



Sintonia de Controladores PID

Controle de Processos Industriais (CPI)

Departamento de Engenharia de Controle e Automação
Instituto de Ciência e Tecnologia – UNESP – Campus Sorocaba

Prof. Dr. Dhiego Fernandes Carvalho

dhiego.fernandes@unesp.br

Objetivos

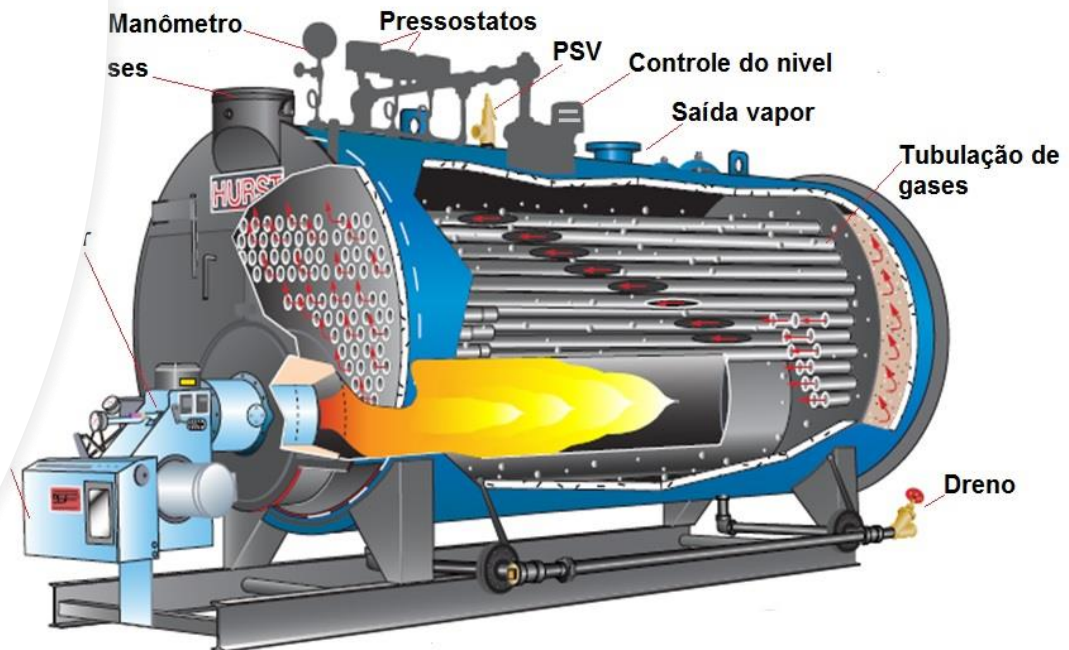
- Compreender os princípios fundamentais e as características dos diferentes métodos de sintonia de controladores PID.
- Aplicar e avaliar métodos de sintonia manual
- Conhecer e aplicar métodos clássicos de sintonia de PID
- Compreender e utilizar métodos de sintonia baseados no Modelo Interno de Controle (IMC)
- Utilizar ferramentas de simulação para praticar e visualizar a sintonia de controladores PID em cenários variados.

Índice

- Introdução
- Método de Sintonia Manual
- Métodos de Sintonia Clássicos (ZN, CC e CHR)
- Métodos de Sintonia Baseados em Modelo Interno de Controle (IMC)
- Conclusões

Introdução

- Os controladores PID são amplamente usados em aplicações industriais, como controle de temperatura, pressão e velocidade, além da automação em robótica. A sintonia adequada é essencial para garantir a eficiência, precisão e estabilidade dos sistemas, minimizando erros e otimizando o desempenho.



Introdução

- A sintonia adequada de controladores PID desempenha um papel fundamental em diversas áreas da engenharia e da indústria. Os principais motivos que tornam essa sintonia crucial incluem:
 - Melhoria do desempenho do sistema
 - Estabilidade do sistema
 - Economia de recursos:
 - Redução do desgaste de equipamentos
 - Adaptação a mudanças de processo



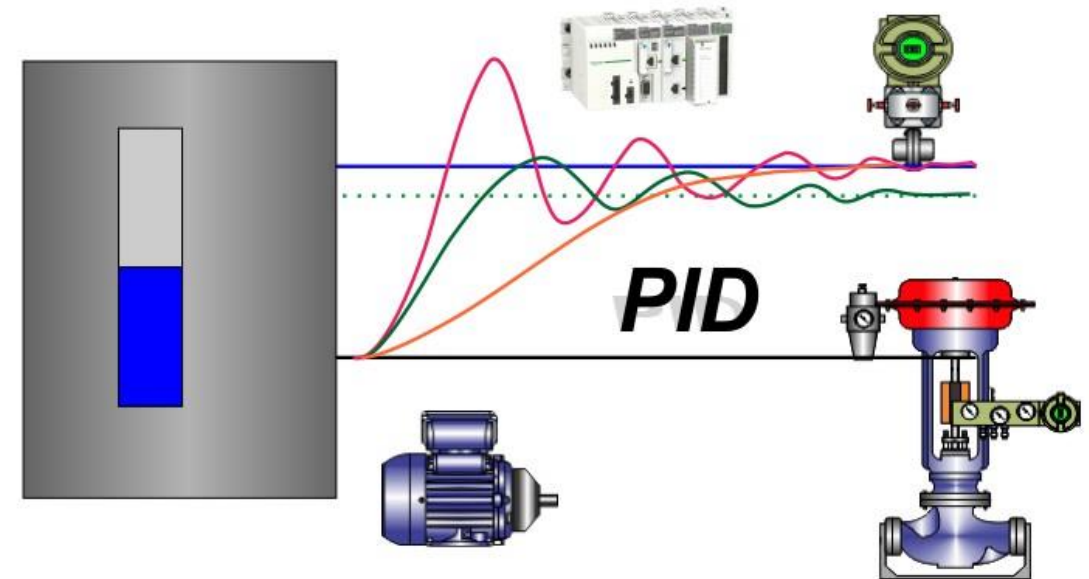
Métodos de Sintonia Manual

- No método de sintonia manual, o operador ajusta incrementalmente os parâmetros do controlador com base nas observações da resposta do sistema.
- Embora dependa da experiência do operador e possa não ser tão preciso quanto métodos automatizados, é uma abordagem prática, especialmente em sistemas com dinâmicas complexas ou desconhecidas, permitindo adaptações rápidas e eficientes.



Métodos de Sintonia Manual

1. **Inicialização:** Comece com K_i e K_d iguais a zero e K_p igual a 1, garantindo que o sistema esteja estável.
2. **Ajuste Proporcional (K_p):** Aumente K_p até observar oscilações ou uma melhora significativa na resposta, buscando um equilíbrio entre velocidade e estabilidade.
3. **Ajuste Integral (K_i):** Aumente K_i para eliminar o erro residual, mas evite valores altos que possam causar instabilidade ou lentidão.
4. **Ajuste Derivativo (K_d):** Aumente K_d para melhorar a resposta transitória e reduzir o sobressinal, usando com moderação para evitar sensibilidade excessiva.



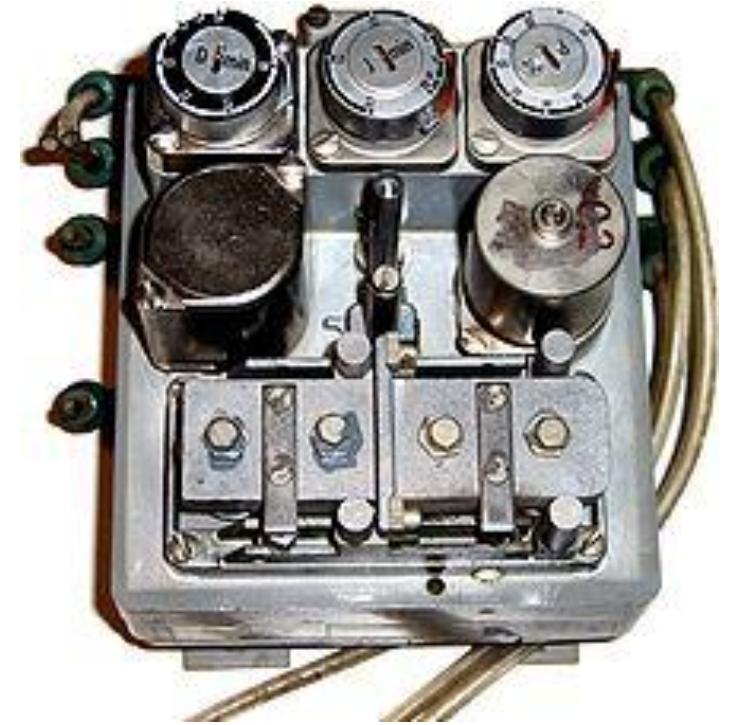
Métodos de Sintonia Manual

- Em muitas situações práticas, a sintonia manual pode ser complementada por métodos formais.
- Por exemplo, um engenheiro pode iniciar com os parâmetros sugeridos pelo método de Ziegler-Nichols e, em seguida, realizar ajustes manuais com base nas respostas observadas.
- A sintonia manual oferece a flexibilidade de realizar ajustes finos, permitindo que o operador utilize sua experiência e adapte o controle às necessidades específicas do sistema.

