



Departamento de Engenharia Química e de Petróleo – UFF

Sintonia de malhas de controle

Profª Ninoska Bojorge

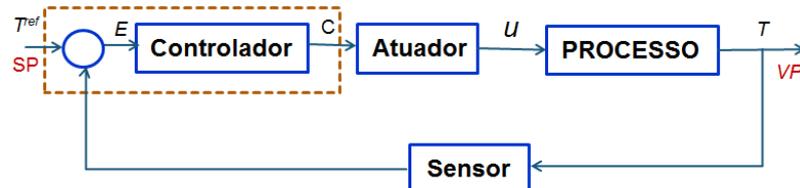
Disciplina: TEQ102- CONTROLE DE PROCESSOS

Malha de Controle Feedback

2

Controlador

- Objetivo: manter variáveis do processo em valores pré-determinados (setpoints);
- Implementa um algoritmo de controle:
 - Recebe medida do sensor;
 - Compara com a referência;
 - Calcula sinal de correção, com base em algoritmo pré-definido;
 - Envia sinal de ajuste para o atuador.



Controle Liga-Desliga (On-Off)

3

A saída do controlador do controlador on-off:

$$u_{on-off}(t) = \begin{cases} u_{\max} , & se \ e \geq 0 \\ u_{\min} , & se \ e < 0 \end{cases}$$

onde u_{\max} e u_{\min} denota valores de liga e desliga, respetivamente.

O controlador On-off pode ser considerado um caso especial do controlador P com um ganho do controlador muito alto.

Controle Liga-Desliga (On-Off)

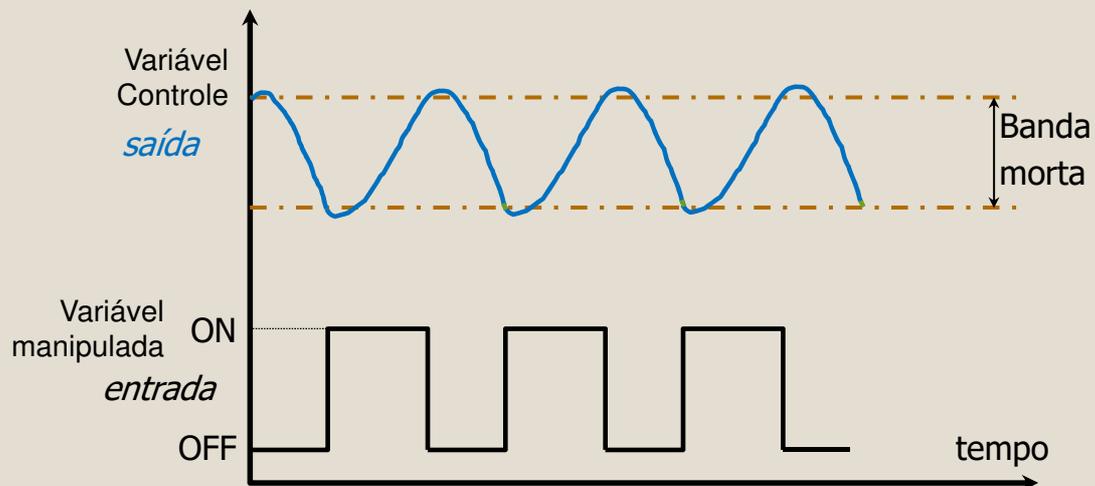
4

A saída do controlador do controlador on-off:

- **Vantagem** : Controladores Simples e baratos.
- **Desvantagens**
 - Não versátil e ineficiente em muitos casos.
 - Ciclo contínuo da variável controlada e com o tempo há desgaste do elemento final de controle.
- **Uso** : Termostatos no sistema de aquecimento.
Refrigerador doméstico.
Aplicações industriais não-críticas

Controle Liga-Desliga (On-Off)

5



Controle liga / desliga com intervalo diferencial ou zona morta.

Controle Realimentado: Algoritmo de controle PID

6

- ❖ PID é o controlador que tem os três modos básicos de controle Proporcional (**P**), Integral(**I**), e Derivativo(**D**).
- ❖ Controladores PID são ainda amplamente utilizados na indústria devido à sua simplicidade, robustez e sucesso em aplicações práticas.
- ❖ Apesar do desenvolvimento de vários algoritmos de controle avançado, mais do 90% dos controladores no campo industrial são controlador PID.

Controle Realimentado: Algoritmo de controle PID

7

- O controle PID calcula inicialmente o erro entre a variável controlada (medida no processo) e seu valor desejado (*setpoint*) e em função deste erro gera uma sinal de controle, visando eliminar este desvio.
- O algoritmo PID usa o erro em três módulos distintos para produzir a sua saída ou variável manipulada.
- Principais tipos de estratégias são:
 - ▶ Controlador Proporcional (P)
 - ▶ Controle Proporcional e integral (PI)
 - ▶ Controle Proporcional e Derivativo (PD)
 - ▶ Controle Proporcional Integral e Derivativo (PID)

Controle Realimentado: Algoritmo de controle PID

8

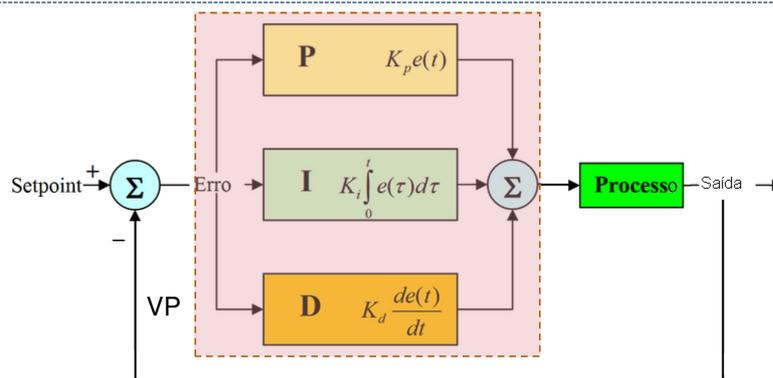


Diagrama de Bloco da malha de controle PID

VP : Variável do processo, valor medido de alguma propriedade física. Na configuração do tanque, esta é o nível medido a partir do LT.

Erro (e): diferença algébrica entre a variável do processo e o valor de referência (SP). Este é o erro da malha de controle, e é igual a zero quando a variável do processo é igual ao *setpoint* (valor desejado).

A / D: conversor analógico-digital (ADC). Ele transforma o valor analógico em sua representação digital.

D / A: conversor analógico para digital (DAC). Transforma o valor digital em sinal analógico.

Saída de Controle: A produção do controlador PID, que é normalmente um valor entre 0% e 100%. Este sinal controla a quantidade de energia para dissipar no LT.

Controle Proporcional (P)

9

Neste tipo de ação o sinal de controle aplicado a cada instante à planta é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro.

$$u(t) = u_0 + K_c e(t) \quad (1)$$

onde

$u(t)$: ação corretiva ou sinal de controle

u_0 : constante que representa o valor do sinal de controle quando o desvio é nulo (*Bias*)

K_c : ganho proporcional do controlador (parâmetro de sintonia a ser selecionado)

$e(t)$: erro ou desvio, ou seja, a diferença entre o setpoint e o valor medido de VC

Controle Proporcional (P)

10

Outra forma de sintonizar um controlador proporcional é através da banda proporcional

