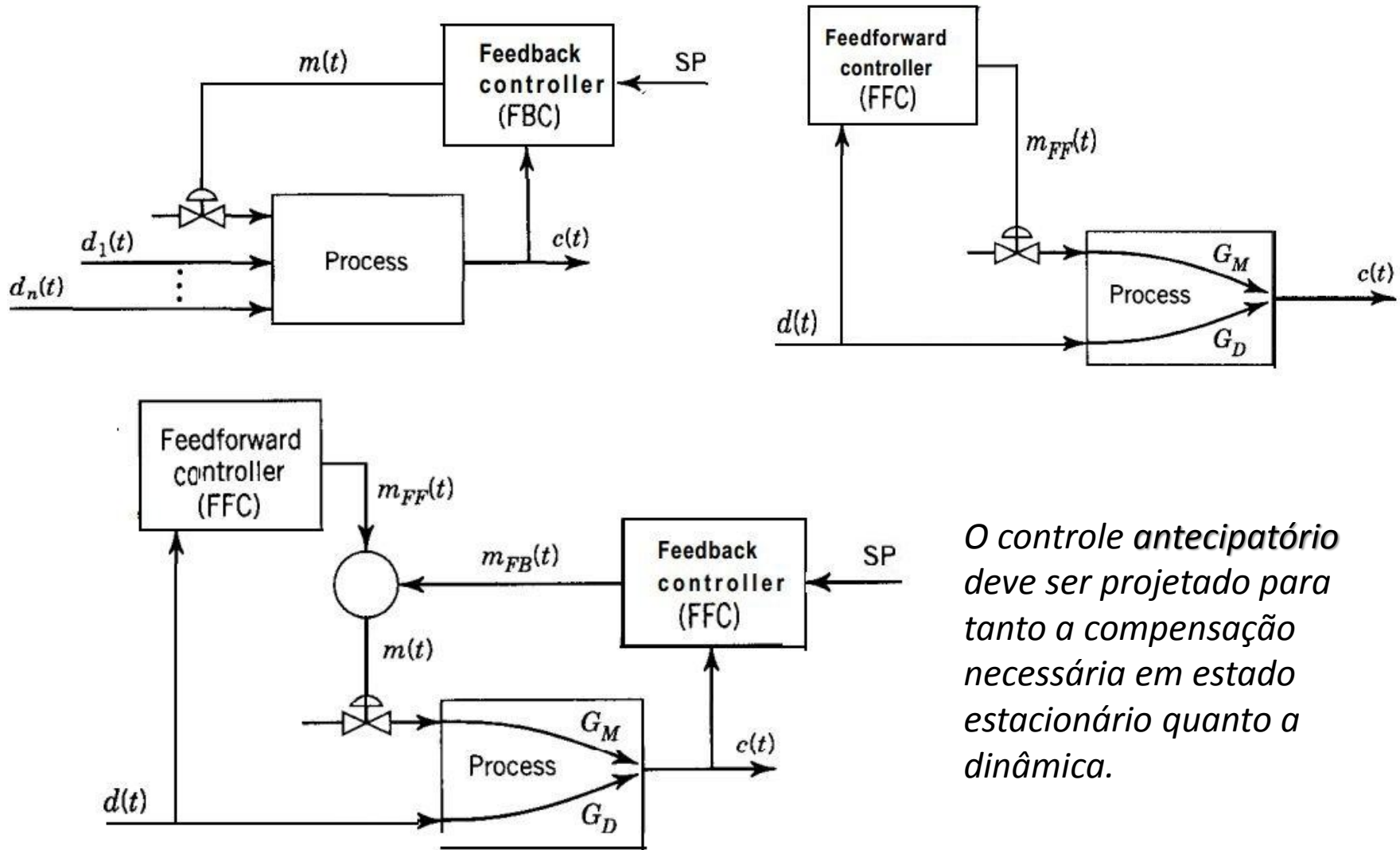


Controle Antecipatório (Alimentação ou *Feedforward*)

