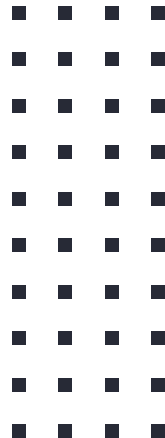


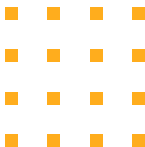


Aula 06

Sistemas Realimentados e Sintonia de Controladores por Métodos Heurísticos



Disciplina: Laboratório de Engenharia de Controle
Professor: Rafael Cavalcanti Neto



Objetivos

- Revisão de sistemas de controle em malha fechada
- Comparação de sistemas em malha fechada e sistemas em malha aberta
- Controladores clássicos
- Método de sintonia de Ziegler-Nichols para controladores PID



Revisão de Sistemas de Controle em Malha Fechada

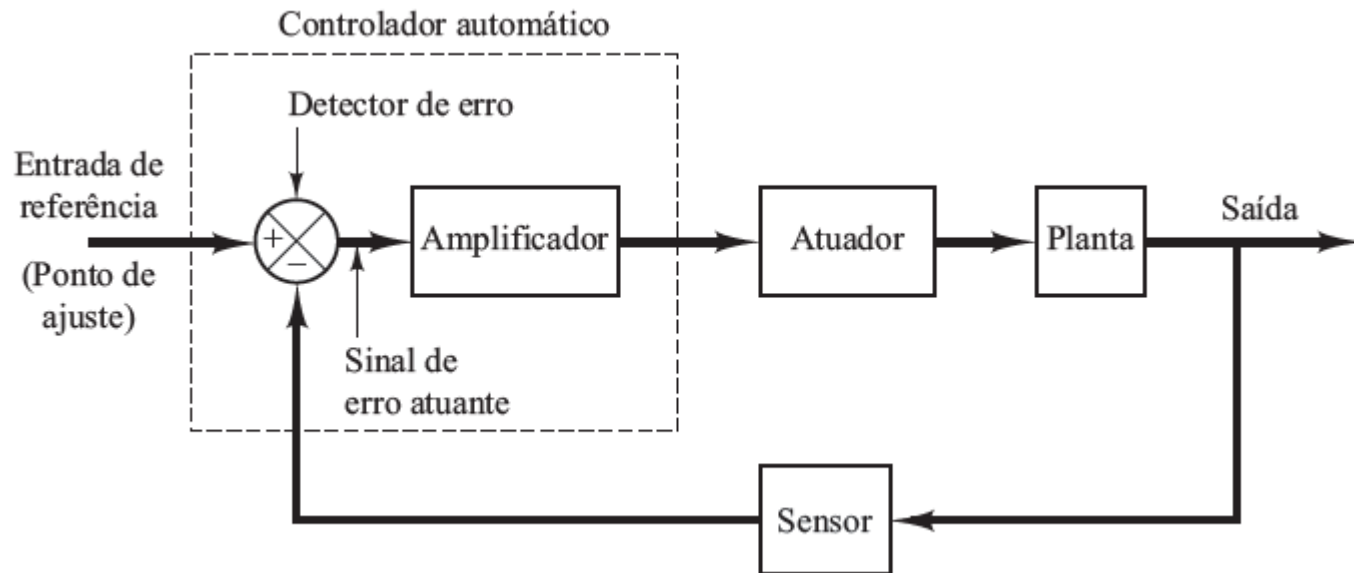


Sistemas de Controle com Realimentação

- Um sistema de controle é definido como uma interconexão de componentes formando um sistema que produzirá uma resposta desejada do sistema.
- Como a resposta de desejada do sistema é conhecida, um sinal proporcional ao erro entre a resposta desejada e a resposta real é gerado. Este sinal é utilizado no controlador do sistema.

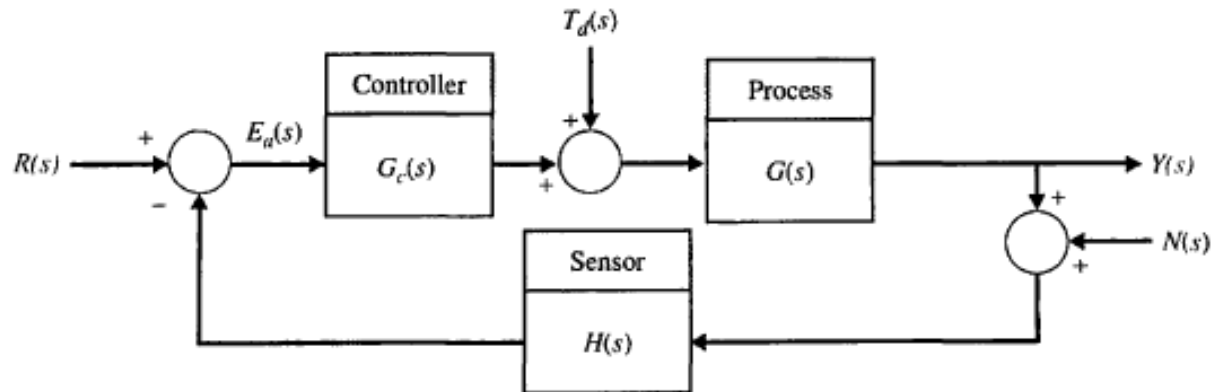
Sistemas de Controle com Realimentação

- Exemplo Típico de Sistema de Controle:



Sistemas de Controle com Realimentação

- **Análise do Sinal do Erro:**
 - Desenvolvimento no quadro.



