

Controle em Cascata

Prof^a Ninoska Bojorge

Sumário

2

- Introdução
- Características
- Diagrama de Blocos do Controle em Cascata
- Conceitos
- Aplicações
- Critério para implementação
- Sintonia do Controle em Cascata

Controle em Cascata

3

Introdução

- O controle em cascata é implementado quando a malha de controle simples não responde satisfatoriamente, principalmente, em processos de grande inércia e/ou quando o processo possui uma **contínua perturbação em torno da variável manipulada**
- O controle em cascata consiste de um controlador primário que regula a um controlador secundário, melhorando a velocidade de resposta e reduzindo os distúrbios causados pela malha secundária.

Controle em Cascata

4

Funcionamento:

- Uma malha de controle em cascata tem dois controladores convencionais com realimentação negativa.
- O sinal de saída do controlador primário (mestre) estabelece o setpoint da variável de processo controlada pelo controlador secundário (escravo).
- O sinal de saída do controlador secundário vai para o atuador da válvula ou o elemento final de controle.

Controle em Cascata

5

Funcionamento

- O controle cascata é constituído de dois controladores (PID) convencionais e uma única válvula de controle, formando duas malhas fechadas.
- Só é útil desdobrar uma malha comum no sistema cascata quando for possível se dispor de uma variável intermediária **convenientemente mais rápida**.

Controle em Cascata

6

Se utiliza quando as perturbações afetam diretamente à variável de processo manipulada (na maioria dos casos será um fluxo mássico ou fluxo de energia).

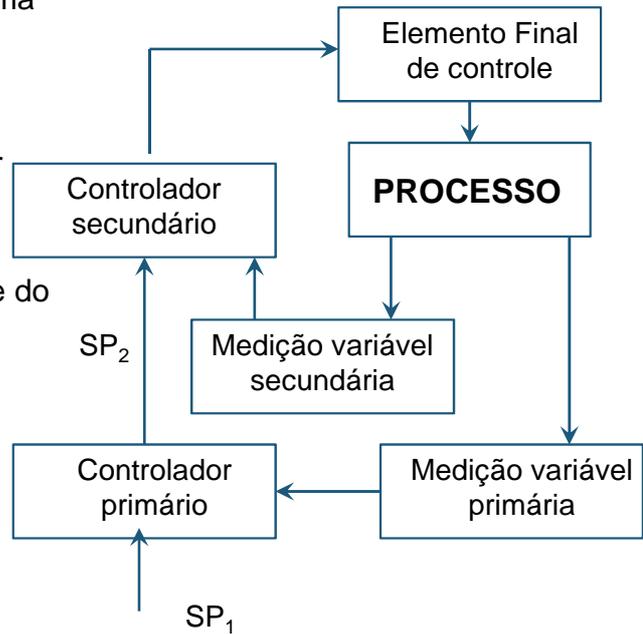
- Este tipo de perturbações se denominam **perturbações à entrada**.
- Utiliza a medida de variáveis internas (ou secundária) para detectar rapidamente o efeito das perturbações e iniciar antes a ação corretiva.
- Se realiza mediante malha de realimentação negativas fechadas.

Controle em Cascata

7

Características:

- 1) Dois controladores FB, mas apenas uma única válvula de controle (ou outro elemento final de controle).
- 2) O sinal de saída do "controlador do mestre" é o *set-point* para "controlador escravo".
- 3) Duas malhas de controle FB fechadas ("aninhadas") com a malha de controle do "escravo" (ou "secundário") dentro da malha de controle do "mestre" (ou "primário").
- 4) O controlador primário cascadeia o secundário.

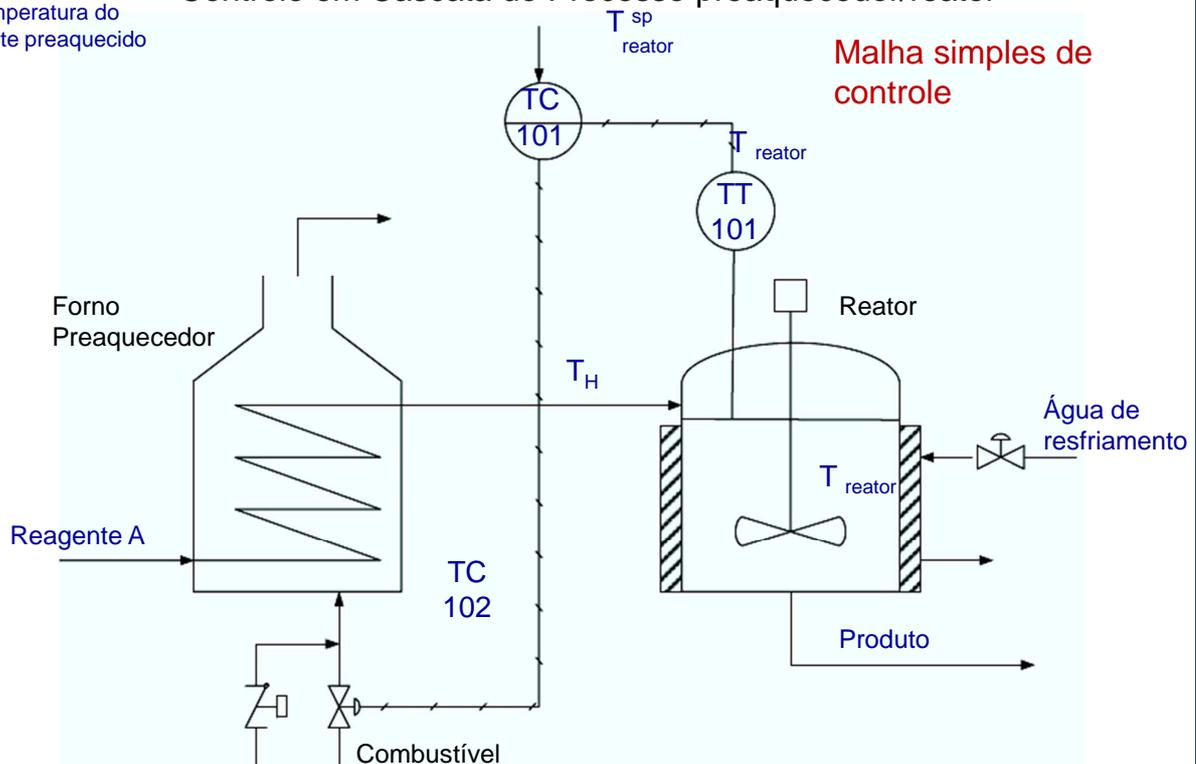


Terminologia:

Escravo vs Mestre
Secundário vs Principal
Interior vs Exterior

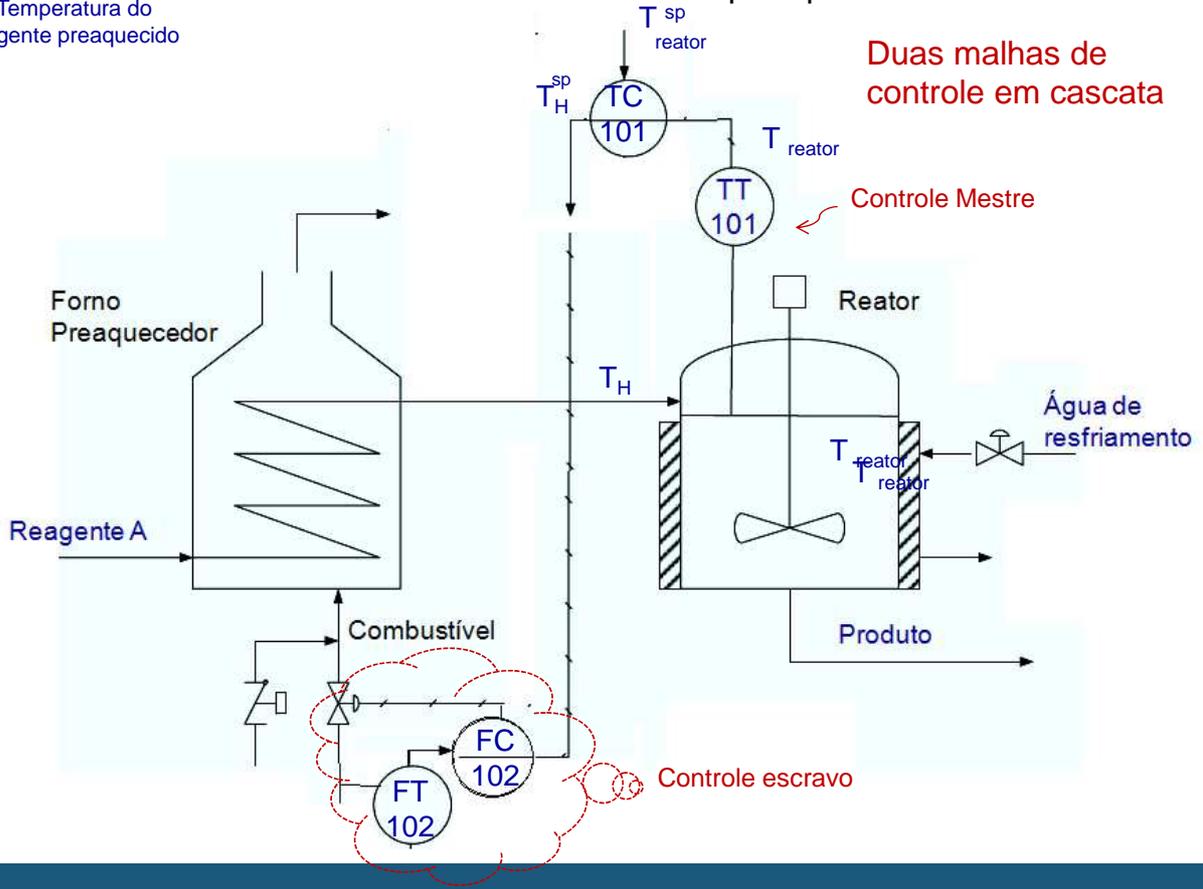
Controle em Cascata do Processo preaquecedor/reator