TCA: Controle de Processos
2S / 2012

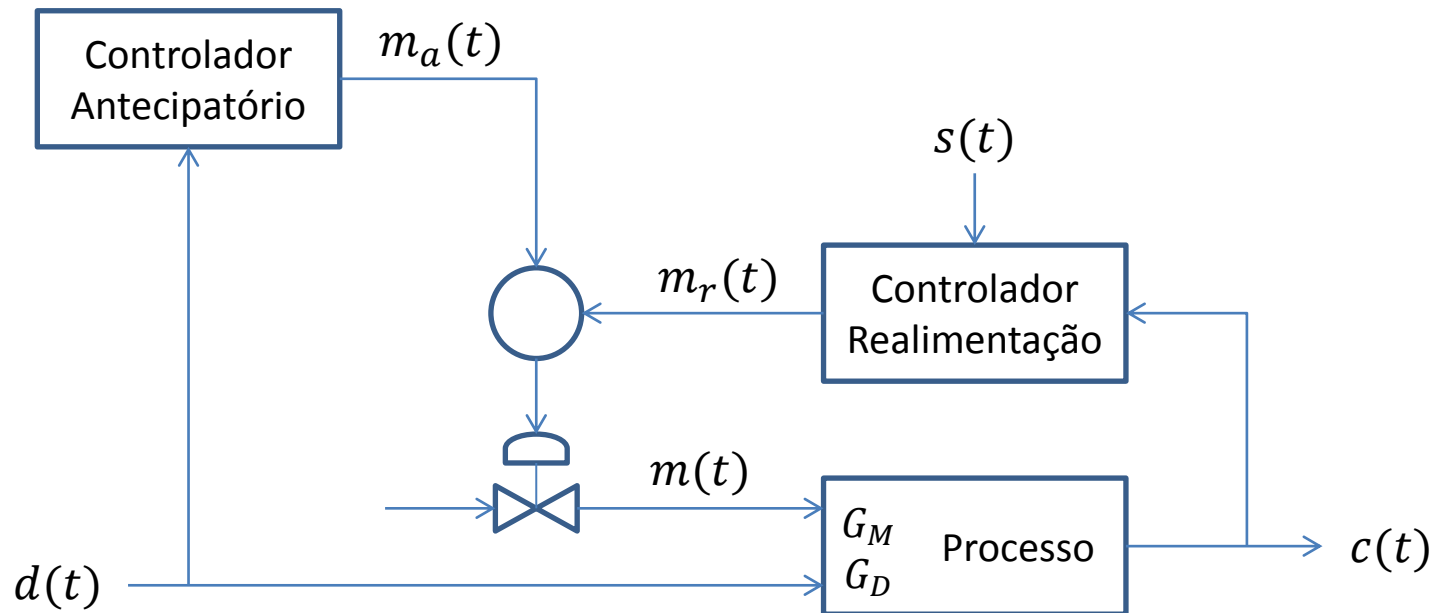
Prof. Eduardo Stockler
Universidade de Brasília
Depto. Engenharia Elétrica