Sistemas de Controle com Realimentação

■ Erro em Regime Permanente:

- O erro do sistema em malha aberta, para o sistema mostrado no slide anterior, é calculado por:

$$E_0(s) = R(s) - Y(s) = (1 - G(s))R(s),$$

contudo, quando se avalia o sistema com realimentação unitária, tem-se

$$E_c(s) = \frac{1}{1 + G_c(s)G(s)} R(s).$$

- Para calcular o erro em regime permanente, utiliza-se o teorema do valor final:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s).$$

Sistemas de Controle com Realimentação

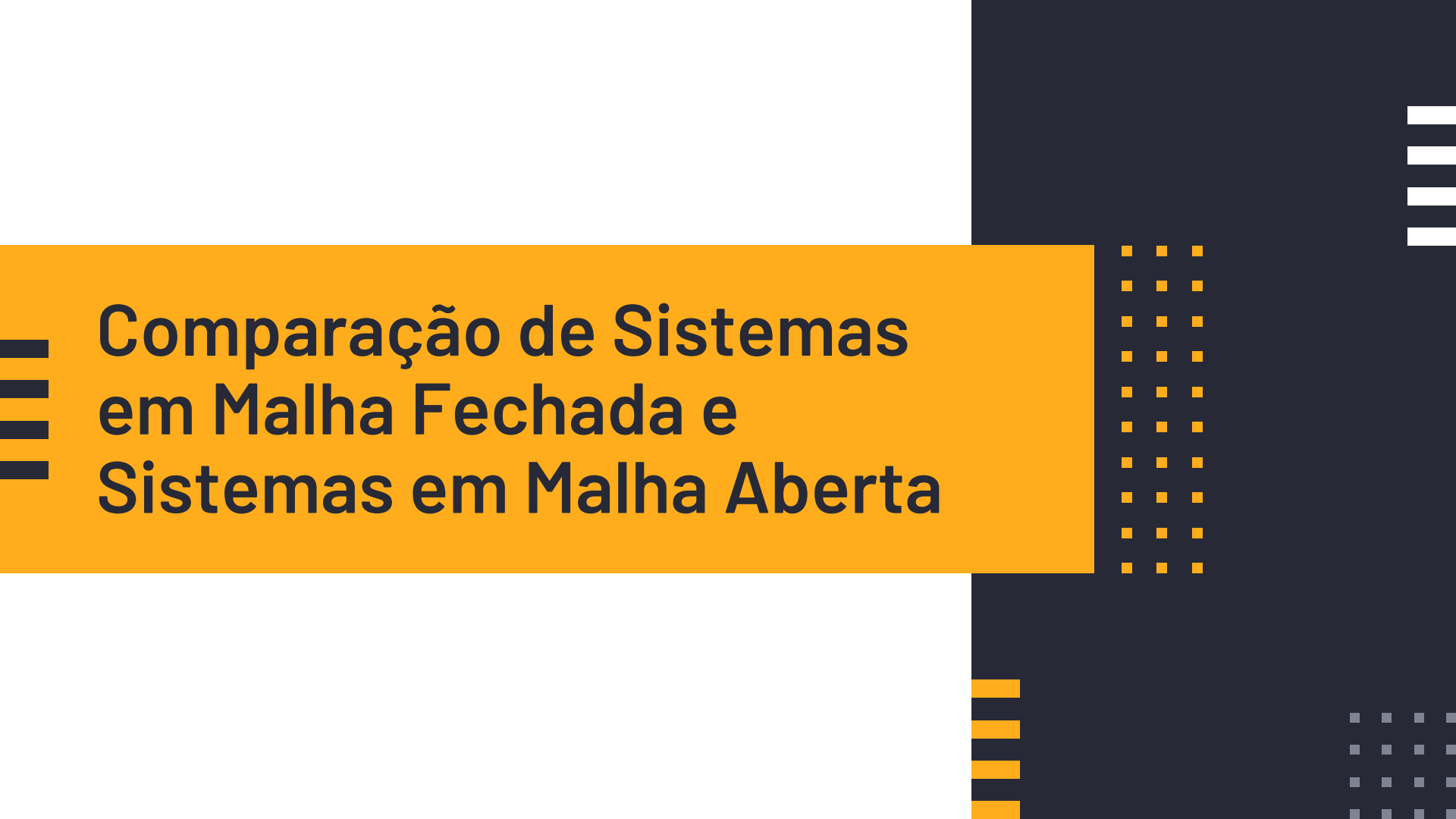
- **Erro em Regime Permanente:**

- Portanto, usando uma entrada em degrau unitário como entrada de comparação, obtém-se para o sistema em malha aberta:

$$e_o(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s(1 - G(s))\left(\frac{1}{s}\right) = \lim_{s \rightarrow 0} (1 - G(s)) = 1 - G(0).$$