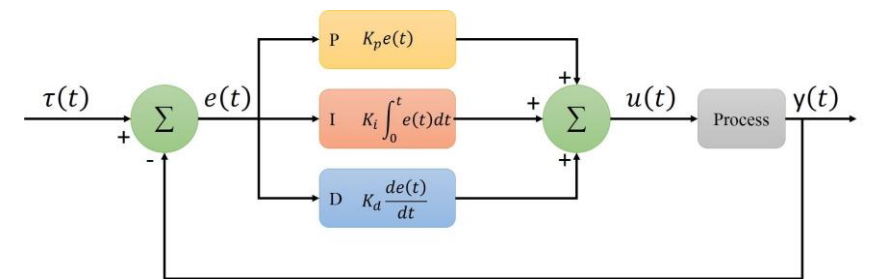


Métodos de Sintonia Clássicos

- Os métodos clássicos de sintonia, desenvolvidos nos primórdios da teoria de controle, são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e eficácia.
- Eles oferecem diretrizes práticas para ajustar controladores PID com base nas características do sistema.
- Entre os mais conhecidos estão os métodos de **Ziegler-Nichols (ZN)**, **Cohen-Coon (CC)** e **Chien, Hrones e Reswick (CHR)**, fornecendo uma base confiável para ajustes rápidos, especialmente em situações com informações limitadas do sistema.



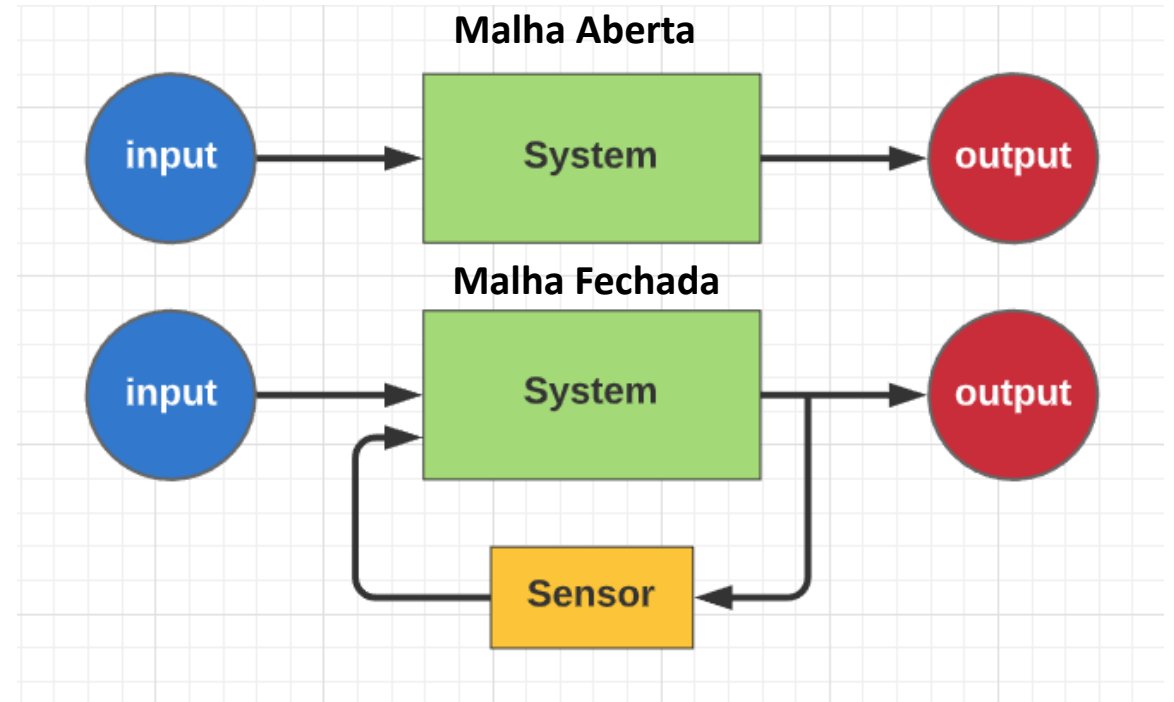
Antigo Controlador PID



Controlador PID Paralelo

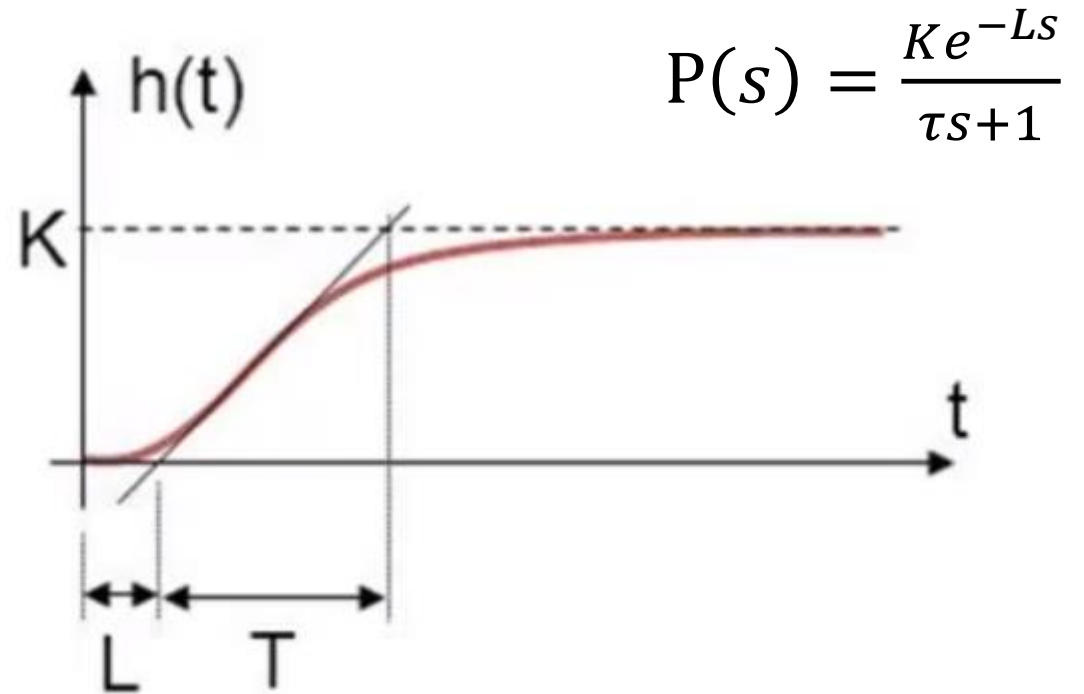
Ziegler-Nichols (ZN)

- O método de Ziegler-Nichols (ZN), desenvolvido na década de 1940, é uma das abordagens mais conhecidas para sintonizar controladores PID, fornecendo regras empíricas para determinar os parâmetros com base nas características do sistema.
- Ele possui duas abordagens principais: **sintonia em malha aberta** e **sintonia em malha fechada**.



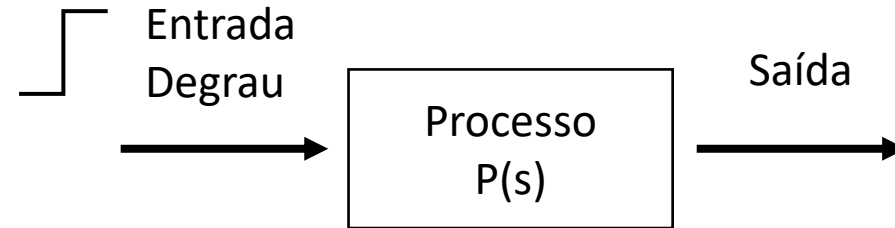
Ziegler-Nichols (ZN) em Malha Aberta

- Na Sintonia na Resposta em Malha Aberta do ZN, uma entrada degrau unitária é aplicada ao processo e a resposta resultante é analisada.
 - L : O tempo de atraso
 - τ : A constante de tempo
 - K : constante do processo

