

# 107484 – Controle de Processos

## Aula: Controle em Cascata

Prof. Eduardo Stockler

Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade de Brasília

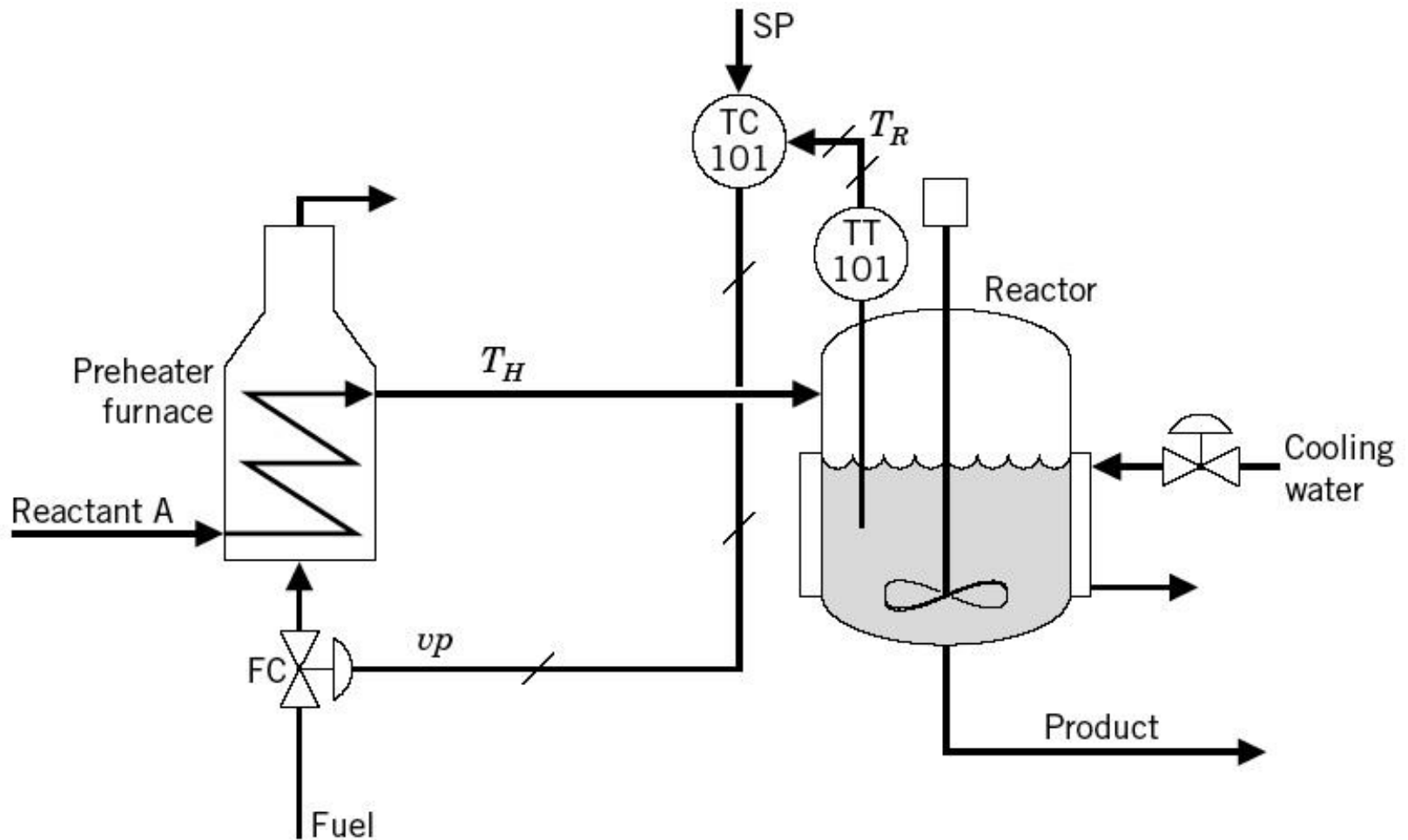


1º Semestre 2015

(Exemplo)

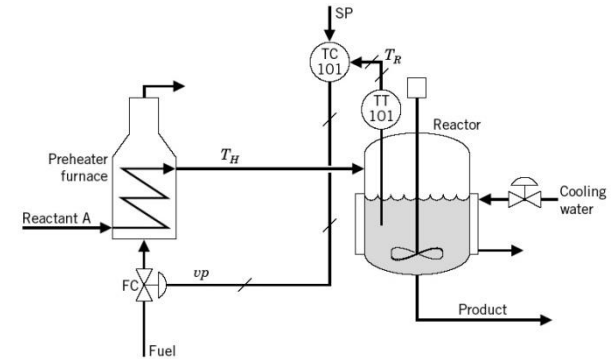
# **CONTROLE DE UM REATOR**

# Realimentação Simples



# O Processo

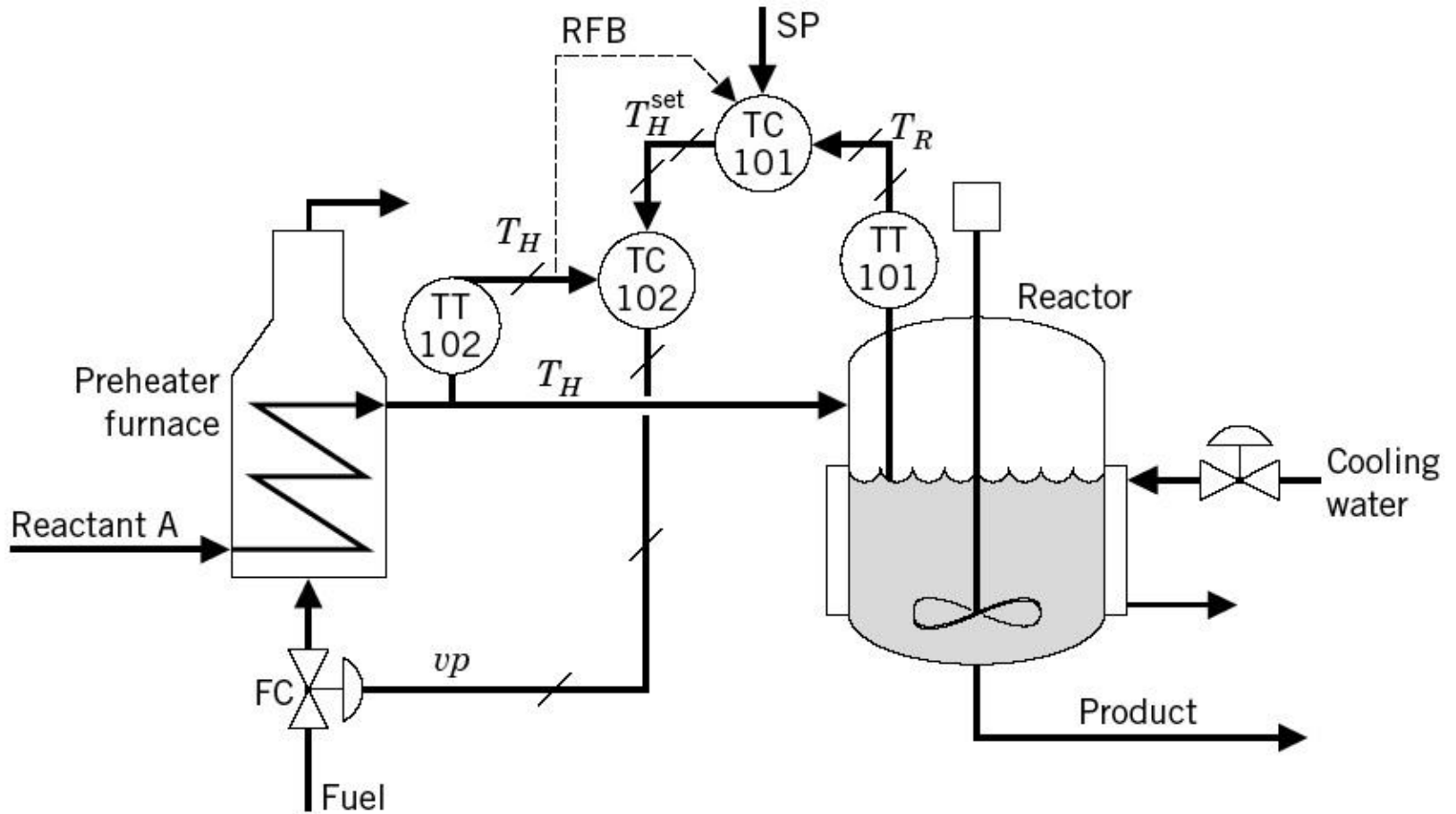
- Reação exotérmica no reator A → B
- Reagente A disponível a uma temp. baixa
- Variável controlada:  $T_R$
- 1ª Estratégia: MV= fluxo do refrigerante (não forneceu a capacidade de resfriamento necessária)
- 2ª Estratégia: MV= fluxo combustível pré-aquecedor (válvula do refrigerante 100% aberta)
- Em processo, observado que  $T_R$  desviava-se do SP o suficiente para o produto ficar fora das especificações:
  - Distúrbios no reator (variações temp. refrigerante e fluxo)
  - Pré-aquecedor (variações  $T_A$  entrada, aquecimento, etc )



