

107484 – Controle de Processos

Aula: Controle Antecipatório (Alimentação ou Feedforward)

Prof. Eduardo Stockler

Departamento de Engenharia Elétrica

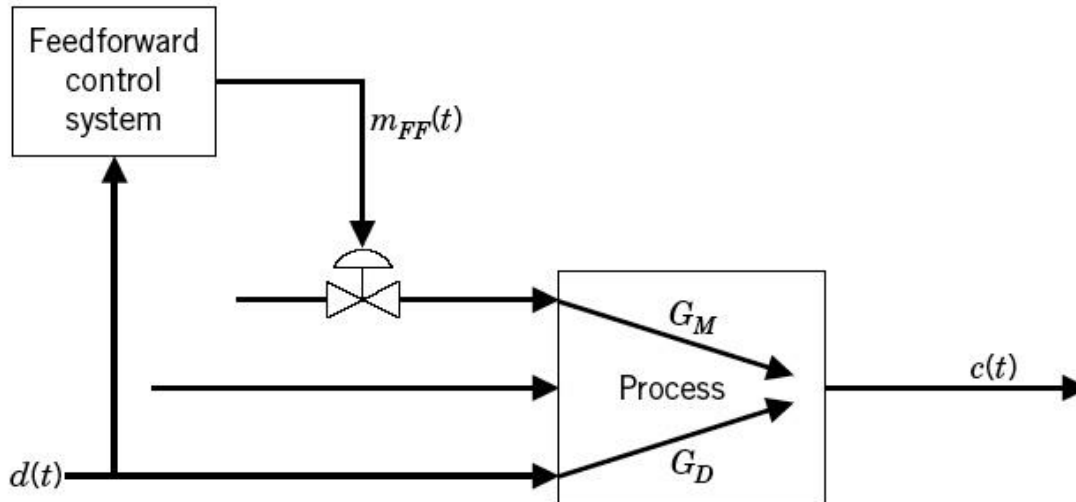
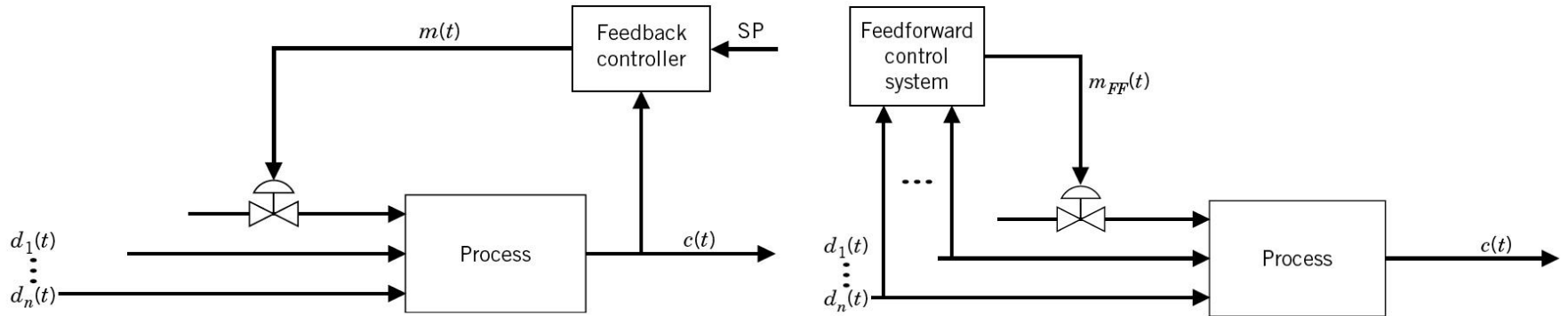
Universidade de Brasília



UnB

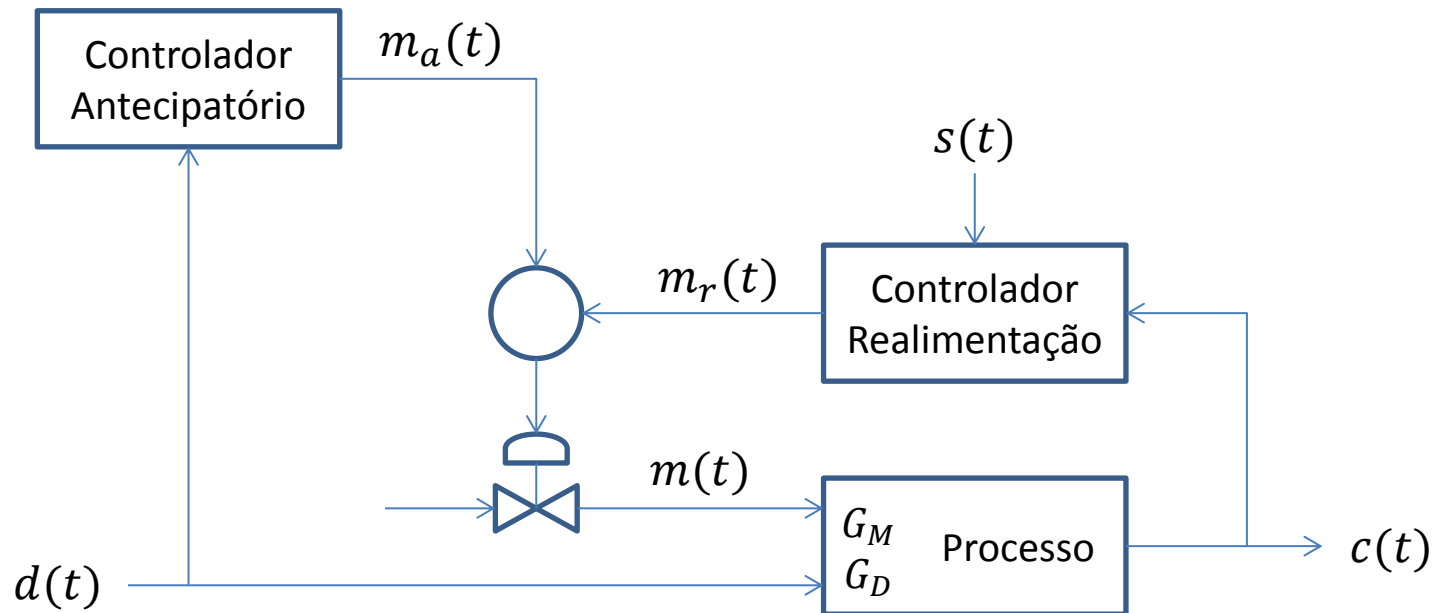
1º Semestre 2015

Recapitulando o conceito



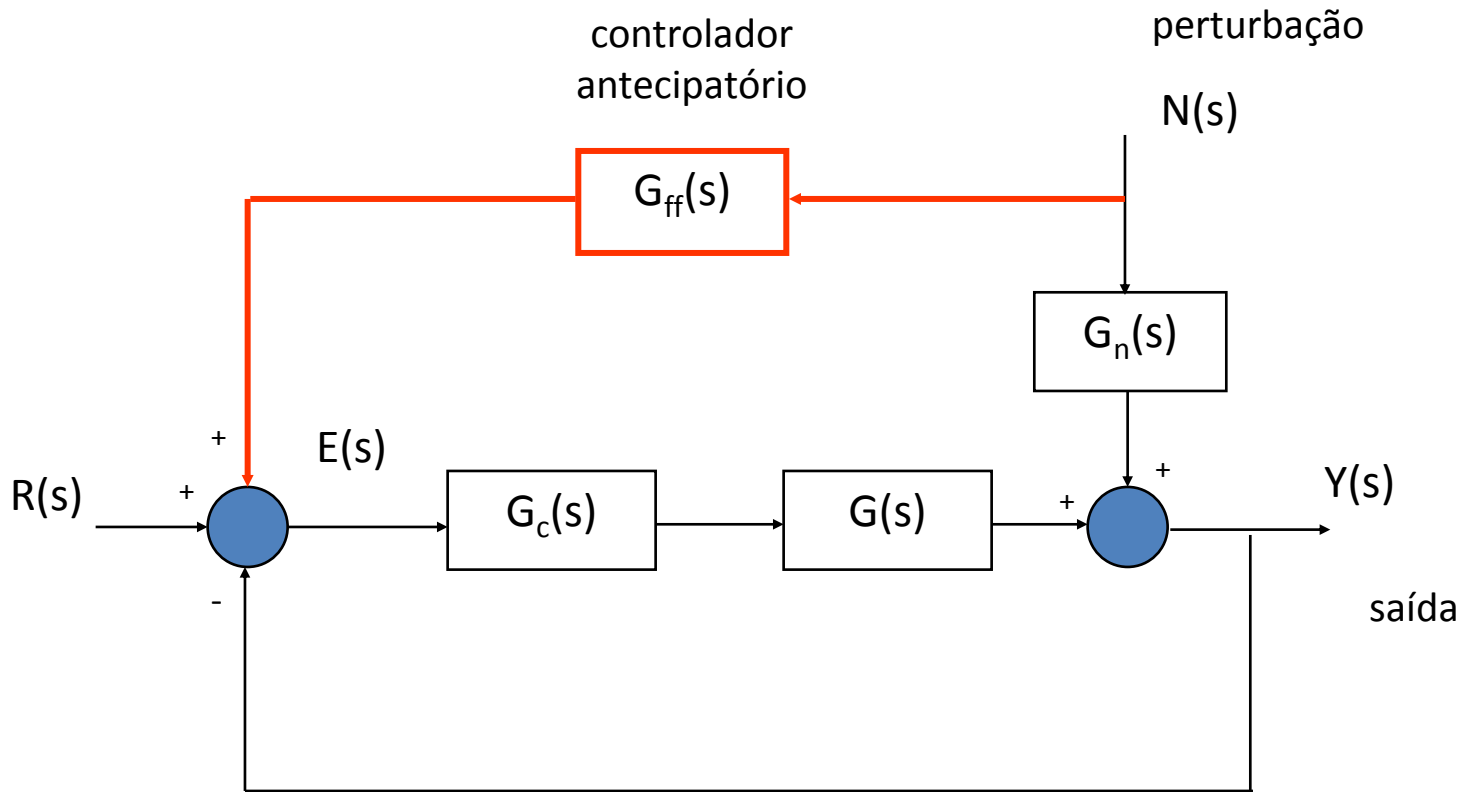
O controle antecipatório deve ser projetado para compensar os distúrbios mensuráveis “importantes”.

Controle Antecipatório

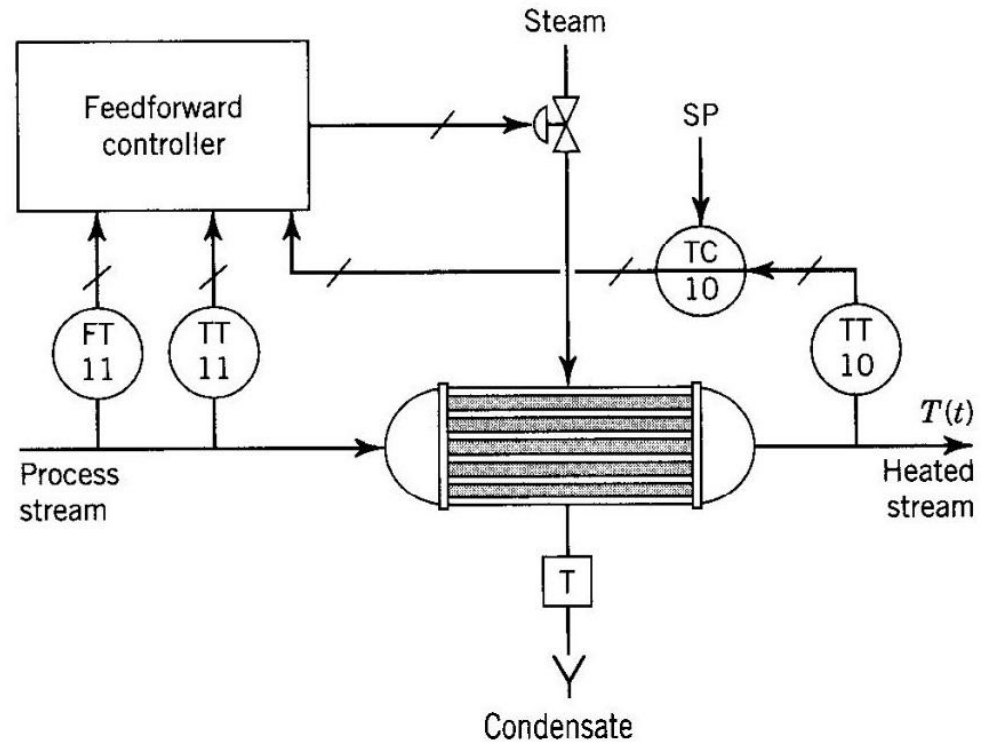


- Antecipação da ação do distúrbio no processo
- Controle antecipatório é usado para distúrbios significantes que afetam a saída (o controle cascata é utilizado para distúrbios que afetam a entrada)
- Necessária medição dos distúrbio (custo)
- Conhecimento da dinâmica do processo (uso combinado)