Recapitulando o conceito



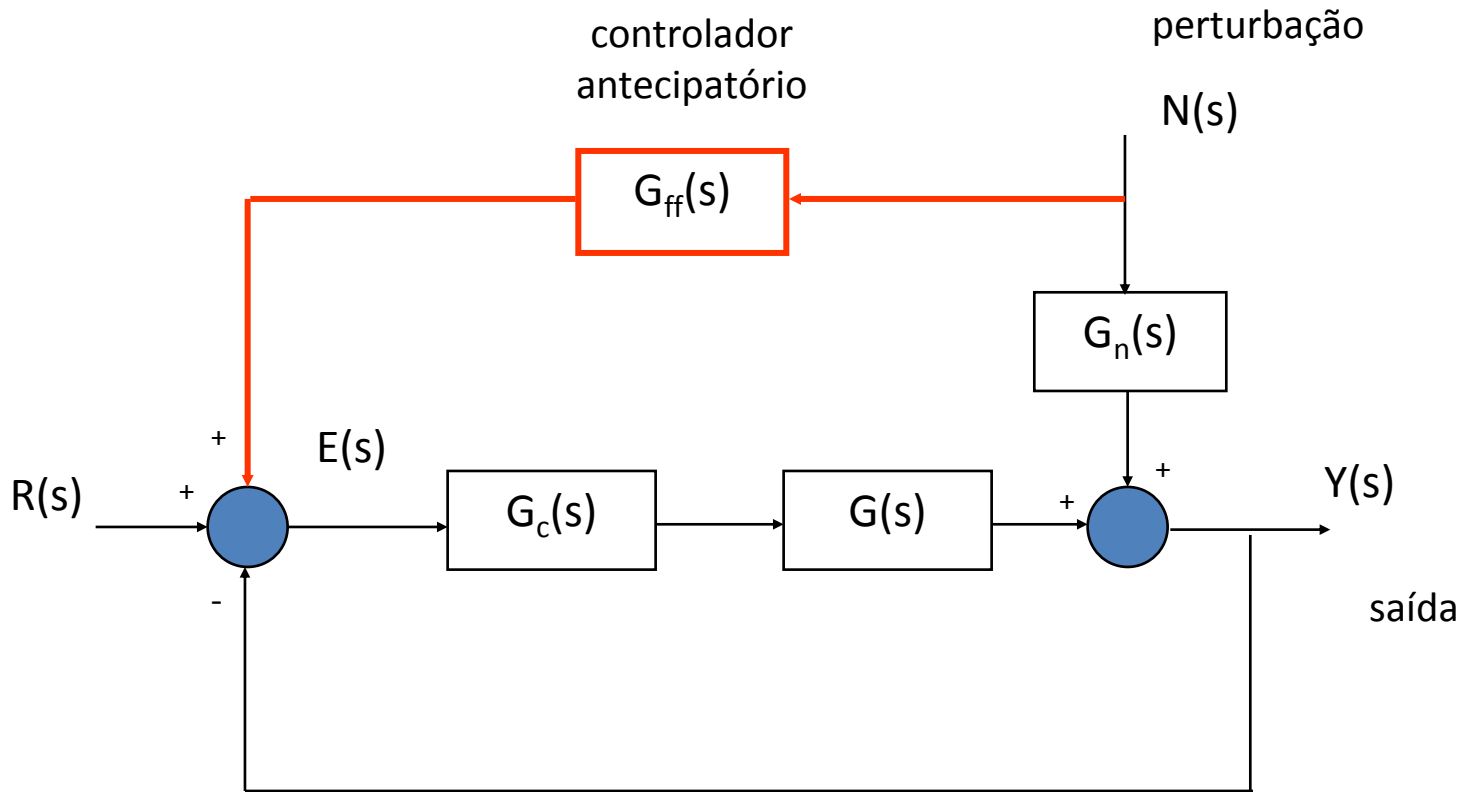
O controle antecipatório deve ser projetado para tanto a compensação necessária em estado estacionário quanto a dinâmica.