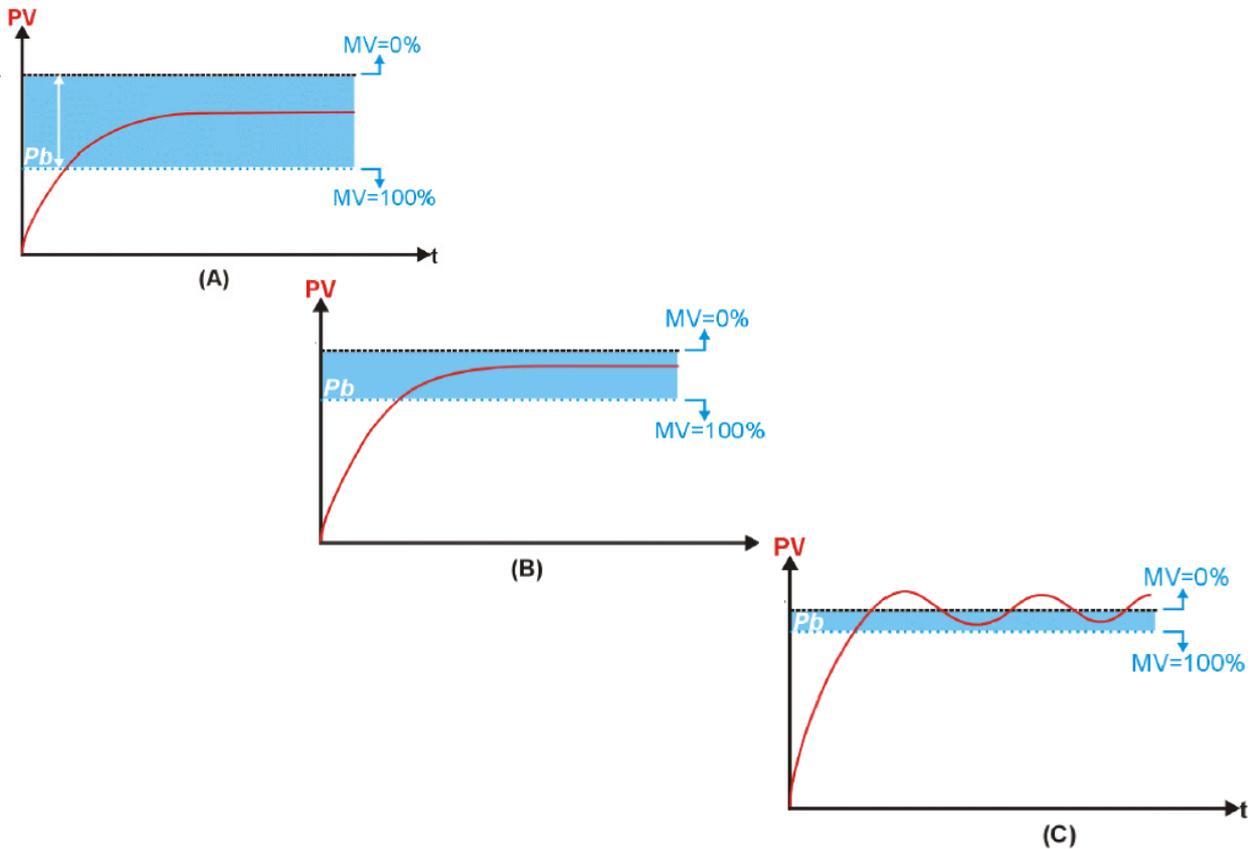
$$BP = \frac{100\%}{K_c} \quad (2)$$

Assim, se em um dado instante, o valor da saída do processo será:

menor (**maior**) que o valor da referência, i.e, $e(t) > 0$, ($e(t) < 0$)

De modo que,

o controle a ser aplicado será positivo (negativo) e proporcional ao módulo de $e(t)$.

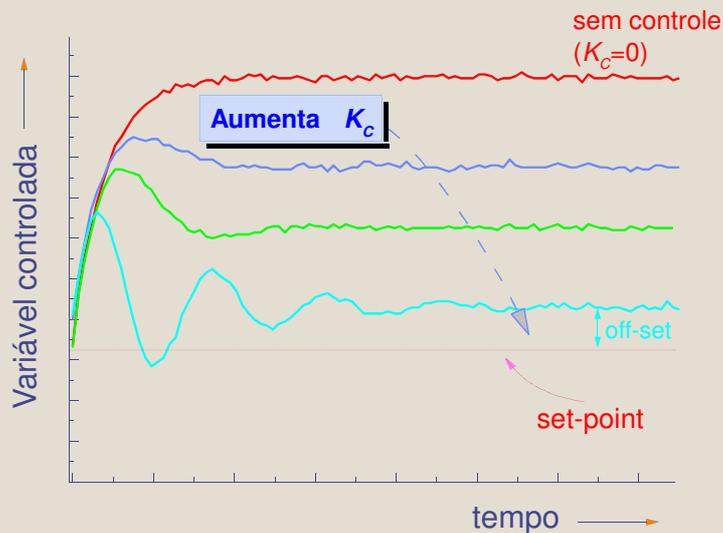


Efeito da redução do PB no comportamento da PV

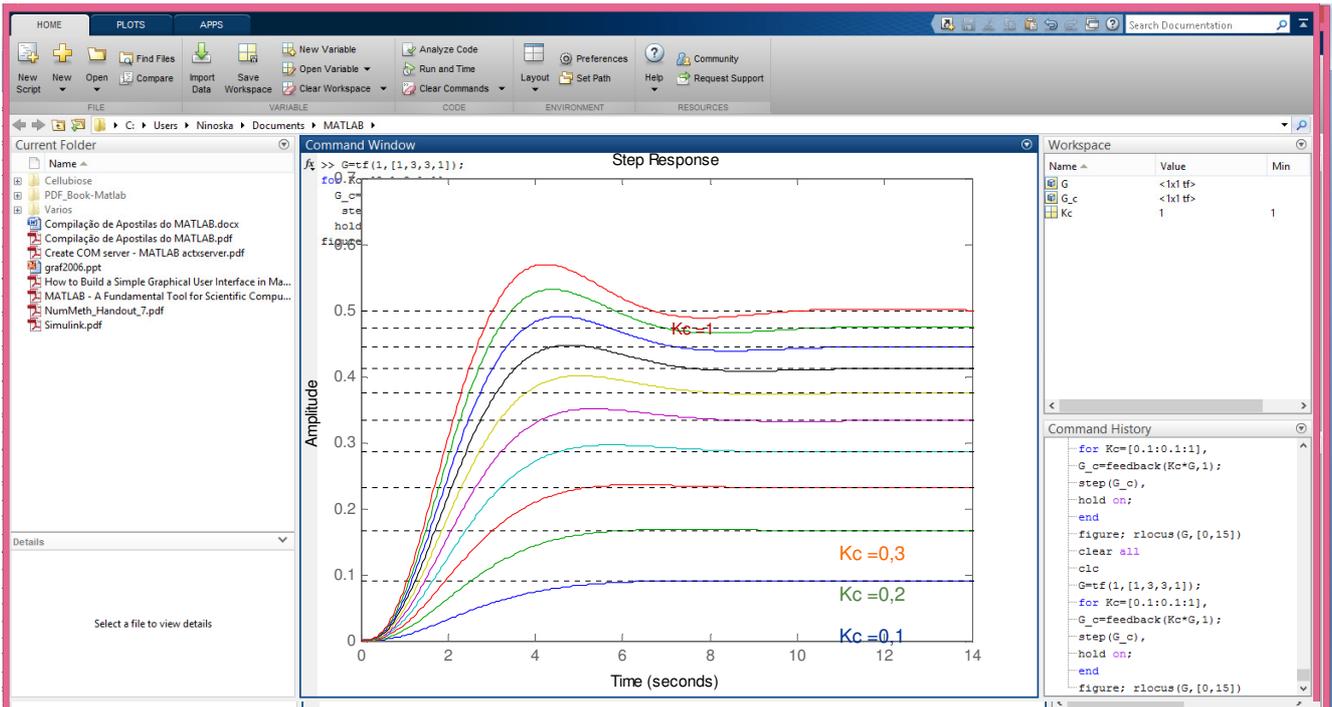
Controle Proporcional (P)

12

Uma característica do controle proporcional é não conseguir manter a VC no *setpoint*, pois este não consegue eliminar um desvio em regime permanente (*offset*).



Ação proporcional: $K_C=1$ (azul), $K_C=2$ (verde), $K_C=4$ (turquesa)

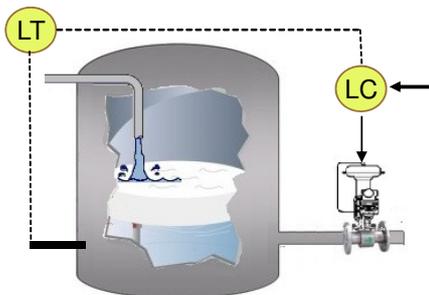


Controle Proporcional (P)

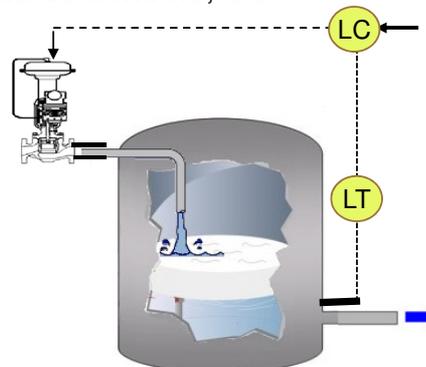
Modo de Ação do controlador

A ação do controlador deve ser escolhida em função do processo para que o controlador funcione adequadamente.