- Para o sistema em malha fechada, tem-se:

$$e_c(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s\left(\frac{1}{1 + G_c(s)G(s)}\right)\left(\frac{1}{s}\right) = \frac{1}{1 + G_c(0)G(0)}.$$



Comparação de Sistemas em Malha Fechada e Sistemas em Malha Aberta

Comparação Entre Sistemas de Malha Fechada e Sistemas de Malha Aberta

- **A presença da realimentação confere as seguintes propriedades a um sistema:**
 1. Precisão aumentada;
 2. Tendência para oscilação ou instabilidade;
 3. Sensibilidade reduzida da razão da saída para entrada às variações nos parâmetros do sistema e outras características;
 4. Efeito reduzido das não linearidades;
 5. Efeito reduzido de distúrbios ou ruídos externos;
 6. Largura de faixa ajustável.



Controladores Clásicos

Controladores Clássicos

- A maioria dos controladores industriais pode ser classificada, de acordo com suas ações de controle, em:
 1. Controladores de duas posições ou *on-off*.
 2. Controladores proporcionais.
 3. Controladores integrais.
 4. Controladores proporcional-integrais.
 5. Controladores proporcional-derivativos.
 6. Controladores proporcional-integral-derivativos.

Ação de Controle de Duas Posições ou *On-Off*

- Em um sistema de controle de duas posições, o elemento atuante tem somente duas posições fixas, que são, em muitos casos, simplesmente *on* e *off*.
- O controle de duas posições ou *on-off* é relativamente simples e barato e, por essa razão, é bastante utilizado em sistemas de controle domésticos e industriais.

Ação de Controle de Duas Posições ou *On-Off*

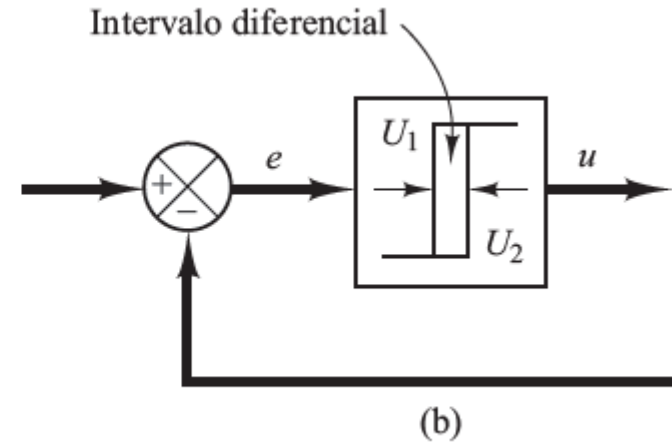
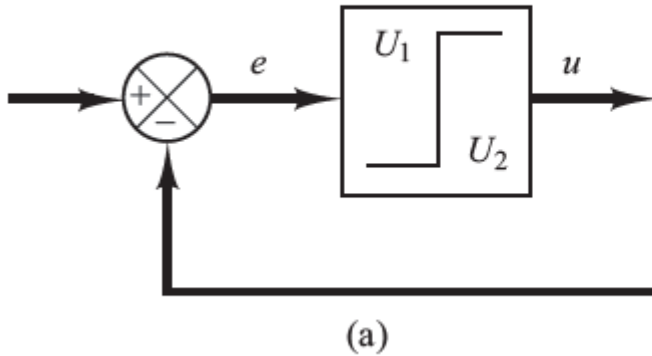
- Considere que o sinal de saída do controlador é $u(t)$ e o sinal de erro atuante é $e(t)$. No controle de duas posições, o sinal $u(t)$ permanece em um valor máximo ou em um valor mínimo, dependendo se o sinal de erro atuante for negativo ou positivo. Assim,

$$\begin{aligned}u(t) &= U_1, \quad \text{para } e(t) > 0 \\ &= U_2, \quad \text{para } e(t) < 0\end{aligned}$$

onde U_1 e U_2 são constantes.

- O valor mínimo U_2 normalmente é zero ou $-U_1$.

Ação de Controle de Duas Posições ou *On-Off*



- a) Diagrama de blocos de um controlador *on-off*;
- b) Diagrama de blocos de um controlador *on-off* com intervalo diferencial.