Controle Antecipatório

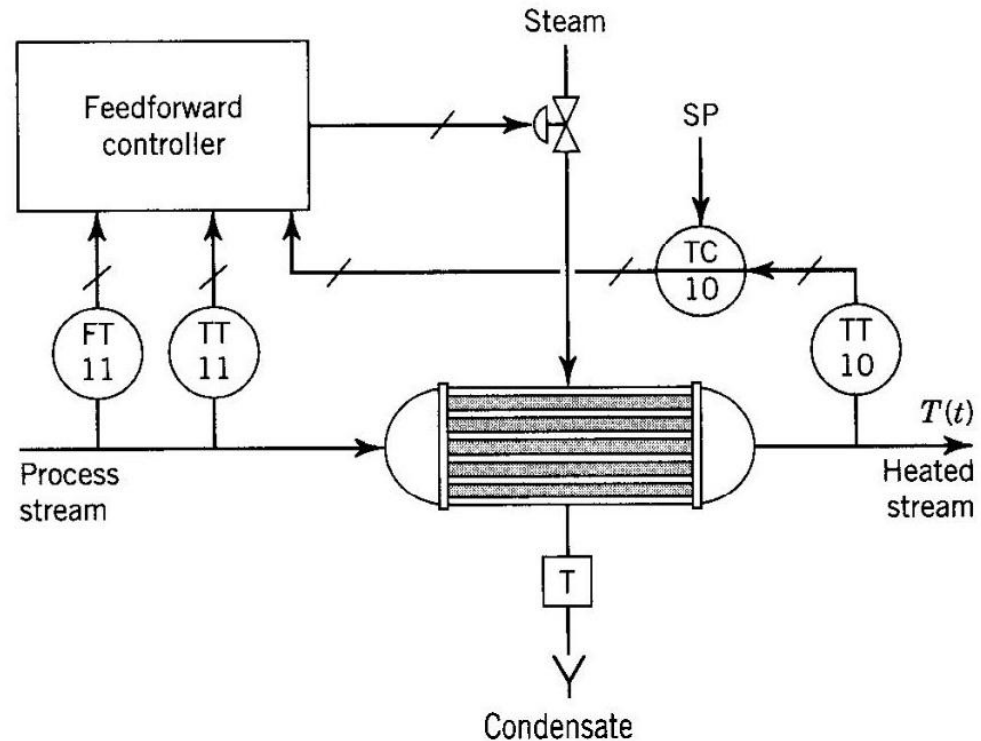


- Antecipação da ação do distúrbio no processo
- Necessária medição dos distúrbio (custo)
- Conhecimento da dinâmica do processo (uso combinado)