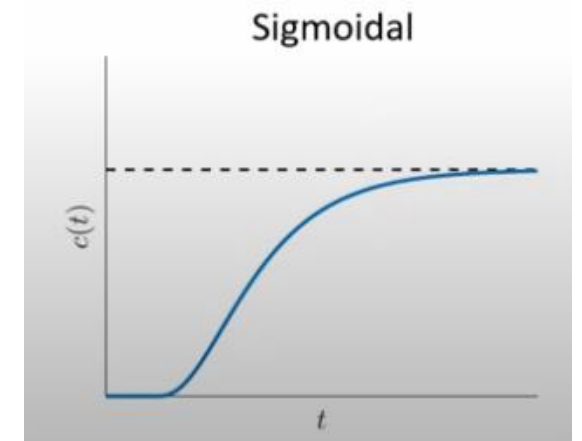
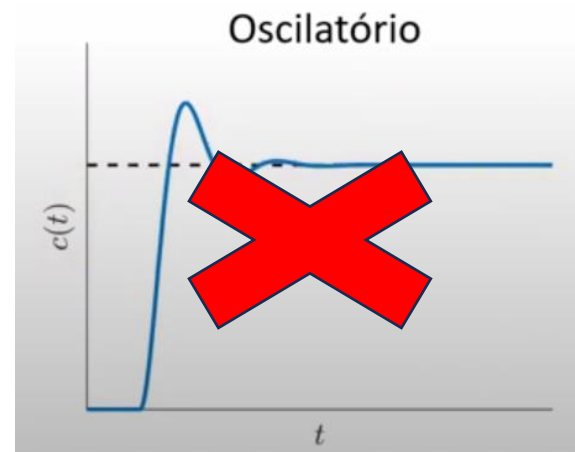
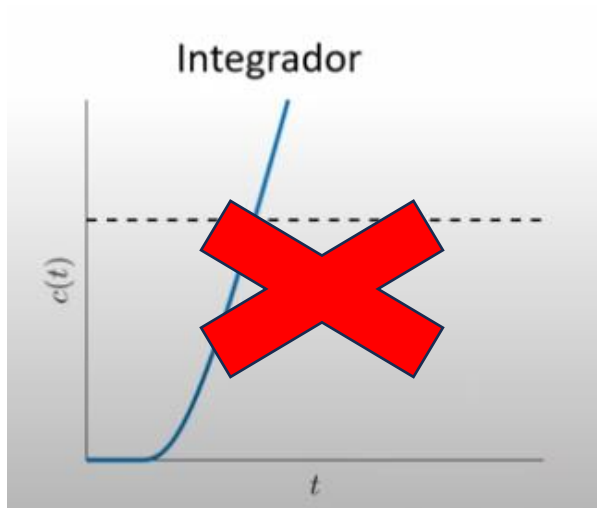


Quando não se conhece o modelo matemático do processo, passa-se uma reta tangente no ponto de inflexão da sua resposta para encontrar os seus parâmetros.

Ziegler-Nichols (ZN) em Malha Aberta



O método ZN em malha aberta serve apenas para quando a saída do processo for sigmoidal.



Método ZN em Malha Aberta

Parâmetros PID do Método ZN em Malha Aberta

Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{\tau}{KL}$	—	—
PI	$\frac{0.9\tau}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	—
PID	$\frac{1.2\tau}{KL}$	$2L$	$0.5L$

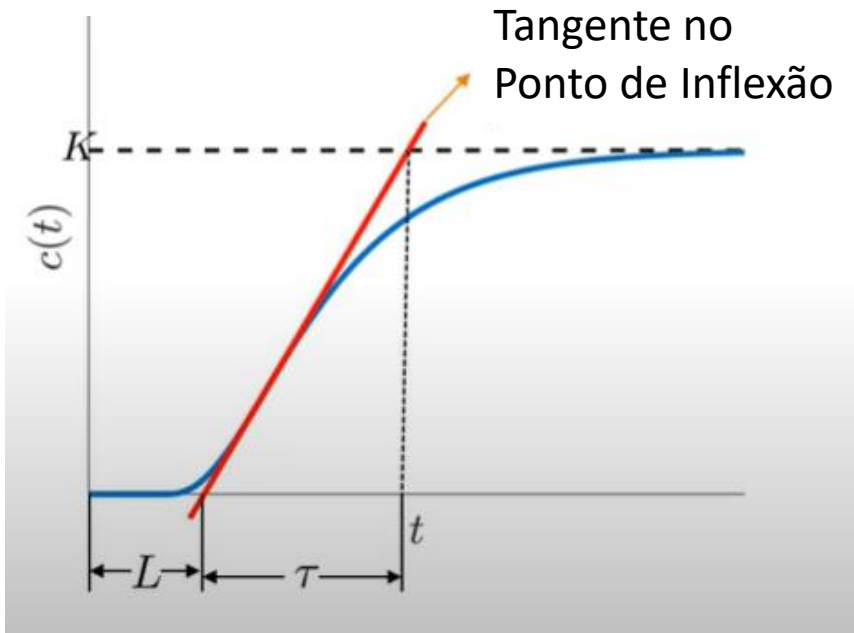
$$\text{PID}_{ISA}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

$$\uparrow K = \frac{1}{K_p} \downarrow \quad \uparrow \tau_i \rightarrow L \uparrow \quad \uparrow \tau_d \rightarrow L \uparrow$$

$$\text{Processo}(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

Bom lembrar que:

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad K_d = K_p \cdot \tau_d$$

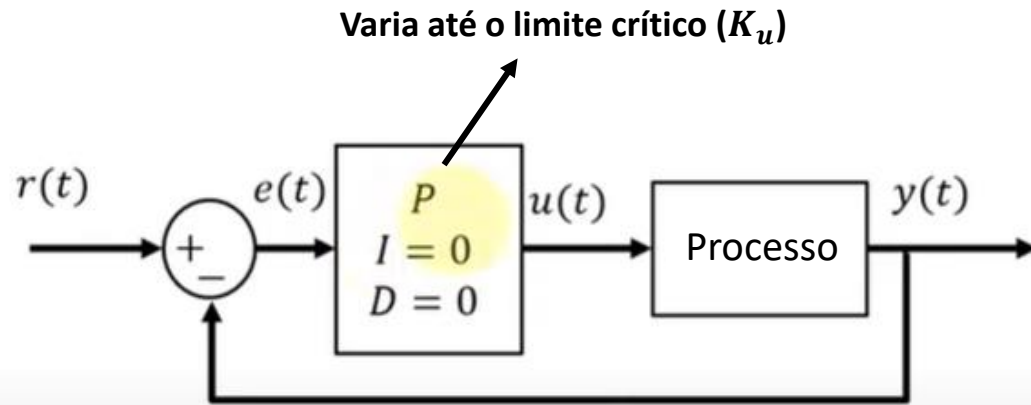


Método ZN em Malha Aberta

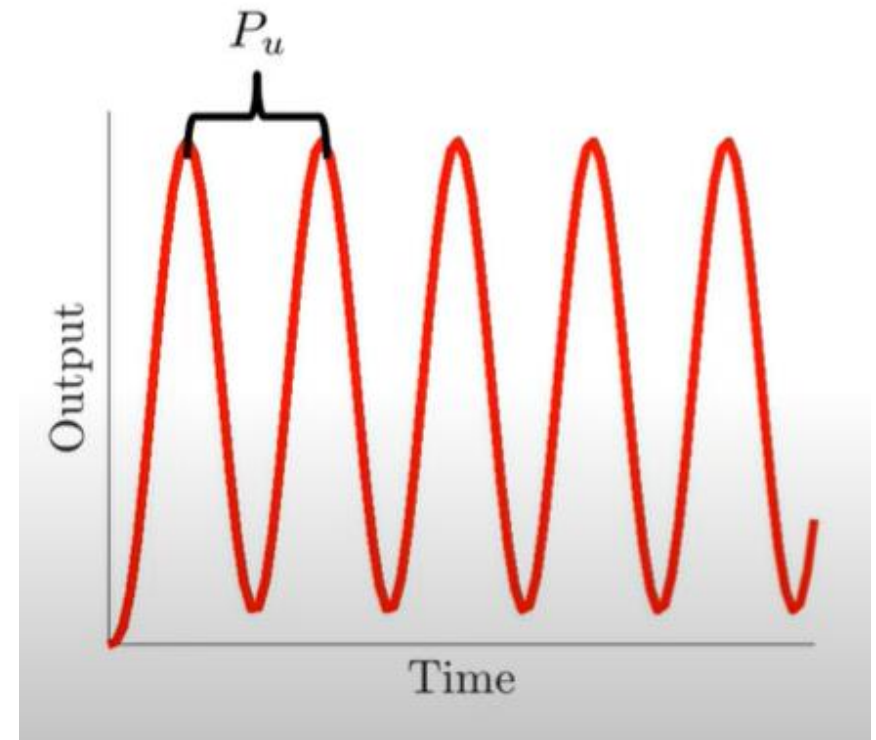
- O método ZN em Malha aberta foi feito para processos industriais, principalmente quando não se sabe o modelo matemático do Processo.
- O método ZN em MA foi feito inicialmente para controladores analógicos.
- O método ZN em MA não garante uma boa performance e muito menos uma boa estabilidade em malha fechada.
- Como a sintonia do método ZN em malha Aberta é muito agressivo, pode-se reduzir K_p pela metade → Afetará as outras constantes (K_i e K_d), caso use o PID ISA. Em seguida, faz-se a sintonia manual fina para atingir as necessidades de cada processo.
- Pode-se medir o **fator de controlabilidade** através da seguinte equação: $\frac{L}{\tau}$
 - $0.1 \leq L/\tau \leq 0.3$ (alguns autores estima-o até 1.4).