Ação Proporcional

- A saída do controlador $u(t)$ é proporcional ao sinal de erro $e(t)$:

$$u_p(t) \propto e(t) \quad \Rightarrow \quad U_p(s) \propto E(s)$$

- Logo, é necessário que exista um sinal de erro na entrada do controlador para que exista um sinal na saída do mesmo.

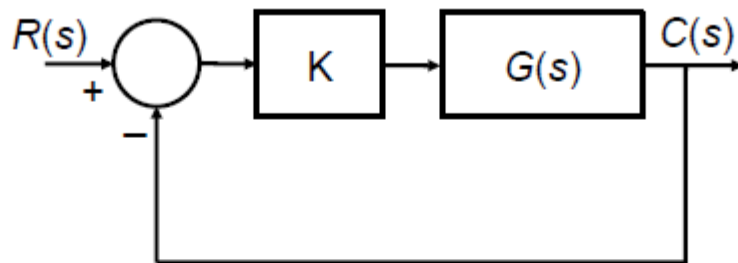


- Ao aumentar o ganho proporcional consegue-se reduzir o erro estático, aumentar a velocidade de resposta, contudo, usualmente o sistema torna-se menos amortecido.

Ação Proporcional

- **Exemplo:**

- Conversor Buck em malha fechada com **controle proporcional**:



$$V_{in} = 100 \text{ V}$$

$$V_o = 50 \text{ V}$$

$$L = 250 \text{ } \mu\text{H}$$

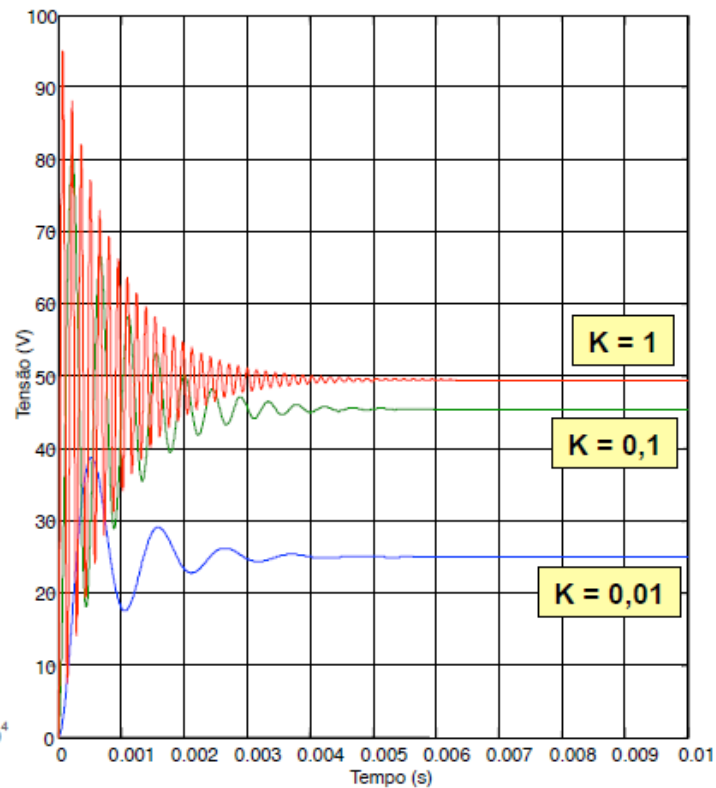
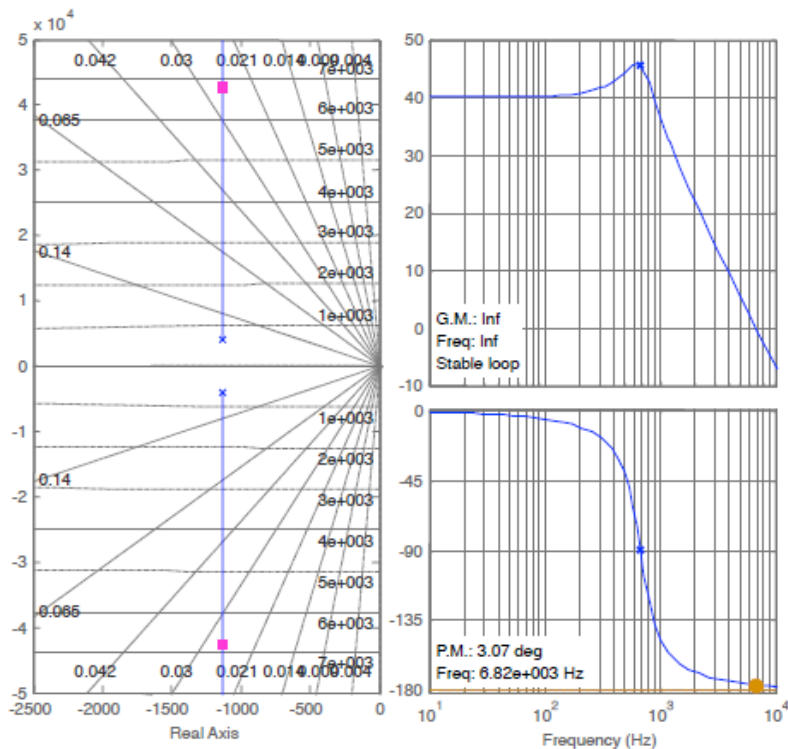
$$R = 2 \text{ } \Omega$$

$$C = 220 \text{ } \mu\text{F}$$

$$f = 50 \text{ kHz}$$

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in} \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$