- **Ação direta:** Quando a PV \uparrow , então, a saída do controle, SC \uparrow .
- **Ação reversa:** Quando a PV \uparrow , então, a saída do controle, SC \downarrow



Controlador de ação **Direta** $K_c < 0$
 Se PV \uparrow então a SC \uparrow ,
abre a válvula



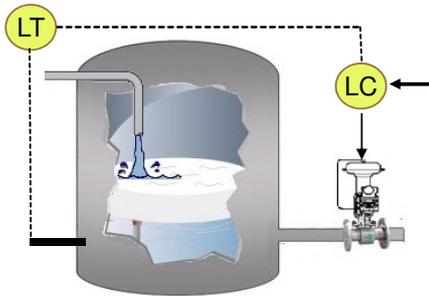
Controlador de ação **Reversa** $K_c > 0$
 Se PV \uparrow então a SC \downarrow ,
fecha a válvula

Controle Proporcional (P)

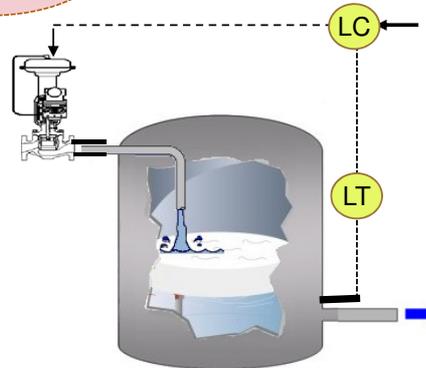
15

Modo de Ação do controlador

Outros exemplos sobre modo de ação de controle:
Recomendo ver aula 12 Malha de Controle Convencional



Controlador de ação **Direta** $K_c < 0$
Se PV \uparrow então a SC \uparrow ,
abre a válvula



Controlador de ação **Reversa** $K_c > 0$
Se PV \uparrow então a SC \downarrow ,
fecha a válvula

Controle Proporcional Integral

16

- A ação integral corresponde o sinal de correção depende da integral do desvio, seu efeito corresponde a um somatório do valor do desvio de forma a eliminar o *offset*
- É sempre empregada associada à ação proporcional: (P + I).

$$u(t) = u_0 + K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt \quad (3)$$

onde

T_i : tempo integral, intervalo de tempo onde, a ação integral é incrementada do valor do desvio (s, repetições por segundo),

reset-time = $1/T_i$ (repetições por segundo ou min.)

$\int e(t) dt$: Integral do desvio, somatório dos valores de desvio

Ação Integral

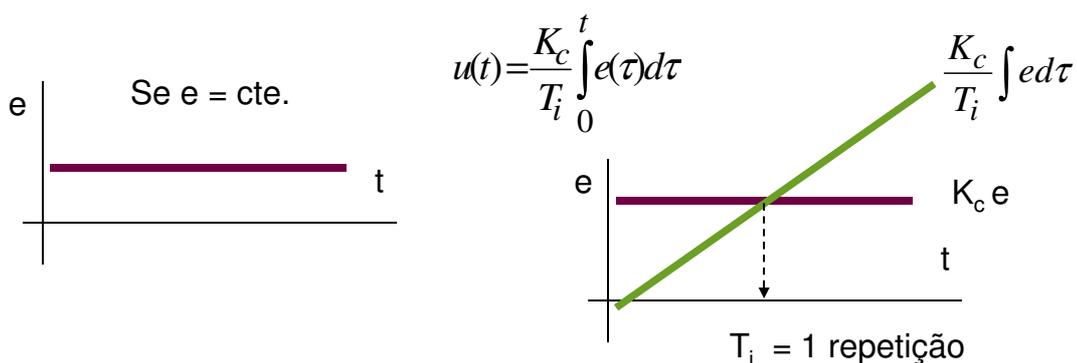
17

A ação integral funciona da seguinte maneira:

- ▶ A intervalos regulares, a ação integral corrige o valor da MV, somando a esta o valor do desvio (SP- PV).
- ▶ Este intervalo de atuação se chama *tempo Integral*, que pode também ser expresso por seu inverso, chamado de *taxa integral (Ir)*.
- ▶ O aumento da *taxa integral – Ir –* aumenta a atuação do integral no controle de processo.

Ação Integral

18



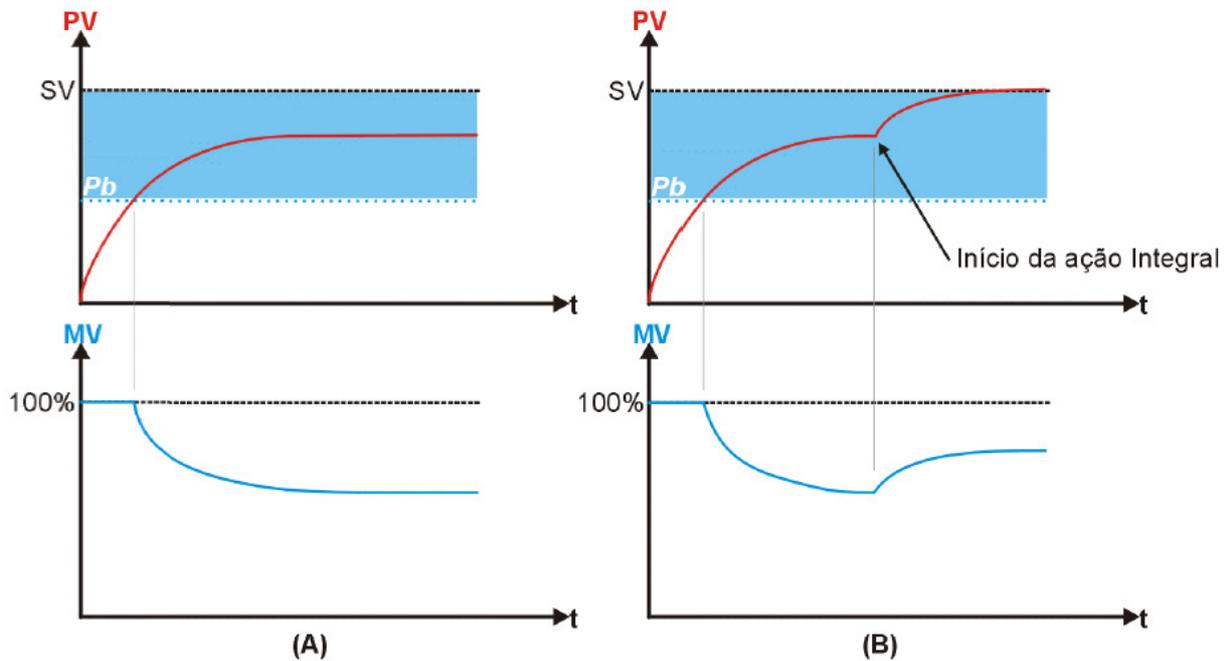
T_i tempo que tarda a ação integral em igualar à ação proporcional (uma repetição) se $e = \text{cte.}$

$$\frac{K_c}{T_i} \int e d\tau = \frac{K_c}{T_i} et = K_c e \Rightarrow t = T_i$$