Controle Antecipatório



Controle Antecipatório

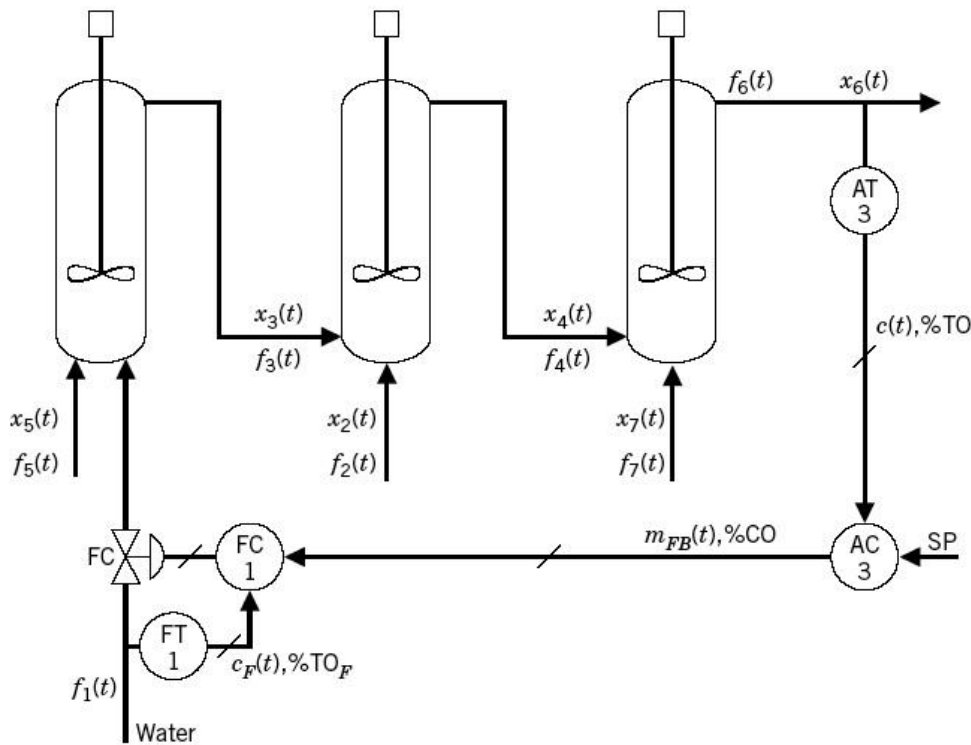


Trocador de calor

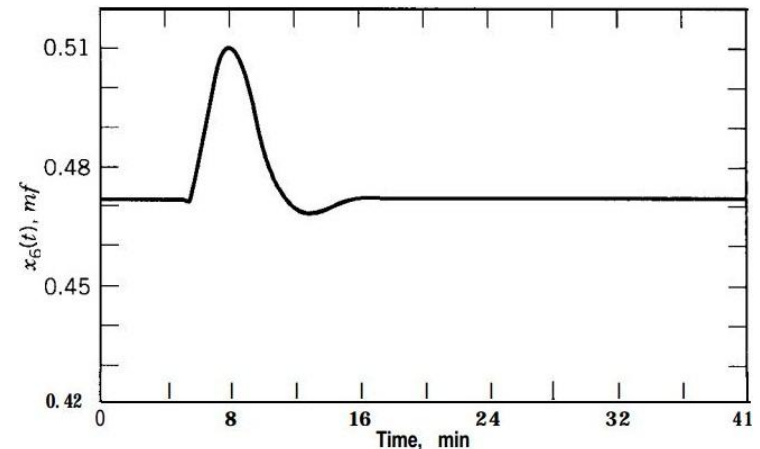
(Exemplo)

SISTEMA DE MISTURA

Processo de Mistura

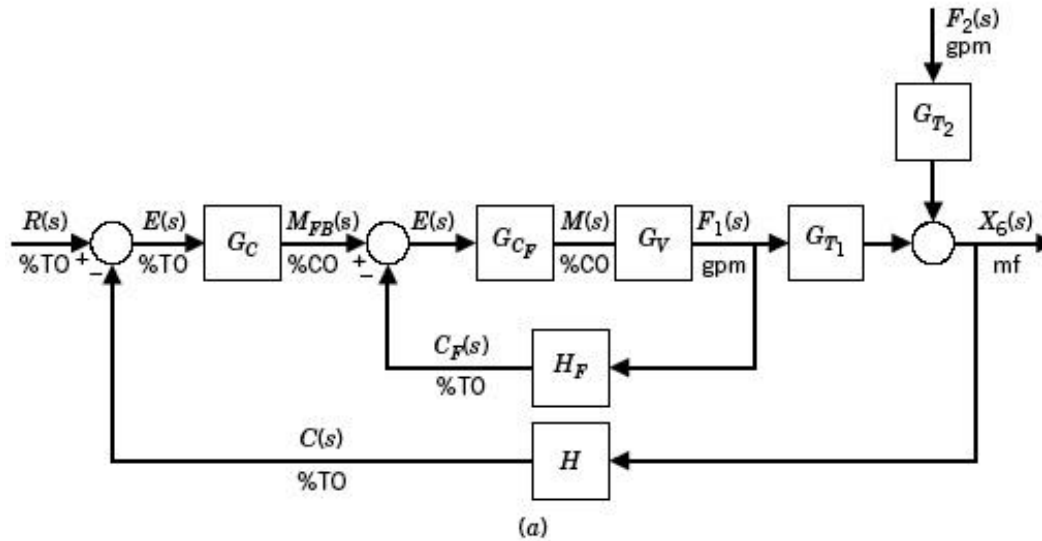


- 3 fluxos misturados com água para uma composição final desejada de A, x_6
- Reservatórios de V cte
- Principais distúrbios f_2 e x_2
- Ex.: Resposta de x_6 controle realimentação qdo f_2 varia de 1000 a 2000 gpm



Varição de 11,23% (IAE = 73,06 fm-min) contudo especificação é $\pm 1,5\%$ (0,465-0,479 fm).

Diagrama de Blocos



$$G_F = \frac{G_{C_F} G_V}{1 + G_{C_F} G_V H_F}$$

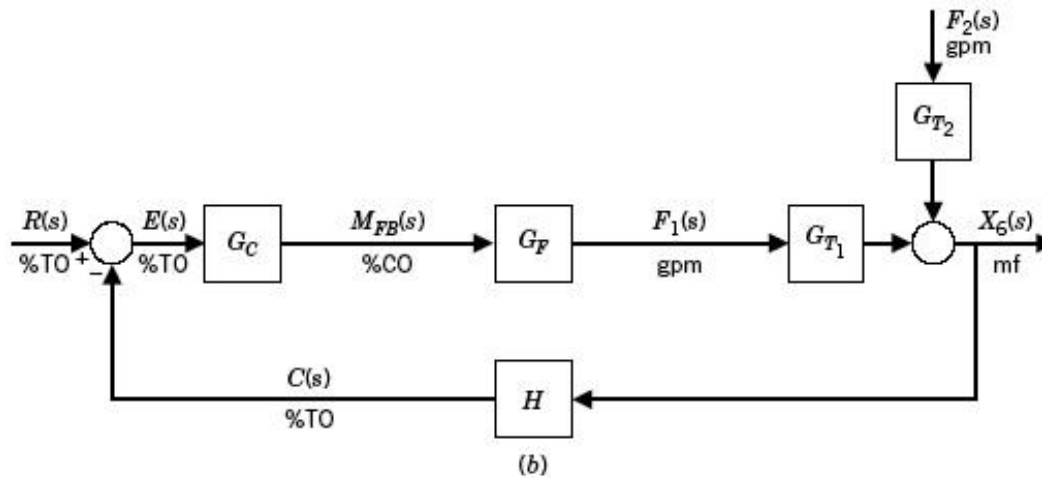
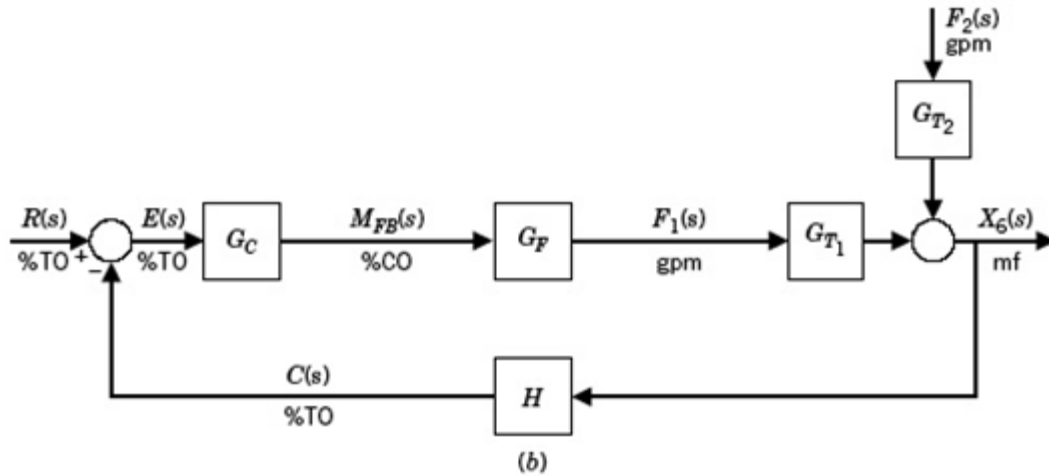
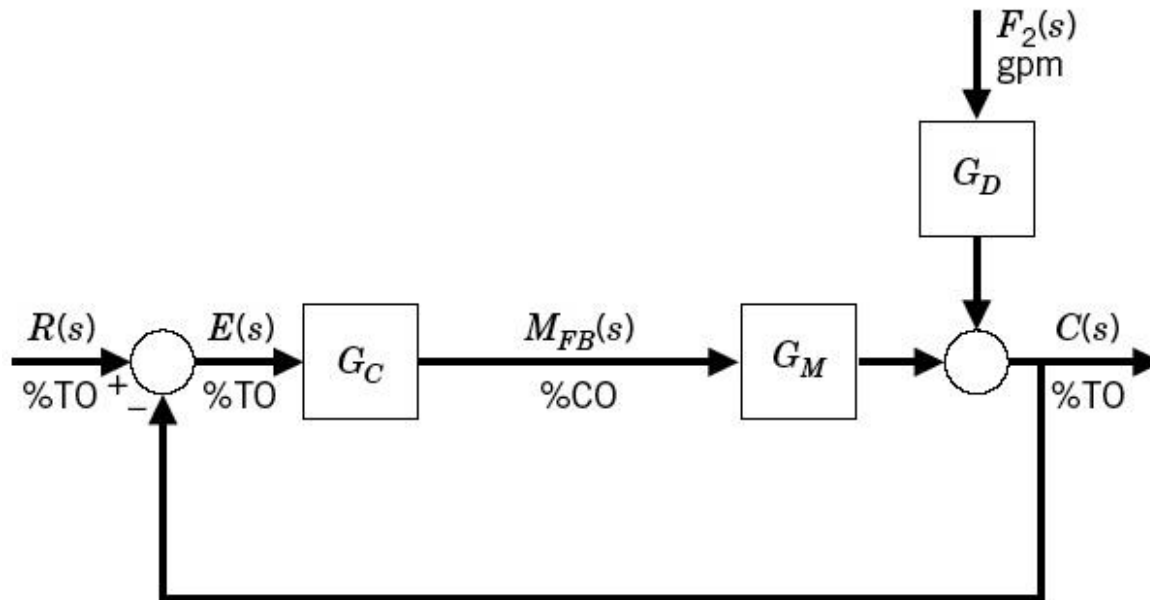


Diagrama de Blocos Simplificado



$$G_F = \frac{G_{C_F} G_V}{1 + G_{C_F} G_V H_F}$$



$$G_M = G_F G_{T_1} H$$

$$G_D = G_{T_2} H$$

Diagrama de Blocos do Controle Antecipatório

Desconectando G_C :

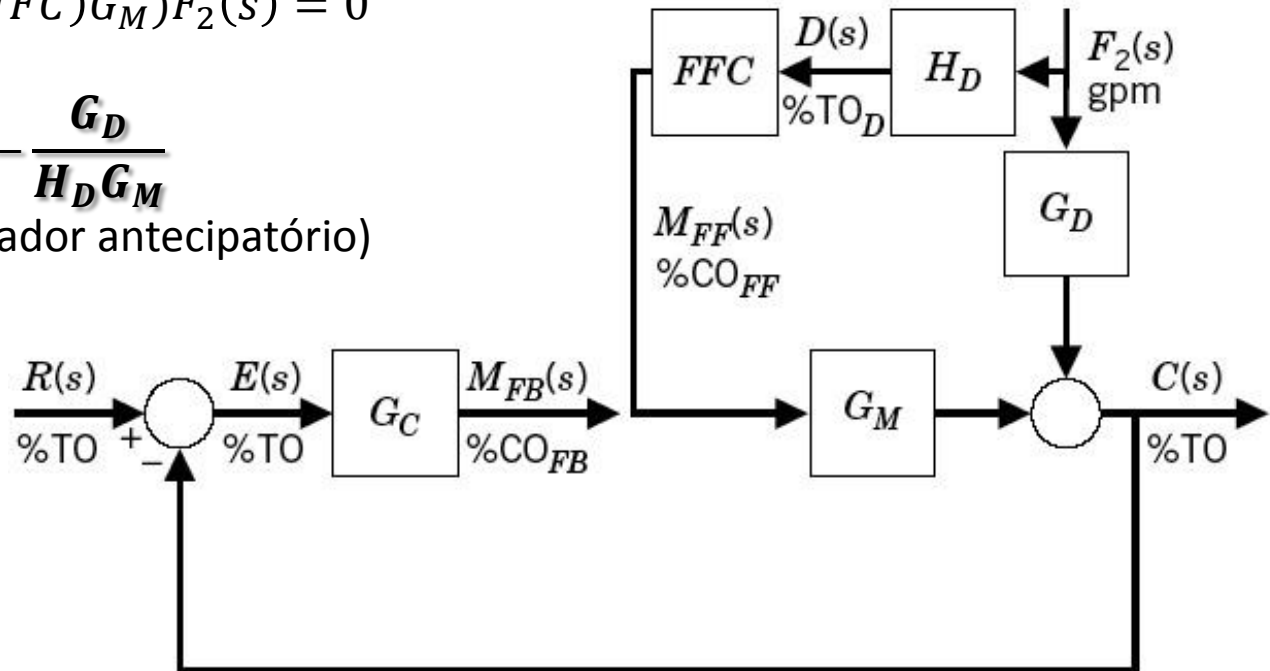
- Modo como $F_2(s)$ afeta $C(s)$:

$$C(s) = G_D F_2(s) + H_D (FFC) G_M F_2(s)$$
- Objetivo:

$$C(s) = (G_D + H_D (FFC) G_M) F_2(s) = 0$$
- Portanto,

$$FFC = -\frac{G_D}{H_D G_M}$$

(projeto do controlador antecipatório)