Método ZN em Malha Fechada

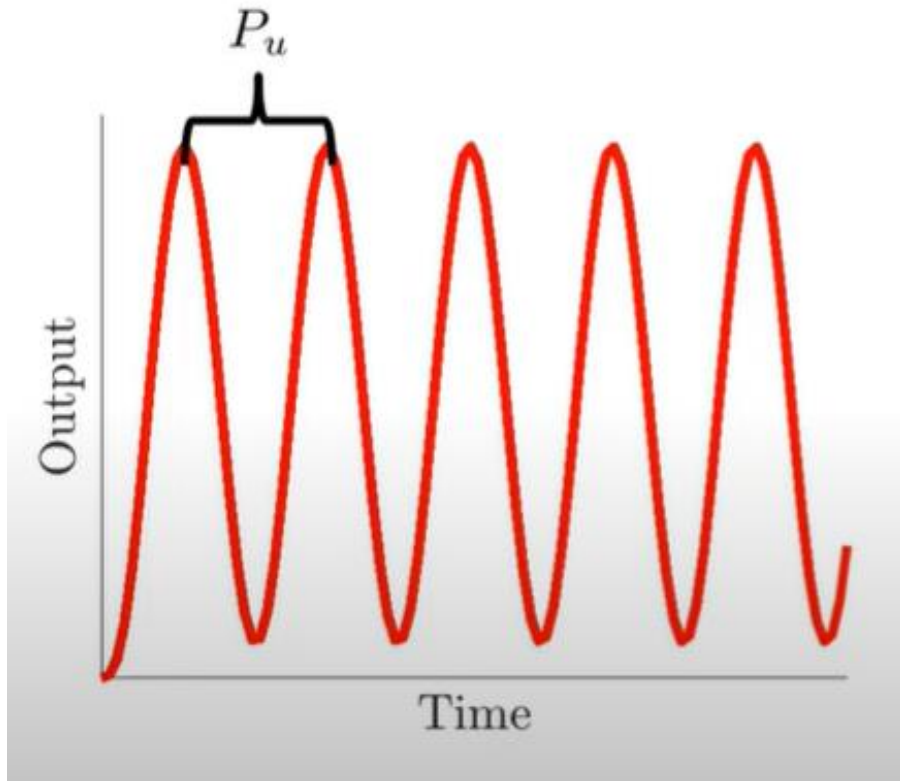
- O processo é submetido a uma entrada degrau, mas neste caso, a ação proporcional é aumentada até o limite crítico onde o processo fica instável.
- Quando o processo atinge a instabilidade, é possível encontrar o Valor Proporcional Crítico (K_u), o Período Crítico (T_u) e Frequência Crítica (W_u).



$$P_u = \frac{2\pi}{W_u}$$



Método ZN em Malha Fechada

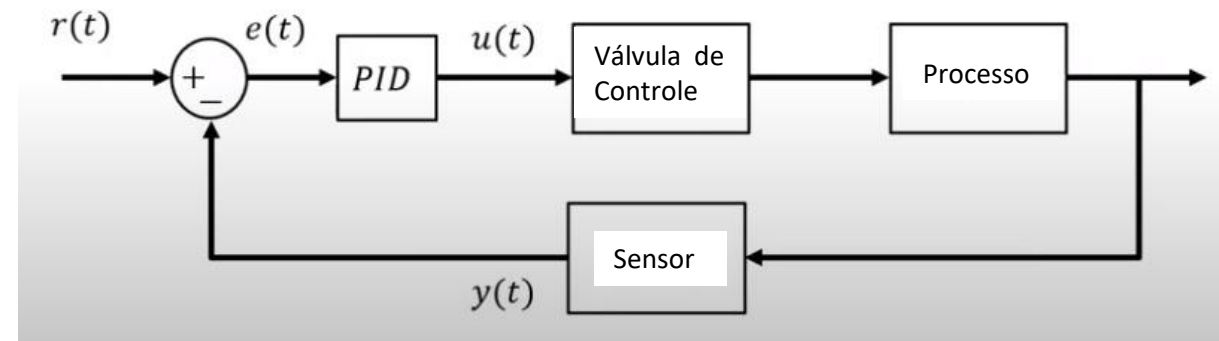


Processo Levado até à instabilidade (K_u)

Constantes da Sintonia do Método ZN em MF

Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.5K_u$	∞	0
PI	$0.45K_u$	$\frac{P_u}{1.2}$	0
PID	$0.6K_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

$$PID_{ISA}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad K_d = K_p \cdot \tau_d$$

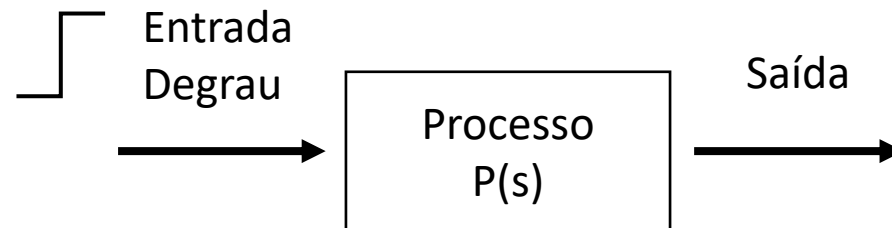


Método ZN em Malha Fechada

- O método de sintonia de ZN em MF, assim como no Malha Aberta, é usado para quando não se sabe a Função de Transferência do Processo.
- O método de ZN em MF funciona melhor para sistemas com dinâmicas mais complexas, como aqueles de terceira ordem ou superior, ou sistemas com atrasos significativos.
- Entretanto, também pode ser aplicado a sistemas de menor ordem, desde que o comportamento oscilatório possa ser induzido.
- É um método de sintonia que a nível industrial pode ser muito perigoso → **por levar o sistema à instabilidade, pode afetar outros processos.**
- Assim como o ZN em MA, o método em Malha Fechada é muito agressivo, recomenda-se que se faça a sintonia fina diminuindo K_p à metade (afeta as outras constantes, caso use o PID ISA).

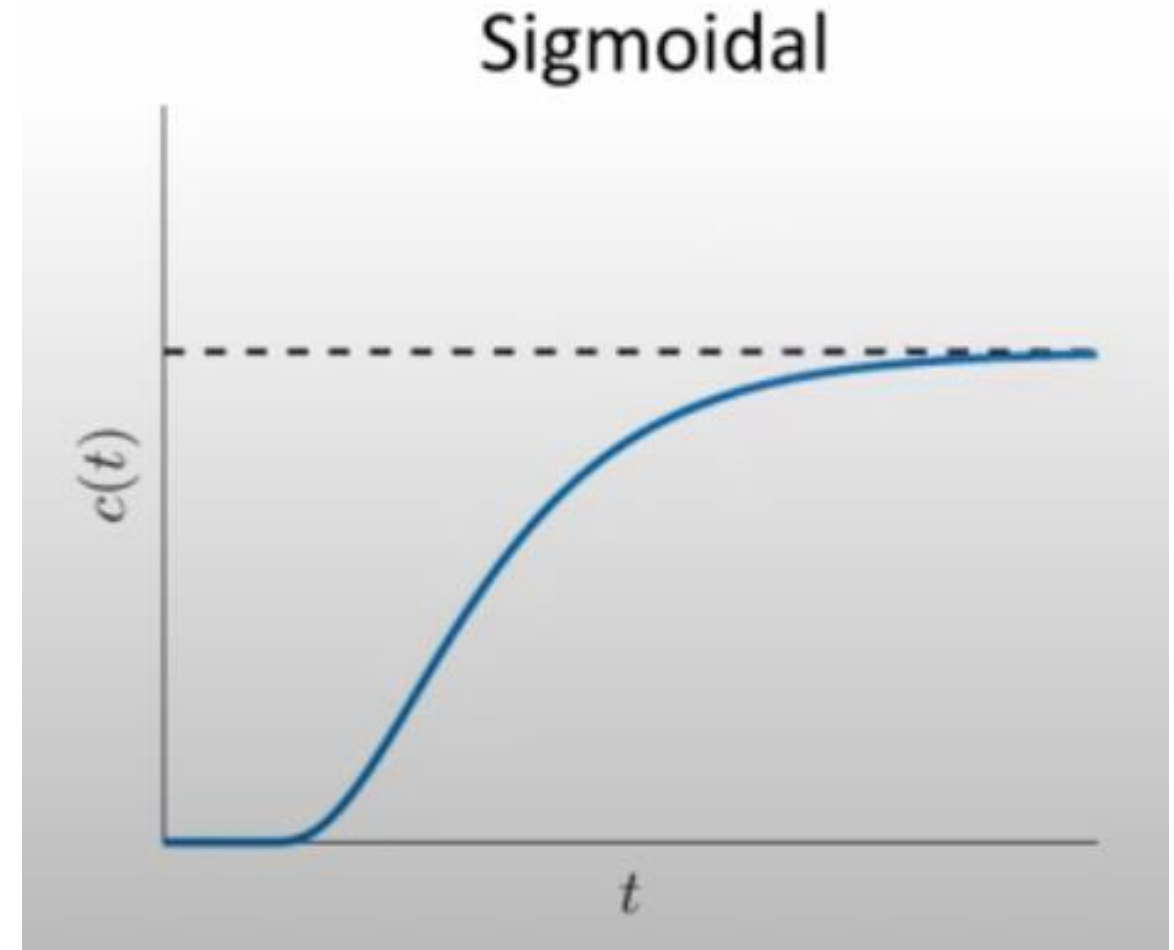
Cohen e Coon (CC)