Controle Integral

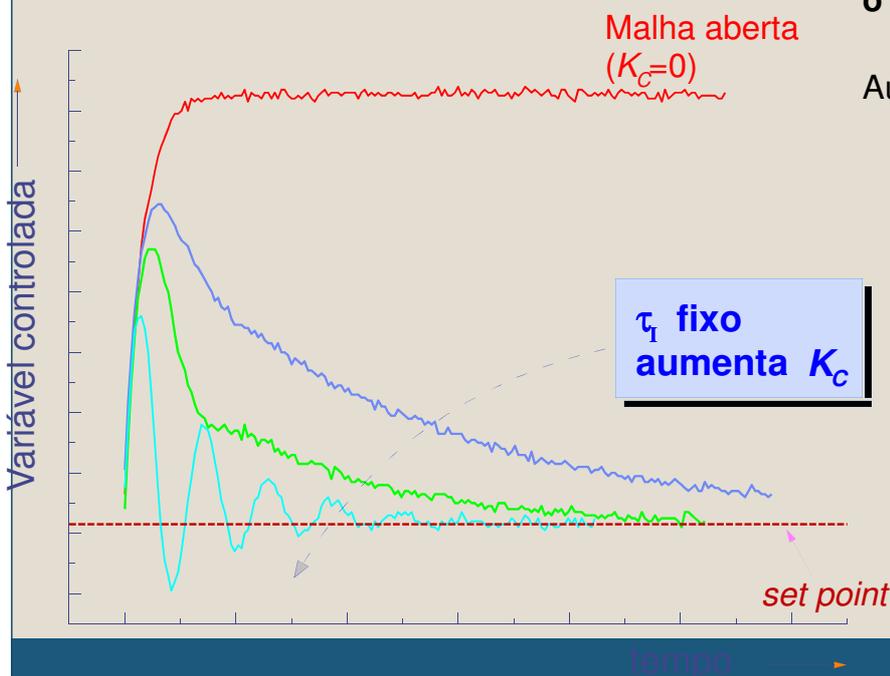
19

Efeito da inclusão da ação Integral



Desempenho do controlador PI

Resposta a uma mudança de perturbação degrau: efeito da K_C



o offset é eliminado

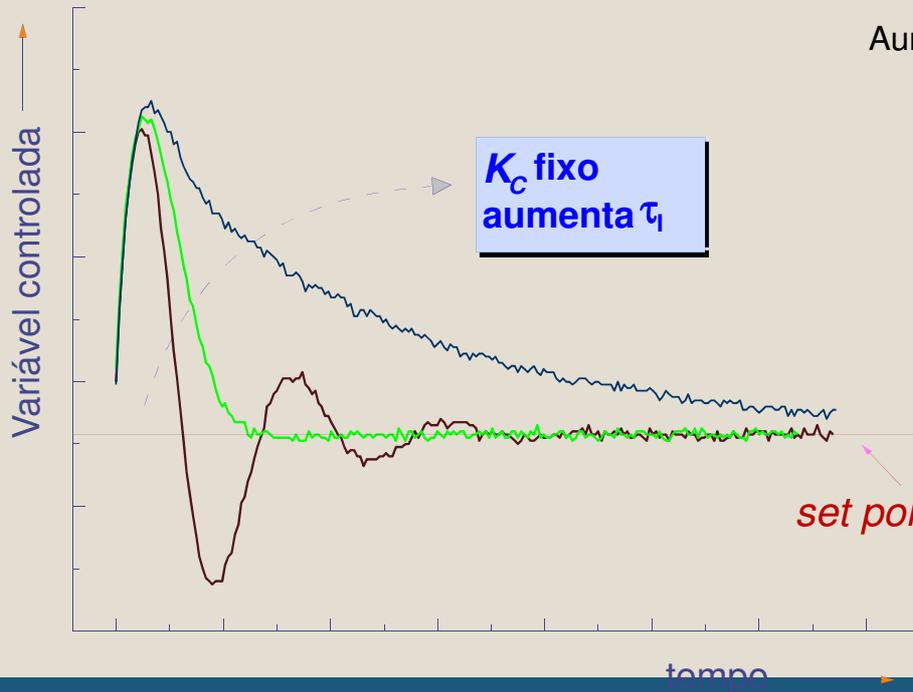
Aumenta K_C :
a resposta do processo é acelerada
o sistema pode oscilar

CUIDADO

Para grandes valores do ganho de controle, a resposta em malha fechada pode ser instável!

Desempenho do controlador PI

Resposta a uma perturbação degrau: efeito do τ_i



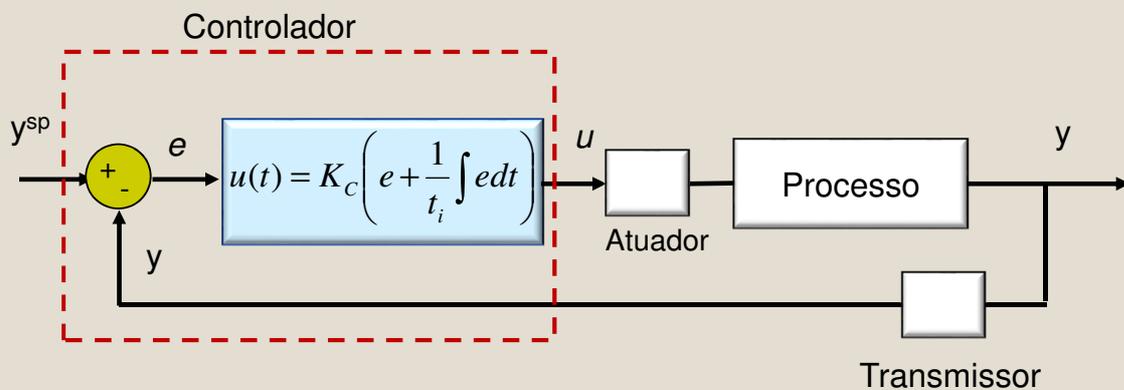
Aumenta τ_i :
oscilações são
amortecida
a resposta do processo
se torna mais lento

CUIDADO

Para pequenos
valores de tempo
integral, a resposta
em malha fechada
pode ser instável!

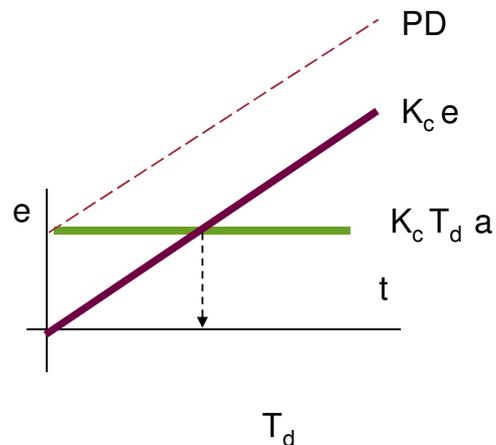
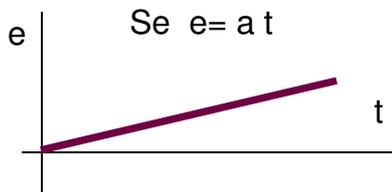
Controle Proporcional Integral

22



Ação Derivativa

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



- A ação derivativa, por ser proporcional a variação do erro, nunca é usada sozinha, uma vez que **só responde a regime transiente**.
- A **adição** da ação derivativa ao modo proporcional resulta num controlador altamente **sensível**.
- Melhora a estabilidade. Permite o uso de K_c mais elevado → menor erro estacionário.

23

Ação Proporcional-Derivativo (PD)

- A estrutura básica do controlador PD é dada por:

$$u(t) = K_c \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

como:

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

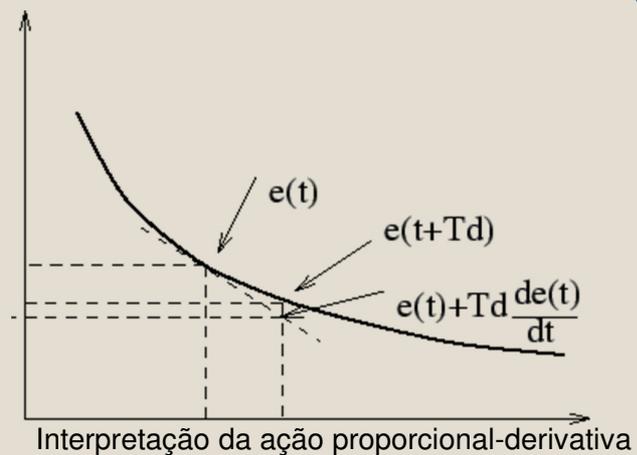
então,

$$u(t) \approx K_c e(t + T_d) \quad (5)$$

24

Ação Proporcional-Derivativo (PD)

Em outras palavras, a predição é feita extrapolando o valor do erro pela tangente a curva do erro num instante



Esta ação preditiva tende a **umentar a estabilidade** relativa do sistema e tornar a resposta transitória mais rápida.

25

Controlador Proporcional Integral Derivativo – (PID)

26

O controlador PID gera a sua saída proporcionalmente ao erro, proporcionalmente à integral do erro e proporcionalmente à derivada do erro.

$$u(t) = u_0 + K_c e(t) + K_c \frac{1}{T_I} \int e(t).dt + K_c T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

- ❖ Controlador baseado em sinal, não incorpora conhecimento explícito do processo
- ❖ 3 parâmetros de sintonia K_c , T_i , T_d
- ❖ Existem diversas modificações

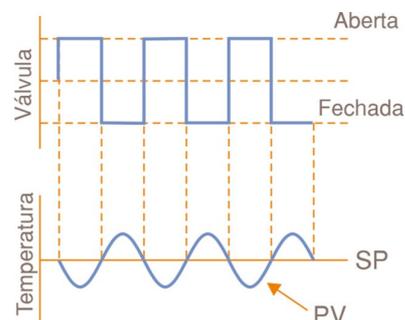
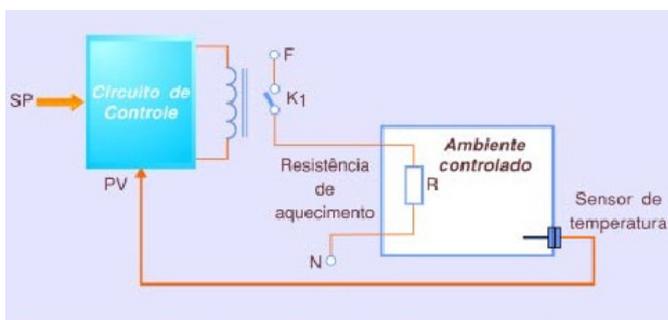
Controle PID: Modos de Ação

27

- **Controle Proporcional:** acelera a resposta de um processo controlado; produz *off-set*,
- **Controle Integral:** elimina *off-set*; produz respostas lentas, com longas oscilações; se o ganho proporcional é aumentado para acelerar a resposta, o sistema se torna mais oscilatório e tende à instabilidade,
- **Controle Derivativo:** antecipa futuros erros e introduz a ação apropriada; introduz efeito estabilizante na resposta da malha de controle.