T_H Temperatura do reagente preaquecido



Controle em Cascata do Processo preaquecedor/reator

T_H Temperatura do reagente preaquecido



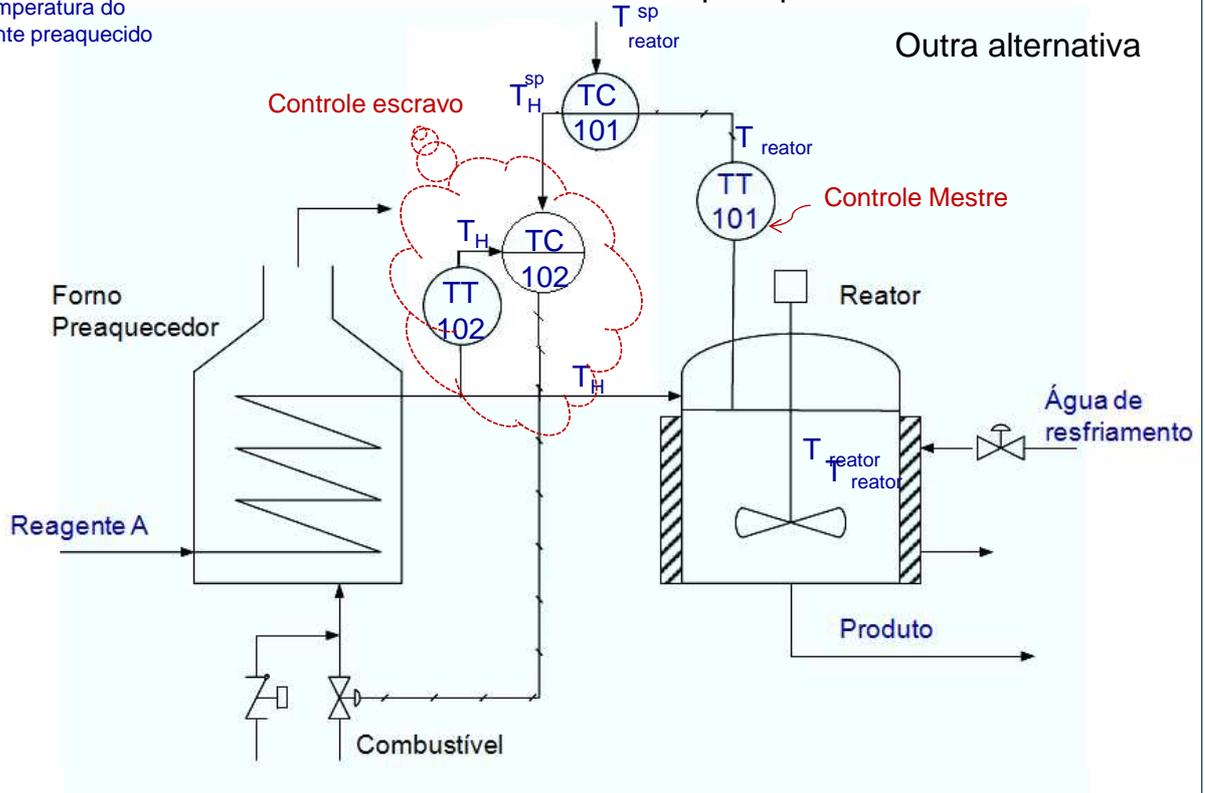
Duas malhas de controle em cascata

Controle Mestre

Controle escravo

Controle em Cascata do Processo preaquecedor/reator

T_H Temperatura do reagente preaquecido



Outra alternativa

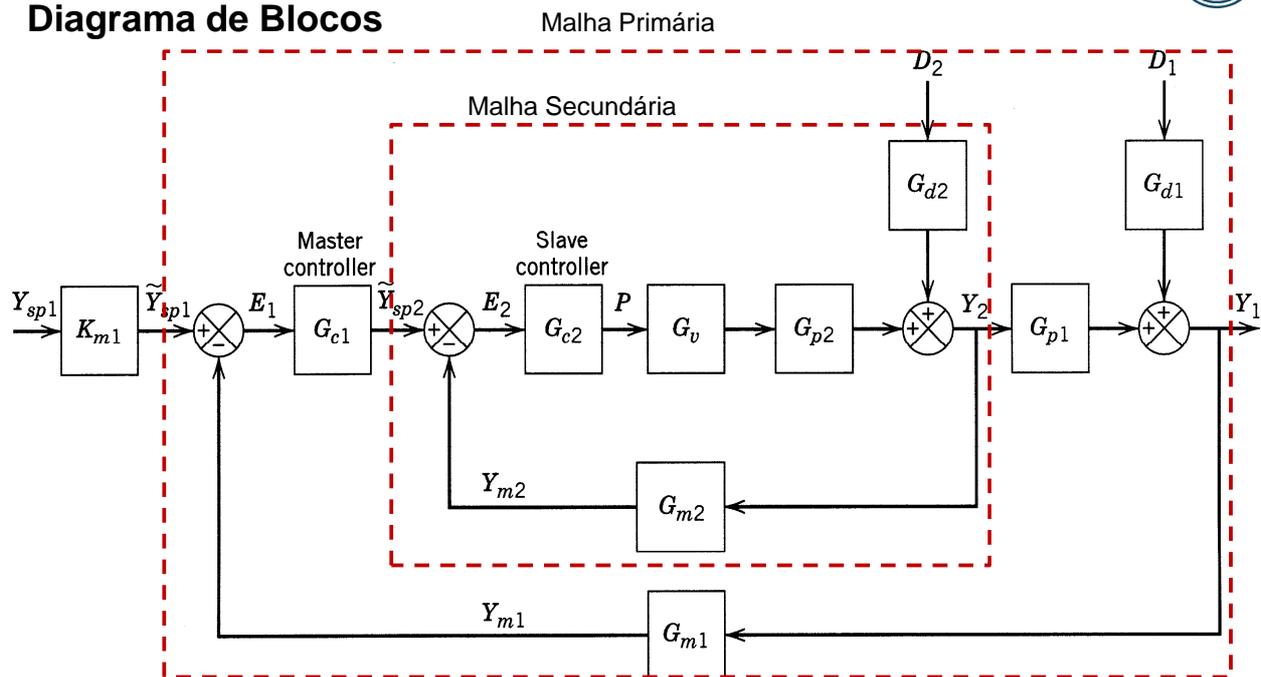
Controle escravo

Controle Mestre

Controle em Cascata

11

Diagrama de Blocos



Controle em Cascata

Conceitos

- O controle em cascata divide o processo em duas partes, duas malhas fechadas dentro de uma malha fechada.
- O controlador primário vê uma malha fechada como parte do processo.
- Idealmente, o processo deve ser dividido em duas metades, de modo que a malha secundária seja fechada em torno da metade dos tempos de atraso do processo.
- Para ótimo desempenho, os elementos dinâmicos no processo devem também ser distribuídos equitativamente entre os dois controladores.

Controle em Cascata

É fundamental a escolha correta das duas variáveis do sistema de cascata, sem a qual o sistema não se estabiliza ou não funciona.

- 1) a **variável primária** (ou principal) deve ser mais lenta que a variável secundária.
- 2) a resposta da malha do **controlador primário** deve ser **mais lenta** que a do secundário .
- 3) o período natural da malha primária deve ser maior que o da malha secundária.
- 4) a banda proporcional ($BP = 100/K_c$) do controlador primário deve ser mais larga que a do controlador secundário.

13

Controle em Cascata

Quando os períodos das malhas primárias e secundárias são aproximadamente iguais, o sistema de controle fica instável, por causa das variações simultâneas do setpoint e da medição da malha secundária.

Usualmente:

o controlador primário é: PID ou PI
e o secundário: P ou PI

14

Controle em Cascata

15

Variáveis - Combinações típicas:

Primária	Secundaria
Temperatura	Vazão
Composição	Vazão
Nível	Vazão
Temperatura	Pressão
Temperatura lenta	Temperatura rápida

Controle em Cascata

As vantagens do sistema de cascata são:

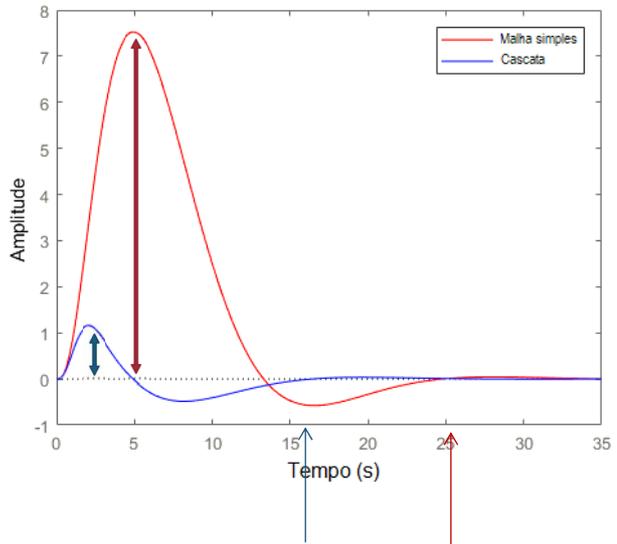
- 1) os distúrbios que afetam a variável secundária são corrigidos pelo controlador secundário, que é mais rápido, antes que possam influenciar a medição primária.
- 2) o atraso de fase existente na malha secundária é reduzido pela malha secundária, melhorando a velocidade de resposta da malha primária.
- 3) a malha secundária permite uma manipulação exata da vazão de produto ou energia requerido pelo controlador primário.

Considere o diagrama de blocos de um sistema em cascata, com as seguintes funções de transferência:

$$G_v = \frac{5}{s+1} \quad G_{p1} = \frac{4}{(4s+1)(2s+1)} \quad G_{p2} = 1$$

$$G_{d2} = 1 \quad G_{m1} = 0.05 \quad G_{m2} = 0.2 \quad G_{d1} = \frac{1}{3s+1}$$

Observe pico *overshoot* e os tempos de assentamento entre controle convencional e o cascata.