Controle Antecipatório



Controle Antecipatório

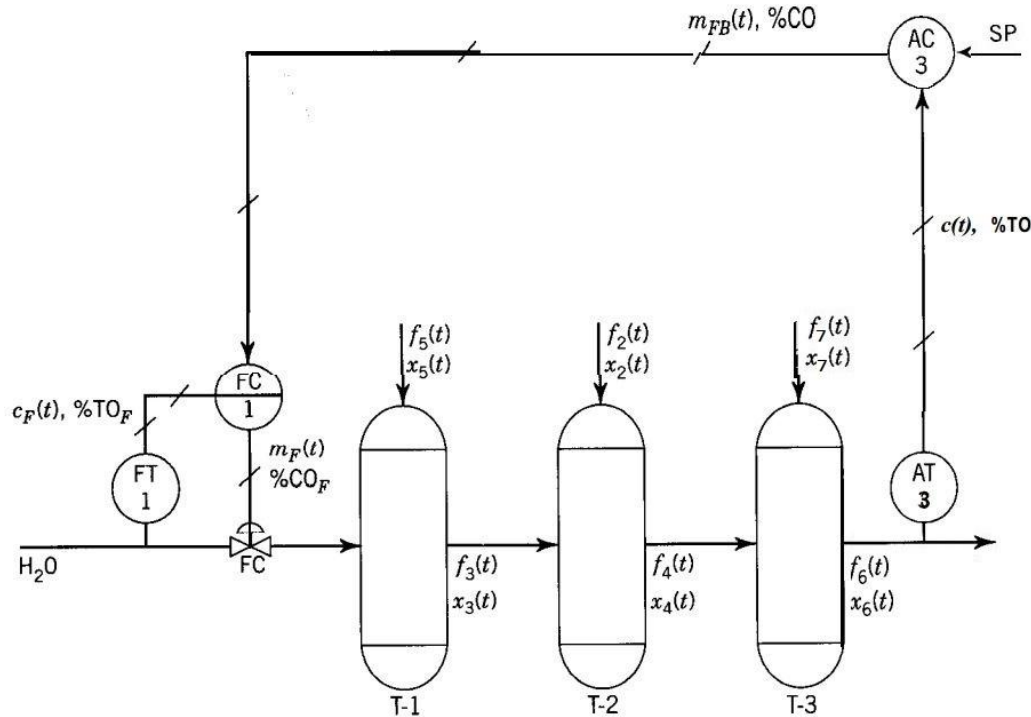


Trocador de calor

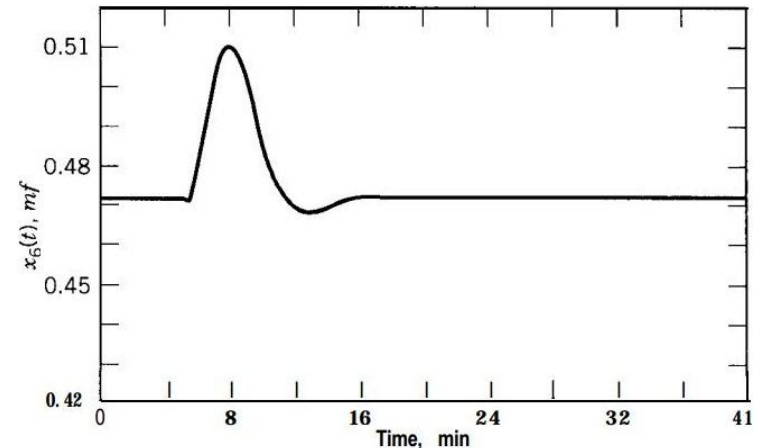
(Exemplo)