Controle On-off

- Para alguns sistemas, o controle on-off é suficiente
- Por exemplo, um termostato, quando o aquecedor está ligado ou desligado.
- Dependendo da frequência de controle, sobrecarga do on-off, etc, isso poderia causar superações e ficar aquém (ondulações)
- Oscilação é um comportamento comum em sistemas de controle
 - Necessidade de evitar- a todo o custo ... Bem, quase todos os custos



Controle Proporcional

- Boa alternativa para o controle on-off: mais "controle" 😊
- Sinal torna-se proporcional ao erro
 - P (*setpoint* – *saida*)
- Precisa descobrir o valor da constante K_C
- Ajuste do controlador é um trabalho duro
 - Se K_C é demasiado grande, o que acontece?
 - Se K_C é muito baixo, o que acontece?
- Normalmente, um cntrl P diminui o tempo de resposta (rapidamente chega ao valor nominal), mas aumenta a overshoot.

29

Controle Proporcional

● Exemplo :

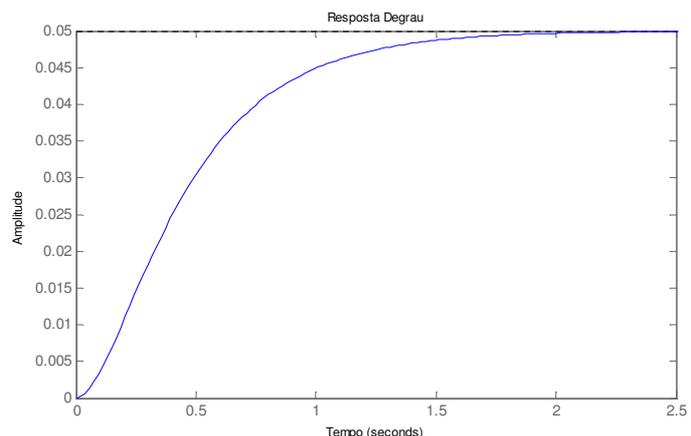
$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

Resposta ao degrau malha aberta

códigos no Matlab:

Command Window

```
>> s = tf('s');  
G = 1/(s^2 + 10*s + 20)  
step(G)  
  
G =  
  
-----  
s^2 + 10 s + 20  
  
Continuous-time transfer function.  
fx >> |
```



30

Controle Proporcional



● Exemplo :

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

Resposta ao degrau malha fechada:

```
>> Kc = 30
Uc = pid(Kc)
MF = feedback(Uc*G,1)
```

```
t = 0:0.01:2;
step(MF,t)
```

Kc =

30

Uc =

Kp = 30

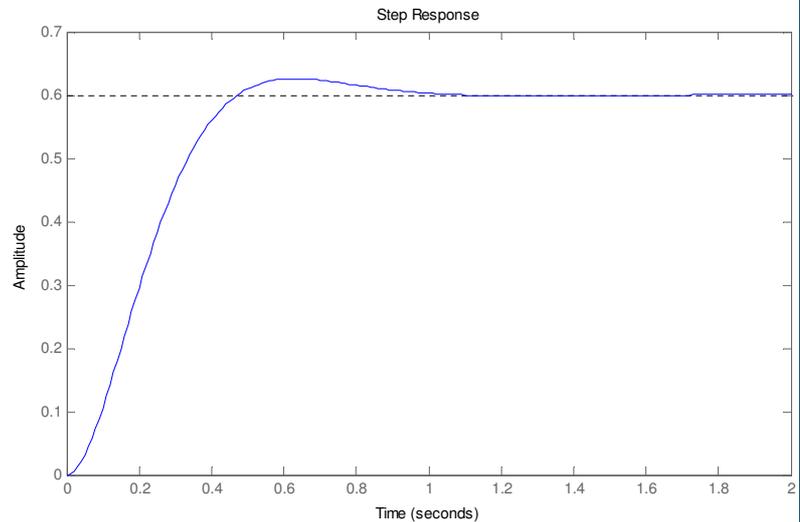
P-only controller.

MF =

30

s² + 10 s + 20

Continuous-time transfer function.



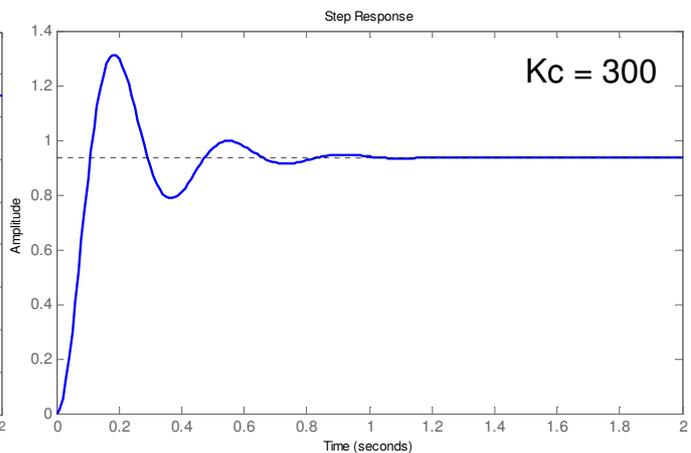
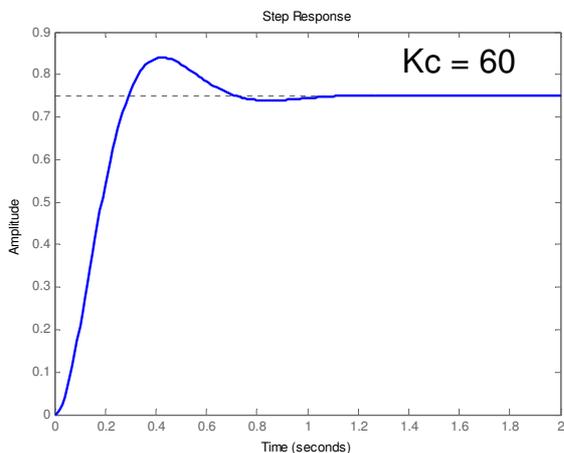
Controle Proporcional



● Exemplo :

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

Resposta ao degrau malha fechada:



Adicionando a Ação Derivativa



Para evitar aumento do Overshoot/ razão decaimento, levar em conta o quão rápido se está aproximando do setpoint.

- Se mto rápido, Overshoot pode ser iminente: reduzir o sinal recomendado pelo controlador proporcional
- Se muito lento, pode nunca chegar ao ponto de ajuste: aumentar o sinal.

Em geral: D (medida atual - medida anterior)

- Controladores PD são mais lentos do que só P, mas **menor** overshoot / oscilação.

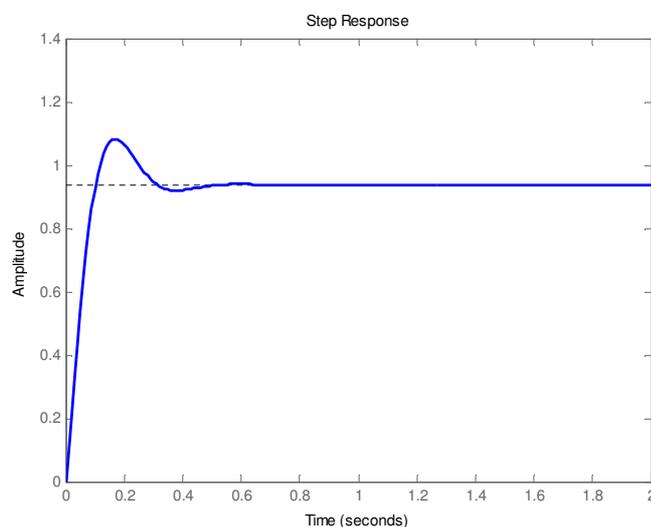
Controle Proporcional Derivativo



- Exemplo :
$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

Agora, vamos dar uma olhada em um controle PD. A partir da FT acima, vemos o efeito da ação derivativa (K_d)

```
>> Kc = 300;  
Kd = 10;  
Uc = pid(Kc, 0, Kd)  
MF = feedback(Uc*G, 1)  
  
t = 0:0.01:2;  
step(MF, t)
```