Exemplo 16.1 (Seborg)

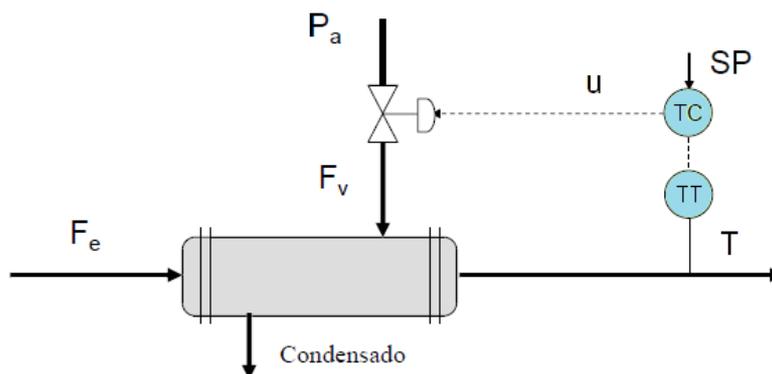
Aplicações do Controle em Cascata

18

Malha simples de controle de Temperatura num trocador de calor

Objetivo:

Aquecer uma corrente de processo, F_e , manipulando a vazão de vapor, F_v , que entra ao trocador. A queda de pressão na válvula pode sofrer variações. Assim mesmo, a vazão de entrada, F_e , pode flutuar arredor de seu valor nominal.



Aplicações do Controle em Cascata

19

Malha simples de controle de Temperatura num trocador de calor

Variáveis significativas de controle:

- Variável de saída ou controlada: Temperatura T (°C)
- Variável manipulada ou controlada: u (% abertura da válvula). Varia Fv (l/s), vazão de vapor que é a variável de processo manipulada.
- Variáveis de perturbação: perturbação à entrada: Pa (atm), queda de pressão na válvula (se Pa muda à mesma abertura da válvula (u) a vazão Fv será diferente. Fv é uma variável secundária que reflete a perturbação antes de que se propague à saída e existe uma relação entre Fv e a variável de controle, u:

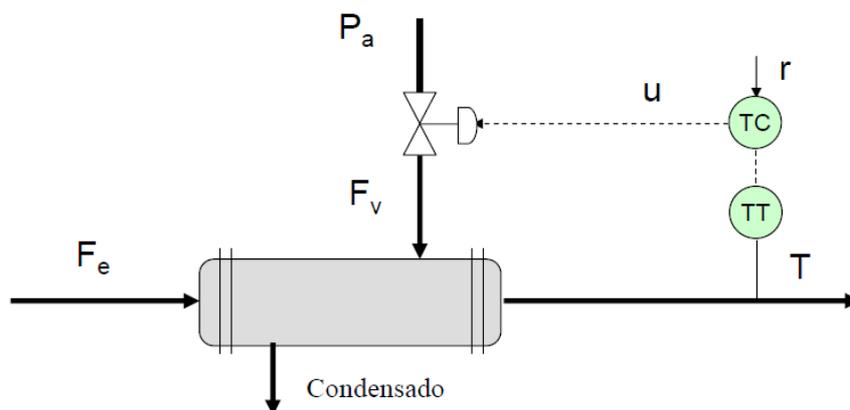
$$G_v(s) = \frac{F_v(s)}{U(s)}$$

Perturbação à **saída**: Fe (l/s), mudanças na vazão de entrada (se transmitem diretamente à saída sem afetar previamente a outra variável de processo auxiliar)

Aplicações do Controle em Cascata

20

Malha simples de controle de Temperatura num trocador de calor



Resposta a mudanças na pressão de subministro de combustível:

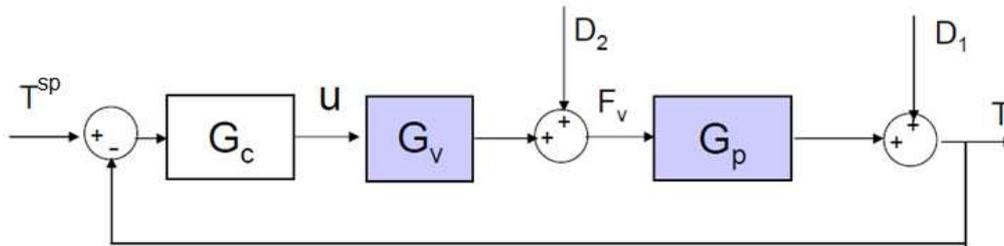
- Se Pa muda, à mesma abertura de válvula (u), mudará Fv (energia aportada) e por tanto, afetará à temperatura T
- O efeito da perturbação se traduz numa mudança em T que será corrigido pelo controlador de realimentação modificando a abertura da válvula, u

Aplicações do Controle em Cascata

21

Malha Simples de Controle de Temperatura

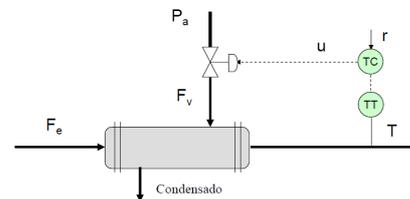
Diagrama de blocos:



D1: perturbação devido a P_a (com dinâmica G_{D1})

D2: perturbação devido a F_e (com dinâmica G_{D2})

O controlador realimentado não rejeitará as perturbações até que seu efeito se propague à saída.



Aplicações do Controle em Cascata

22

Estrutura do Controle em Cascata (...como já dito)

- A estrutura de controle em cascata se caracteriza por dois controladores realimentados aninhados, sendo a saída do primário (mestre) o ponto de referencia do controlador secundário (ou escravo).
- A saída do **controlador secundário é a que atua sobre o processo.**

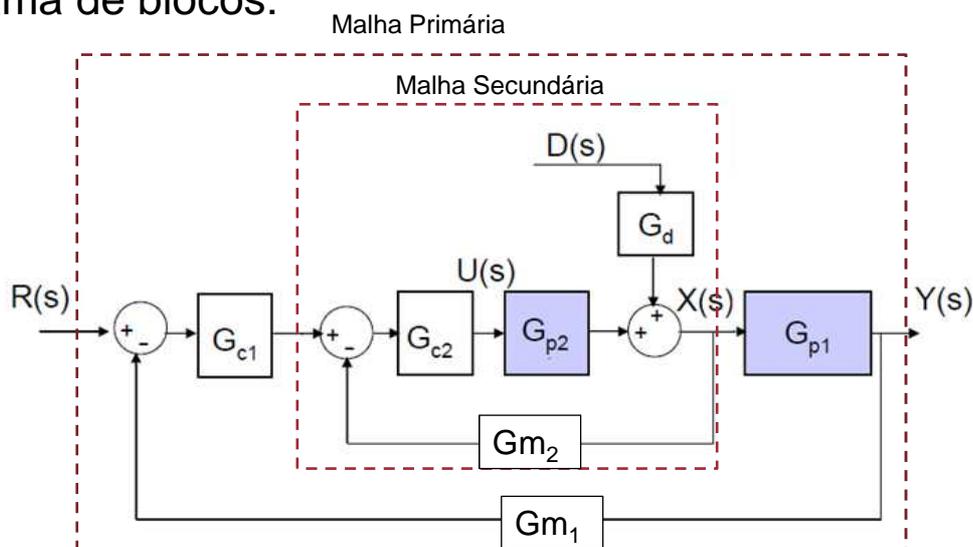
Objetivos:

- Minimizar o efeito de algumas perturbações
- Melhorar as variações dinâmicas do sistema de controle

Aplicações do Controle em Cascata

23

Diagrama de blocos:



$D(s)$: perturbação à entrada

$X(s)$: variável secundária

» reflexa a perturbação antes de que se transmita à saída

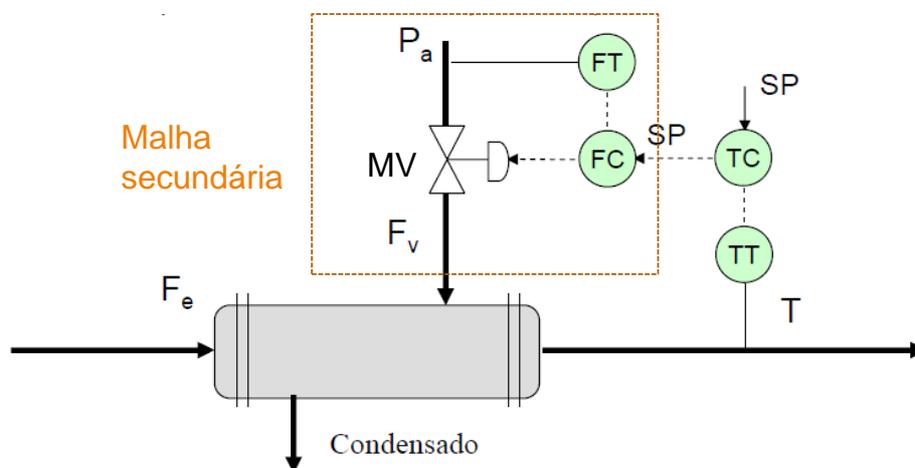
» tem relação causal com $U(s)$

Aplicações do Controle em Cascata

24

Exemplo Trocador de calor:

Malha de controle (em notação ISA simplificada)

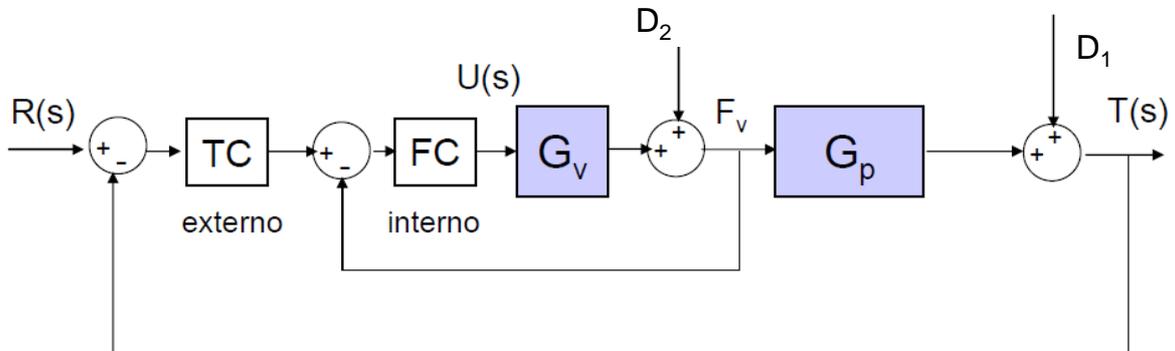


O controlador externo (TC-temperatura) fixa o ponto de referência do controlador interno (FC-vazão) cujo objetivo é corrigir o efeito sobre a vazão de combustível (F_v) da variação em P_a antes de que afete de forma significativa à temperatura T .

Aplicações do Controle em Cascata

25

Exemplo Trocador de calor: Diagrama de Controle

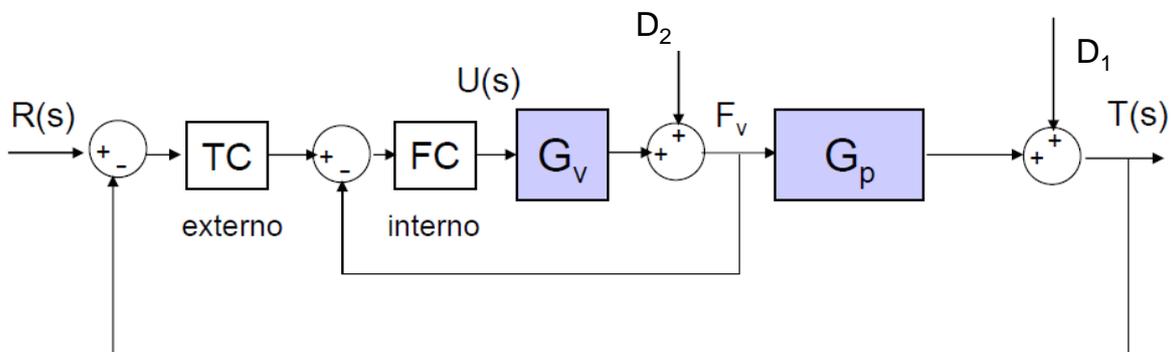


O controlador externo (TC-temperatura) fixa o ponto de referência do controlador interno (FC-vazão) cujo objetivo é corrigir o efeito sobre a vazão de combustível (F_v) da variação em P_a antes de que afete de forma significativa à temperatura T .

Aplicações do Controle em Cascata

26

Exemplo Trocador de calor: Diagrama de Controle



- processo principal: (TC-no trocador) é o processo de dinâmica mais lento
- processo secundário: (FC-Vapor) é o processo de dinâmica mais rápida
 - » o efeito das perturbações sobre o processo secundário é controlável
 - » é necessário utilizar mais instrumentação.

Sintonia do Controle em Cascata

27

Controle Cascata

SINTONIA:

primeiro se ajustam os parâmetros do controlador secundário. Posteriormente, com a malha secundária fechada, se ajustam os do controlador primário.