Ação Proporcional



Ação Integral

- O sinal de saída do controlador é a área sob a curva do sinal de erro, até aquele momento (depende do passado)

$$u_i(t) \propto \int_0^t e(t) dt \quad \Rightarrow \quad U_i(s) \propto \frac{E(s)}{s}$$

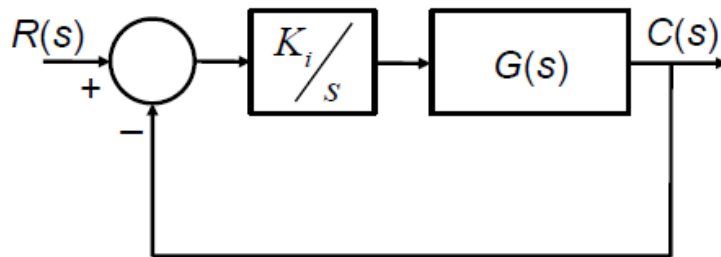


- O sinal de controle pode ter um valor não-nulo mesmo quando o sinal de erro for zero.
- Embora a ação de controle integral remova o erro em regime permanente para entradas do tipo degrau, pode conduzir a uma **resposta oscilatória** ou até mesmo **instável**.

Ação Integral

- **Exemplo:**

- Conversor Buck em malha fechada com **controle integral**:



$$V_{in} = 100 \text{ V}$$

$$L = 250 \text{ } \mu\text{H}$$

$$C = 220 \text{ } \mu\text{F}$$

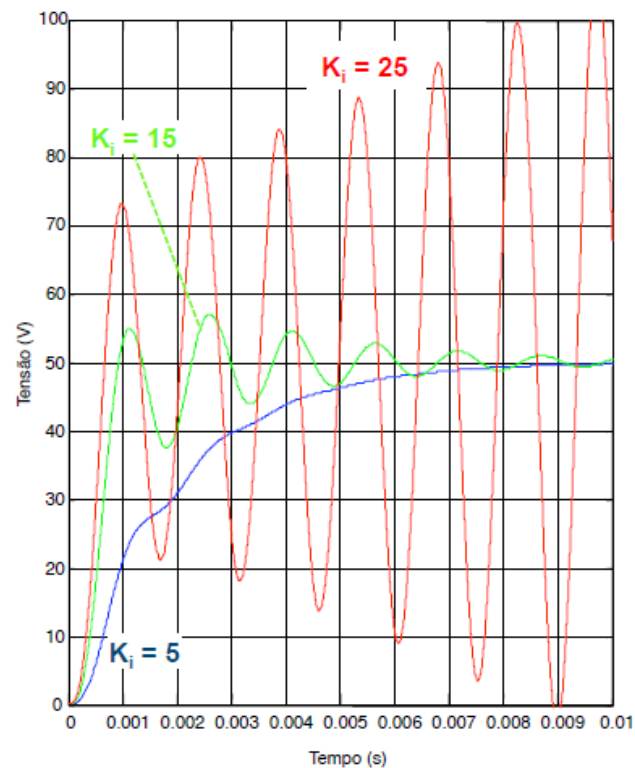
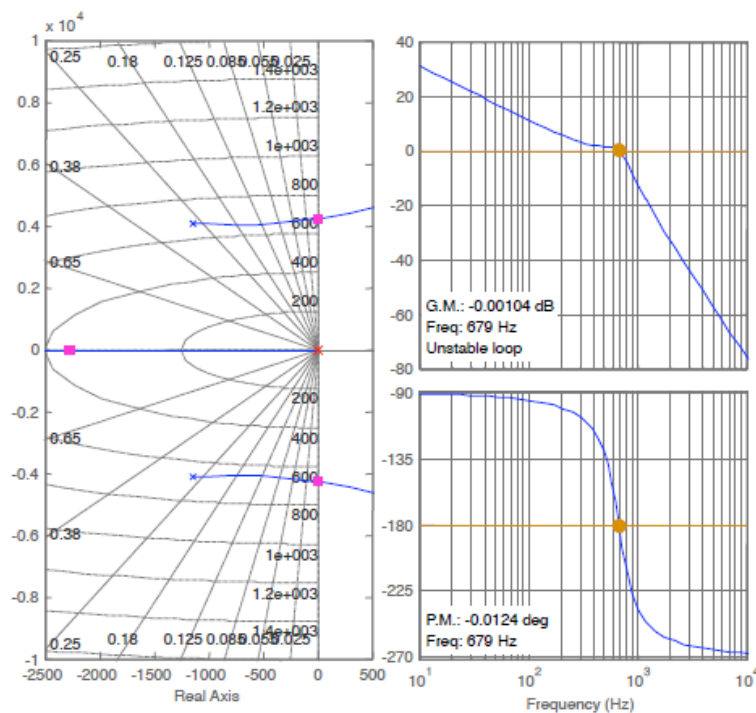
$$V_o = 50 \text{ V}$$