Modelagem do Processo

- Modelando o processo por um modelo FOPDT

$$G_M = \frac{K_M e^{-\theta_M s}}{\tau_M s + 1}, \quad \begin{array}{l} \%ST \\ \%SC \end{array}$$
$$G_D = \frac{K_D e^{-\theta_D s}}{\tau_D s + 1}, \quad \begin{array}{l} \%ST \\ gpm \end{array}$$

- Considerando

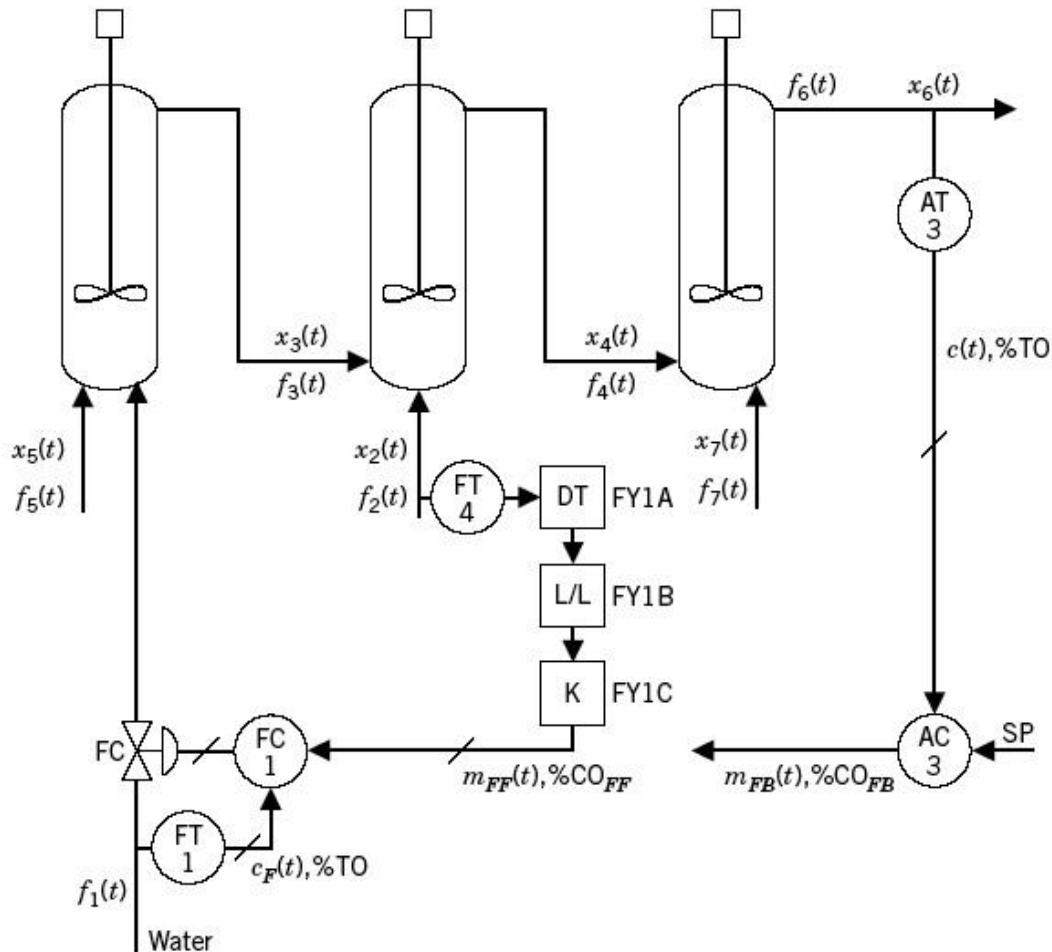
$$H_D = K_{TD}, \quad \begin{array}{l} \%ST_D \\ gpm \end{array}$$

Tem-se,

$$FFC = -\frac{K_D}{K_{TD} K_M} \left(\frac{\tau_M s + 1}{\tau_D s + 1} \right) e^{-(\theta_D - \theta_M)s}$$

- FFC: ganho (comp. est. estac.) + termo avança-atraso (comp. dinâmico)
+ tempo morto (não pode ser positivo)
- No exemplo: $K_D > 0$, $K_M < 0$ e $K_{TD} > 0$

Implementação do Controlador Antecipatório



$$FY1C: -\frac{K_D}{K_{TD}K_M}$$

$$FY1B: \left(\frac{\tau_M s + 1}{\tau_D s + 1} \right)$$

$$FY1A: e^{-(\theta_D - \theta_M)s}$$

Obtenção do Modelo do Processo

- Por meio da resposta ao degrau de 5% no controlador de realimentação

$$G_M = \frac{-1,095e^{-0,93s}}{3,82s + 1}, \quad \frac{\%ST}{\%SC}$$

Variando $f_2(t)$ em 10 gpm

$$G_D = \frac{0,0325e^{-0,75s}}{2,75s + 1}, \quad \frac{\%ST}{gpm}$$

Calibrando o transmissor em 0 a 3000 gpm

$$H_D = K_{T_D} = \frac{100}{3000} = 0,0333, \quad \frac{\%ST_D}{gpm}$$

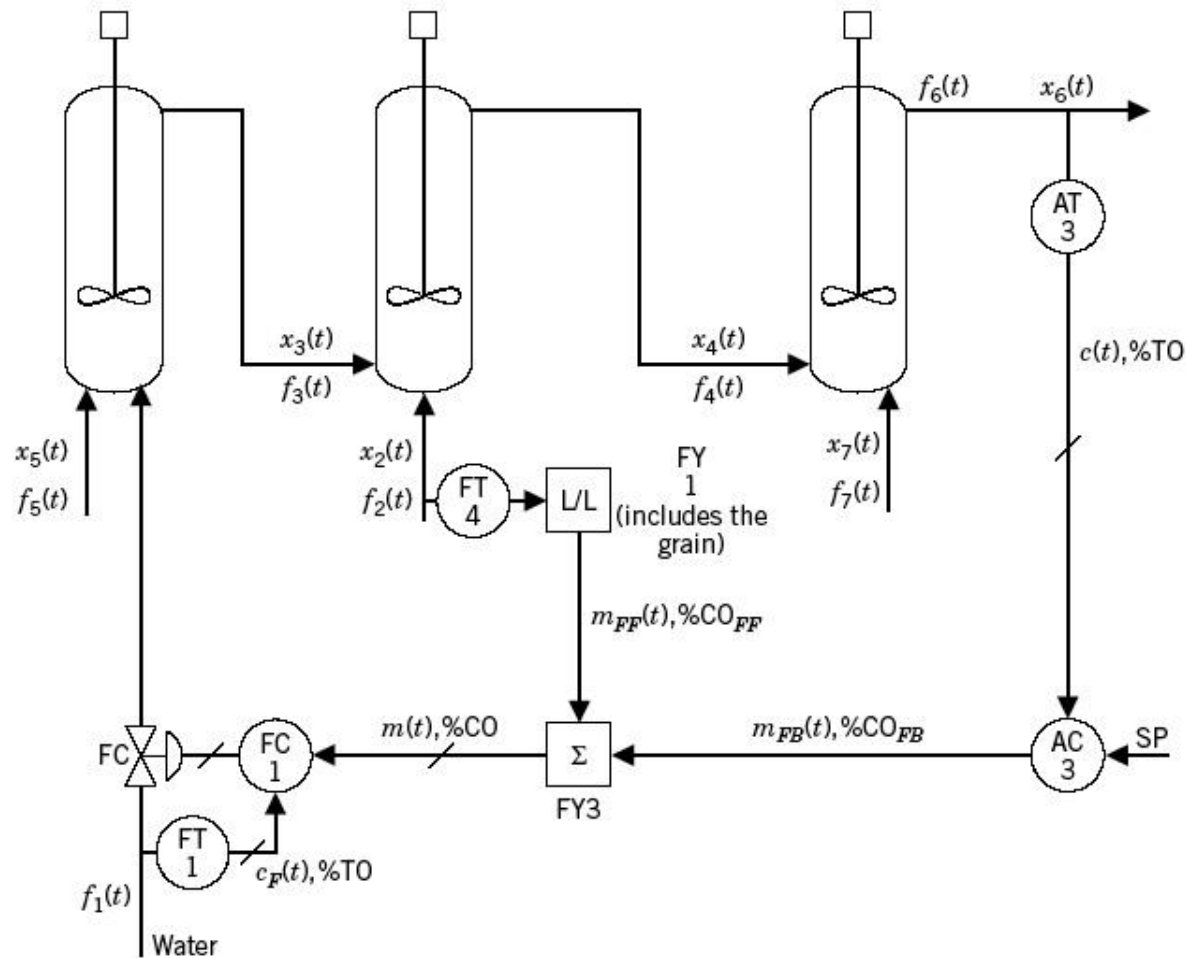
Tem-se,

$$FFC = 0,891 \left(\frac{3,82s + 1}{2,75s + 1} \right) e^{-(0,75-0,93)s}$$

Controlador implementável (realizável),

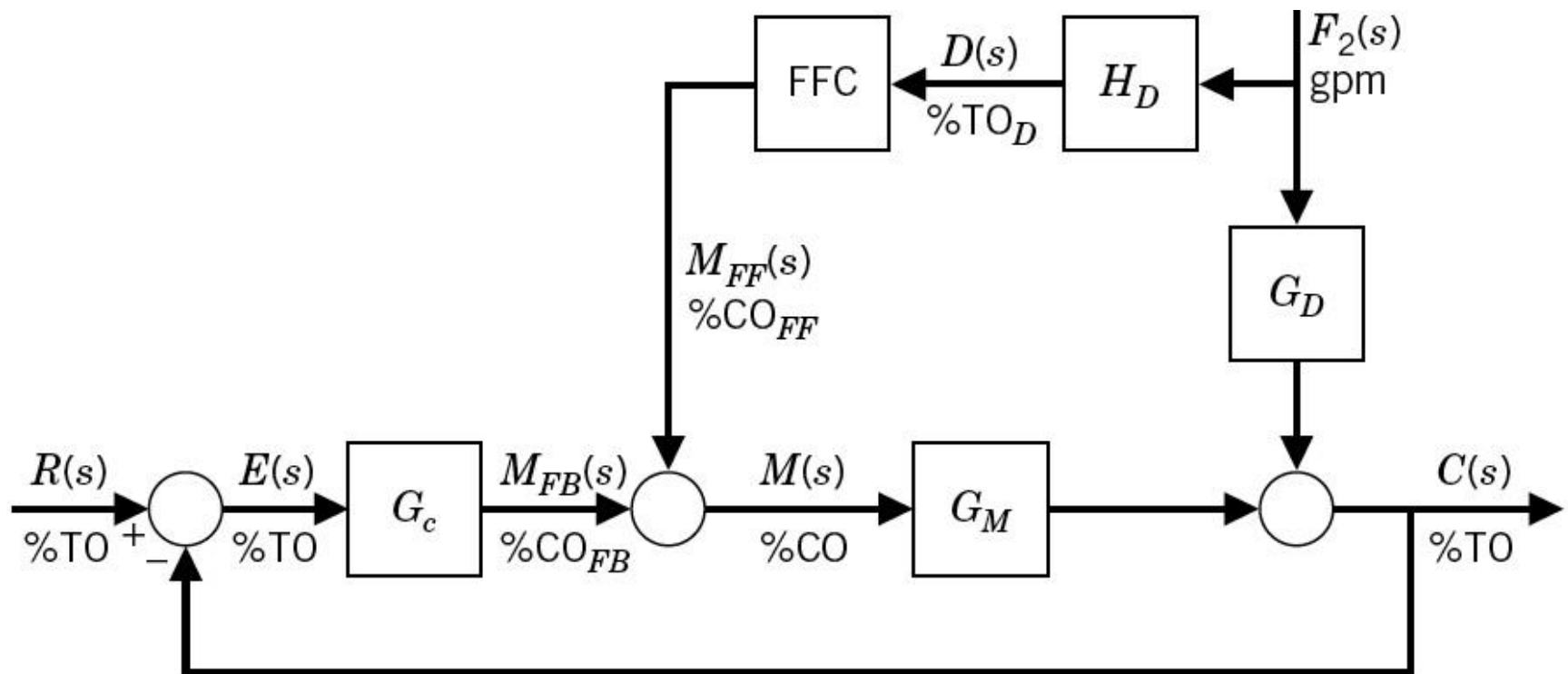
$$FFC = 0,891 \left(\frac{3,82s + 1}{2,75s + 1} \right)$$

Implementação do Controlador Antecipatório e de Realimentação (P&ID)