- **O método de Cohen e Coon (CC)** é outro conjunto clássico de regras empíricas para sintonizar controladores PID, desenvolvido por Morris H. Cohen e George S. Coon em 1953.
- Este método, assim como o de Ziegler-Nichols, baseia-se na resposta do sistema a um degrau em malha aberta, mas utiliza uma abordagem menos agressiva do ZN.
- **Projetado para sistemas com atrasos longos.**

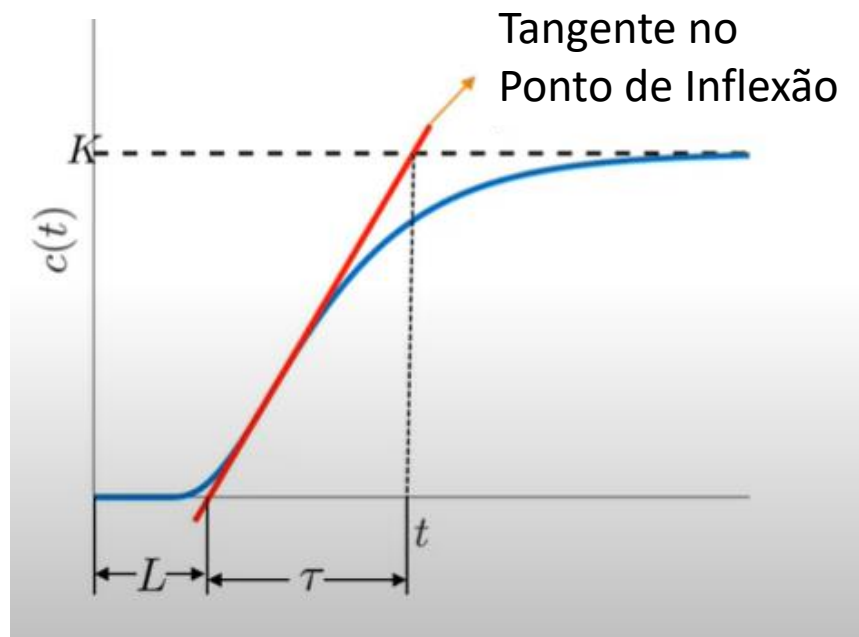


Cohen e Coon (CC)

- O método CC foi desenhado para Processos com atrasos mais elevados, quando o fator de incontrolabilidade (L/τ) é acima de 0.3.
- O método CC apresenta um desempenho em razoável quando os valores de incontrolabilidade estiverem em: $0.6 \leq L/\tau \leq 4.5$.
- Mas o ideal é ser usado para fatores de incontrolabilidade acima de 2.
- O método Cohen-Coon é frequentemente usado em processos com atrasos significativos, e a faixa de $0.6 \leq L/\tau \leq 4.5$ é comumente aceita.
- Para fatores acima de 2, ele tende a ser mais eficaz em relação a outros métodos, como Ziegler-Nichols.
- Assim como o ZN, o método CC só pode ser aplicado quando a resposta degrau em Malha Aberta for sigmoidal.



Cohen e Coon (CC)



$$\text{Processo}(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

Parâmetros PID do Método CC

Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$\left(1.03 + 0.35 \frac{L}{\tau}\right) \frac{\tau}{KL}$	—	—
PI	$\left(0.9 + 0.083 \frac{L}{\tau}\right) \frac{\tau}{KL}$	$\frac{\left(0.9 + 0.083 \frac{L}{\tau}\right) L}{\left(1.27 + 0.6 \frac{L}{\tau}\right)}$	—
PID	$\left(1.35 + 0.25 \frac{L}{\tau}\right) \frac{\tau}{KL}$	$\frac{\left(1.35 + 0.25 \frac{L}{\tau}\right) L}{\left(0.54 + 0.33 \frac{L}{\tau}\right)}$	$\frac{0.5L}{\left(1.35 + 0.25 \frac{L}{\tau}\right)}$

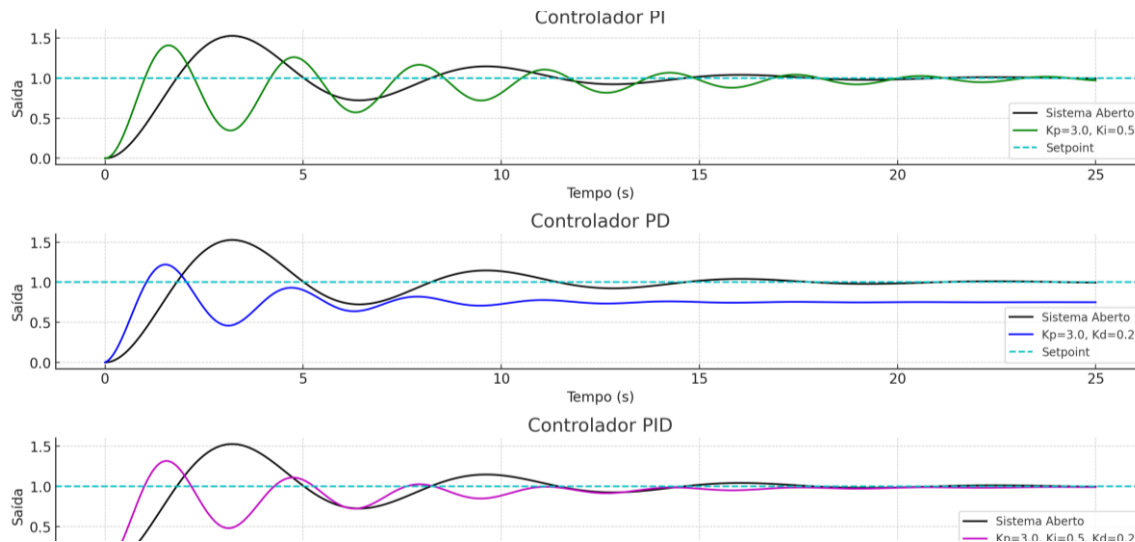
$$\text{PID}_{ISA}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i}$$