# Estratégia de Controle

- Variação  $T_{A_e}$   $\longrightarrow$  variação  $T_H$   $\longrightarrow$  variação  $T_R$   $\longrightarrow$  atuação na MV (combustível)  $\longrightarrow$  correção lenta
- Melhoria: Variação  $T_{A_e}$   $\longrightarrow$  variação  $T_H$   $\longrightarrow$  atuação na MV (combustível)
- Controle em cascata: 2 sensores-transmissores, 2 controladores e 1 válvula
- Controlador da variável controlada (primária): controlador mestre, externo ou **primário**
- Controlador da variável secundária: controlador escravo, servo, interno ou **secundário**

# Controle em Cascata



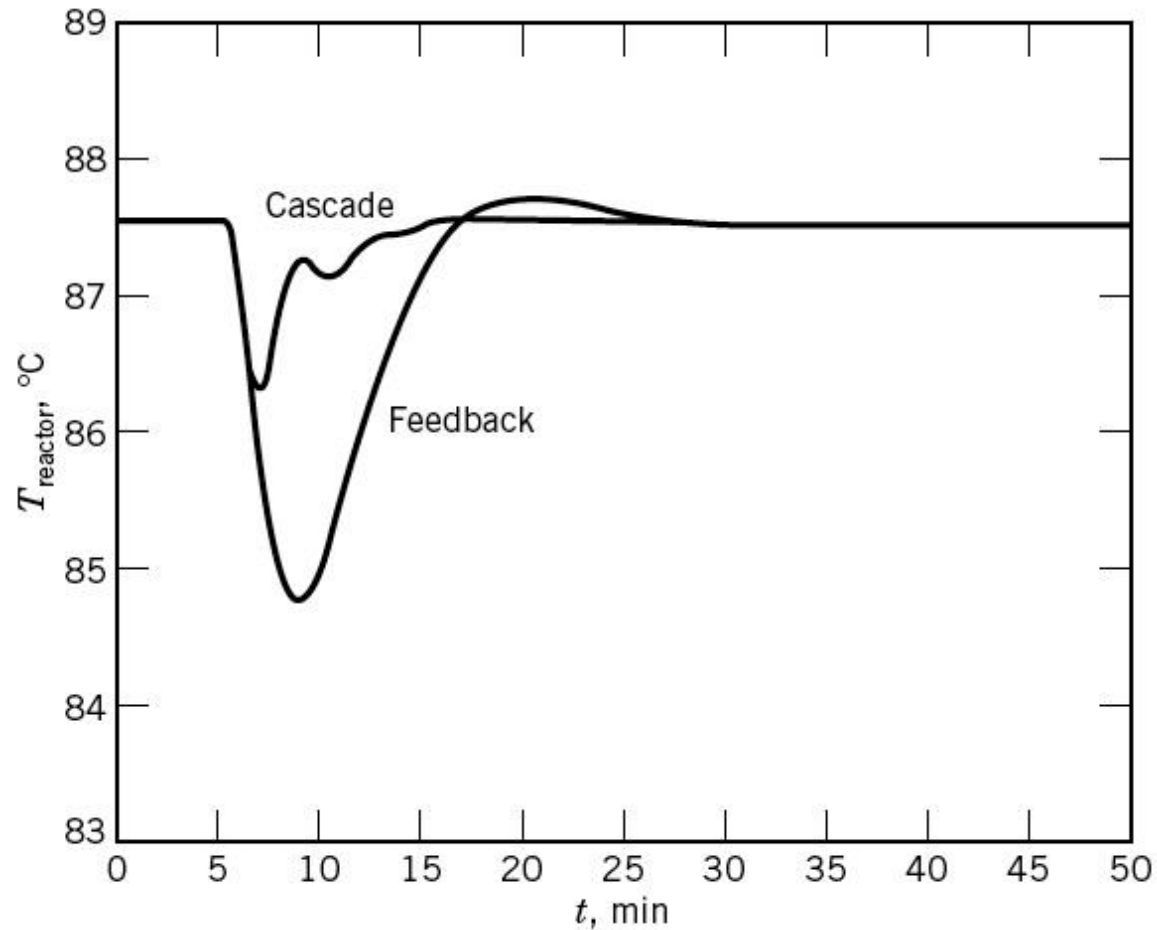
# Controle em Cascata

*Ao se projetar estratégias de controle em cascata, a consideração mais importante é que a malha interna (variável secundária) deve responder mais rapidamente à variações no distúrbio e na variável manipulada do que a malha externa (variável primária). Quanto mais rápido melhor.*

*Todo sinal deve ter um significado físico.*

[Smith & Corripio, 2012]

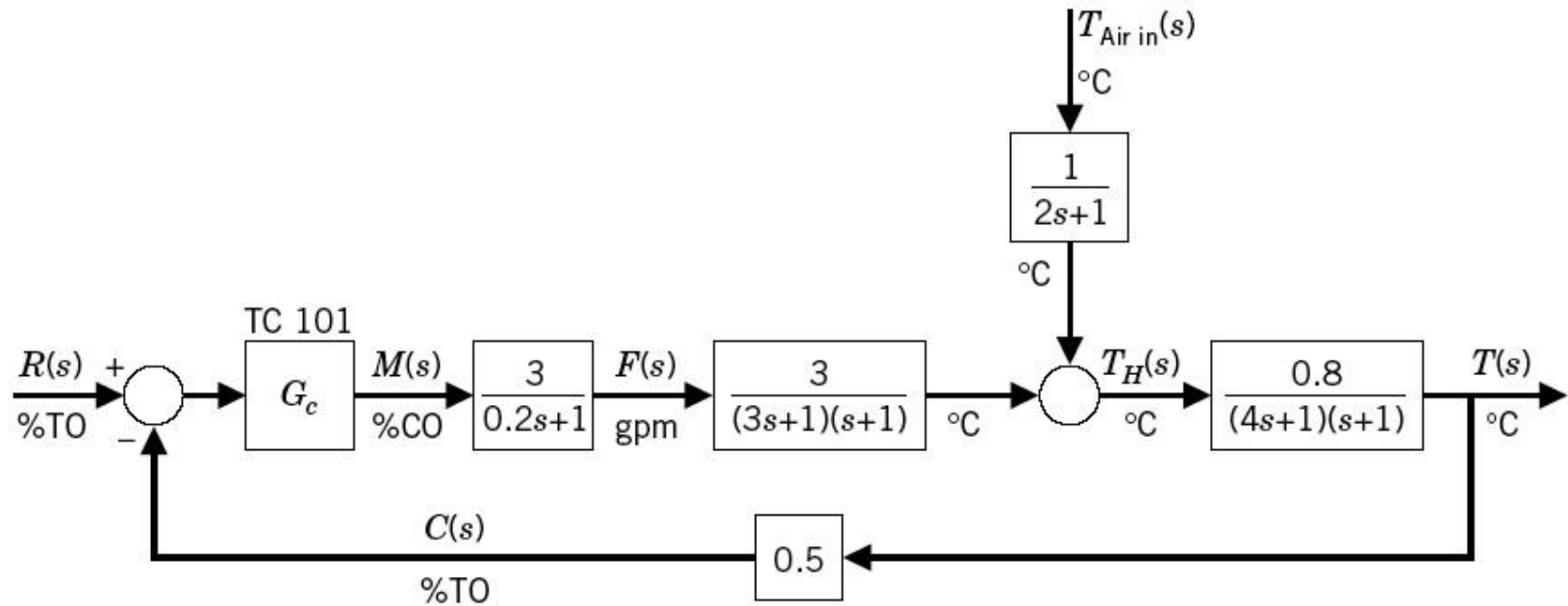
# Controle em Cascata



Resposta de  $T_R$  a uma mudança de  $-25^{\circ}\text{C}$  na temperatura de alimentação do aquecedor.



