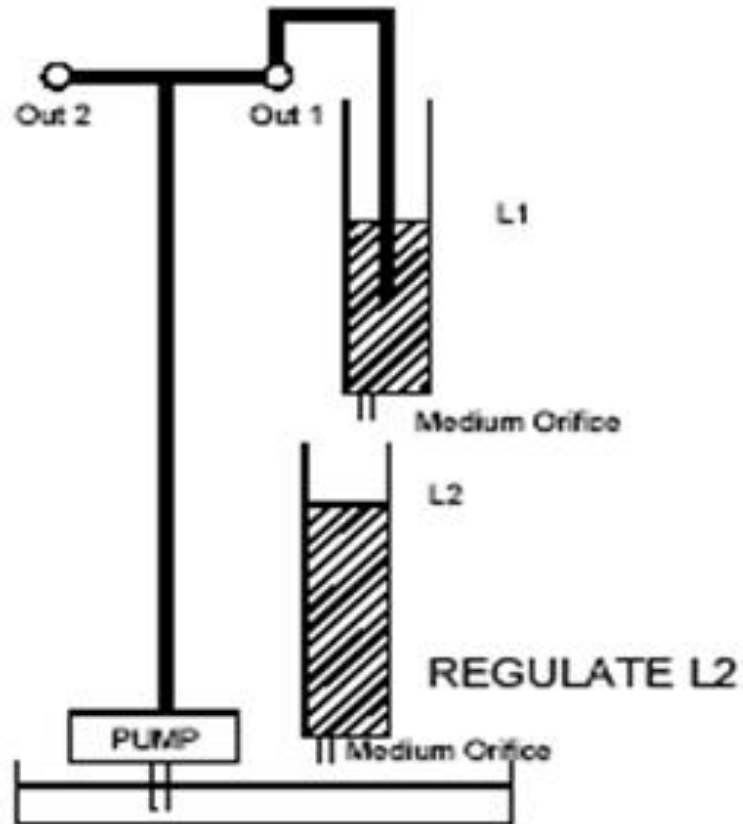
Configurações Controlador PI-D



Configurações Controlador I-PD



Controle em cascata

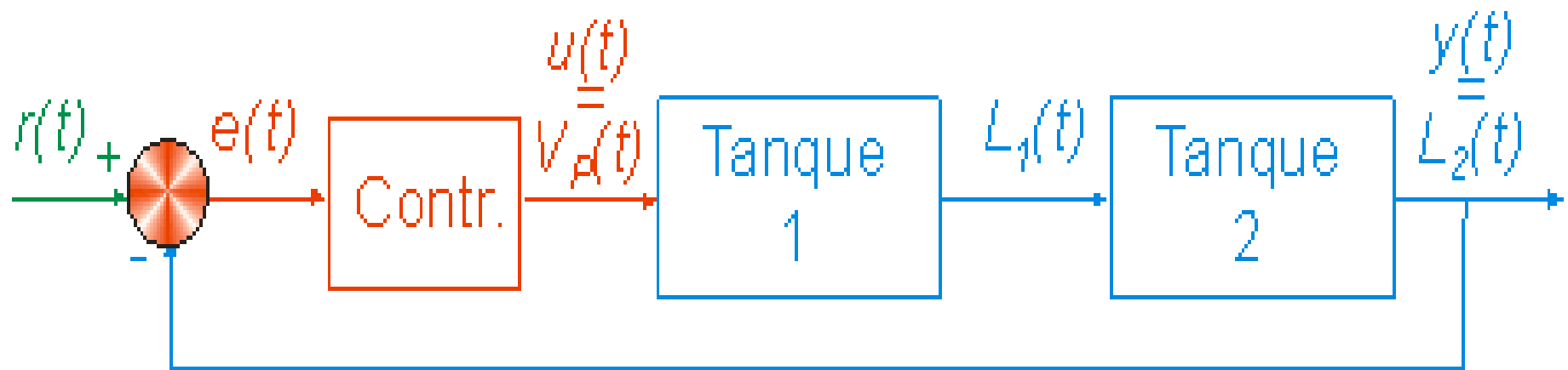


Utilizando os dois tanques, mas com alimentação apenas no tanque 1. Deseja-se controlar o nível de líquido no tanque 2.