$$K_d = K_p \cdot \tau_d$$

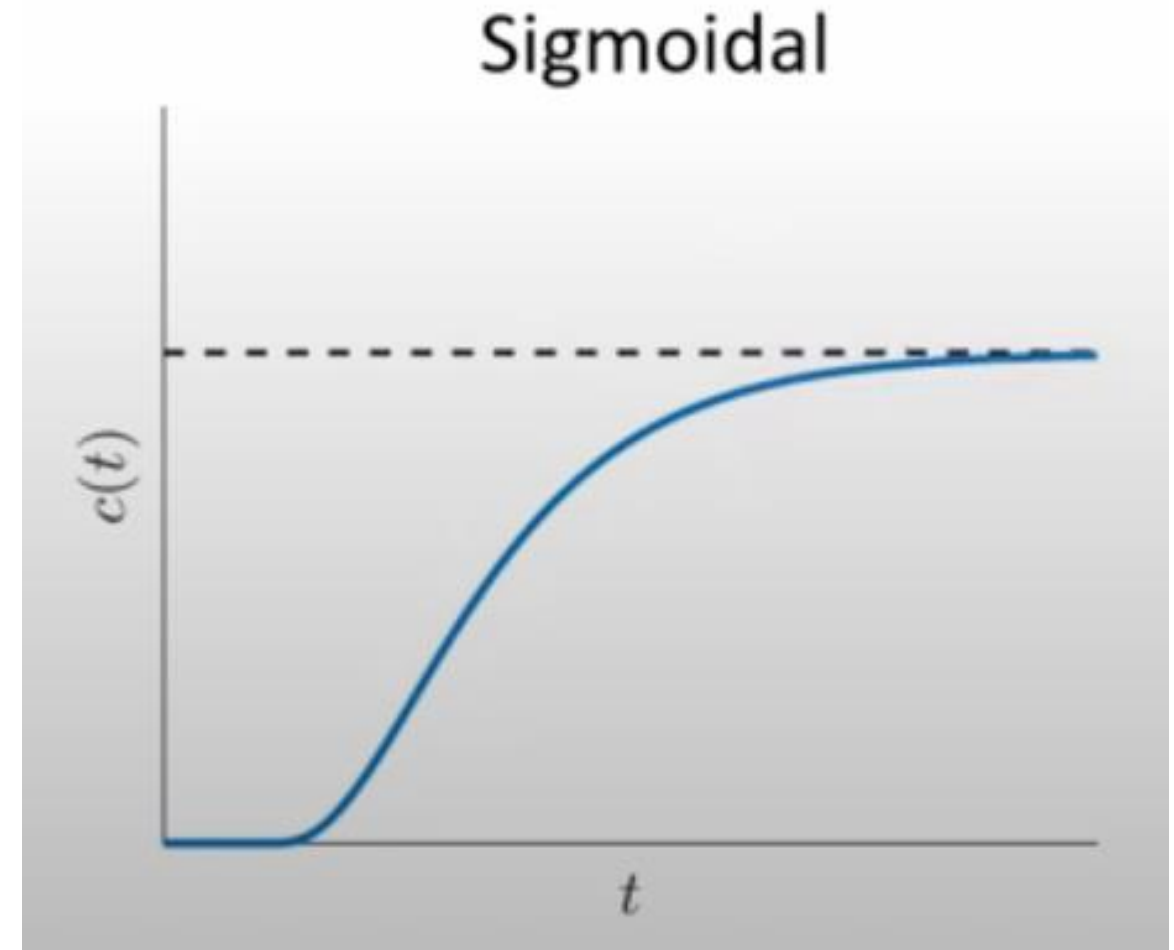
Sintonia Fina

- Embora o método CC seja geralmente menos agressivo que ZN, ele ainda pode exigir ajustes finos após a determinação das constantes do PID, para otimizar o desempenho do controlador.



Chien, Hrones e Reswick (CHR)

- O Método de Chien, Hrones e Reswick (CHR) é baseado no trabalho dos engenheiros T.T. Chien, John G. Hrones e Joseph B. Reswick em 1952.
- O método CHR propõe métodos de sintonia **com 20% sobressinal** e **sem sobressinal**, para tipos de controle **regulatórios** e **servos**, respectivamente quando os **setpoints** são fixos e mudam com o tempo.
- Assim como os métodos ZN em Malha Aberta e CC, o método CHR só pode ser aplicado quando a resposta degrau em Malha Aberta for sigmoidal.



Chien, Hrones e Reswick (CHR)

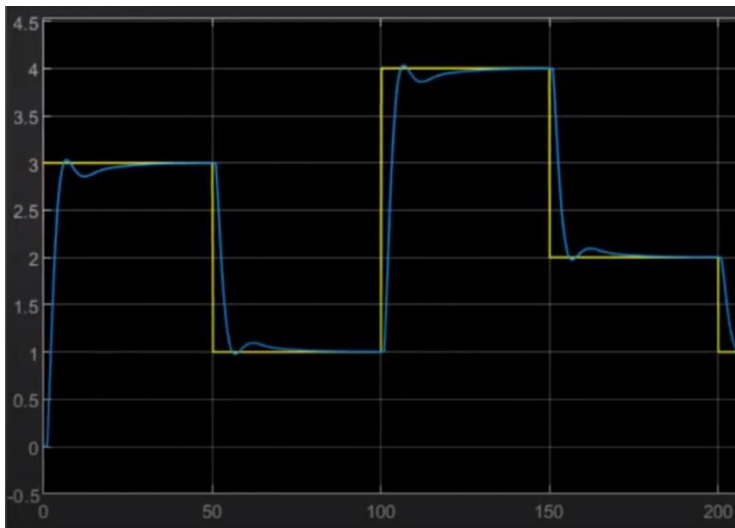
- Comparação do Método CHR com o Ziegler-Nichols.
- Se traça uma curva entre a Constante Proporcional do Controlador (K_p) vezes a Constante Proporcional do Processo (K) em função de uma razão "r" (τ/L).
- Percebe-se que quanto mais a reta é inclinada, mais instável o processo fica.



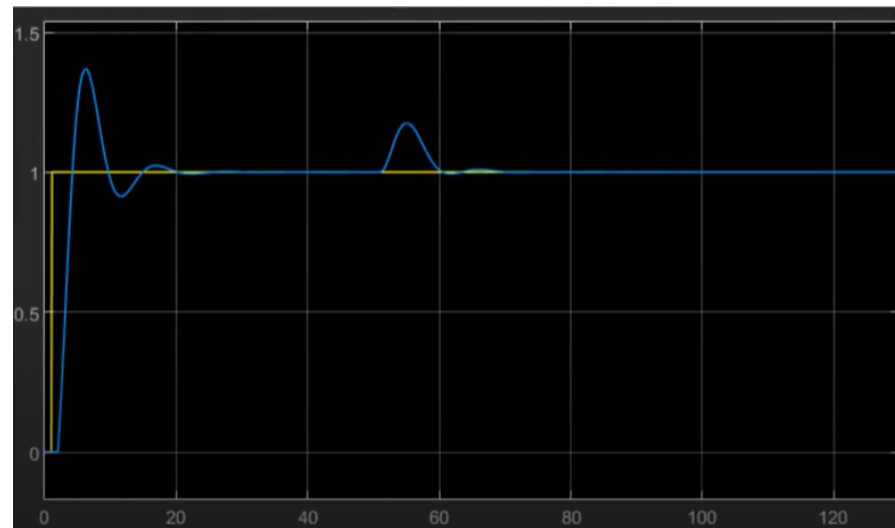
Chien, Hrones e Reswick (CHR)

- O método CHR possui três tipos de sintonias:

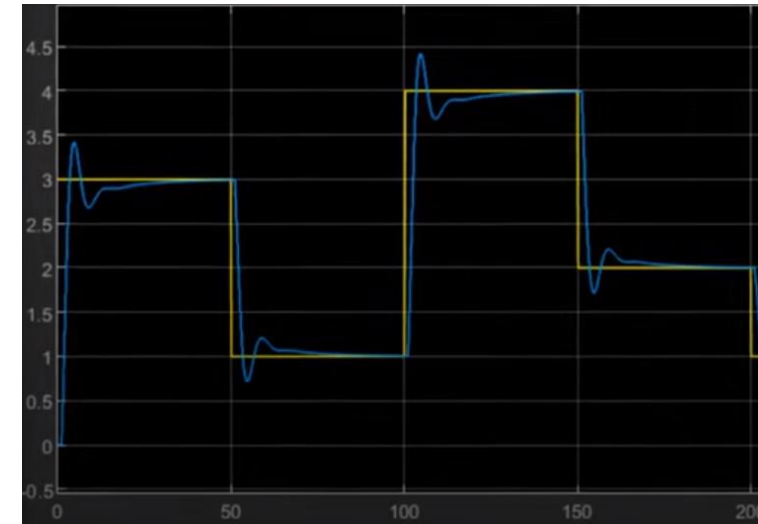
Sem sobressinal (servo – setpoint muda).



Sem sobressinal (regulatório – setpoint não muda).

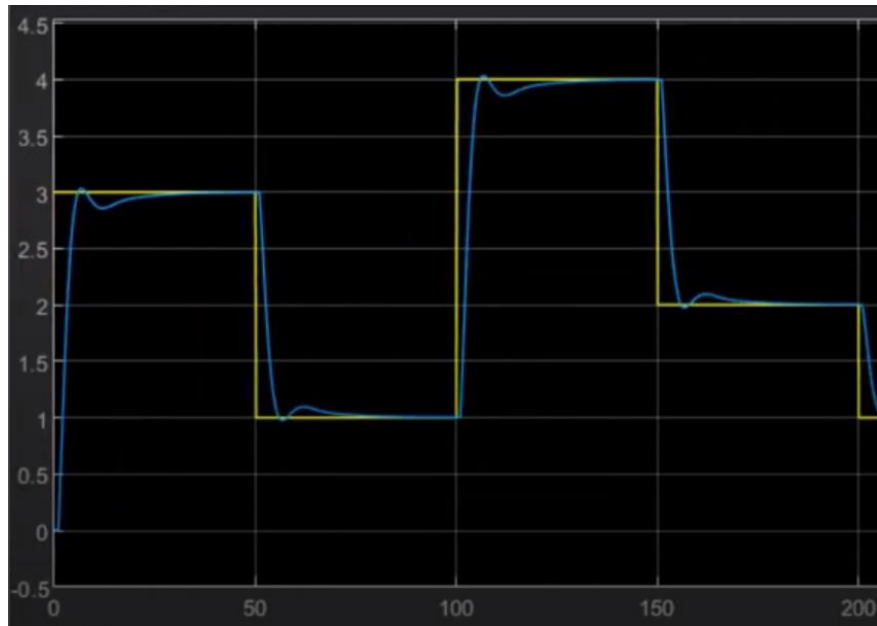


Resposta pápida com sobressinal de 20% (servo – setpoint muda).