$$R = 2 \text{ } \Omega$$

$$f = 50 \text{ kHz}$$

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in} \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$

Ação Integral



Ação Derivativa

- A ação de controle derivativo responde a uma taxa de variação do erro e pode produzir uma correção significativa antes que o valor do erro atuante se torne muito elevado.

$$u_d(t) \propto \frac{de(t)}{dt} \quad \Rightarrow \quad U_d(s) \propto sE(s)$$

- Portanto, o controle derivativo “prevê” o erro, inicia uma correção antecipada e tende a aumentar a estabilidade do sistema.
- Embora o controle derivativo não afete diretamente o erro estacionário, ele aumenta o amortecimento do sistema, permitindo o uso de ganho proporcional mais elevado, o que vai resultar em maior precisão em regime permanente.

Ação Derivativa

- Como o controle derivativo atua sobre a taxa de variação do erro e não sobre o próprio erro, ele nunca é utilizado sozinho.
- É sempre utilizado em combinação com uma ação proporcional ou proporcional-integral.

$$U_{pd}(s) = (K_p + K_d s)E(s) \quad \Rightarrow \quad U_{pd}(s) = K_c (T_d s + 1)E(s)$$

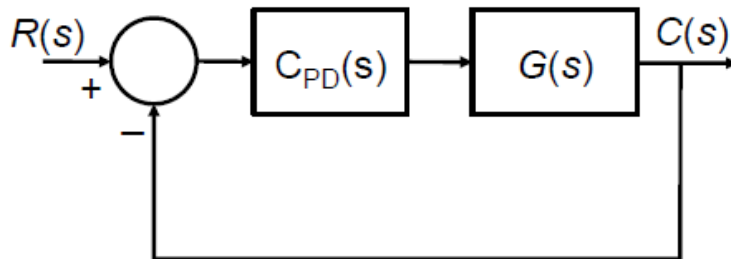
- O zero adicionado aumenta o ganho do compensador em +20dB/déc, podendo amplificar ruídos em alta frequência. Nesse sentido, é usual a adição de um polo em alta frequência para limitação de ganho.

$$U_{pd}(s) = K_c \frac{T_d s + 1}{T_p s + 1} E(s)$$

Ação Derivativa

- **Exemplo:**

- Conversor Buck em malha fechada com controle **proporcional-derivativo**:



$$V_{in} = 100 \text{ V}$$

$$V_o = 50 \text{ V}$$

$$L = 250 \text{ } \mu\text{H}$$

$$R = 2 \text{ } \Omega$$

$$C = 220 \text{ } \mu\text{F}$$

$$f = 50 \text{ kHz}$$

$$G(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_{in} \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$





Método de Ziegler-Nichols

Método de Ziegler-Nichols

- **Cenário:**

- Em diversas situações, o modelo matemático da planta é complexo, impossibilitando sua modelagem como caixa-branca ou caixa-cinza. Além disso, a aquisição de sinais pode ser complicada o suficiente para inviabilizar a obtenção de um modelo de caixa-preta. Neste cenário, como podemos sintonizar os ganhos do controlador?

- **Solução:**

- Podemos utilizar métodos heurísticos como o de **Ziegler-Nichols**.

Método de Ziegler-Nichols

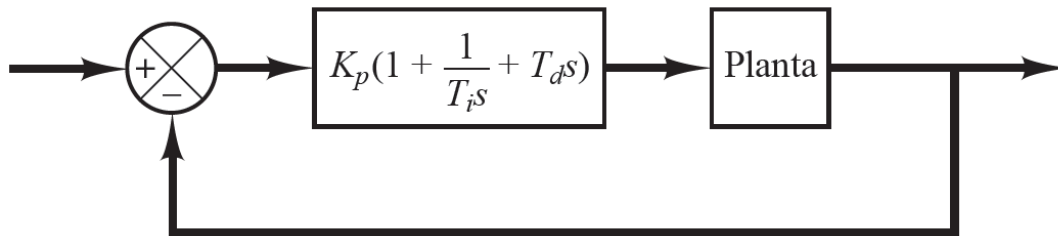
Definições:

- Ziegler e Nichols sugeriram regras para sintonia de controladores PID baseadas na resposta ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada.
- Essas regras sugerem um conjunto de parâmetros do controlador que proporcionarão uma operação estável do sistema. Contudo, o sistema resultante pode exibir um sobressinal máximo grande na resposta do degrau. Nesse caso, precisamos fazer uma série de sintonias finas até que um resultado aceitável seja obtido.