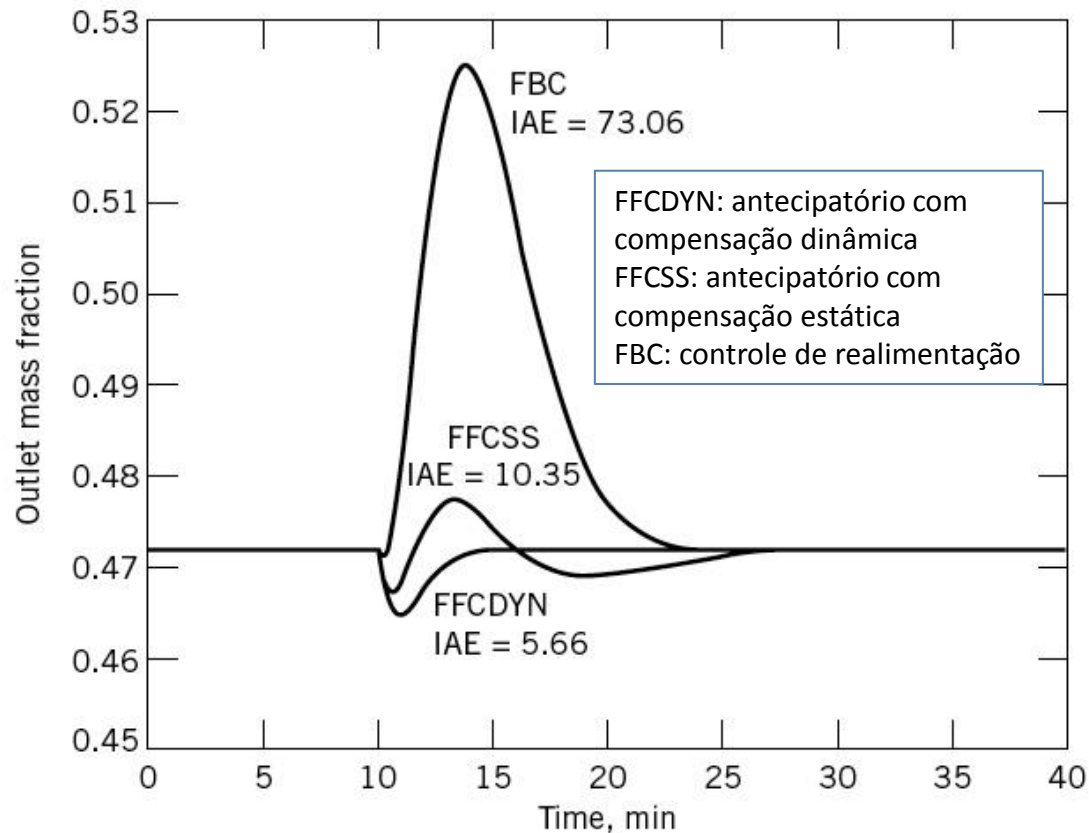
Implementação do Controlador Antecipatório e de Realimentação

(Diagrama de Blocos)



Resposta ao distúrbio

Resposta de x_6 quando f_2 varia de 1000 a 2000 gpm



Controle antecipatório (ganho de estado estacionário, FFC=0,891): variação de 1,05%

Controle antecipatório (ganho de estado estacionário+dinâmico): variação de 0,21%

Controle de realimentação: variação de 11,23%

Obs.: especificação é $\pm 1,5\%$

Controlador Avanço-Atraso (*Lead-Lag*)

- Controlador Avanço-Atraso

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\tau_{ld}s+1}{\tau_{lg}s+1}$$

τ_{ld} : cte. tempo de avanço

τ_{lg} : cte. tempo de atraso

Para $U(s) = A/s$,

$$y(t) = A \left(1 + \frac{\tau_{ld} - \tau_{lg}}{\tau_{lg}} e^{-t/\tau_{lg}} \right)$$

Controlador Avanço-Atraso (*Lead-Lag*)

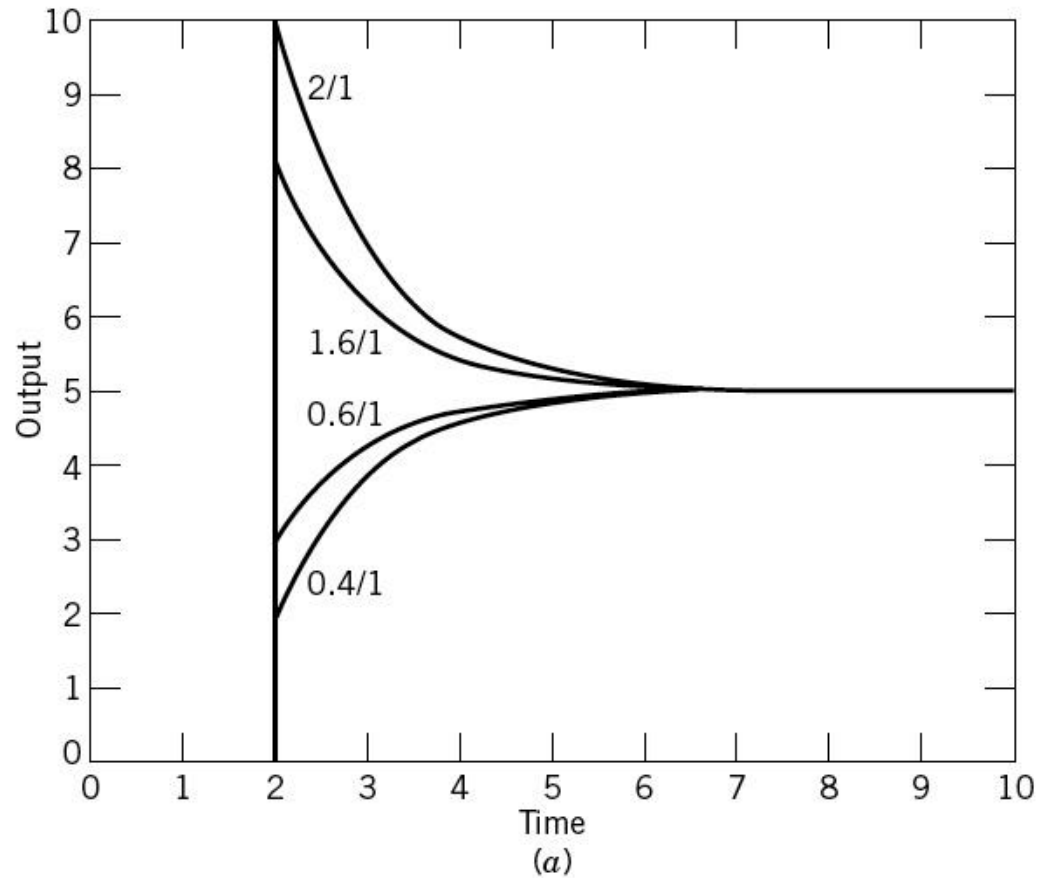


Figure 11-3.1a Response of lead-lag to an input change of 5 units.

Controlador Avanço-Atraso (*Lead-Lag*)

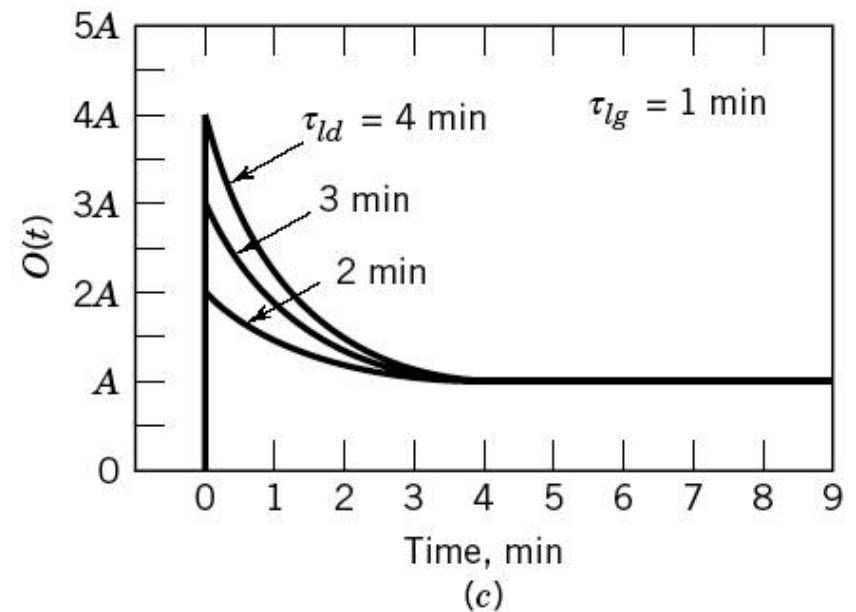
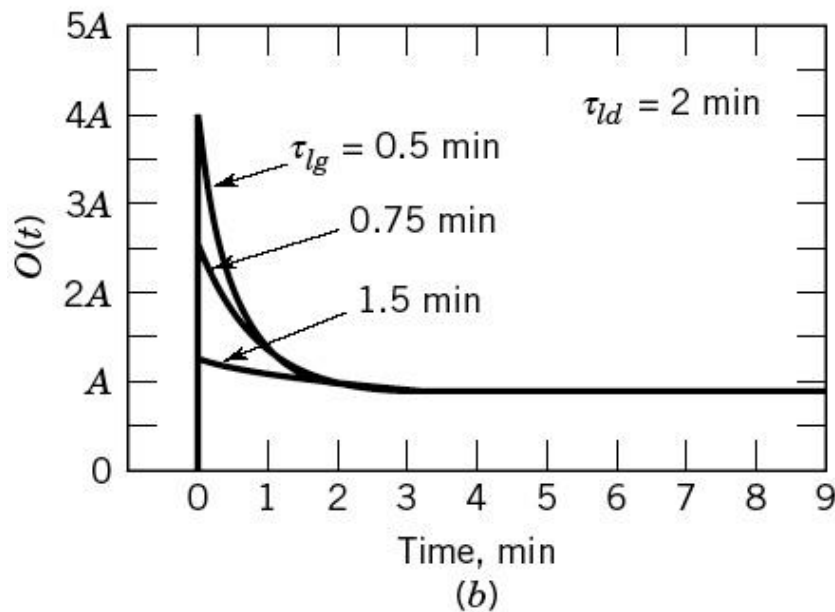


Figure 11-3.1b,c Response of lead-lag to an input of A units of magnitude.

Controlador Avanço-Atraso (*Lead-Lag*)

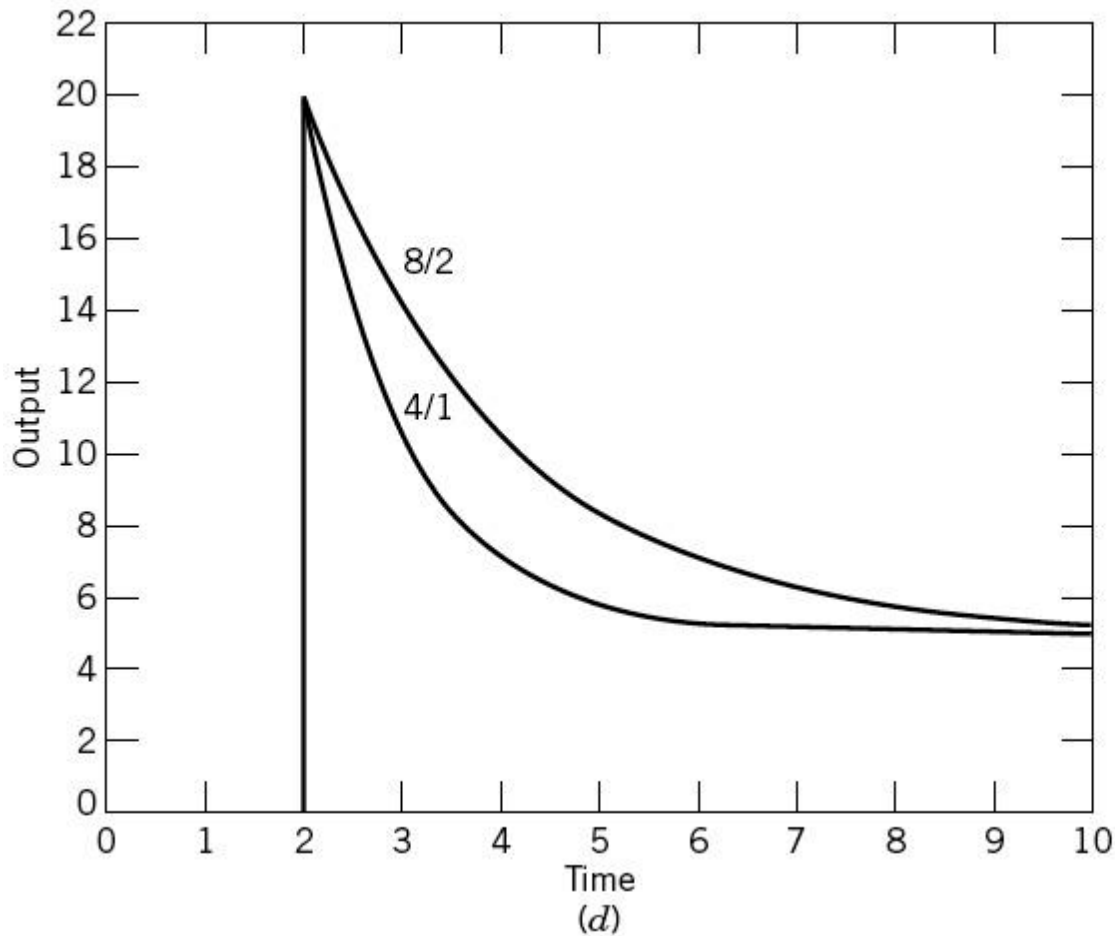


Figure 11-3.1d Response of lead-lag to an input change of 5 units.