# Considerações sobre Estabilidade

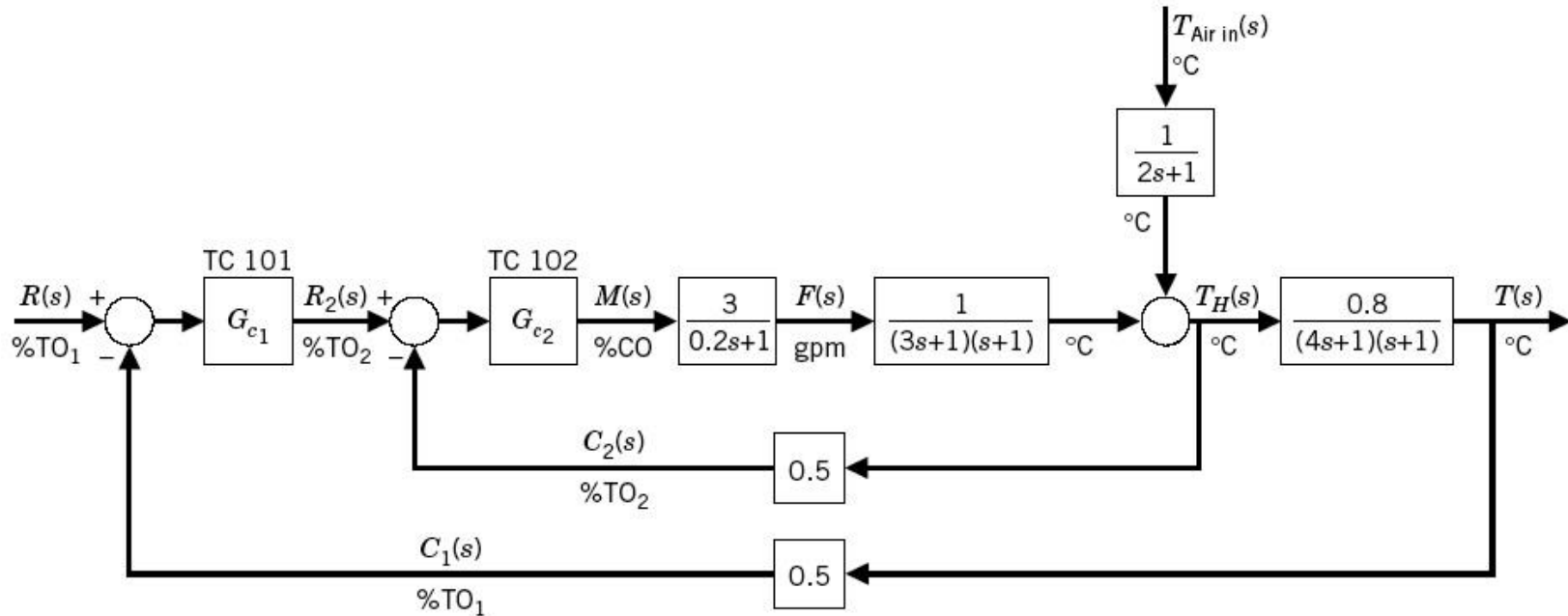


Equação característica:

$$1 + \frac{1,2 G_{c1}}{(0,2s + 1)(3s + 1)(s + 1)(4s + 1)(s + 1)} = 0$$

Subst. Direta: impondo  $s = jw \rightarrow K_{cu} = 4,33 \text{ \%/\%}$  e  $w_{cu} = 0,507 \text{ rad/s}$

# Considerações sobre Estabilidade



Equação característica :

$$1 + \frac{1,2 G_{c1} G_{c2}}{(0,2s + 1)(3s + 1)(s + 1)(4s + 1)(s + 1)} = 0$$

$$1 + \frac{1,5 G_{c2}}{(0,2s + 1)(3s + 1)(s + 1)}$$

# Considerações sobre Estabilidade

- Equação característica da malha secundária

$$\frac{1,5 G_{c2}}{(0,2s + 1)(3s + 1)(s + 1)} = 0$$


Impondo  $s = j\omega \rightarrow K_{cu2} = 17,06 \text{ \%/\%}$

- Considerando  $G_{c2}(s) = K_{c2}$  (controlador P), via Ziegler-Nichols

$$K_{c2} = 0,5K_{cu2} = 8,53 \text{ \%/\%}$$

- Substituindo  $G_{c2}(s) = K_{c2}$  na equação característica para a estratégia em cascata:

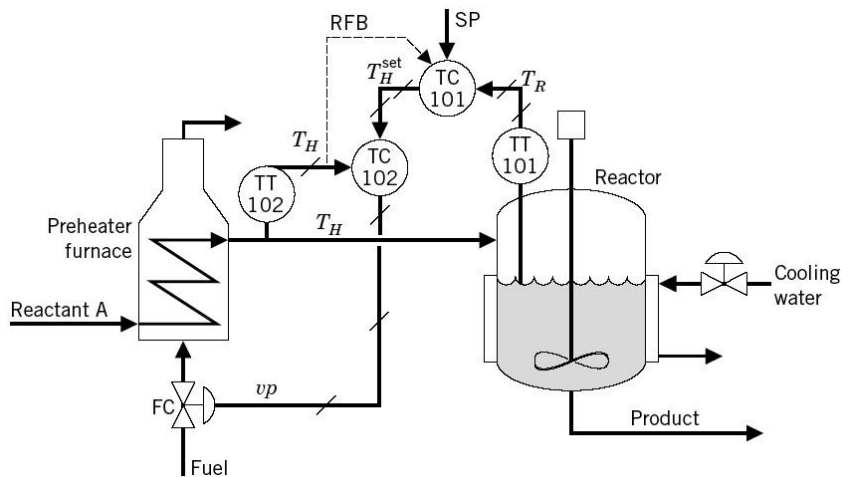
$$s = j\omega \rightarrow K_{cu1} = 7,2 \text{ \%/\%} \text{ e } \omega_{u1} = 1,54 \text{ rad/s}$$

Observa-se um ganho final (limite de estabilidade) e frequência final maior  controle global mais rápido e maior ganho do controlador.

# Sintonia dos Controladores

- Modos de operação do controlador interno: manual, automático, cascata
- Sintonia de dentro para fora: com todas as malhas em manual, sintoniza-se o controlador mais interno. Após, deixar em automático e sintonizar a próxima malha até que todos estejam em operação.