ETAPAS:

SINTONIA DA MALHA SECUNDARIA

- Obter um modelo da parte do processo secundário (modelo fenomenológico ou modelo experimental)
- Sintonizar o controlador secundário por qualquer dos métodos conhecidos de sintonia (normalmente se utiliza um PI já que o secundário deve ser uma malha rápida)

SINTONIA DA MALHA PRIMARIA

- Obter um modelo da variável controlada para as mudanças no SP do controlador secundário (com malha secundária já no modo automático ou fechada).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{Y^{sp}(s)} = \frac{G_{c2}G_vG_{p2}}{1 + G_{c2}G_{p2}G_{T2}} G_{P1}G_{C1} = G_{mlha\text{interna}}(s)G_{P1}(s)G_{C1}(s)$$

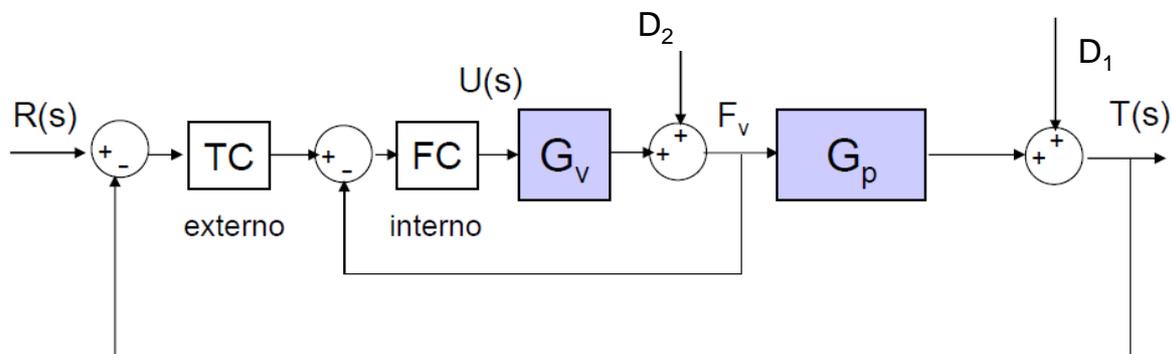
- Sintonizar o controlador primário por algum dos métodos conhecidos.

Sintonia do Controle em Cascata

28

Controle Cascata

Sintonia:



Sintonizar primeiro as malhas interiores, logo as exteriores

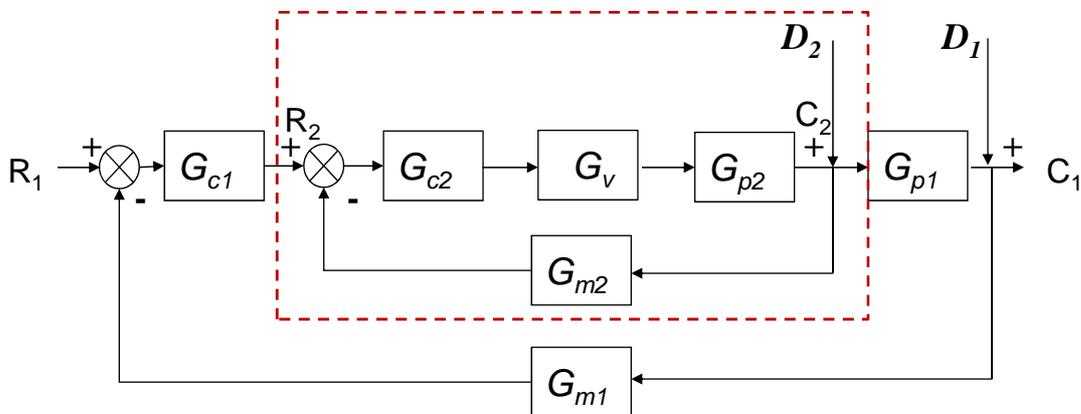
- Em geral, um sistema em cascata resulta mais rápido que uma malha simples
- Se uma malha está em modo manual, todos os externos a ela também devem estar em modo manual

Sintonia do Controle em Cascata

29

Diagrama de Blocos:

Sintonia:



Sintonizar primeiro a malha interna, logo a externa,

- Em geral, um sistema em cascata resulta mais rápido que uma malha simples
- Se uma malha está em modo manual, todas as malhas externas a ela também devem estar em modo manual

Função de transferência do Controle em Cascata

30

1. Malha Interna

$$\frac{C_2}{R_2} = \frac{G_{p2}G_{v2}G_{c2}}{1 + G_{p2}G_{v2}G_{c2}G_{m2}} = G_{cl2}$$

Pela Regra de Mason

2. Malha Externa

$$\frac{C_1}{R_1} = \frac{G_{p1}G_{cl2}G_{c1}}{1 + G_{p1}G_{cl2}G_{c1}G_{m1}}$$

Equação característica

Função de transferência do Controle em Cascata

31

Equação Característica (completa)

$$1 + G_{p1}G_{c1}G_{m1} = 0$$

$$1 + G_{p1} \frac{G_{p2}G_{v2}G_{c2}}{1 + G_{p2}G_{v2}G_{c2}G_{m2}} G_{c1}G_{m1} = 0$$

$$1 + G_{p2}G_{v2}G_{c2}G_{m2} + G_{p1}G_{p2}G_{v2}G_{c2}G_{c1}G_{m1} = 0$$

Sintonia do Controle em Cascata

32

- A estratégia em Cascata produz um limite de estabilidade, maior do que malha de controle de realimentação simples. E o valor da frequência final é também maior, indicando resposta de processo é mais rápida.
- O método de análise de estabilidade são os mesmo das malhas de realimentação simples

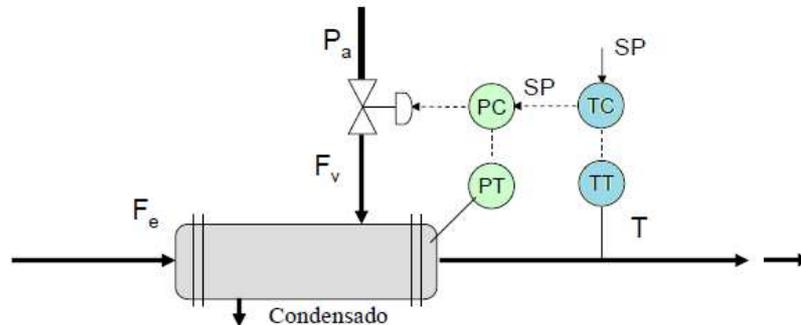
Sintonia do Controle em Cascata

33

Controle Cascata

Cascata Pressão - Temperatura

Uma malha interna (vazão) regula a vazão de vapor (MV).