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



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

Diagrama de Blocos

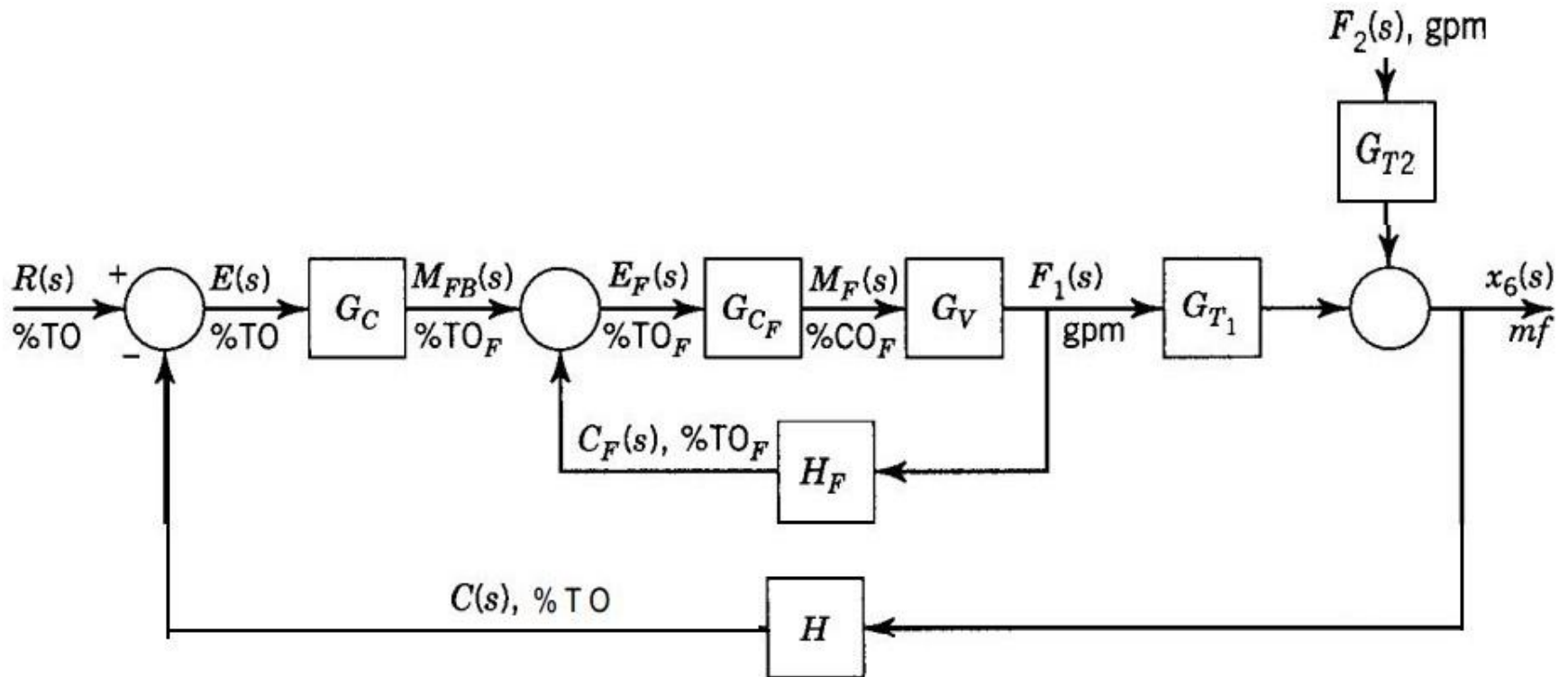


Diagrama de Blocos Simplificado

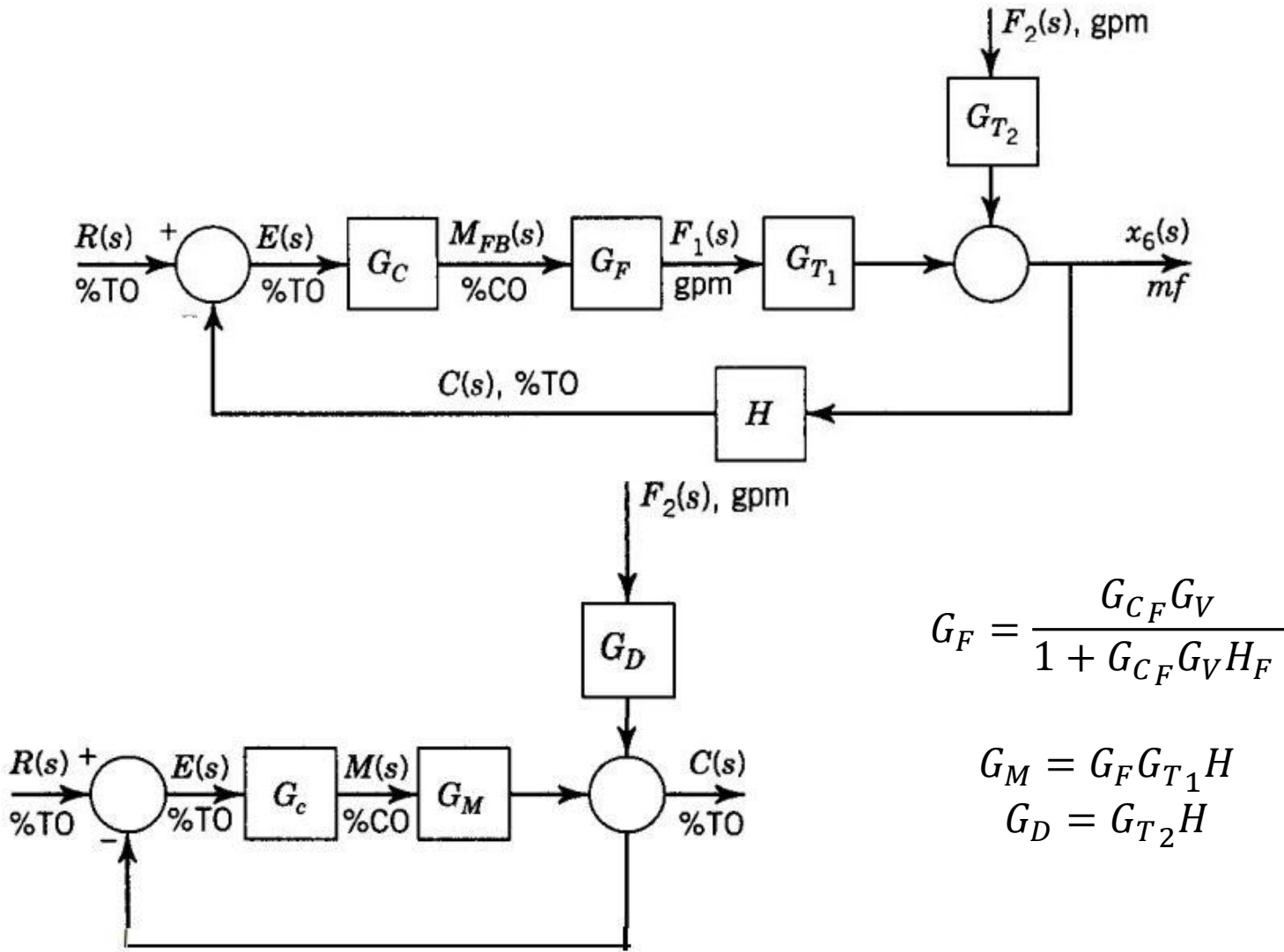


Diagrama de Blocos do Controle Antecipatório