# Sintonia dos Controladores



- Com TC-101 em manual, sintonizar TC-102 (tão rápido quanto possível)
- Verificado sintonia do TC-102 através de degrau SP2
- Com TC-102 no modo cascata, sintonizar TC-101 e colocá-lo em automático

# Métodos de Sintonia do Controlador

1. (controlador primário) Método de MF de Ziegler-Nichols ou relé (obtenção de  $K_{cu1}$  e  $w_{u1}$ )
2. (controlador primário e secundário) Métodos da resposta ao degrau na saída de  $G_{c2}$  (obtenção de  $K_2, \tau_2, \theta_2$ ) e de  $G_{c1}$  (obtenção de  $K_1, \tau_1, \theta_1$ )
3. (controlador primário e secundário) Método de [Austin, 86] e [Lopez, 03] Aplicar degrau na válvula e obter  $K_2, \tau_2, \theta_2$  e  $K_1^*, \tau_1^*, \theta_1^*$ . Sintonizar controlador secundário por métodos convencionais e o primário por tabela fornecida por [Lopez, 03]

# Métodos de Sintonia do Controlador (2 níveis)

PRIMARY $G_{c1}(s)$	PI	PID
	$\tau_{I1} = \tau_1$	$\tau_{I1} = \tau_1; \tau_{D1} = \frac{t_{01} - \tau_2}{2}$
SECONDARY $G_{c2}(s)$	$K_{c1}$	$K_{c1}$
P	$1.4 \left[ \frac{1 + K_{c2}K_2}{K_{c2}K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.14} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$	$1.4 \left[ \frac{1 + K_{c2}K_2}{K_{c2}K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.14} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$
PI	$1.25 \left[ \frac{K_2}{K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.07} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$	$1.25 \left[ \frac{K_2}{K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.07} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$
Range	$0.02 \leq \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \leq 0.38$ $t_{02} \leq t_{01}$	$0.02 \leq \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \leq 0.38$ $t_{02} \leq t_{01}$ $\frac{t_{01} - \tau_2}{2} \geq 0.08$

[Lopez, 2003]

Faixa de uso da tabela:  $\tau_2/\tau_1 > 0.38$

# Métodos de Sintonia do Controlador (2 níveis)

PRIMARY $G_{c1}(s)$	PI	PID
	$\tau_{I1} = \tau_1$	$\tau_{I1} = \tau_1; \tau_{D1} = \frac{t_{01} - \tau_2}{2}$
SECONDARY $G_{c2}(s)$	$K_{c1}$	$K_{c1}$
P	$0.84 \left[ \frac{1 + K_{c2}K_2}{K_{c2}K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.14} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$	$1.17 \left[ \frac{1 + K_{c2}K_2}{K_{c2}K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.14} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$
PI	$0.75 \left[ \frac{K_2}{K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.07} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$	$1.04 \left[ \frac{K_2}{K_1} \right] \left[ \frac{t_{01}}{\tau_1} \right]^{-1.07} \left[ \frac{\tau_2}{\tau_1} \right]^{0.1}$
Range	$0.02 \leq \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \leq 0.65$ $t_{02} \leq t_{01}$	$0.02 \leq \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \leq 0.35$ $t_{02} \leq t_{01}$ $\frac{t_{01} - \tau_2}{2} \geq 0.08$

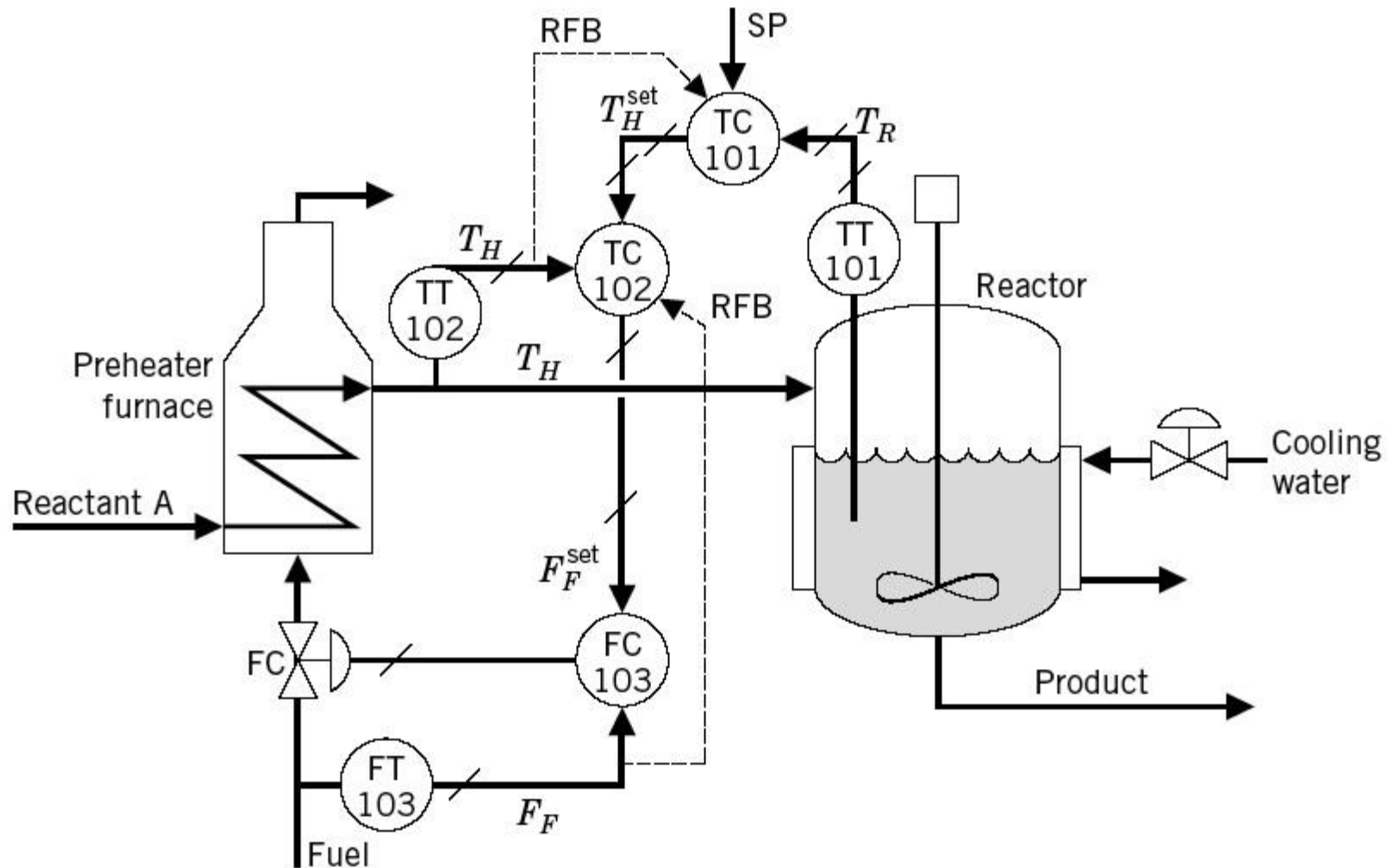
[Lopez, 2003]



# Sistema em Cascata de 3 Níveis

- No controlador em cascata de 2 níveis, manipula-se a posição da válvula e não o fluxo de combustível, que depende da posição da válvula e da queda de pressão através da válvula.
- Se a variação da queda de pressão for significativa, poderá ser adicionado um nível de controle extra.
- A malha mais interna (fluxo) deve ser a mais rápida.
- Sintonia:
  1. FC-103 (após, reduz-se a sintonia de cascata de 2 níveis)
  2. TC-102
  3. TC-101