Comentários

- O processo responde mais lentamente à uma variação de $m(t)$ do que à $f_2(t)$
- O controlador FFC deve “acelerar” o caminho $G_M(s)$ (não há θ no controlador FFC)
- $\frac{\tau_{ld}}{\tau_{lg}} = 3,82/2,75 = 1,39$ (se $f_2(t)$ varia 1%, a saída de FFC varia $(0,891)(1,39)=1,238\%$)
- Controle de realimentação compensa inexactidão do controlador antecipatório e outros distúrbios não considerados

Transferência sem impacto

- Somador: $S = K_x m_{FB}(t) + K_y m_{FF}(t) + B$, $K_x, K_y = \{0, +1, -1\}$
- Transferência sem impacto do controle FB para FB/FF
 1. Somador em manual (saída congelada)
 2. Controlador FF ligado ($K_y = 1$) e $m_{FF}(t) = \overline{m_{FF}}$ lido em FY-3
 3. Termo constante B definido como $-\overline{m_{FF}}$
 4. Somador em automático

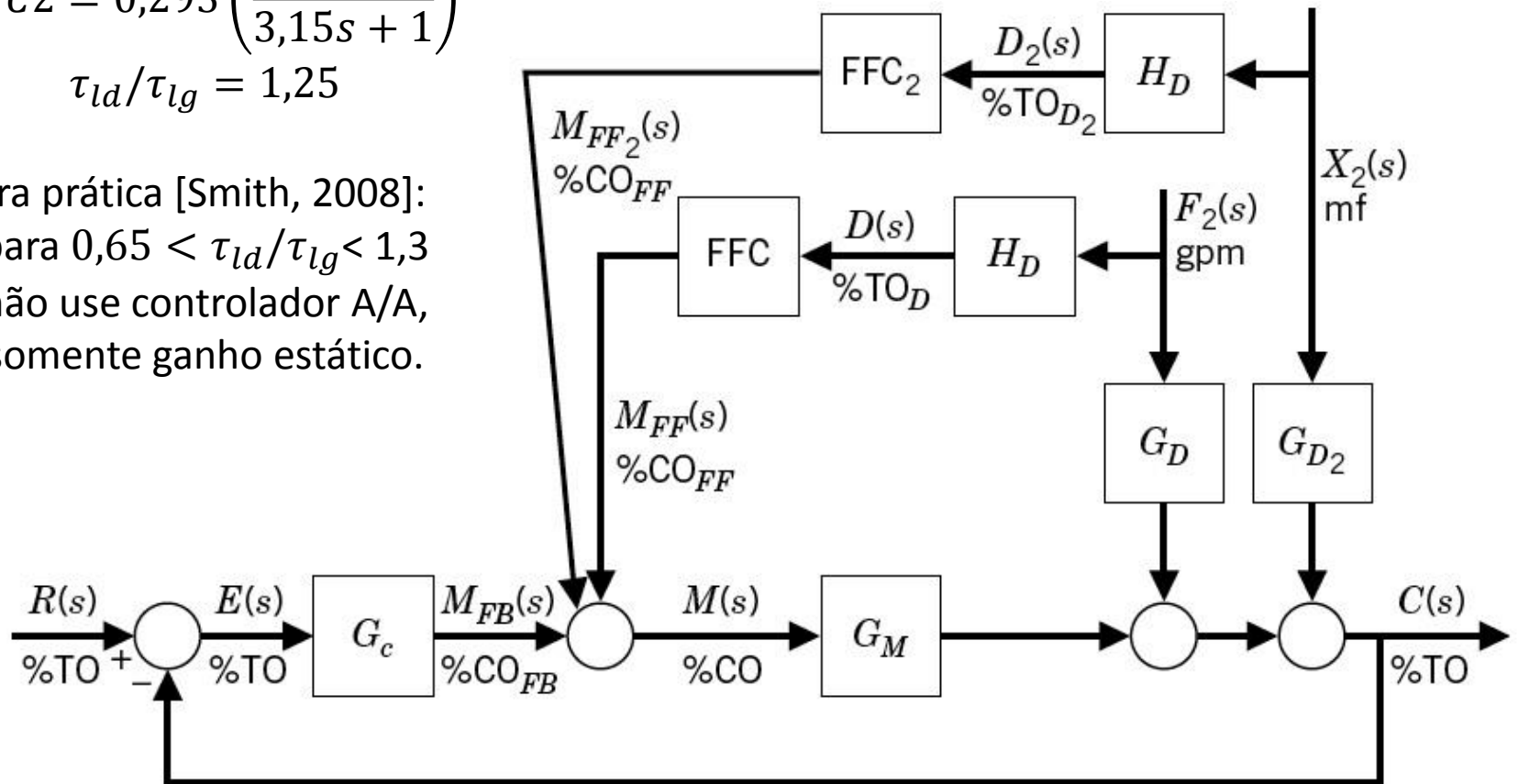
Ex.: $f_2 = 1500 \text{ gpm}$ (FT-4 em 50%), $S = m_{FB}(t) + (1)(50\%)(0,891) - 44,55 = m_{FB}(t)$
Ex.: $f_2 = 1800 \text{ gpm}$ (FT-4 em 60%), $S = m_{FB}(t) + 53,49 - 44,55 = m_{FB}(t) + 8,91\%$
- Forma automática: $S = K_x m_{FB}(t) + K_y m_{FF}(t) + B$, $B = \{B_{FB} \text{ ou } B_{FF}\}$
 1. Originalmente $B_{FB} = B_{FF} = 0$
 2. Somente FB: $K_y = 0$, $B = B_{FB}$, $B_{FF} = -m_{FF}(t) + B_{FB}$
 3. FF ligado: B_{FF} congela, $K_y = 1$, $B = B_{FF}$, $B_{FB} = m_{FF}(t) + B_{FF}$
 4. FF desligado: B_{FB} congela, $K_y = 0$, $B = B_{FB}$

Compensação do distúrbio em $x_2(t)$

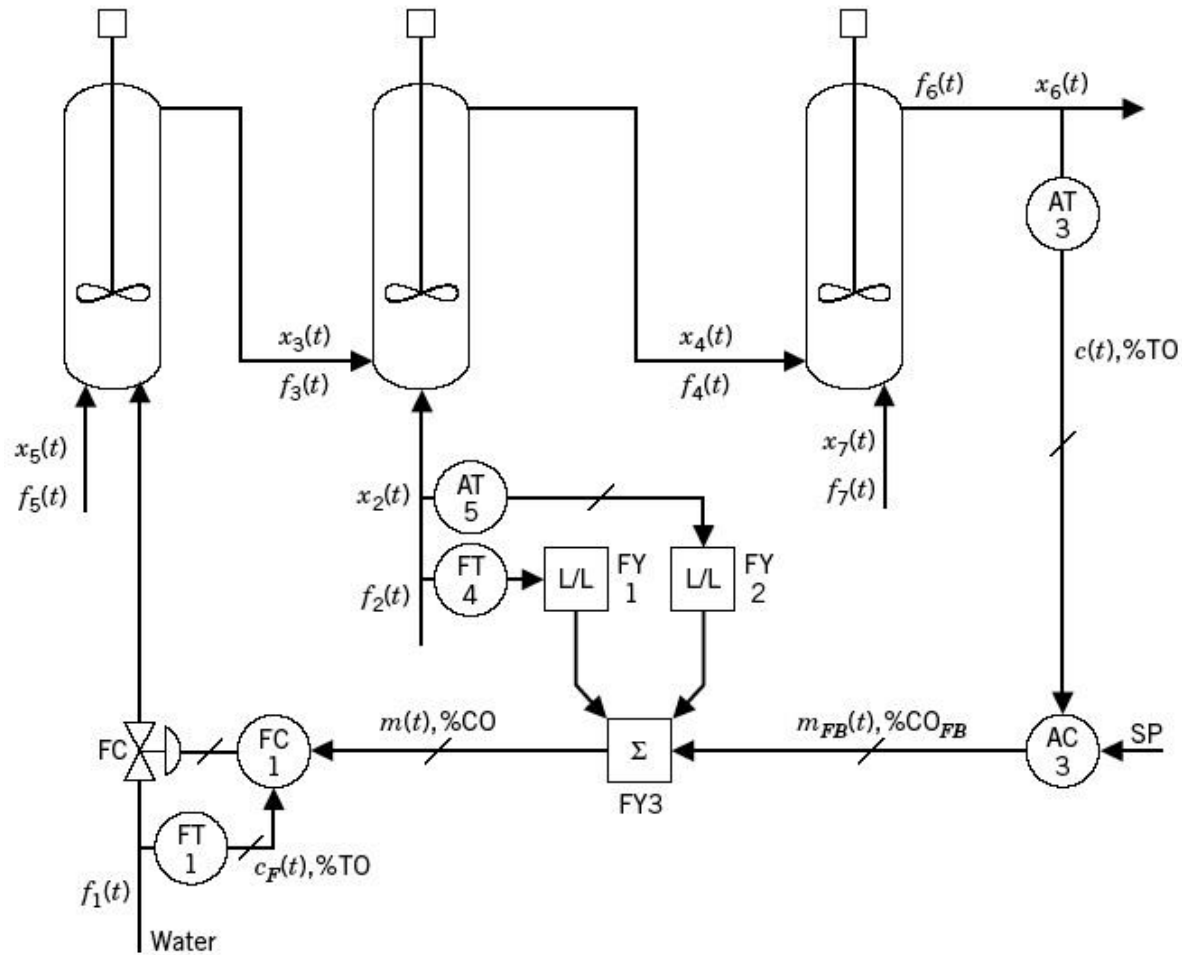
$$FFC2 = 0,293 \left(\frac{3,82s + 1}{3,15s + 1} \right)$$

$$\tau_{ld}/\tau_{lg} = 1,25$$

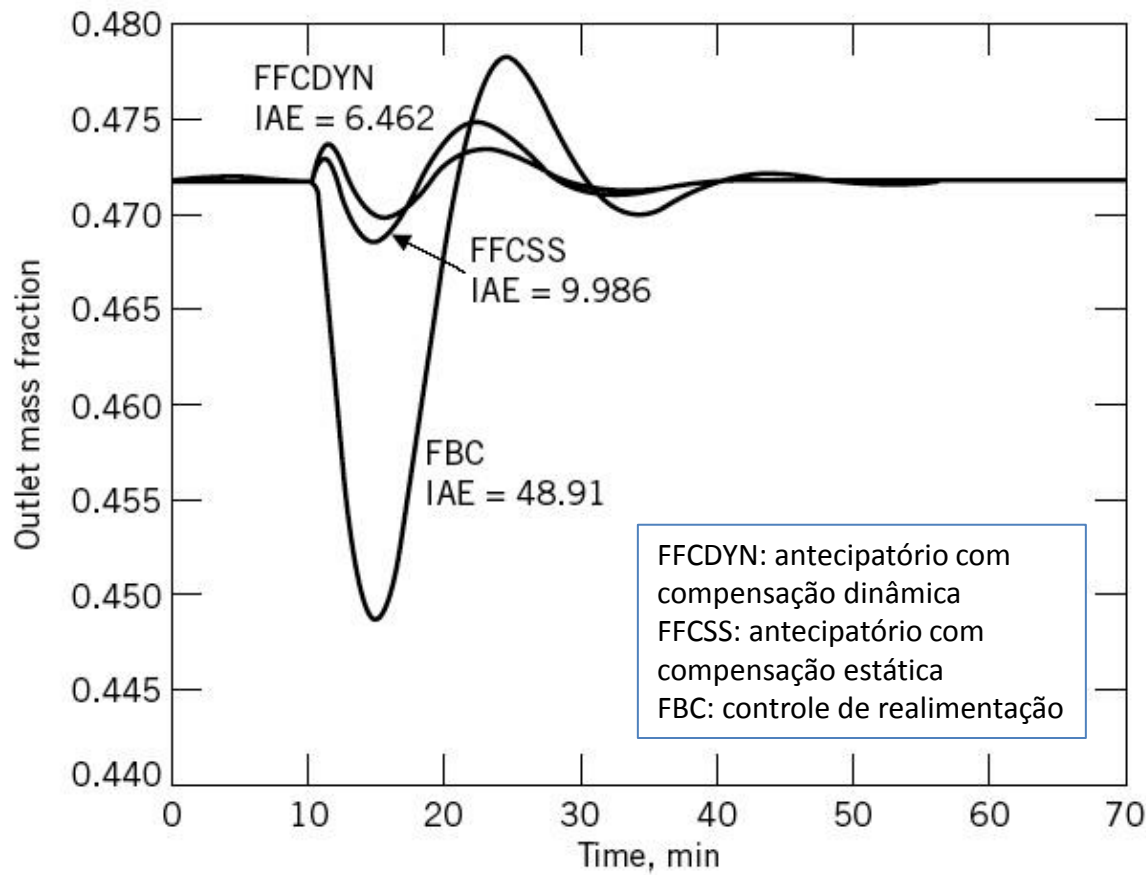
Regra prática [Smith, 2008]:
 para $0,65 < \tau_{ld}/\tau_{lg} < 1,3$
 não use controlador A/A,
 somente ganho estático.