Controle em cascata

Como já sabemos, na configuração 2 do sistema de tanques, manipulando-se a tensão enviada para a bomba, pode-se obter um nível desejado para o líquido no tanque 1. Por sua vez, o nível de líquido no tanque 1 influencia na vazão de saída deste, que corresponde a vazão de entrada do tanque 2, influenciando assim no nível de líquido no tanque 2, que é justamente a variável que desejamos controlar. Sendo assim, temos inicialmente a seguinte estrutura de controle:

Controle em cascata



Controle em cascata

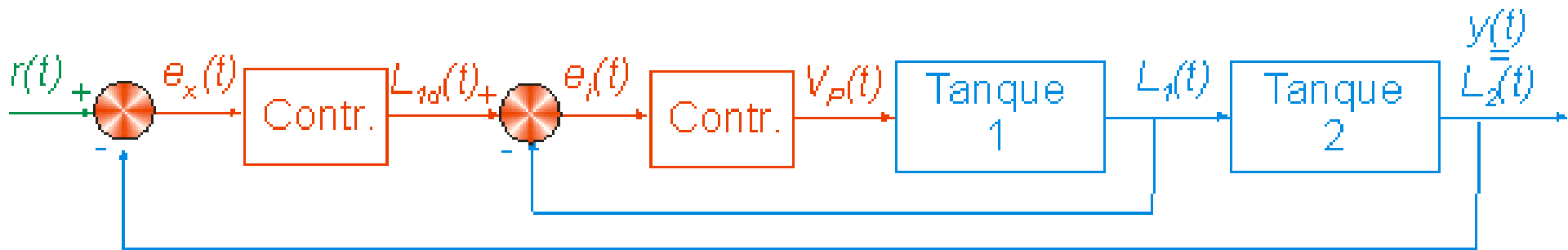
Sabendo-se que, manipulando o nível de líquido no tanque 1 (L_1) pode-se controlar o nível de líquido no tanque 2 (L_2), a ideia é que tenhamos uma **malha externa de controle** que a partir do erro entre a referência desejada e o nível obtido no tanque 2 ($e_x = r - L_2$) forneça um valor ideal para o nível do tanque 1 (L_{1d}) que levaria o nível no tanque 2, da forma mais satisfatória possível, para o valor desejado (r).

Controle em cascata

Contudo, para que o nível no tanque 1 atingisse, também de forma satisfatória, o nível indicado como ideal pelo controlador da malha externa, utilizaria-se um outro controlador, formando assim uma **malha interna de controle**. O controlador da malha interna tem a incumbência de, a partir do erro entre o nível indicado pelo controlador externo para o tanque 1 e nível medido ($e_i = L_{1d} - L_1$) determinar o valor da tensão a ser enviado para bomba (V_p). Desta forma, passamos a ter uma estrutura de controle com duas malhas:

Controle em cascata

Desta forma, é possível utilizar duas malhas de controle (dois controladores) com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema.