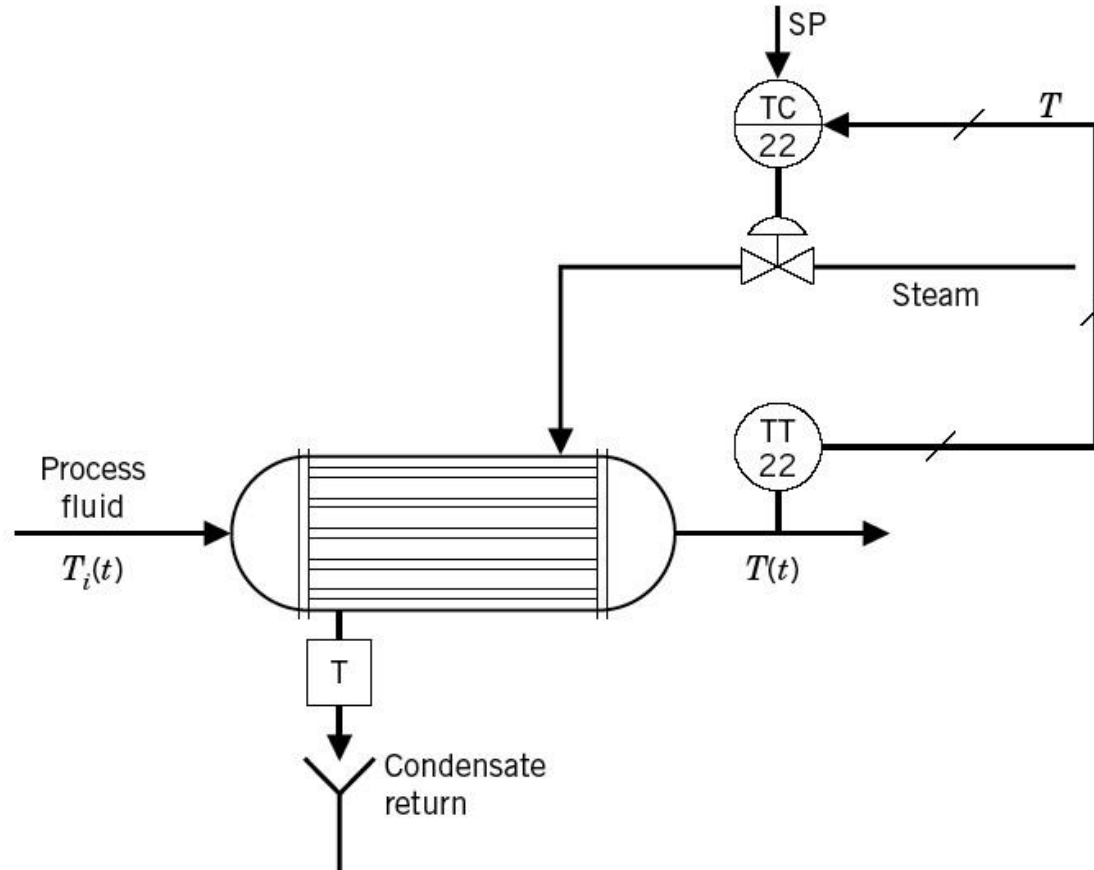
# Sistema em Cascata de 3 Níveis



(Exemplo)

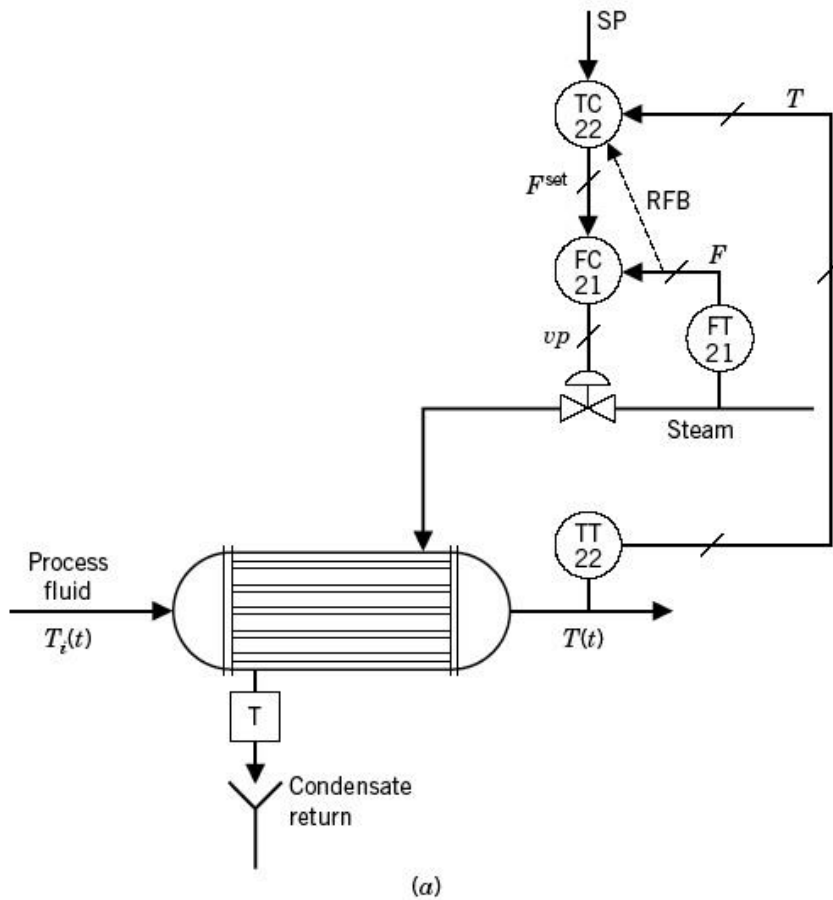
# TROCADOR DE CALOR

# Trocador de Calor

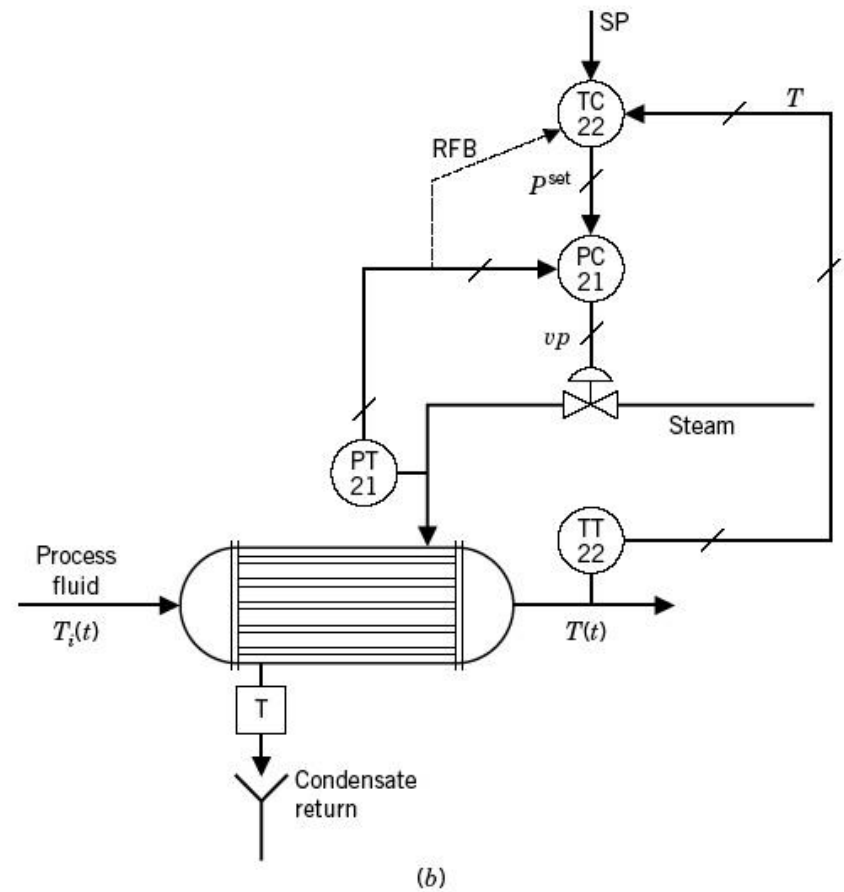


- compensação de variações do fluxo de vapor?
- compensação de variações da pressão do vapor?

# Trocador de Calor



Malha para compensação de variações do fluxo de vapor.



Malha para compensação de variações da pressão do vapor (prop. temp. e transf. calor).