Controle Proporcional Integral



- A ação integral ($K_i = 1/T_i$) diminui o tempo de subida, mas aumenta tanto o overshoot como o tempo de assentamento, e elimina o erro de estado estacionário.
- Para o sistema do exemplo anterior, a função de transferência em malha fechada com um controle PI será:

$$G(s) = \frac{K_c s + K_i}{s^3 + 10s^2 + (20 + K_c s + K_i)}$$

Controle Proporcional Integral

- Exemplo : $G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$

Vamos fixar $K_c = 30$ e $K_i = 70$. Digite os seguintes comandos para criar um novo arquivo m:

```
>> Kc = 30;
Ki = 70;
Uc = pid(Kc,Ki)
MF = feedback(Uc*G,1)

t = 0:0.01:2;
step(MF,t)

Uc =

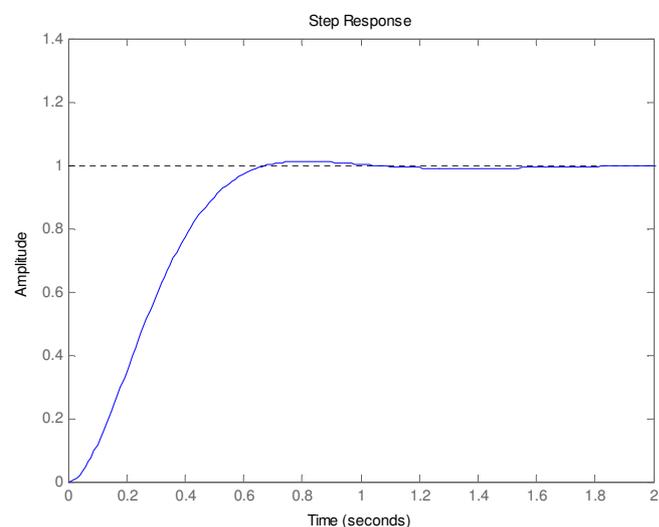
      1
Kp + Ki * ----
      s

with Kp = 30, Ki = 70

MF =

      30 s + 70 |
-----
s^3 + 10 s^2 + 50 s + 70

Continuous-time transfer function.
```

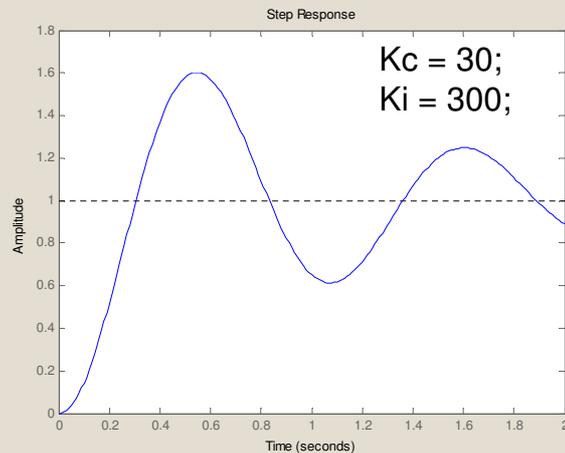
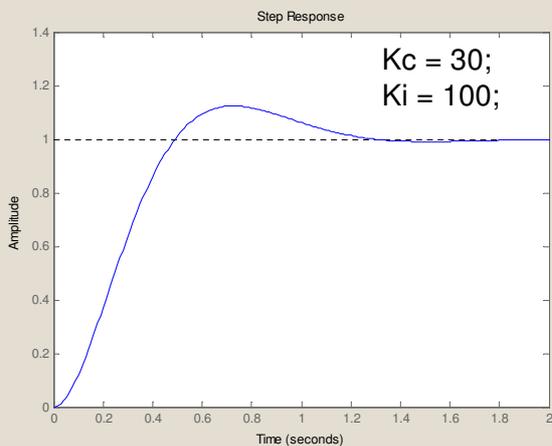


Controle Proporcional Integral

Exemplo :

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

Vamos fixar $K_c = 30$ e variar K_i .



37

Controle Proporcional Integral Derivativo

Exemplo :

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 10s + 20}$$

com $K_c = 350 = K_i = 300$, e $K_d = 50$ se atinge a resposta desejada. Para confirmar, digite os seguintes comandos para um arquivo-m e execute-lo na janela de comando. Você deve obter a seguinte resposta ao degrau.

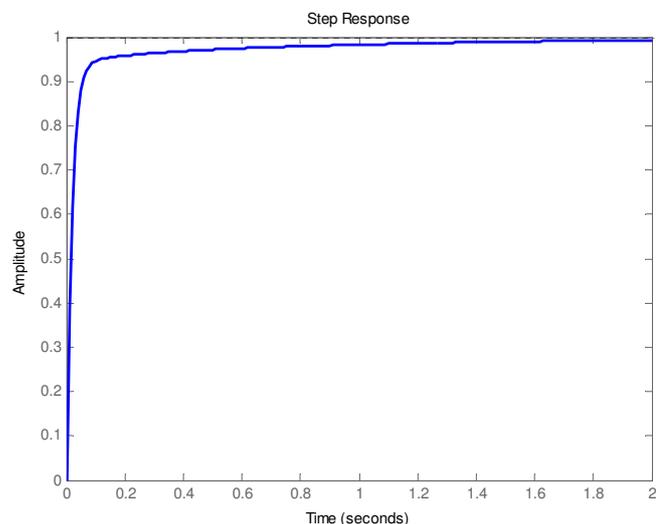
```
>>> Kc = 350;  
Ki = 300;  
Kd = 50;  
Uc = pid(Kc,Ki,Kd)  
MF = feedback(Uc*G,1);
```

```
tau = 0:0.01:2;  
step(MF,tau)
```

Uc =

$$K_p + K_i * \frac{1}{s} + K_d * s$$

with $K_p = 350$, $K_i = 300$, $K_d = 50$



Continuous-time PID controller in parallel form.

38

Em resumo

39

- Diferentes tipos de estratégias de controle → Respostas diferentes
- A tarefa da sintonia de um PID é mais difícil

Estratégia de Controle	Tempo de resposta	Overshoot	Tempo assentamento	Erro
On-off	Menor	Maior	---	Grande
Proporcional	Diminui	Aumenta	Peq. variação	Diminui
Integral	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Derivativo	Peq. variação	Diminui	Diminui	Não muda

Sintonia de Controle PID

40

- O valor numérico dessas três constantes (K_c , τ_I , τ_D) deve ser determinado de maneira que o controlador tenha um **bom desempenho** e nunca introduza **instabilidades** no processo.
- Esse é o problema de controle clássico, o problema de sintonia do controlador PID.

Sintonia de Controladores



Existem vários métodos de ajustes dos parâmetros do PID, associados de alguns forma aos *critérios de desempenho* de malhas, já citados:

- Métodos empíricos em malhas instaladas;
- Métodos de correlações de ajustes;
- Métodos de análises de frequência;
- Métodos adaptados à simulação de processos em computadores.

Sintonia de Controladores



Métodos de Ajuste de Controladores

Os métodos empíricos mais utilizados se baseiam em trabalhos de Ziegler-Nichols:

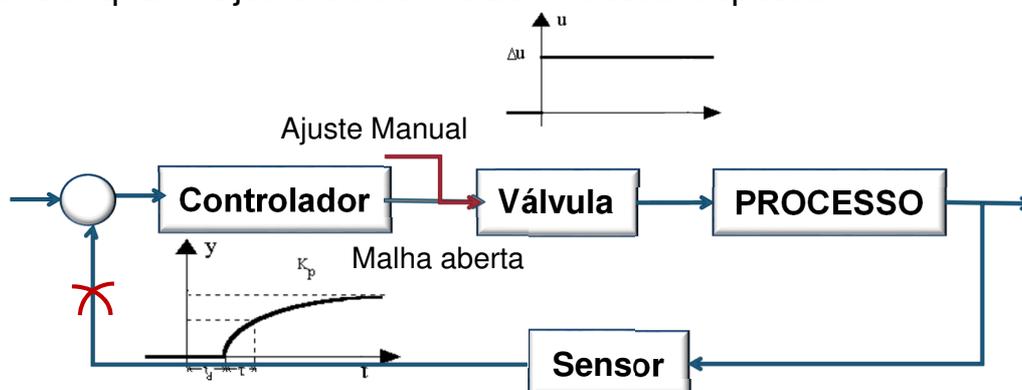
- ❖ Método de Curva de Reação
- ❖ Método da Sensibilidade Limite ou do Ganho Limite.

Ambos métodos partem da previsão que os modelos individuais da malha não são conhecidos, e tem como objetivo fazer testes de ID da malha instalada para adequação dos parâmetros do controlador a esta dinâmica.

Método da Curva de Reação (Ziegler-Nichols)

43

- Este método consiste na realização de um teste degrau em malha aberta sobre a válvula de controle pelo ajuste manual do controlador e identificação da resposta correspondente da variável medida para então adequar o ajuste do controlador a esta resposta.



Este método foi proposto por Ziegler-Nichols e as correlações de sintonia são baseadas no *critério da razão de amortecimento de 1/4 na resposta*.