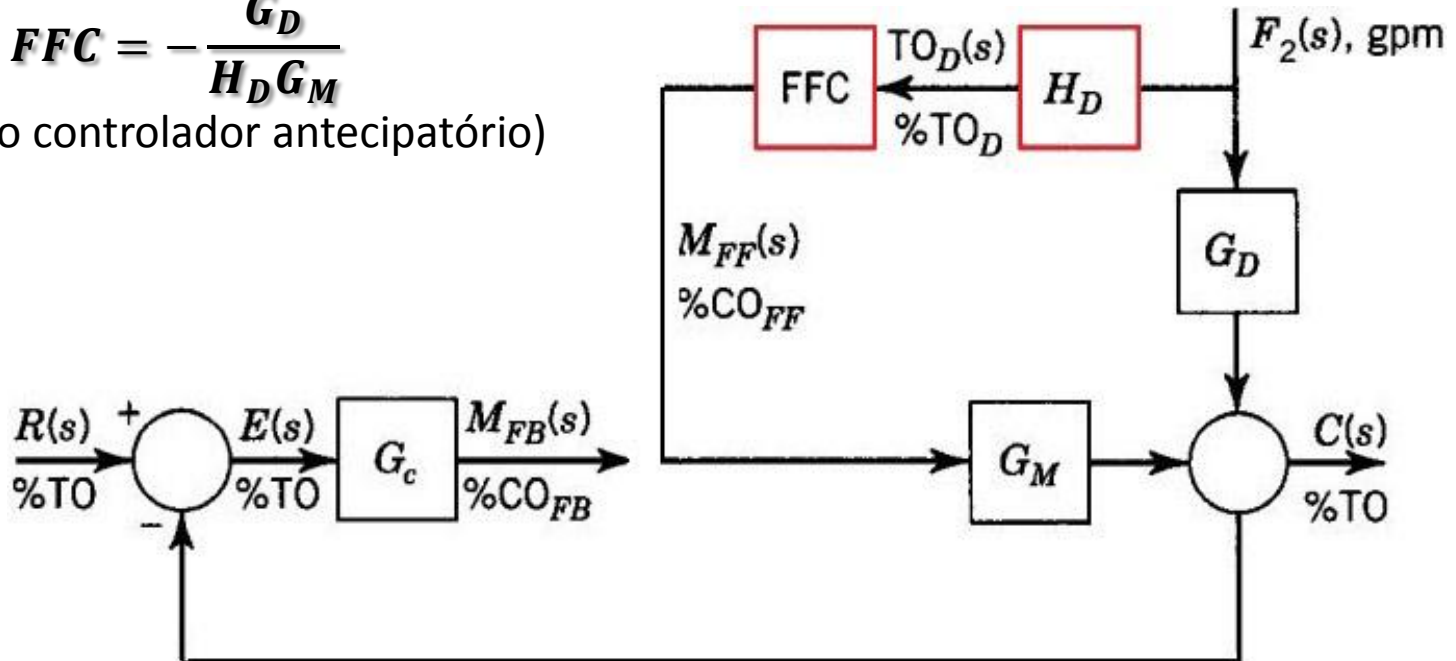
- Modo como $F_2(s)$ afeta $C(s)$:

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

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

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

(projeto do controlador antecipatório)