# Controle em Cascata

- Distúrbios rapidamente corrigidas antes de perturbar a malha mestre
- A malha escrava acelera a resposta do processo visto pela malha mestra ( $\tau_{MF} < \tau_{MA}$ )
- Não-linearidades vista pela malha mestra é compensada pela malha escrava (ex. vazão da válvula)
- Desvantagens: custo e confiabilidade do sensor da malha escrava

# Sintonia Controle em Cascata

- Controlador escravo deve ter ganho P alto e ação integral baixa, exceto se a malha escrava for sujeita a grandes perturbações
- Se a malha escrava for FIC, usar PI com  $T_I$  da ordem de grandeza da  $\tau_{valvula}$
- Se a malha escrava for TIC, usar PID com  $T_D$  da ordem de grandeza da  $\tau_{transmissor}$  e ação derivativa atuando na PV

# Balanço na transição

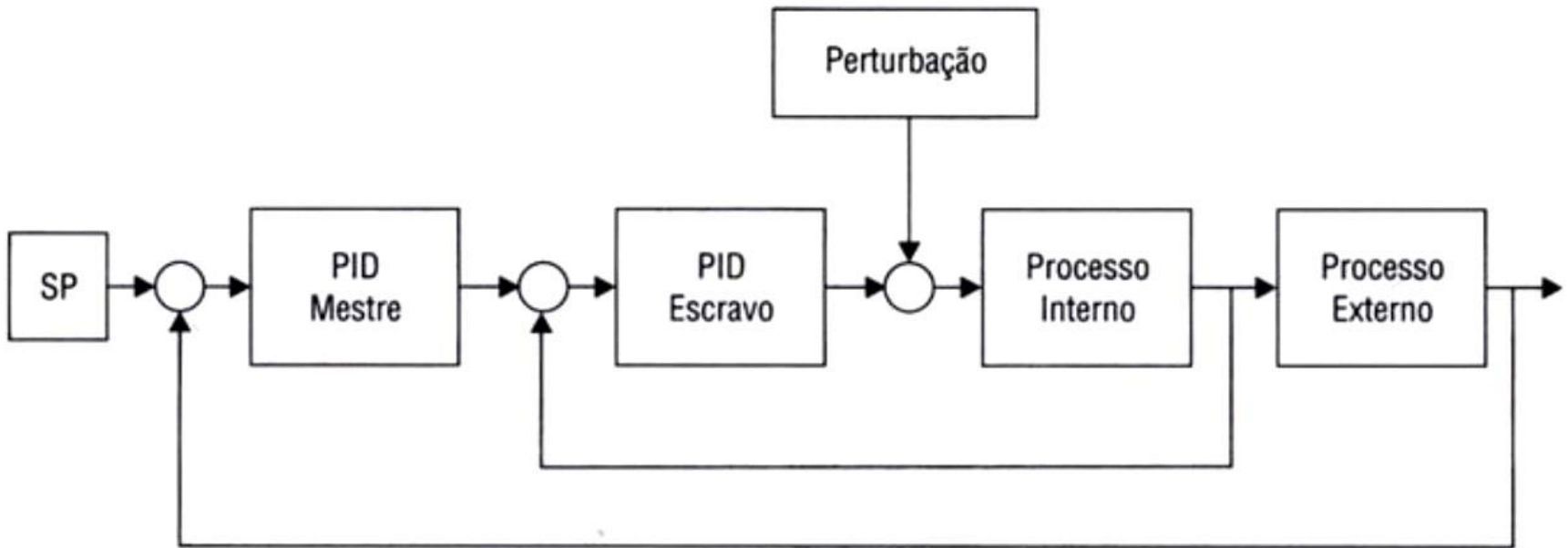
- Evitar “balanço” na transição manual/ automático/ cascata
  - Escravo em manual: SP do escravo deve seguir PV escravo (“PV tracking”)
    - evita balanço qdo escravo M/A
  - Escravo em manual ou automático: saída do mestre seguir SP do escravo (“output tracking”)
    - evita balanço qdo mestre A/C
  - Mestre em manual: SP do mestre deve seguir PV mestre (“PV tracking”)
    - evita balanço qdo mestre M/A



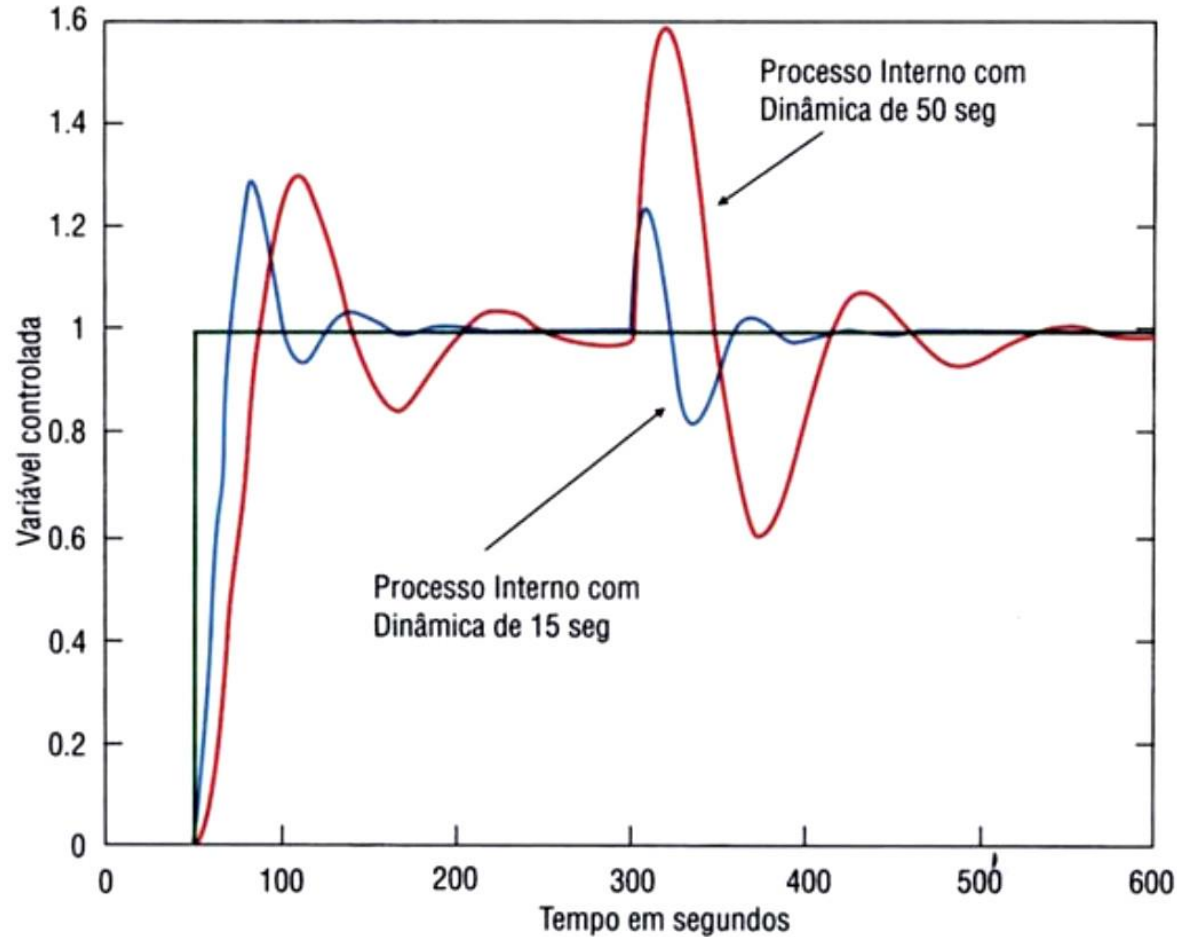
# Saturação do Controlador

- Controlador escravo satura e o mestre continua integrando o erro até saturar
- O mestre deve ser informado quando o escravo saturar (rastreamento)