Método de Ziegler-Nichols

Definições:

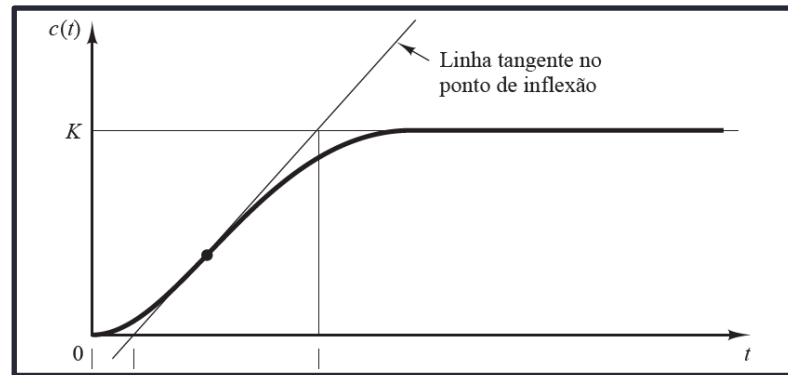
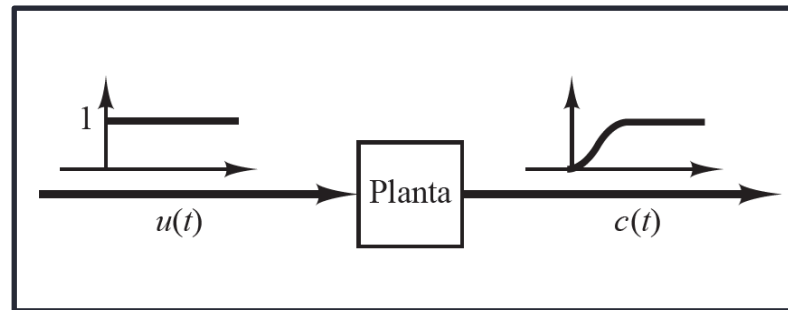
- As regras de sintonia de Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na **sintonia fina**, e não os valores definitivos de K_p , T_i e T_d logo na primeira tentativa.
- Existem dois métodos denominados **Regras de Sintonia de Ziegler-Nichols**.



Primeiro Método de Ziegler-Nichols

Quando usar?

- No primeiro método, obtemos experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, como mostra a figura ao lado.
- Se a planta não possui integradores ou polos complexos conjugados dominantes, então essa curva de resposta ao degrau unitário pode ter o aspecto de um S, como se pode ver na figura ao lado.

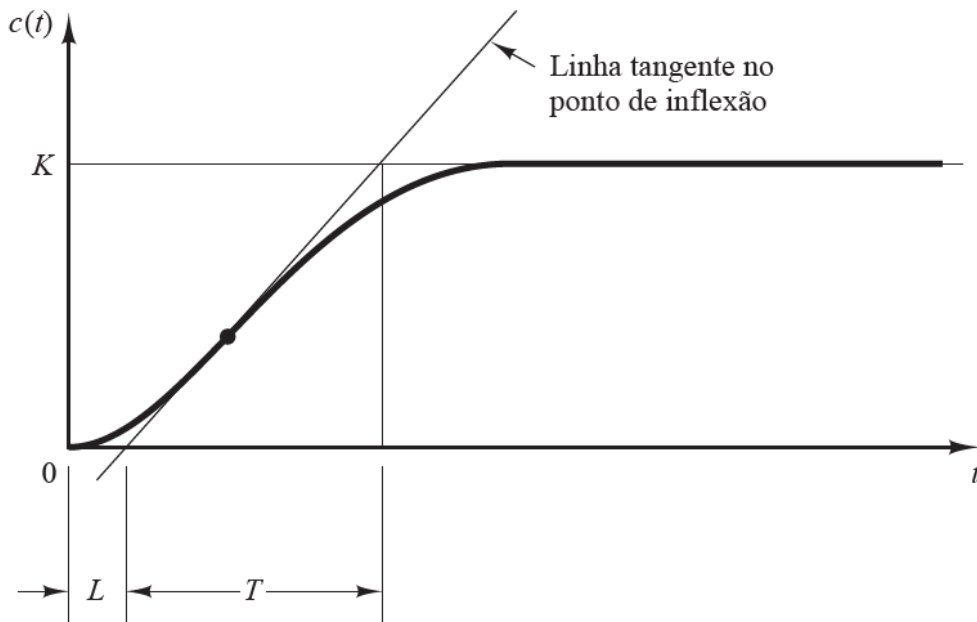


Primeiro Método de Ziegler-Nichols

Resposta ao degrau em malha aberta:

- Essa resposta possuirá dois parâmetros:
 - O ganho K ;
 - O atraso L ; e
 - A constante de tempo T .