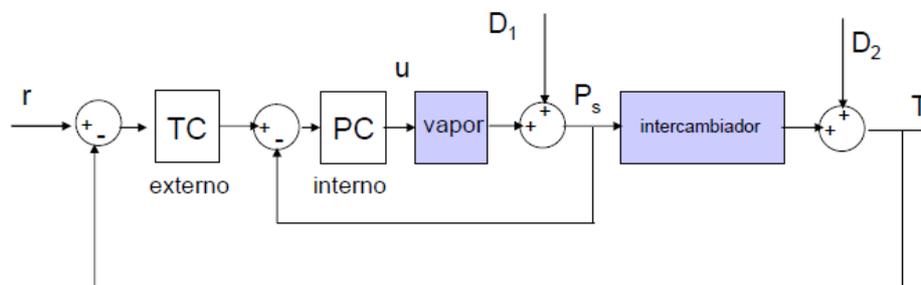
A **malha secundária** (PC) controla a pressão no interior do tanque. De esta forma se podem corrigir mais perturbações (todas as que afetam à pressão e, posteriormente à temperatura) de forma mais eficaz.

Outras Aplicações do Controle em Cascata

34

Controle Cascata

Cascata Pressão – Temperatura: Diagrama de Blocos

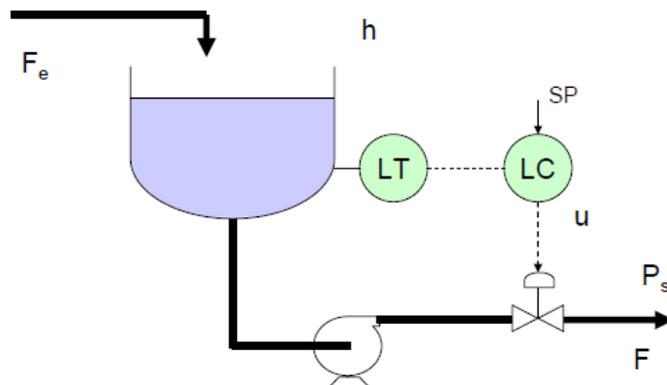


o **controle externo (temperatura-TC)** fixa a referência do **controlador interno (pressão-PC)** cujo objetivo é corrigir o efeito das perturbações (por exemplo, variações na queda de pressão em da válvula) sobre a pressão no interior do tanque (P_s) antes de que afetem de forma significativa à temperatura T .

Outras Aplicações do Controle em Cascata

35

Controle do Nível

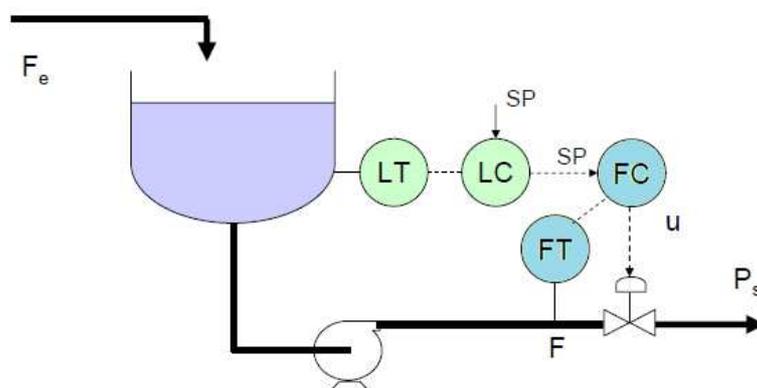


Resposta a mudanças da pressão na linha de descarga: altera o nível no tanque (h) e será corrigido pelo controlador modificando o sinal u

Outras Aplicações do Controle em Cascata

36

Controle Cascata do Nível-Vazão

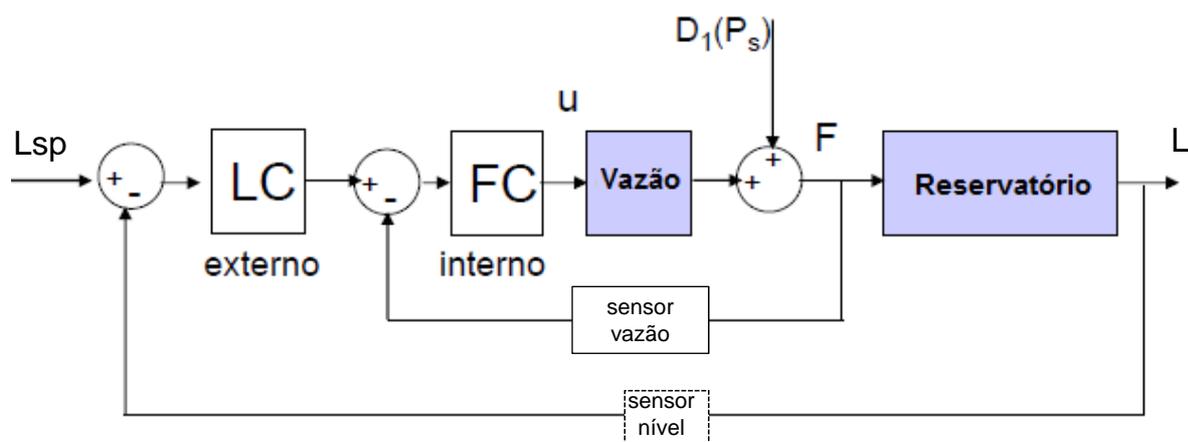


o **controle externo** (nível-LC) fixa a referência (sp) do **controle interno** (vazão-FC), cujo objetivo será corrigir as perturbações sobre a vazão F antes de atingir significativamente o nível do tanque ou reservatório.