Chien, Hrones e Reswick (CHR)

Sem sobressinal (servo)



$$\text{Processo}(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

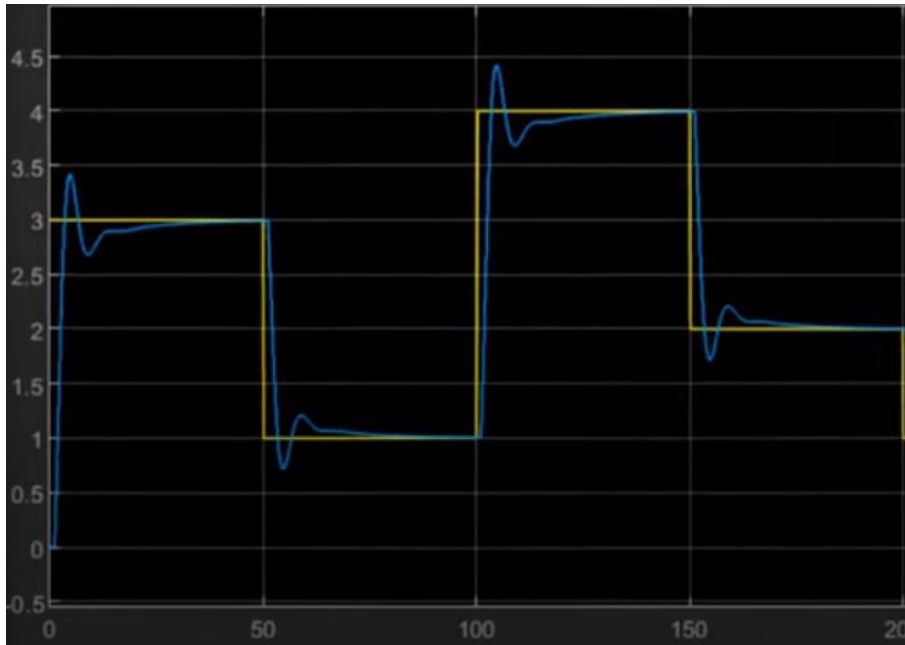
Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.3 \frac{\tau}{KL}$	—	—
PI	$0.35 \frac{\tau}{KL}$	1.16τ	—
PID	$0.6 \frac{\tau}{KL}$	τ	$0.5L$

$$\text{PID}_{ISA}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad K_d = K_p \cdot \tau_d$$

Chien, Hrones e Reswick (CHR)

Resposta mais rápida com sobressinal de 20% (servo).



$$\text{Processo}(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

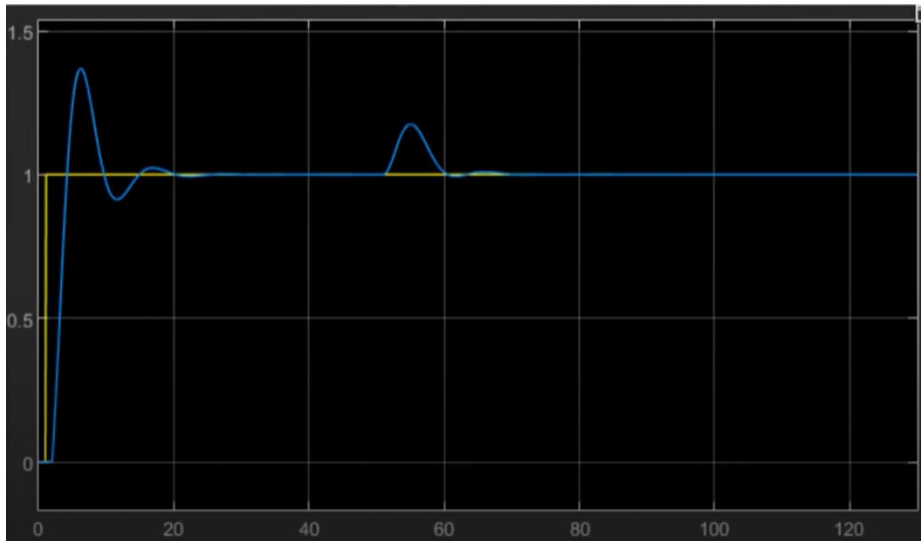
Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.7 \frac{\tau}{KL}$	∞	0
PI	$0.6 \frac{\tau}{KL}$	τ	0
PID	$0.95 \frac{\tau}{KL}$	1.357τ	$0.473L$

$$\text{PID}_{ISA}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad K_d = K_p \cdot \tau_d$$

Chien, Hrones e Reswick (CHR)

Sem sobressinal (regulatório), com perturbação aos 50 segundos.



$$\text{Processo}(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

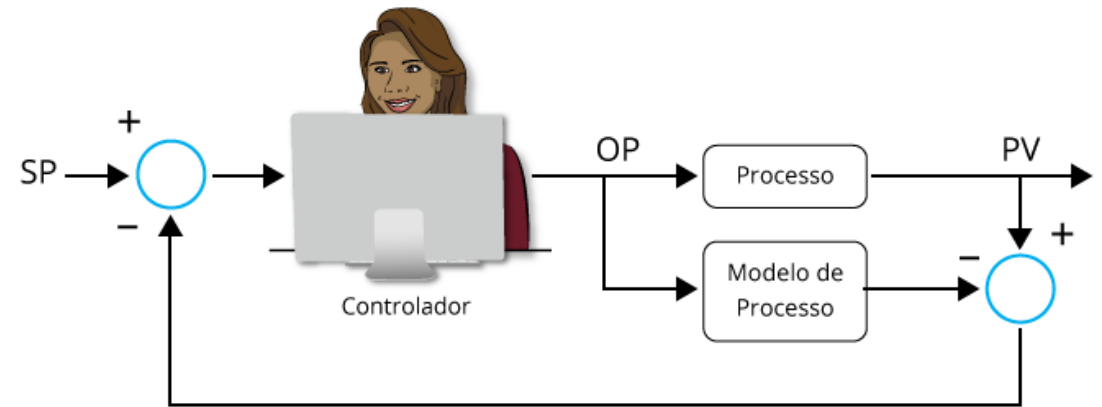
Controle	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.3 \frac{\tau}{KL}$	∞	0
PI	$0.6 \frac{\tau}{KL}$	$4L$	0
PID	$0.95 \frac{\tau}{KL}$	$2.375L$	$0.421L$

$$\text{PID}_{ISA}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \quad K_d = K_p \cdot \tau_d$$

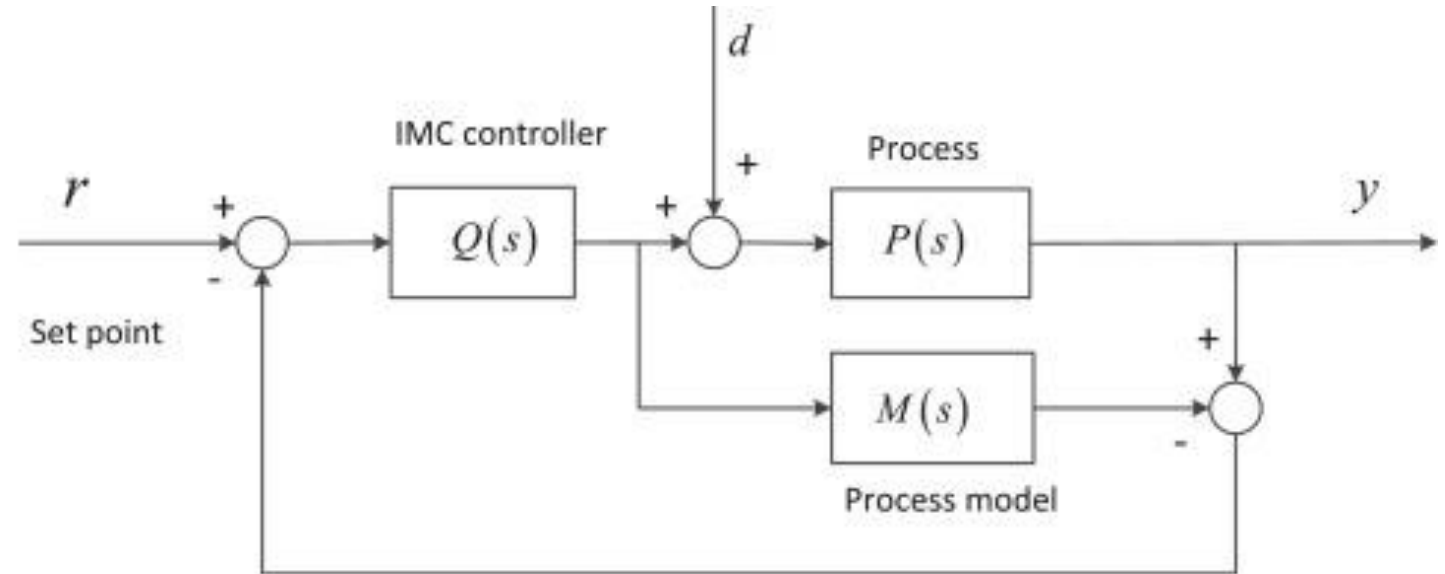
Métodos de Sintonia Baseados em Modelo Interno de Controle (IMC)