Implementação da compensação do distúrbio em $x_2(t)$



Resposta ao distúrbio em $x_2(t)$



Resposta de $x_6(t)$ quando x_2 varia $-0,2$

Controlador Antecipatório Não-linear

- O ganho estático $-K_D/K_{T_D}K_M$ pode ser escrito utilizando a dinâmica não-linear do modelo
- Objetivo

$$MV(t) = f(d_1(t), \dots, d_n(t), SP)$$

- Para o processo estudado

$$f_1(t) = f(f_5(t), x_5(t), f_2(t), x_2(t), f_7(t), x_7(t), x_6^{SP}(t))$$

- Como f_2 e x_2 são os distúrbios importantes

$$f_1(t) = f(\bar{f}_5, \bar{x}_5, f_2(t), x_2(t), \bar{f}_7, \bar{x}_7, x_6^{SP}(t))$$

Incógnitas: $f_1(t)$ e $f_6(t)$ ($f_2(t)$ e $x_2(t)$ não são incógnitas porque são medidas)

- Balanço total de massa e balanço de massa sobre o componente A

$$\rho \bar{f}_5 + \rho f_1(t) + \rho f_2(t) + \rho \bar{f}_7 - \rho f_6(t) = 0$$

$$\rho \bar{f}_5 \bar{x}_5 + \rho f_2(t) x_2(t) + \rho \bar{f}_7 \bar{x}_7 - \rho f_6(t) x_6^{SP}(t) = 0$$

- Resolvendo o conjunto de equações

$$f_1(t) = \frac{1}{x_6^{SP}(t)} (\bar{f}_5 \bar{x}_5 + \bar{f}_7 \bar{x}_7) - \bar{f}_5 - \bar{f}_7 + \frac{1}{x_6^{SP}(t)} (x_2(t) + x_6^{SP}(t)) f_2(t)$$

Implementação 1

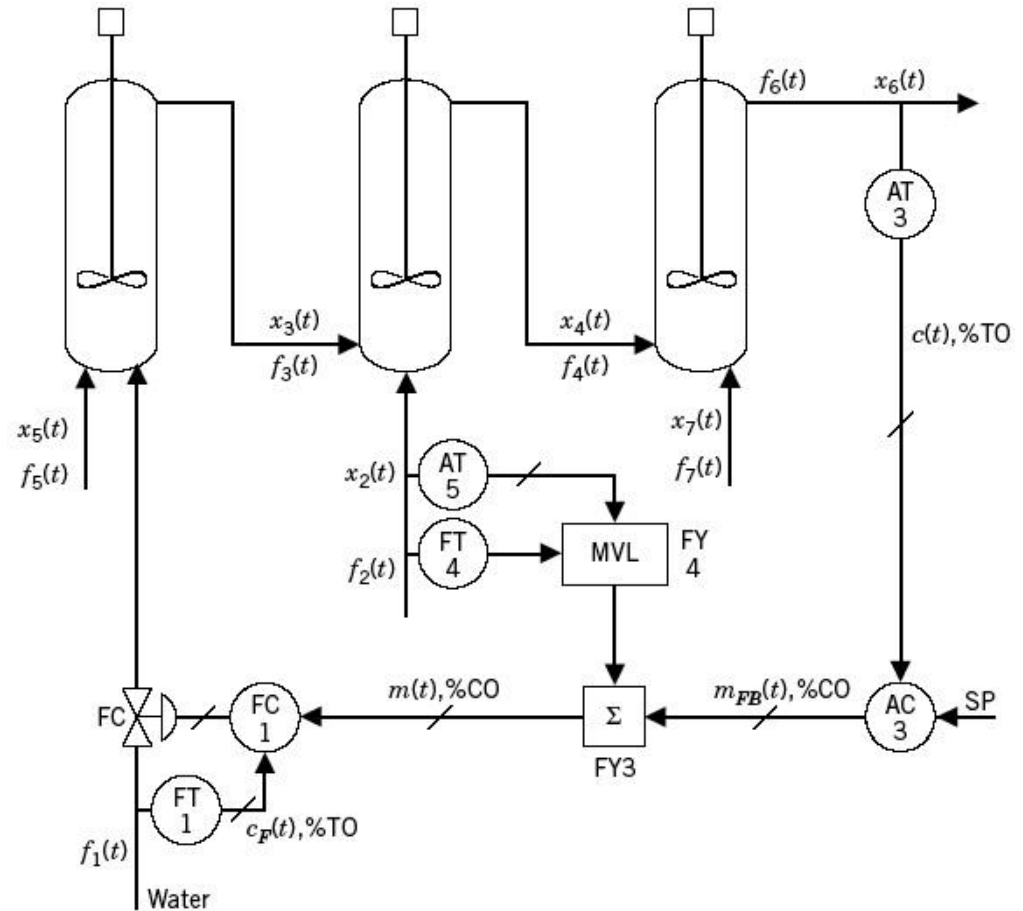
Para o sinal de realimentação da malha AC-3 significando Δf_1 , considera-se

$$x_6^{SP}(t) = 0,472$$

e implementa-se

$$f_1(t) = 800,85 + f_2(t) \left(\frac{x_2(t)}{0,472} - 1 \right)$$

(bloco "MVL")

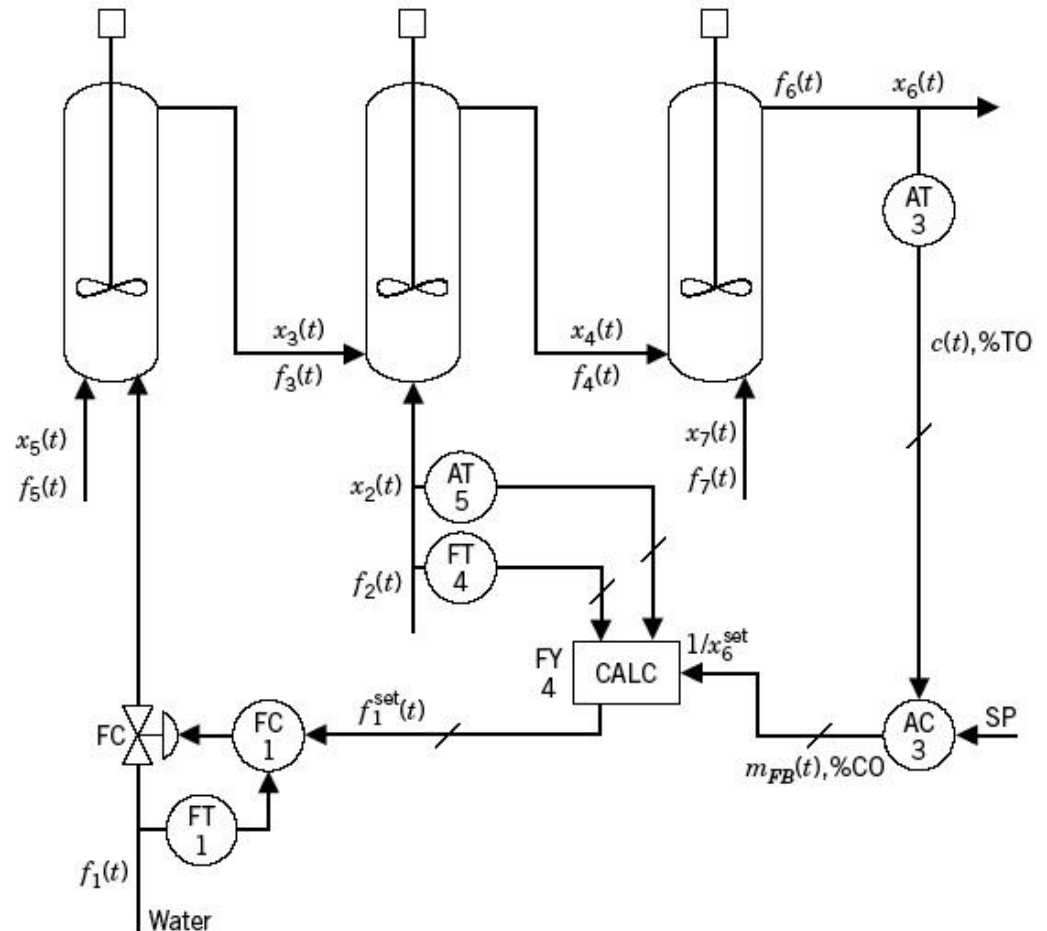


Implementação 2

Para o sinal de realimentação da malha AC-3 significando $1/x_6^{SP}$ implementa-se

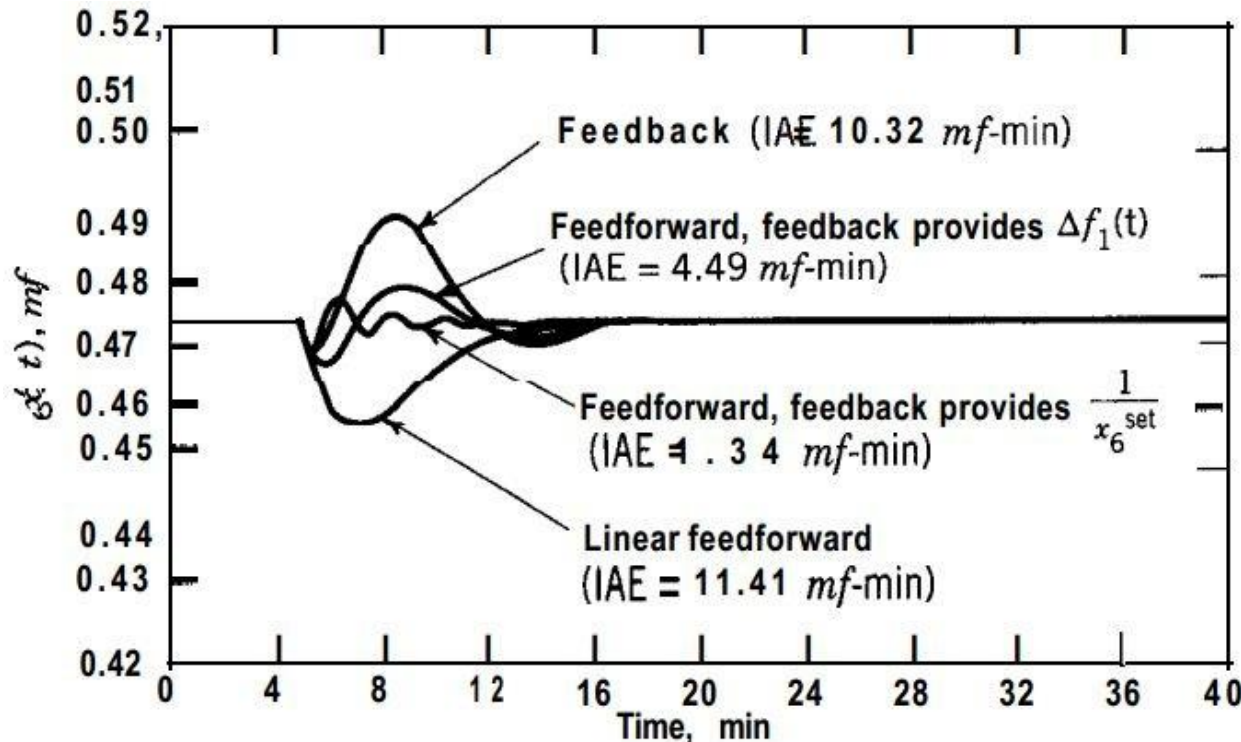
$$f_1(t) = \frac{1}{x_6^{SP}(t)} (850 + f_2(t)x_2(t)) - f_2(t) - 1000$$

Esta equação é implementada no bloco "CALC" da figura ao lado. Neste caso o sinal de realimentação é usado no cálculo do controle antecipatório e não somando-se a ele.



Resposta ao distúrbio em $f_2(t)$ e $x_2(t)$

Resposta de $x_6(t)$ a uma variação de 1000 gpm de aumento em $f_2(t)$ e -0,2 de fração de massa em x_2



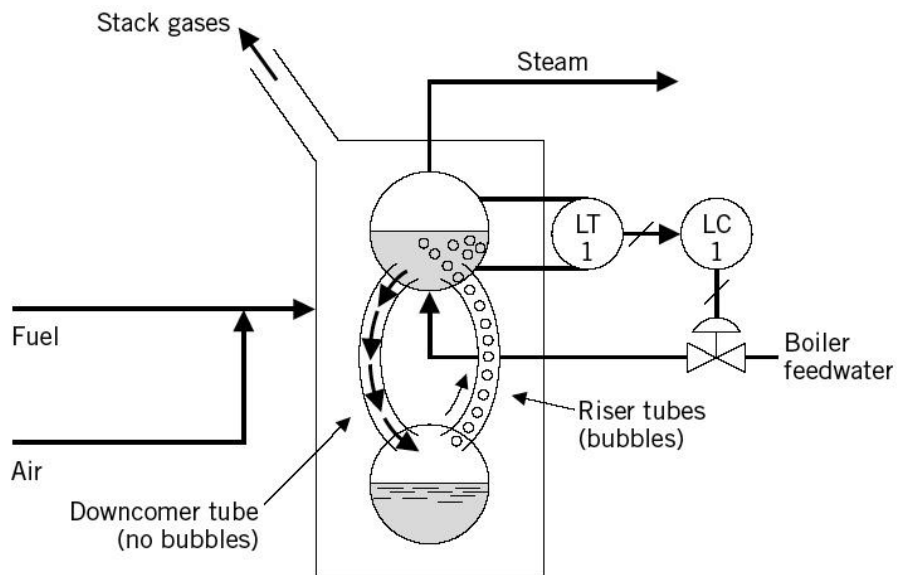
Obs.:

1. O sinal de realimentação poderia também significar $x_6^{SP}(t)$.
2. Caso o modelo matemático não seja conhecido, poderia-se implementar um controlador antecipatório não-linear por meio de análises de regressão.