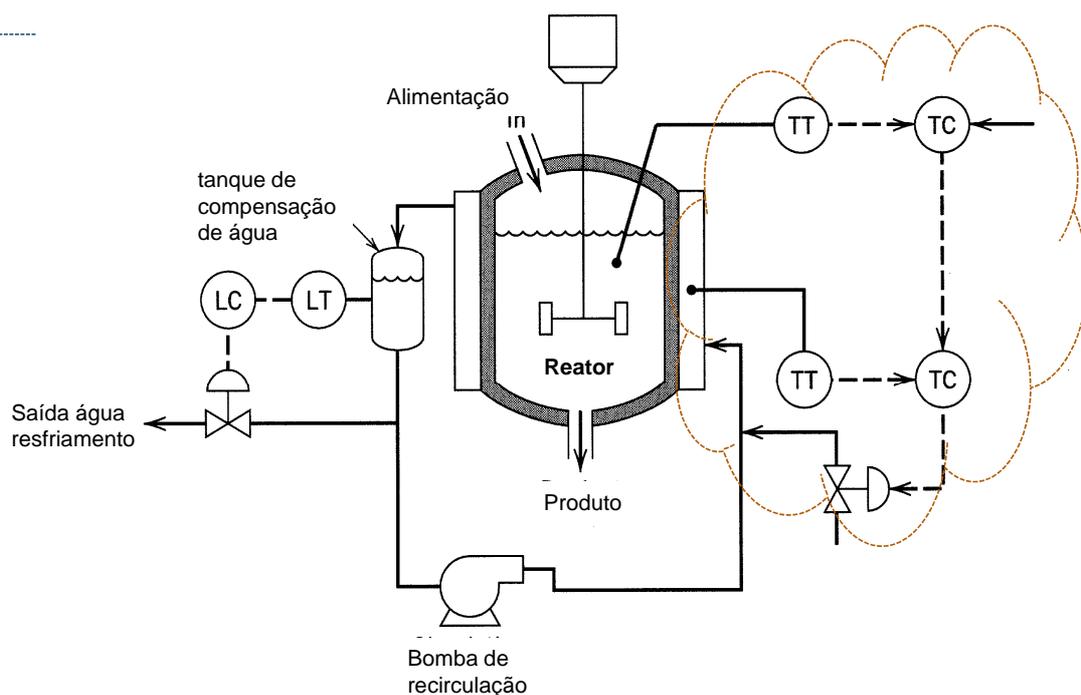
Aplicações do Controle em Cascata

37

Controle Cascata do Nível-Vazão: Diagrama do blocos



o **controle externo** (nível-LC) fixa a referência (sp) do **controle interno** (vazão-FC), cujo objetivo será corrigir as perturbações sobre a vazão F antes de atingir significativamente o nível do tanque ou reservatório.



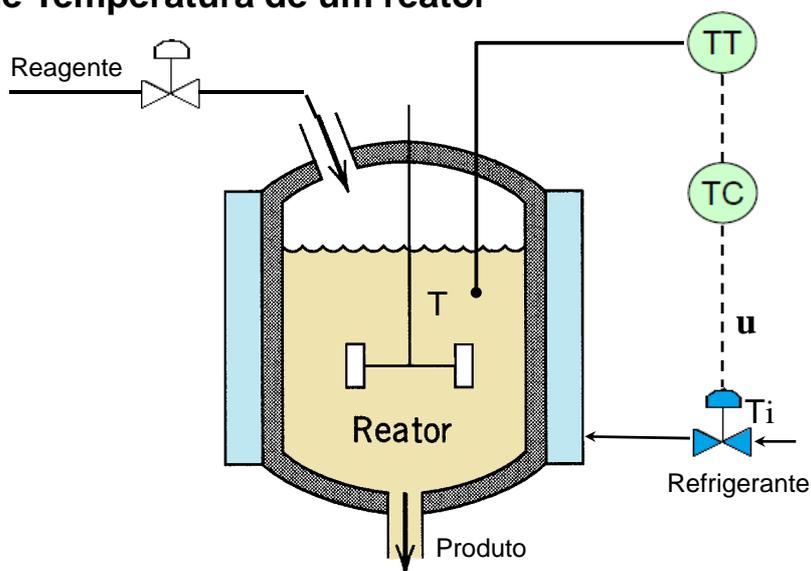
38

Controle em Cascata de reator químico exotérmico

Aplicações do Controle em Cascata

39

Controle de Temperatura de um reator

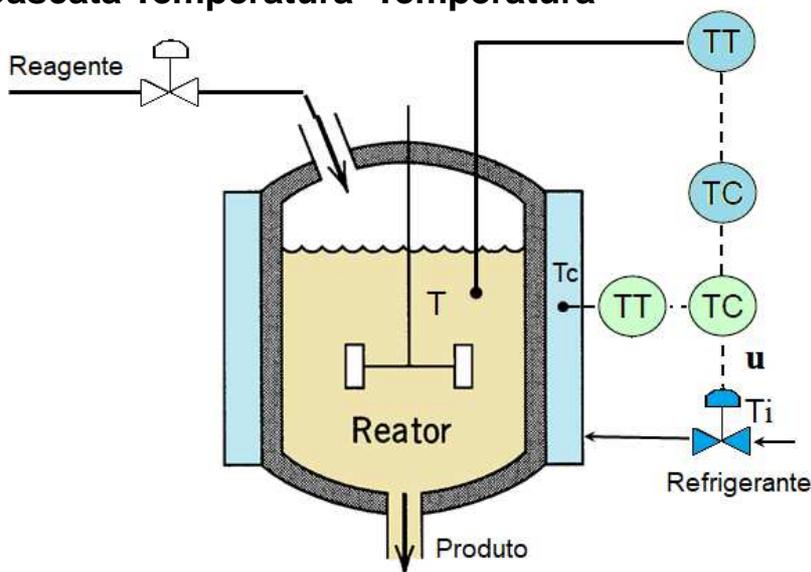


A resposta para a mudanças na temperatura do refrigerante, T_i : afeta à T do reator e, por tanto, à reação. O que será corrigido pelo controlador modificando a abertura da válvula, u , e por tanto a vazão do refrigerante na jaqueta..

Aplicações do Controle em Cascata

40

Controle Cascata Temperatura–Temperatura

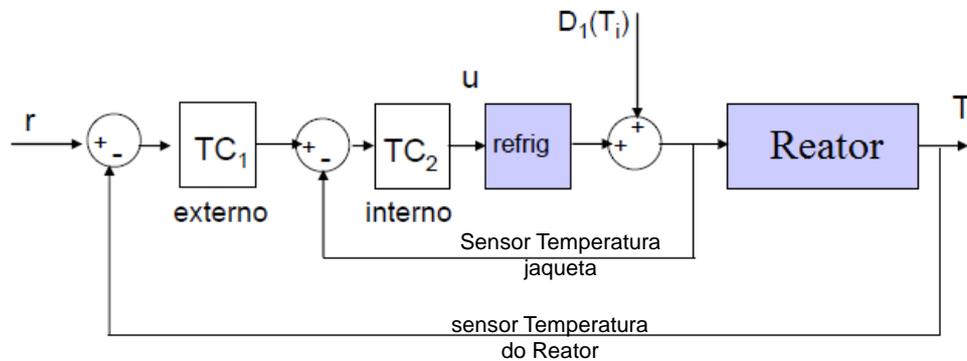


O controlador externo (temperatura no interior-TC1) fixa o *setpoint* do controlador interno (temperatura da camisa-TC2) cujo objetivo é corrigir as perturbações que afetam a T_r antes de que afetem significativamente à temperatura T .

Aplicações do Controle em Cascata

41

Controle Cascata: Diagrama de Blocos



O controlador externo (temperatura no interior-TC1) fixa o *setpoint* do controlador interno (temperatura da camisa-TC2) cujo objetivo é corrigir as perturbações que afetam a T_{jaqueta} antes de que afetem significativamente à temperatura T_{reator} .

Referências:

- Seborg , Cap. 16 – Cascade Control
- Smith & Corripio, Cap. 9 – Controle em cascata