- O IMC é uma estratégia de controle baseada no uso de um modelo matemático do sistema para prever seu comportamento e melhorar a ação de controle.
 - **Modelo Interno:** Representa o processo real que se deseja controlar. O modelo é utilizado para prever a resposta do processo e auxiliar na determinação da ação de controle.
 - **Controlador IMC:** Gera o sinal de controle comparando a saída real com a saída prevista pelo modelo interno e ajustando a ação de controle para minimizar o erro entre a saída real e a desejada.
 - **Processo Real:** O sistema real a ser controlado. A saída do processo é comparada com a saída desejada, e o controlador IMC ajusta a ação de controle para minimizar o erro.



Métodos de Sintonia Baseados em IMC

- A abordagem IMC tem várias vantagens, como:
 - **Robustez:** O IMC é projetado para ser robusto a incertezas no modelo e perturbações.
 - **Rejeição de Perturbações:** O IMC pode ser projetado para rejeitar perturbações de forma eficaz.
 - **Facilidade de Design:** Uma vez que um modelo é conhecido, o design do controlador IMC pode ser mais direto do que métodos convencionais.



É importante observar que a eficácia do IMC depende da precisão do modelo interno.

Métodos de Sintonia Baseados em IMC

- No contexto do Internal Model Control (IMC), o termo *lambda* (λ) refere-se ao parâmetro de ajuste que determina a rapidez e robustez da resposta do controlador.
- Esse parâmetro é fundamental na formulação do controlador IMC e influencia diretamente o desempenho do sistema de controle.
- Aqui estão alguns pontos-chave sobre *lambda* no IMC:
 - **Sintonização do Controlador:** Um valor menor de λ resulta em uma resposta mais rápida, enquanto um valor maior de λ produz uma resposta mais lenta, mas estável.
 - **Robustez:** Um valor maior de λ geralmente torna o sistema mais robusto a incertezas no modelo e perturbações, enquanto um valor menor de λ pode tornar o sistema mais sensível a essas incertezas.
 - **Escolha de λ :** A escolha apropriada de λ é essencial para equilibrar o desempenho e a robustez do sistema de controle.

IMC, Luyben 2001

- Um dos métodos de Sintonia Baseado em IMC é o Luyben, 2001, feito para Processos de Primeira Ordem com Tempo Morto (FOPDT – *First Order Process Plus Dead Time*).

$$P(s) = \frac{K e^{-Ls}}{\tau s + 1}$$

- Os tipos de controladores PID utilizados por Luyben (2001) incluem a configuração **ISA** e a configuração **em Série** com **filtragem na ação derivativa**, que é usada para atenuar ruídos e melhorar o desempenho do controlador em sistemas reais.

$$PID_{ISA_FD}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{\frac{\tau_d s}{N} + 1} \right)$$

$$PID_{Série_FD}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{\tau_d s + 1}{\frac{\tau_d s}{N} + 1} \right)$$

IMC, Luyben 2001

- O método de Luyben, 2001, também usa outro tipo de Controlador PID.

$$PID(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \left(\frac{1}{\tau_f s + 1} \right), \text{ onde } \tau_f = \frac{\lambda L}{2(\lambda + L)}$$

Controle	K_p	τ_i	τ_d	Sugestão de Desempenho
PI	$\frac{2\tau + L}{2K\lambda}$	$\tau + \frac{L}{2}$	—	$\lambda = \max(1.7L, 0.2\tau)$
PID	$\frac{2\tau + L}{2K(\lambda + L)}$	$\tau + \frac{L}{2}$	$\frac{\tau L}{2\tau + L}$	$\lambda = \max(0.25L, 0.2\tau)$

Neste caso, apenas λ varia

IMC, Skogestad 2004

- Outro método de Sintonia apresentado foi Skogestad, 2004, usando controladores PID em série com Ponderação de Referência e Filtragem na ação derivativa.

$$PID_{Série_PD}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(SP(s) - \frac{\tau_d s + 1}{\tau_f s + 1} Y(s) \right)$$

- Recomendado: $\tau_f = 0.01\tau_d$ ($\tau_f = \frac{\tau_d}{N}$, ou seja, $N = 100$) e $\lambda = L$ (garante robustez e desempenho).
- Caso o desempenho não estiver adequado, aumentar λ .
- Para processos ruidosos: aumentar τ_f até $0.5L$, eliminar τ_d e aumentar λ .

IMC, Skogestad 2004

Modelo de Processo	K_p	τ_i	τ_d
$\frac{Ke^{-Ls}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K(\lambda + L)}$	$\min(\tau, 4(\lambda + L))$	—
$\frac{Ke^{-Ls}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1}{K(\lambda + L)}$	$\min(\tau_1, 4(\lambda + L))$	τ_2
Ke^{-Ls}	0	0^e	—
$\frac{K}{s}e^{-Ls}$	$\frac{1}{K(\lambda + L)}$	$4(\lambda + L)$	—
$\frac{Ke^{-Ls}}{s(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{K(\lambda + L)}$	$4(\lambda + L)$	τ_2

Conclusões

- Nesta aula, foram apresentados diversos métodos de sintonia para controladores PID.
- Métodos tradicionais, como **ZN**, **CC** e **CHR**, são usados quando o modelo do processo é desconhecido e a resposta em malha aberta é sigmoidal.
- Já os métodos baseados no **IMC** são aplicados quando há uma modelagem precisa do processo.
- Mesmo após a aplicação desses métodos, ajustes manuais podem ser necessários para atender às demandas específicas de cada processo.

DÚVIDAS?

Exercícios

Parte 1: Processo de Primeira Ordem com Atraso

1. **Criação do Modelo:** No Simulink, modele um processo de primeira ordem com atraso usando os blocos apropriados. Defina os parâmetros τ (constante de tempo), K (ganho do processo) e L (atraso).
2. **Identificação de Parâmetros:** Apesar de conhecer os parâmetros, aplique uma entrada degrau em malha aberta e utilize a técnica da reta tangencial para identificar visualmente τ , K , e L a partir da resposta ao degrau do processo.

Parte 2: Processo de Segunda Ordem com Atraso

1. **Criação do Modelo:** Modele um processo de segunda ordem, configurando os parâmetros de amortecimento, frequência natural e atraso.
2. **Identificação de Parâmetros:** Semelhante ao processo de primeira ordem, aplique uma entrada degrau em malha aberta. Verifique se a sua saída é sigmoideal. Caso positivo, utilize uma reta tangencial na resposta ao degrau para estimar os parâmetros (τ , K , e L) que serão usados nos métodos de sintonia tradicionais.

Parte 3: Controle em Malha Fechada

1. **Configuração do Controlador:** Implemente um controlador PID em malha fechada para ambos os processos.
2. **Aplicação de Entrada:** Aplique uma entrada degrau ao sistema e observe a resposta.
3. **Sintonia do Controlador:** Utilize métodos de sintonia tradicionais (ZN, CC, CHR) e métodos baseados em modelo (Luyben 2001 e Skogestad 2004) para ajustar os parâmetros do PID.

Parte 4: Análise e Comparação

1. **Aplicabilidade dos Métodos de Sintonia:** Avalie se os métodos tradicionais de sintonia (como ZN, CC e CHR) podem ser aplicados adequadamente aos processos de segunda ordem, assim como o método de Luyben (2001).
2. **Comparação de Desempenho:** Registre e compare as saídas dos processos controlados utilizando as diferentes técnicas de sintonia. Analise qual método oferece o melhor desempenho em termos de rapidez, estabilidade e robustez.