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$



Primeiro Método de Ziegler-Nichols

Sintonia dos Parâmetros do Controlador:

- Baseando-se nos parâmetros K , L e T , Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d , de acordo com as fórmulas que aparecem abaixo:

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L} / K$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L} / K$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L} / K$	$2L$	$0,5L$

Primeiro Método de Ziegler-Nichols

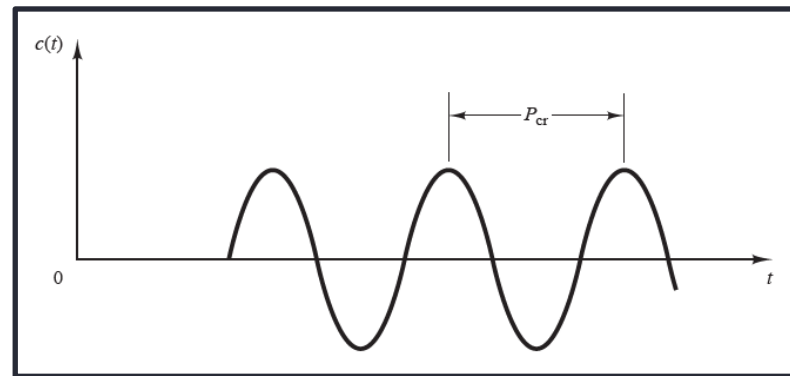
Exemplo 1:

- Sintonizar um controlador que consiga controlar a saída da planta simulada no arquivo: **Exemplo_1_Ziegler_Nichols**.
- Critérios de sintonia fina:
 - ▣ Tempo de resposta de 2 segundos;
 - ▣ Máximo sobressinal percentual de 25%.

Segundo Método de Ziegler-Nichols

Quando usar?

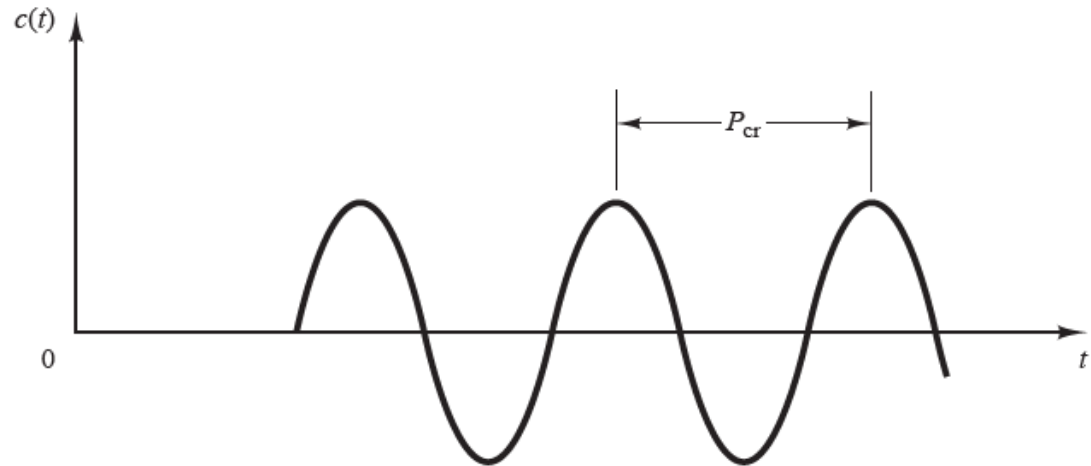
- O segundo método só é aplicável quando, após adicionar APENAS a ação proporcional, obtém-se uma oscilação sustentada a grandes valores de K_p (deixando o sistema marginalmente estável).
- Portanto, para usar este método, primeiramente aumenta-se o K_p de 0 até o valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada.



Segundo Método de Ziegler-Nichols

Resposta ao degrau em malha fechada:

- Essa resposta possuirá dois parâmetros:
 - ▣ O ganho crítico K_{cr} ; e
 - ▣ O período da oscilação sustentada P_{cr} .



Segundo Método de Ziegler-Nichols

Sintonia dos Parâmetros do Controlador:

- Baseando-se nos parâmetros K_{cr} e P_{cr} , Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , T_i e T_d , de acordo com as fórmulas que aparecem abaixo:

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Segundo Método de Ziegler-Nichols

Exemplo 2:

- Sintonizar um controlador que consiga controlar a saída da planta simulada no arquivo: **Exemplo_2_Ziegler_Nichols**.
- Critérios de sintonia fina:
 - ▣ Tempo de resposta de 3 segundos;
 - ▣ Máximo sobressinal percentual de 20%.

Suporte ao Aluno

e-mail:

- rafael.cavalcantinetto@ufpe.br