(Exemplo)

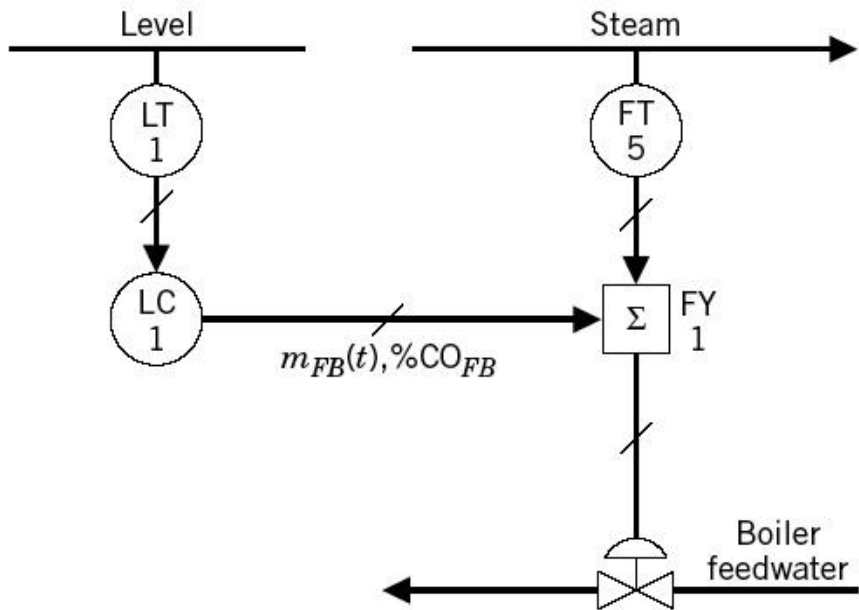
CONTROLE DE NÍVEL DE UMA CALDEIRA

Controle de “elemento único”



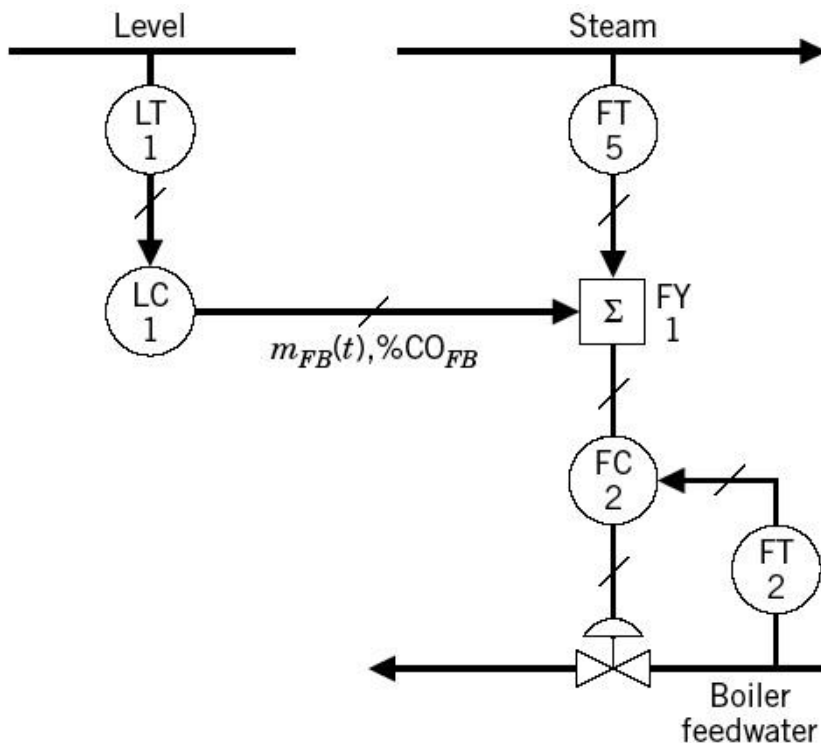
- Ao variar a pressão de vapor (variações de demanda) o nível varia devido a dilatação/ encolhimento das bolhas de vapor
- O controle de elemento único é recomendado nas caldeiras de carga constante
- Para o caso de demanda variável é necessário compensar o efeito dilatação/ encolhimento

Controle de “dois elementos”



- Sistema de controle de realimentação/ antecipatório
- Para quilo de vapor produzido um quilo de água deve entrar (BM)
- Há sistemas com queda de pressão variável na válvula de alimentação de água (desordena o BM)
- Esse esquema não compensa este tipo de distúrbio

Controle de “três elementos”

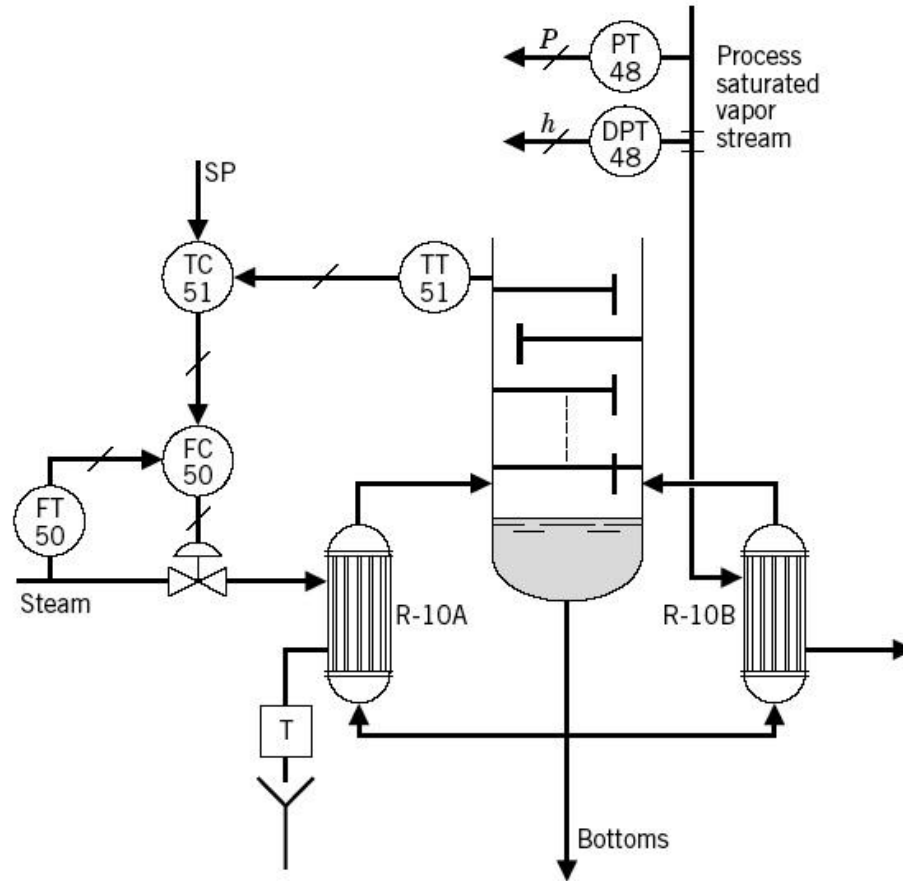


- O esquema de controle de três componentes compensa a queda de pressão variável na válvula de alimentação de água
- Adicionado um controlador de fluxo em cascata

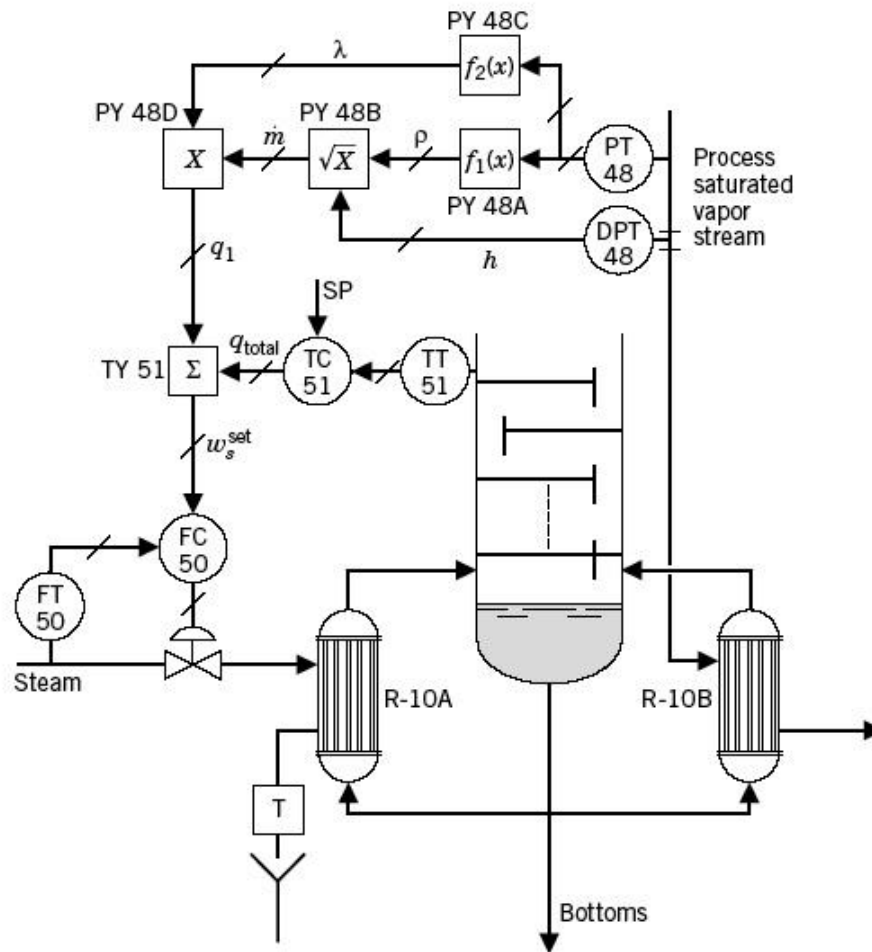
(Exemplo)

CONTROLE DE TEMPERATURA DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO

Controle convencional



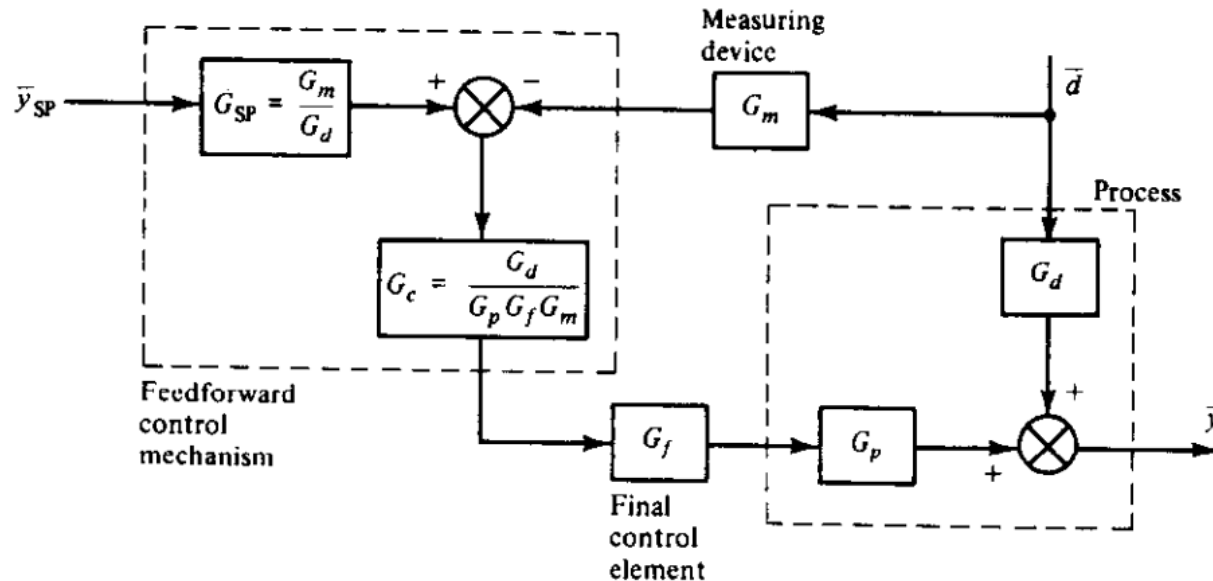
Controle antecipatório



Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

- Objetivo: fazer a resposta do processo seguir exatamente mudanças no SP ($\bar{y} = \bar{y}_{SP}$)

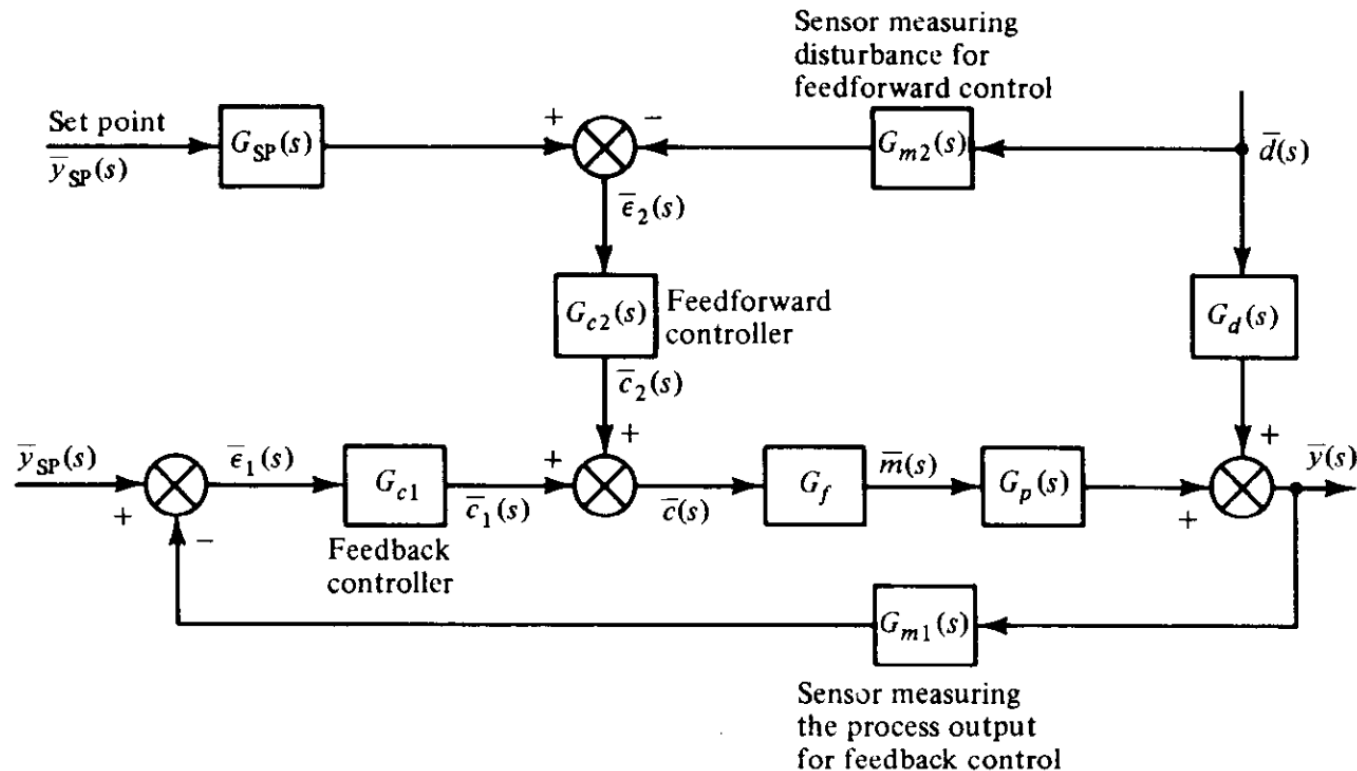


$$\bar{y} = G_p G_f G_c G_{SP} \bar{y}_{SP} + [G_d - G_p G_f G_c G_m] \bar{d} \quad \Rightarrow$$

$$G_p G_f G_c G_{SP} = 1 \text{ e } G_d - G_p G_f G_c G_m = 0 \quad \Rightarrow \quad G_c = \frac{G_d}{G_p G_f G_m}, \quad G_{SP} = \frac{G_m}{G_d}$$