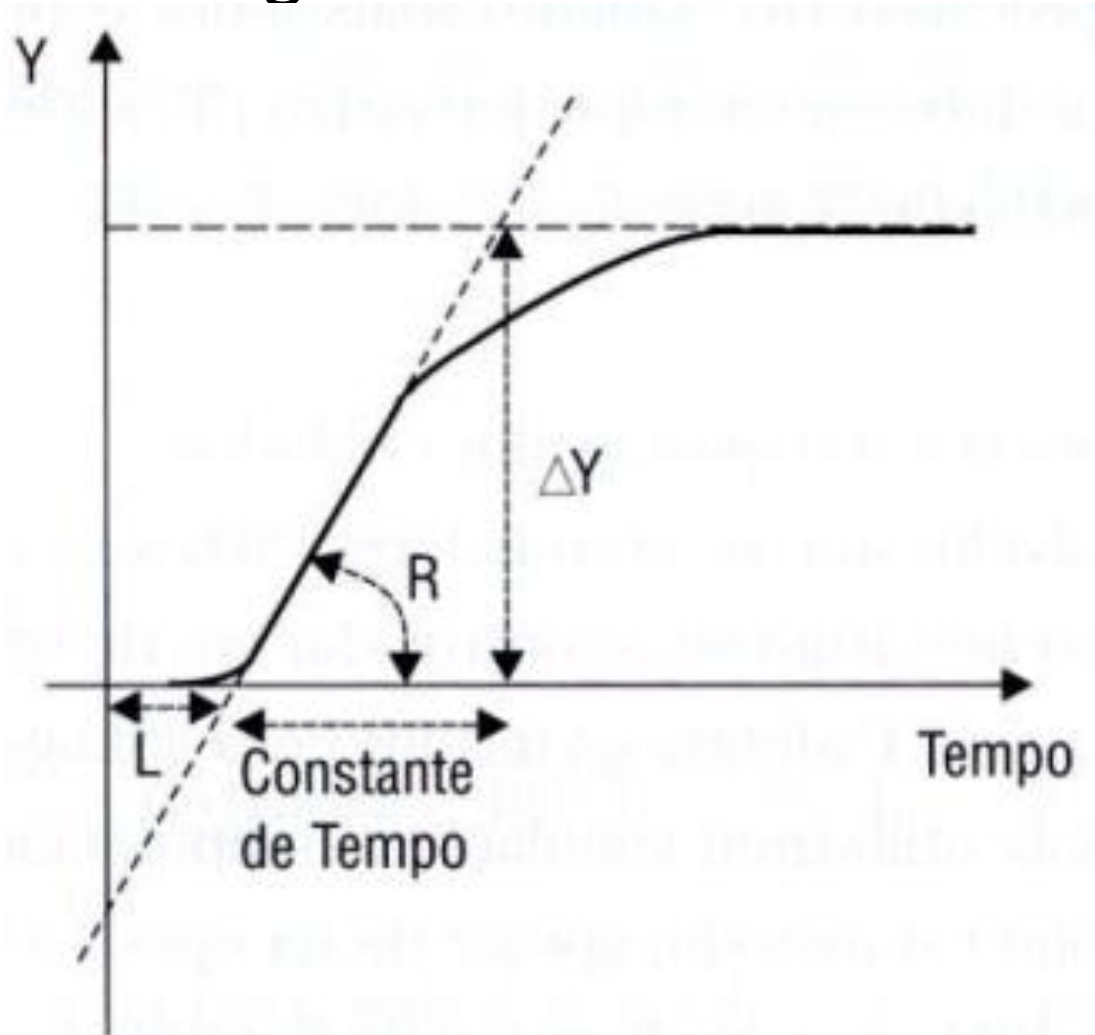


Índices de desempenho para avaliação do controle em malha fechada

Índice de Desempenho	Descrição	Expressão
IAE	Integral do módulo do erro	$\int e(t) dt$
ISE	Integral dos erros ao quadrado	$\int e^2(t) dt$
ITAE	Integral do módulo do erro vezes o tempo	$\int t e(t) dt$

Métodos de Sintonia de Controladores PID

- Método de Ziegler-Nichols



Métodos de Sintonia de Controladores PID

- Método de Ziegler-Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_D
P	$\tau / (K \times \theta)$	—	—
PI	$0.9 \tau / (K \times \theta)$	$3.33 \times \theta$	—
PID	$1.2 \tau / (K \times \theta)$	$2 \times \theta$	$0.5 \times \theta$

Roteiro

1º. Acrescente ao programa desenvolvido na primeira experiência, na opção MALHA FECHADA, as seguintes funcionalidades:

- a) Possibilitar que o usuário escolha um dentre os seguinte tipos de controladores: P, PD ou PI, PID, PI-D ou I-PD;**
 - Qualquer que seja a escolha, o programa deverá solicitar um valor para o ganho proporcional;**
 - No caso de optar pelo controle PD o usuário poderá optar por fornecer o tempo derivativo ou diretamente o ganho derivativo;**

Roteiro

- No caso de optar pelo controle PI o usuário poderá optar por fornecer o tempo integral ou diretamente o ganho integral.
- No caso de optar pelo controle PID ou PI-D o usuário poderá optar por fornecer os tempos integral e derivativo ou diretamente os ganhos integral e derivativo.
- No caso de optar pelo controle do tanque 2 (configuração 2), o usuário poderá optar pelo uso do controlador em cascata.

Roteiro

Obs.1: O usuário deve poder alterar os parâmetros dos controladores com o programa em execução.

Obs.:2: Para realizar as atividades relacionadas ao sistema de primeira ordem, o usuário deverá escolher o nível do tanque 1 como PV.

Obs.:3: Para realizar as atividades relacionadas ao sistema de segunda ordem, o usuário deverá escolher o nível do tanque 2 como PV.

Obs.4: Para realizar o controle em malha fechada , o sinal de controle (MV) calculado, antes de ser escrito na porta selecionada, deverá ser limitado em +/-4 volts respeitando os limites operacionais do atuador (bomba) do sistema de tanques.

Roteiro

2º. Verifique e descreva em seu relatório a diferença no comportamento do sistema com cada um dos controladores.

3º. Para cada tipo de controlador, verifique e descreva em seu relatório o comportamento do sistema para diferentes valores dos ganhos.

Referências

- **[1] Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 4ª ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 2004.**
- **[2] Franklin, G. F.; Powell, D.; Naeini, A. E. Sistemas de Controle para Engenharia. 6ª ed. Bookman, 2013.**
- **[3] Nise, N. S. Engenharia de Sistemas de Controle. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.**
- **[4] E. A. Bega, S. R. M. Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras. 3ª ed. Interciência, 2003.**