# Resposta de um Sistema Cascata



# Resposta de um Sistema Cascata



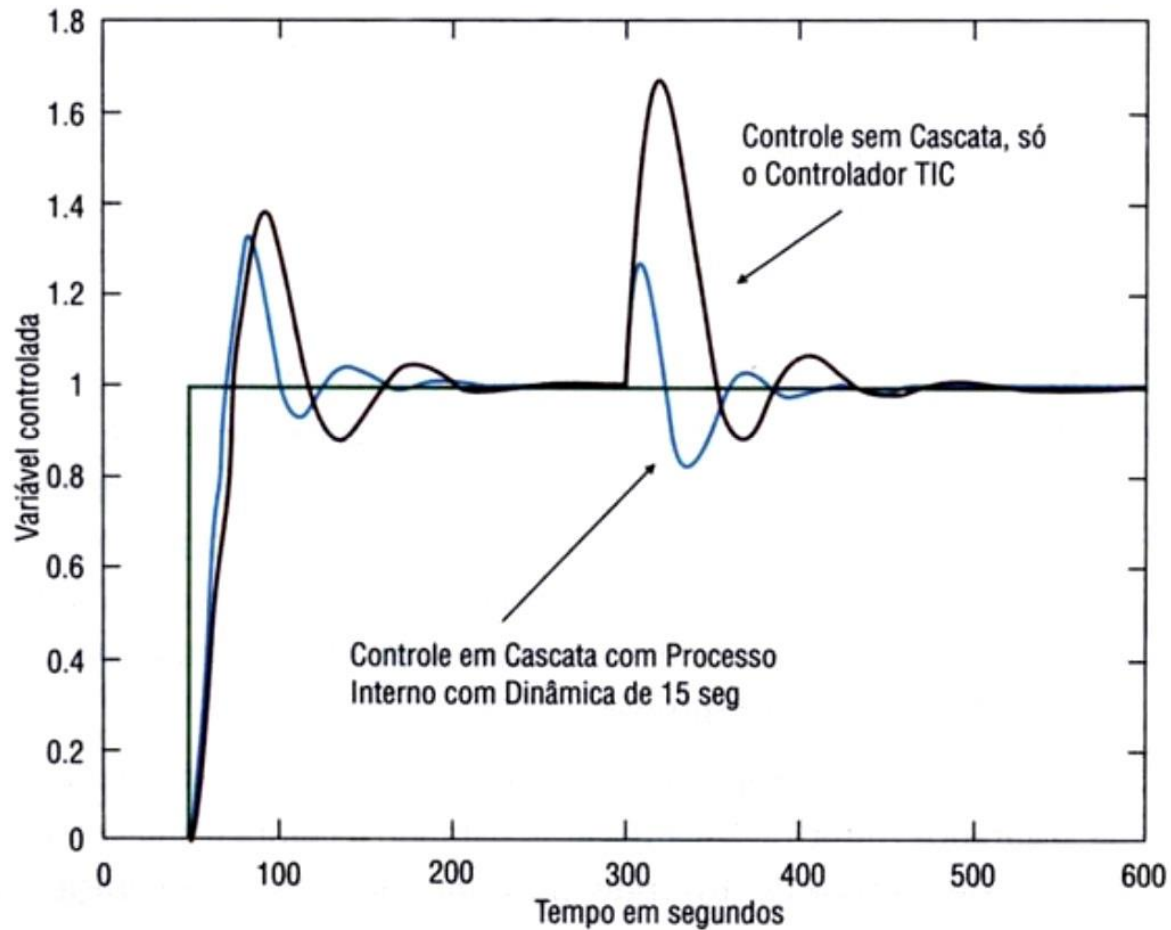
*Respostas à mudança no SP e distúrbio para:*