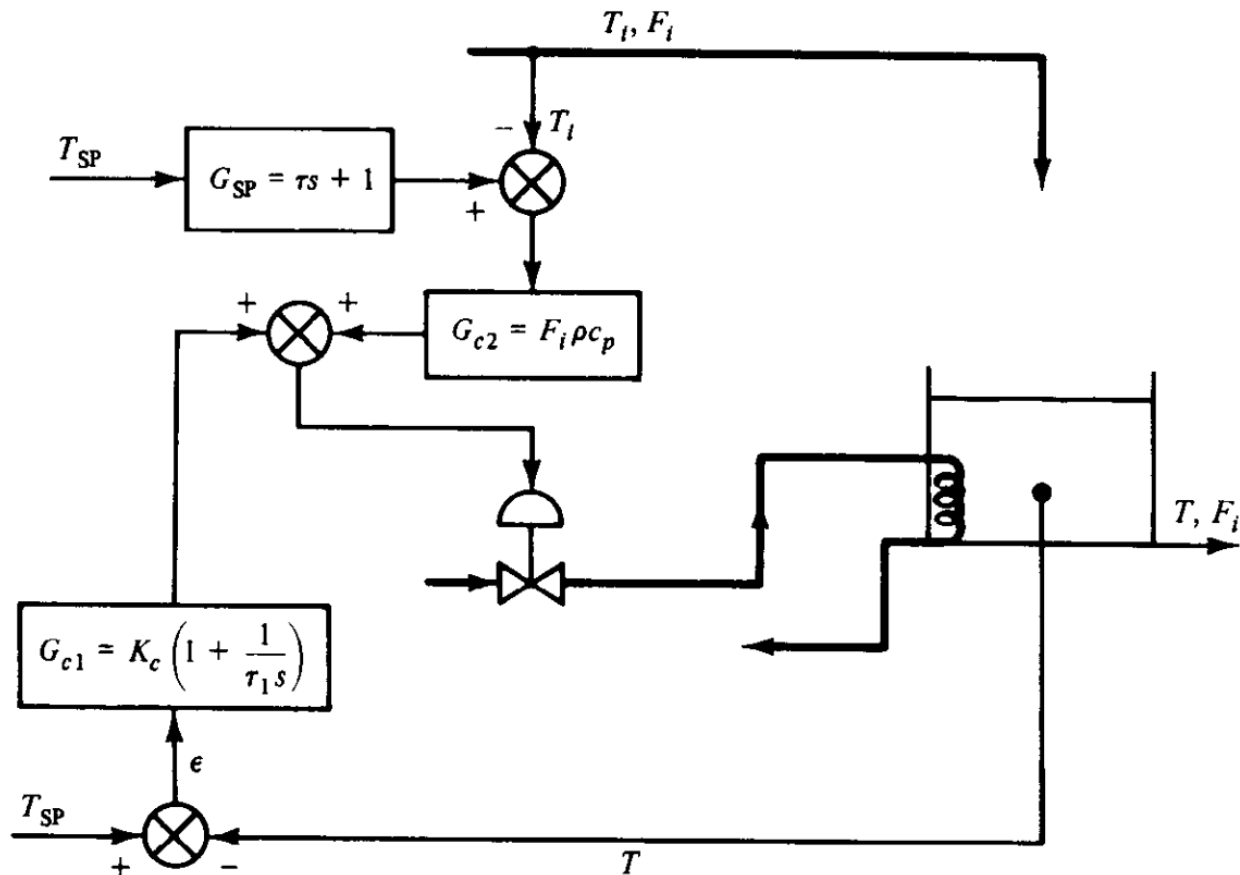
Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

- Controle antecipatório + controle realimentação



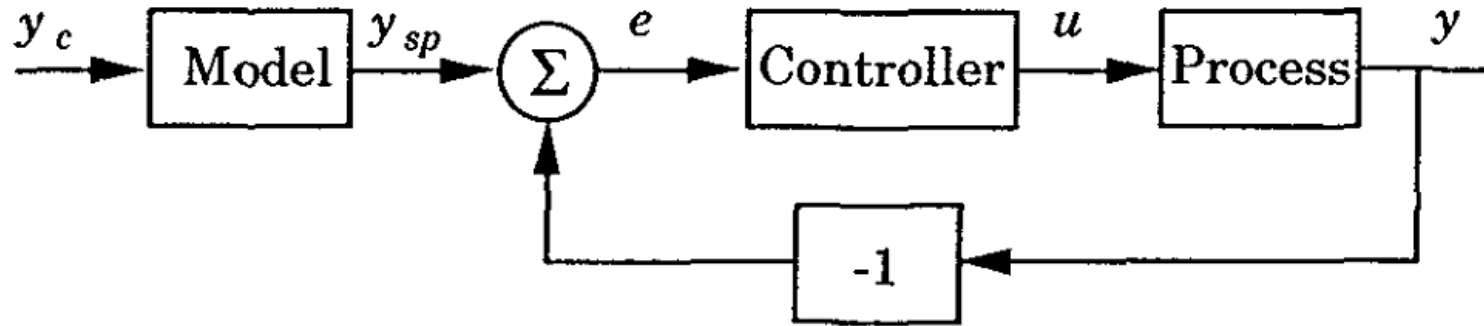
Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

- Controle de tanque com aquecimento



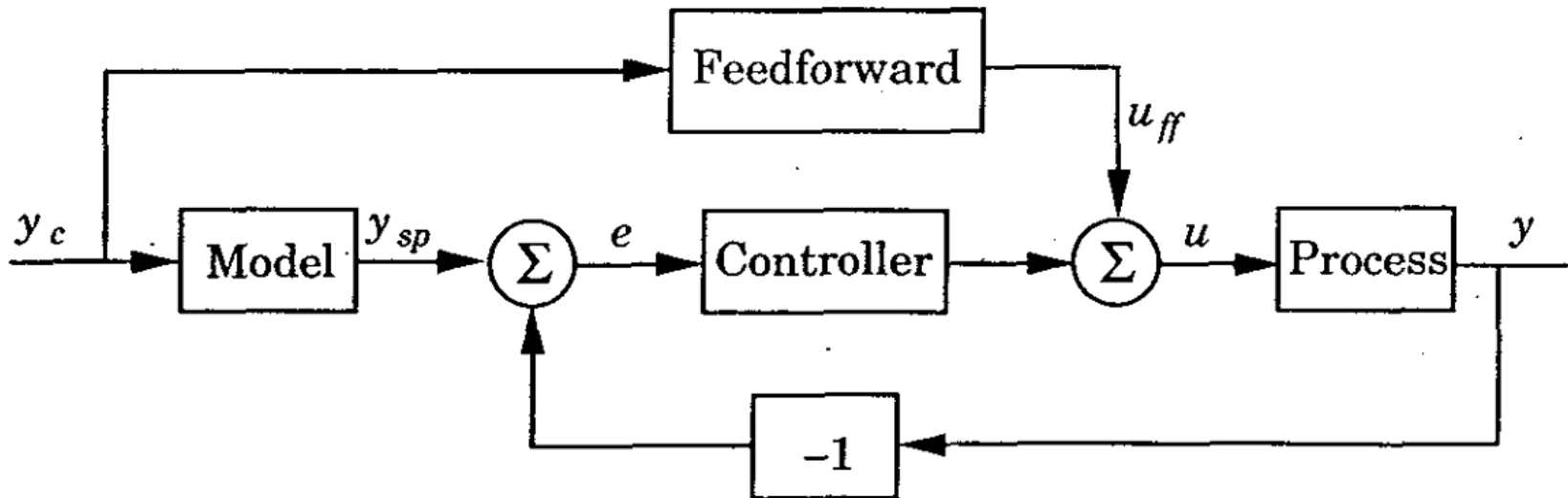
Seguimiento de Modelo (*Model Following*)

Modelo de Referência



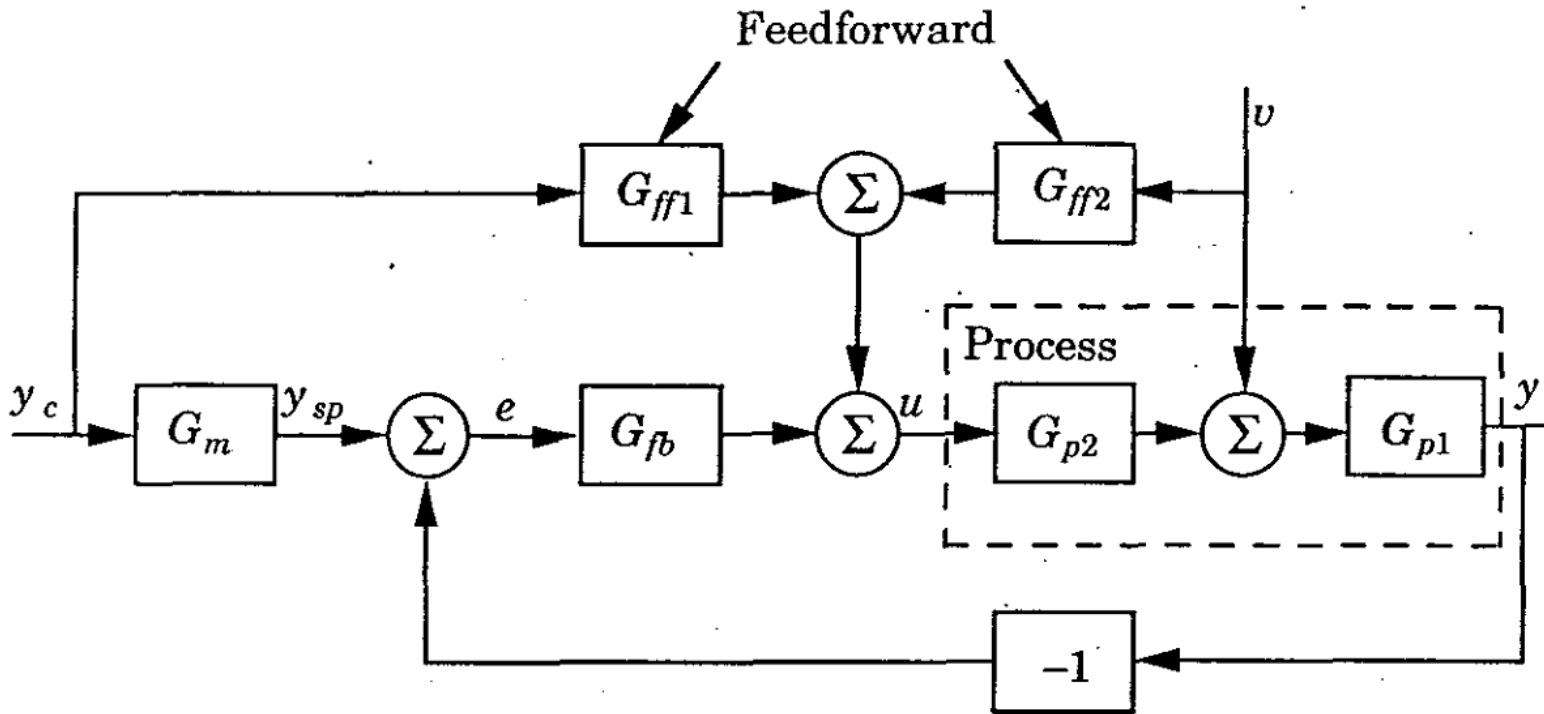
- Resposta desejada à mudança de SP (1ª ou 2ª ordem)
- A malha de realimentação deve ser muito mais rápida relativo ao modelo de referência

Aprimoramento



- Malha antecipatória aprimora significamente a resposta
- u_{ff} fornece a saída desejada se o modelo estiver correto
- Na implementação os blocos "Model" e "Feedforward" são implementados juntos (entrada y_c e saídas y_{sp} e u_{ff})
- Sistemas a dois graus de liberdade ($SP \rightarrow u$ e $y \rightarrow u$ independentes)

Estrutura Geral



Bibliografia

- C. A. Smith e A. Corripio, *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*, 3ª. Edição, Ed. LTC, 2012.
- G. Stephanopoulos, *Chemical Process Control - An Introduction to Theory and Practice*, Ed. Prentice-Hall, 1984.