Método da Curva de Reação (Ziegler-Nichols)

44

Considere o seguinte sistema:

$$G(s) = G_p G_m G_v = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

onde,

K : ganho da planta em regime de operação

θ : constante de atraso por transporte [tempo]

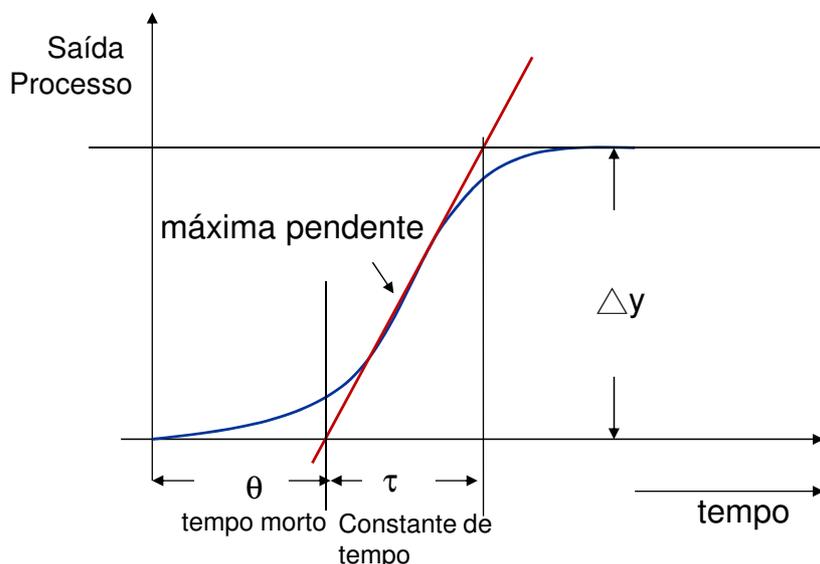
τ : constante de tempo da planta [tempo]

Este método **não** é aplicável a:

- Sistemas com integradores
- Sistemas com polos conjugados complexos (oscilações mantidas) (vide referência No.2)

Método da Curva de Reação (Ziegler-Nichols)

A resposta da planta $G(s)$ à entrada degrau se assemelha a letra "S", caso a resposta de um sistema a ser sintonizado não apresente uma resposta semelhante a letra S, este método não pode ser aplicado.



$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

45

Método da Curva de Reação (Ziegler-Nichols)

Aplicado o degrau na planta e obtidos os parâmetros K , τ e θ , então utiliza-se a seguinte tabela para sintonizar o PID. Neste caso objetiva-se obter um decaimento de 25% do valor máximo de overshoot.

Correlações de ajuste para o Modelo 1ª ordem com tempo morto

Controlador	K_c	T_i	T_d
P	$\tau/(K \cdot \theta)$	---	---
PI	$0,9\tau/(K \cdot \theta)$	3,33 θ	---
PID	$1,2\tau/(K \cdot \theta)$	2 θ	0,5 θ

46

Método da Curva de Reação (Cohen-Coon)

47

Este método de sintonia de PID aplica-se para processos com tempos mortos mais elevados. Isto é, **fator de incontrolabilidade $(\theta/\tau) > 0,3$** . O *critério de desempenho continua sendo a razão de declínio igual a $1/4$* .

Cohen-Coon			
Controller Type	K_c	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]$	—	—
PI	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right) \left[0,9 + \frac{1}{12} \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]$	$\alpha \frac{\left[30 + 3 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}{\left[9 + 20 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}$	—
PD	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right) \left[\frac{5}{4} + \frac{1}{6} \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]$	—	$\theta \frac{\left[6 - 2 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}{\left[22 + 3 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}$
PID	$\frac{1}{K} \left(\frac{\tau}{\theta} \right) \left[\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]$	$\alpha \frac{\left[32 + 6 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}{\left[13 + 8 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}$	$\theta \frac{4}{\left[11 + 2 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}$
Recommended Range of Applicability $1.0 < (\theta/\tau) < 0.1$			

Considerações gerais: Z&N e Coohen-coon

48

Algumas considerações gerais destes métodos de sintonia:

- O método de Coohen-coon apresenta um desempenho razoável para valores do fator de incontrolabilidade do processo (θ/τ) entre 0,4 e 4,5.
- A robustez é ruim para valores de (θ/τ) menores que 2. Na realidade, o objetivo do método de CC é obter sintonia para processos com tempos mortos maiores que os estudados por Ziegler e Nichols.
- Ambos métodos produzem sintonias agressivas e na prática, sugere-se diminuir inicialmente os ganhos (diminuir o K_c , aumentar o T_i e diminuir o T_d) propostos nas tabelas anteriores e ir aumentando-os em função das observações do comportamento do processo.

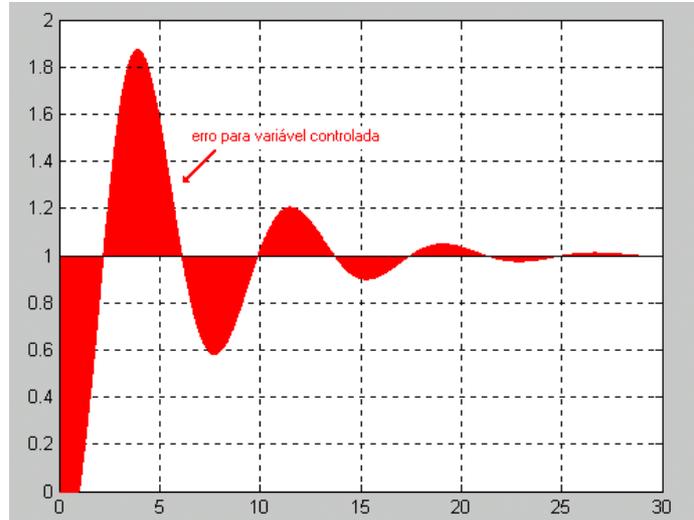
SINTONIA DE CONTROLADORES: MÉTODOS BASEADOS EM DESEMPENHO ÓTIMO COM MALHA FECHADA MÉTODO DA INTEGRAL DO ERRO

49

- Outra forma de sintonizar controlador PID consiste em pesquisar valores das constantes K_c , τ_i e τ_d que minimizem o erro de desempenho.

• O erro de desempenho decorre do fato de que qualquer ajuste promovido por um sistema de controle leva um tempo para se concluir e, ao longo desse tempo, acumulam-se erros de controle (valor desejado – *set-point* – menos valor medido)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$



SINTONIA DE CONTROLADORES: MÉTODOS BASEADOS EM DESEMPENHO ÓTIMO COM MALHA FECHADA MÉTODO DA INTEGRAL DO ERRO

Para quantificar o erro ocorrido em função de uma perturbação utilizam-se critérios baseados na integral do erro, definindo-se o primeiro critério como:

- 1) Integral absoluta do erro - *integrated absolute error* - IAE :

$$IAE = \int_0^{\infty} |y_s - y(t)| dt = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

- 2) Integral do erro ou *integrated error* – IE é uma boa aproximação, para IAE em sistemas oscilatórios que sejam bem amortecidos.

$$IE = \int_0^{\infty} (y_s - y(t)) dt = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

**SINTONIA DE CONTROLADORES: MÉTODOS BASEADOS EM
DESEMPENHO ÓTIMO COM MALHA FECHADA
MÉTODO DA INTEGRAL DO ERRO**

3) Integral do erro quadrático ou *Integrated square error* – ISE, sendo mais indicado para malhas com características menos oscilatórias.

$$ISE = \int_0^{\infty} (y_s - y(t))^2 dt = \int_0^{\infty} (e(t))^2 dt$$

4) Integral do tempo multiplicado pelo erro absoluto - *Integrated of the time multiplied by absolute error* - ITAE

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |y_s - y| dt = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

Dentre os índices baseado nos erros descritos anteriormente, o que apresenta maior seletividade é ITAE, pois o valor mínimo da integral é prontamente verificável ao serem variados os parâmetros do sistema.

**SINTONIA DE CONTROLADORES: MÉTODOS BASEADOS EM
DESEMPENHO ÓTIMO COM MALHA FECHADA
MÉTODO DA INTEGRAL DO ERRO**

Minimum ITAE				
Controller Type	Type of Response	K_c	τ_I	τ_D
P	Disturbance	$\frac{0.49}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{1.084}$	—	—
PI	Setpoint Tracking	$\frac{0.586}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.916}$	$\frac{\tau}{\left[1.03 - 0.165 \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right]}$	—
PI	Disturbance	$\frac{0.859}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.977}$	$\frac{\tau}{0.674} \left(\frac{\alpha}{\tau}\right)^{0.680}$	—
PID	Setpoint Tracking	$\frac{0.965}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.855}$	$\frac{\tau}{\left[0.796 - 0.147 \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right]}$	$0.308 \tau \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{0.929}$
PID	Disturbance	$\frac{1.357}{K} \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{0.947}$	$\frac{\tau}{0.842} \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{0.738}$	$0.381 \tau \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{0.995}$