$$\tau_{externo} = 50s$$

$$\tau_{interno1} = 15s$$

$$\tau_{interno2} = 50s$$

# Resposta de um Sistema Cascata

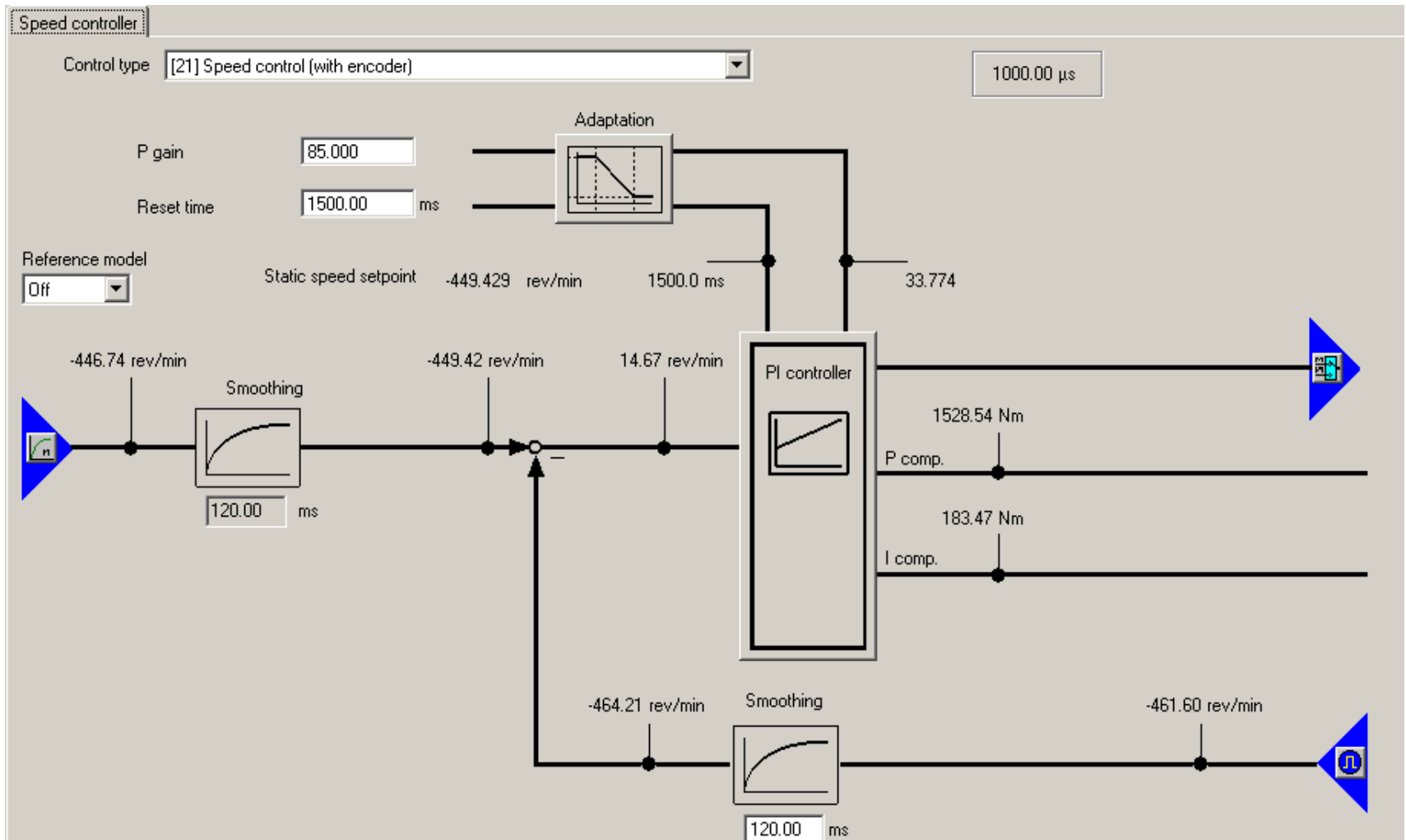


# Resumo do Controle em Cascata

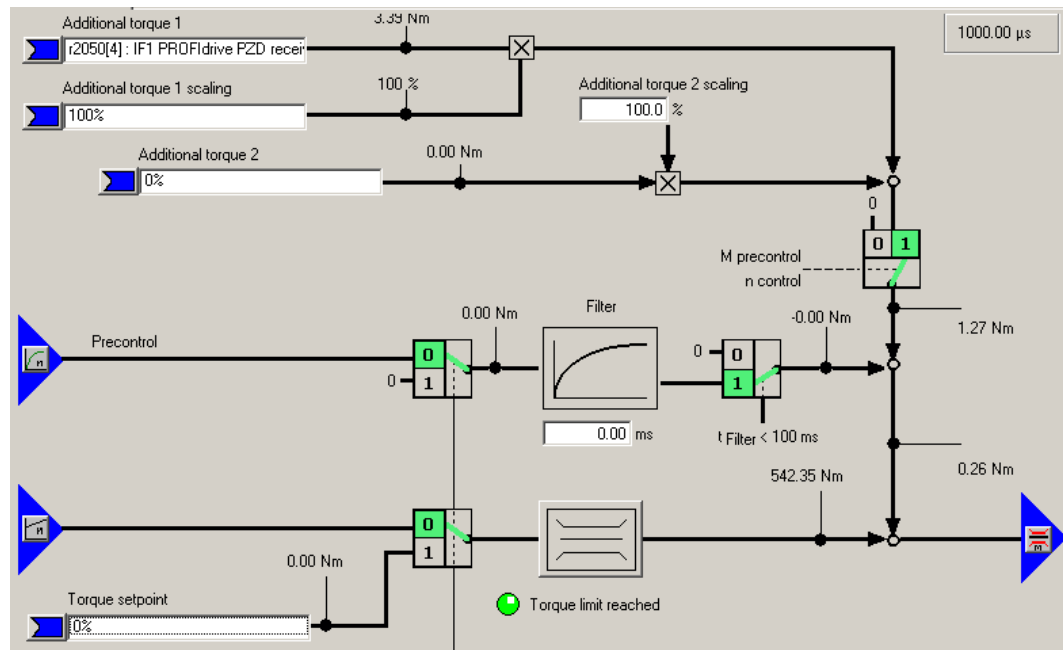
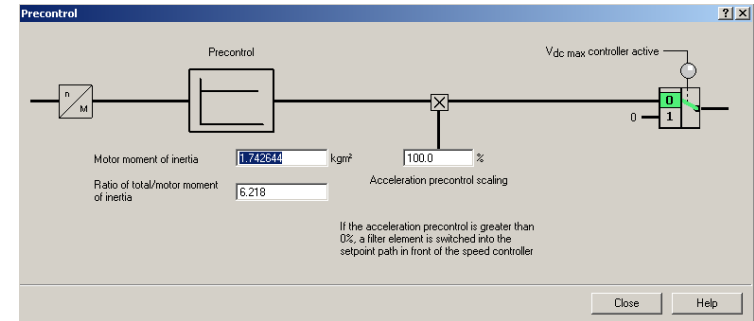
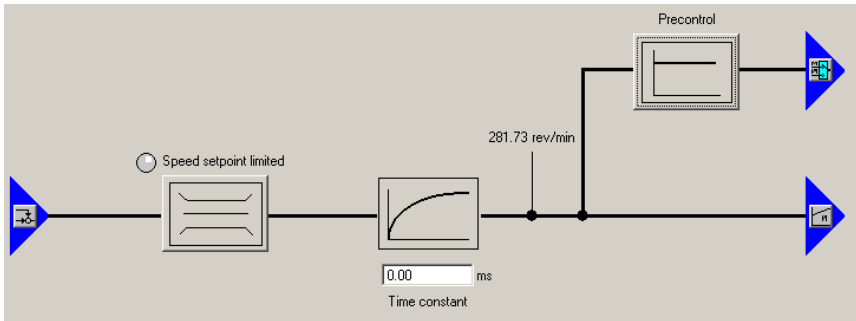
- Controle em cascata é usado para distúrbios significantes que afetam a entrada (o controle antecipatório é utilizado para distúrbios que afetam a saída)
- O processo principal tem uma variável controlada e uma manipulada  $u$  sujeito a distúrbios
- O controlador secundário regula  $u$  ajustando o elemento final de controle
- A saída do controlador primário é a referência para o controlador secundário
- A malha interna é muito mais rápida que a malha externa
- O distúrbio a ser regulado está dentro da malha interna

Caso real:  
Indústria de papel

# Malha de Controle de Velocidade

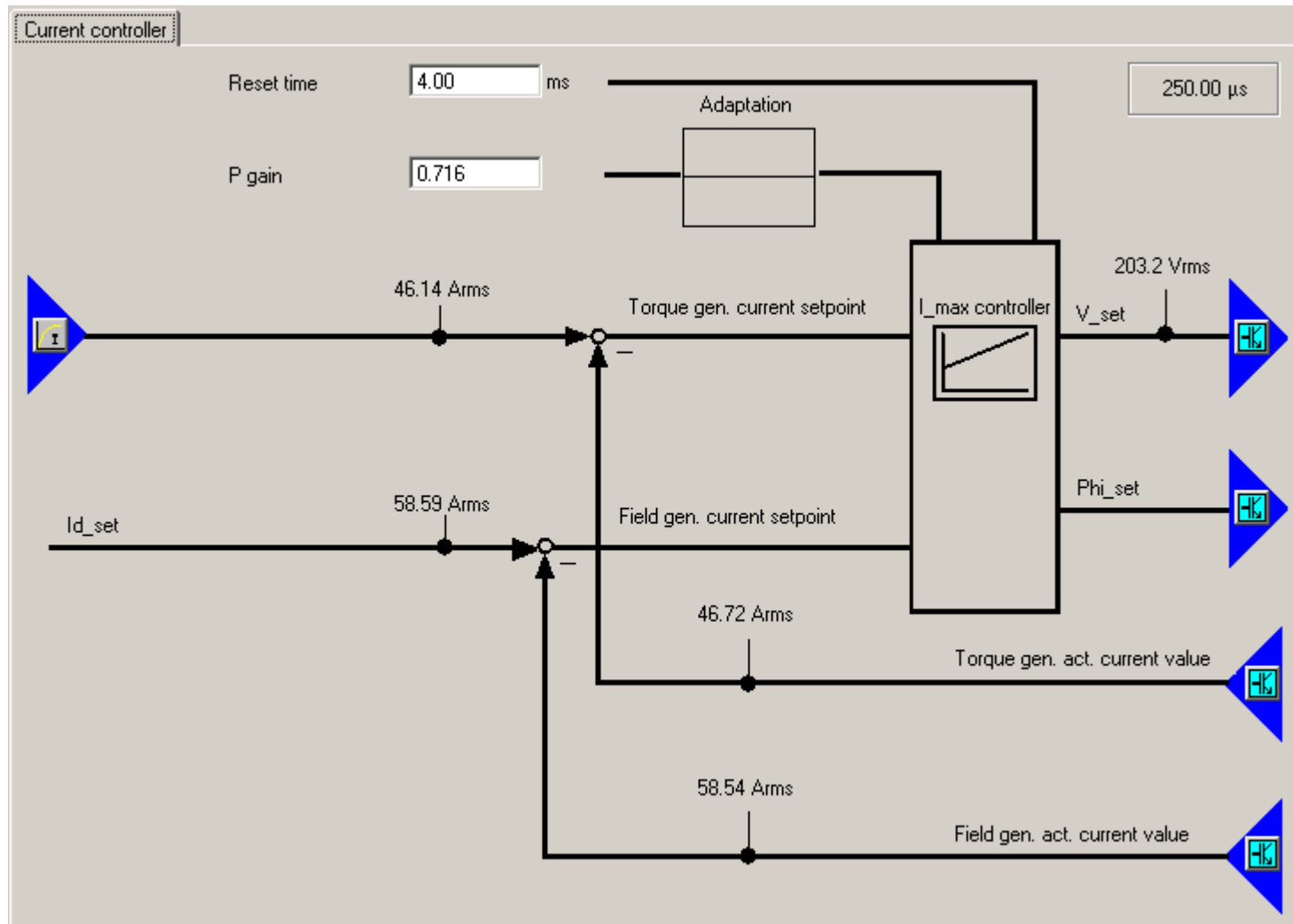


# Pré-Contrôle (torque)





# Malha de Controle de Corrente



# Bibliografia

- C. A. Smith e A. Corripio, *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*, 3ª. Edição, Ed. LTC, 2012.