Recommended Range of Applicability $1.0 < (\theta/\tau) < 0.1$

∴ T : cte de tempo da planta, τ_d : tempo morto

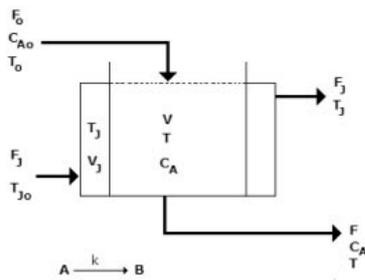
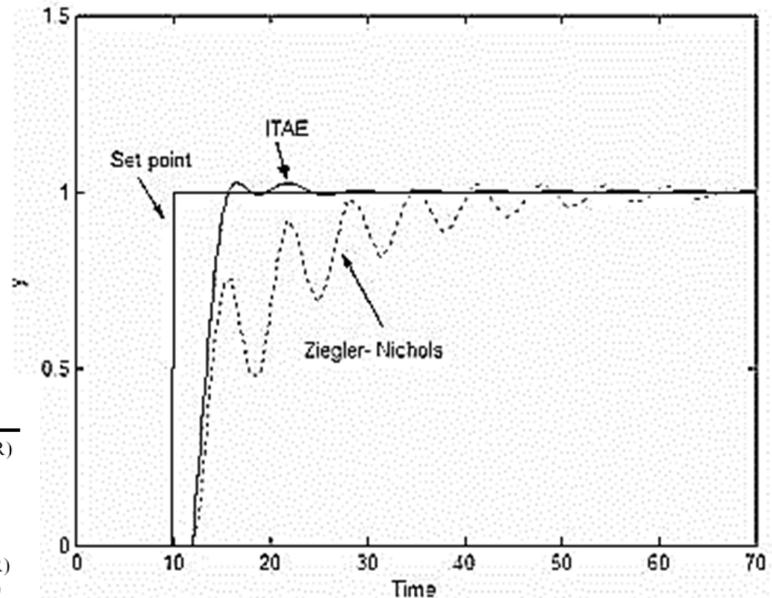


Table 3. Non-isothermal CSTR parameter values

$\bar{F} = 40 \text{ ft}^3/\text{hr}$	$U = 150 \text{ Btu}/(\text{hr ft}^2 \text{ R})$
$\bar{V} = 48 \text{ ft}^3$	$A = 250 \text{ ft}^2$
$\bar{C}_{A0} = 0.50 \text{ mole}/\text{ft}^3$	$T_{j0} = 530 \text{ R}$
$\bar{C}_A = 0.245 \text{ mole}/\text{ft}^3$	$\bar{T}_0 = 530 \text{ R}$
$\bar{T} = 600 \text{ R}$	$\lambda = -30000 \text{ Btu}/\text{mole}$
$\bar{T}_j = 594.6 \text{ R}$	$C_p = 0.75 \text{ Btu}/(\text{lbm R})$
$\bar{F}_j = 49.9 \text{ ft}^3/\text{hr}$	$C_j = 1.0 \text{ Btu}/(\text{lbm R})$
$V_j = 3.85 \text{ ft}^3$	$\rho = 50 \text{ lbm}/\text{ft}^3$
$\alpha = 7.08 \times 10^{-1} \text{ hr}^{-1}$	$\rho_j = 62.3 \text{ lbm}/\text{ft}^3$
$E = 30000 \text{ Btu}/\text{hr}$	
$R = 1.99 \text{ Btu}/(\text{mole R})$	

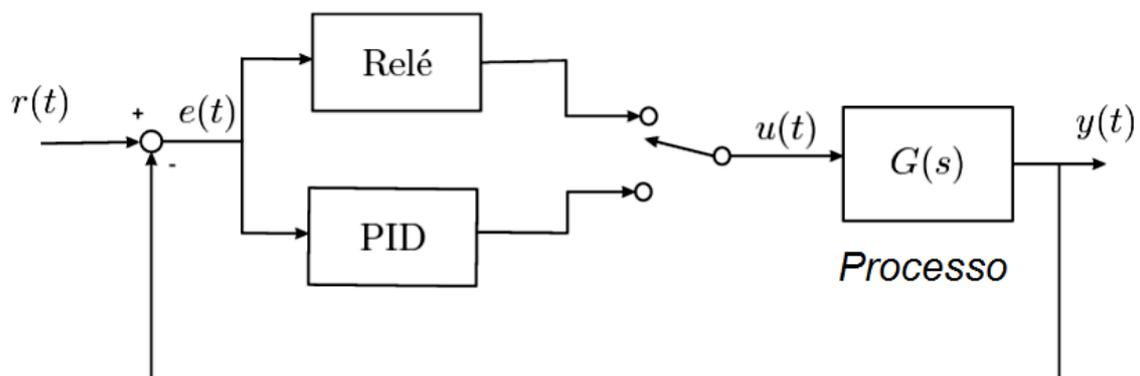


Fonte:

Martins F. Tuning PID Controllers using the ITAE Criterion, *nt. J. Engng Ed.* Vol. 21, No. 5, pp. 867-873, 2005

Método de sintonia malha fechada (relé realimentado)

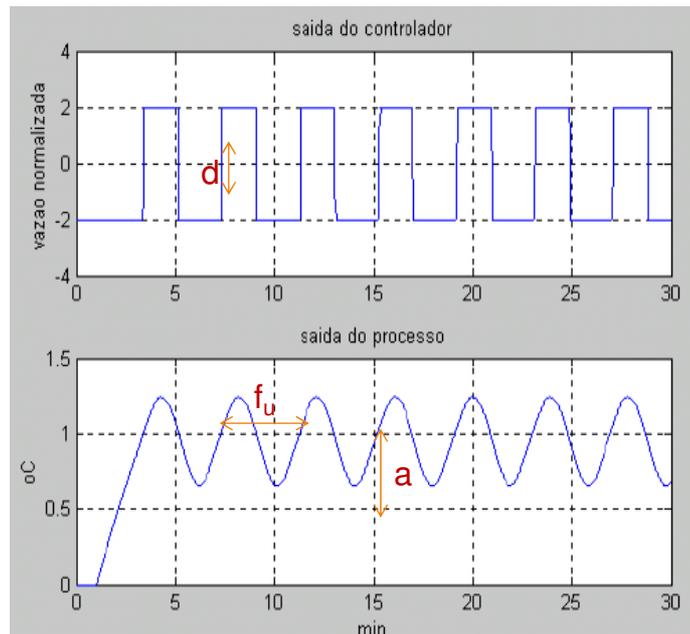
Sistema de Controle



- Base para controle de auto-sintonia,
- CLPs como Siemens, Rockwell, Schneider adotam este sistema em seu software de auto-sintonia,
- Foi um dos primeiros métodos de auto-sintonia a ser comercializado.

Método de sintonia malha fechada (relé realimentado)

Posiciona-se a chave na opção relé e obtém-se a seguinte figura:



Obs: a saída da planta deve estar defasada de 180°.

Respostas do sistema com controle relé.

55

Método de sintonia malha fechada: Método do relé realimentado

56

Na figura anterior podemos identificar os seguintes parâmetros:

f_u : frequência crítica,
 a : Amplitude da saída,
 d : Amplitude do relé.

Assim, para a sintonia, calculamos as seguintes expressões:

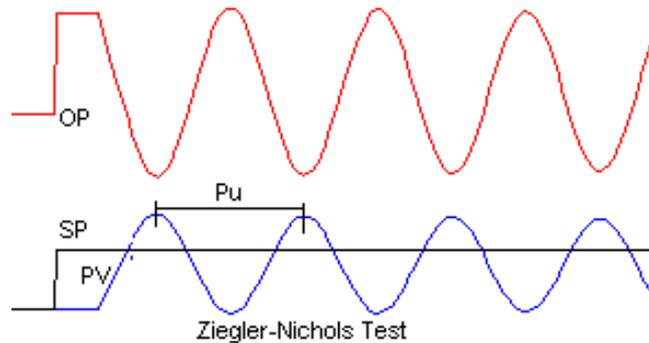
$$P_u = \frac{1}{f_u},$$
$$K_u = \frac{4d}{\pi a}.$$

Uma vez determinados estes valores, podemos utilizar a tabela seguinte para sintonizar o PID. Neste contexto objetiva-se diminuir 25% do overshoot.

Parâmetros de Sintonia de Controle do Relé Realimentado ou Z&N malha fechada:

57

Controlador	K_c	τ_I	τ_D
P	$0.5K_{cu}$	-	-
PI	$0.45K_{cu}$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6K_{cu}$	$P_u/2$	$P_u/8$



Outros métodos de sintonia

58

Alguns outros métodos de sintonia de PID são:

- Método de Síntese Direta
- Método do Modelo Interno
- Fuzzy
- Adaptativo
- Redes Neurais

1. Seborg, D.E., Edgar, T.F., Mellichamp, D.A.: Process Dynamics and Control. Wiley, New York (1989)
2. Skogestad S., Grimholt C. Chapter 5 - The SIMC Method for Smooth PID Controller Tuning, In: R. Vilanova, A. Visioli (eds.), PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control, DOI 10.1007/978-1-4471-2425-2_5, © Springer-Verlag London Limited 2012
3. Smith, C.A., Corripio, A.B.: Principles and Practice of Automatic Process Control. Wiley, New York (1985)