Modelagem do Processo

- O processo é modelado 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

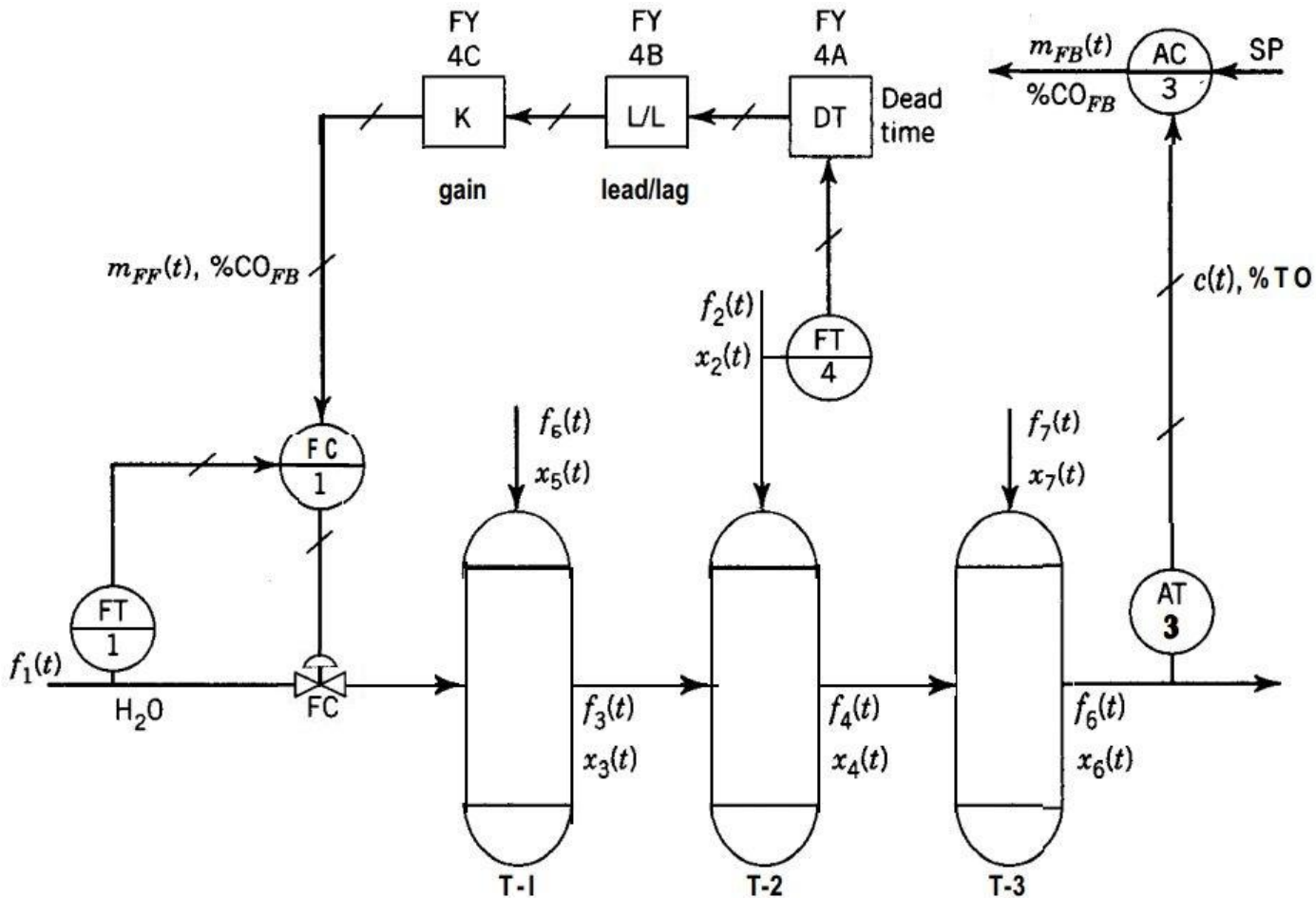
$$H_D = K_{T_D}, \quad \begin{array}{l} \%ST_D \\ gpm \end{array}$$

Tem-se,

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

- FFC: ganho (comp. est. estac.) + termo avança-atraso (comp. dinâmico)
+ tempo morto (não pode ser positivo)

Implementação do Controlador Antecipatório



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

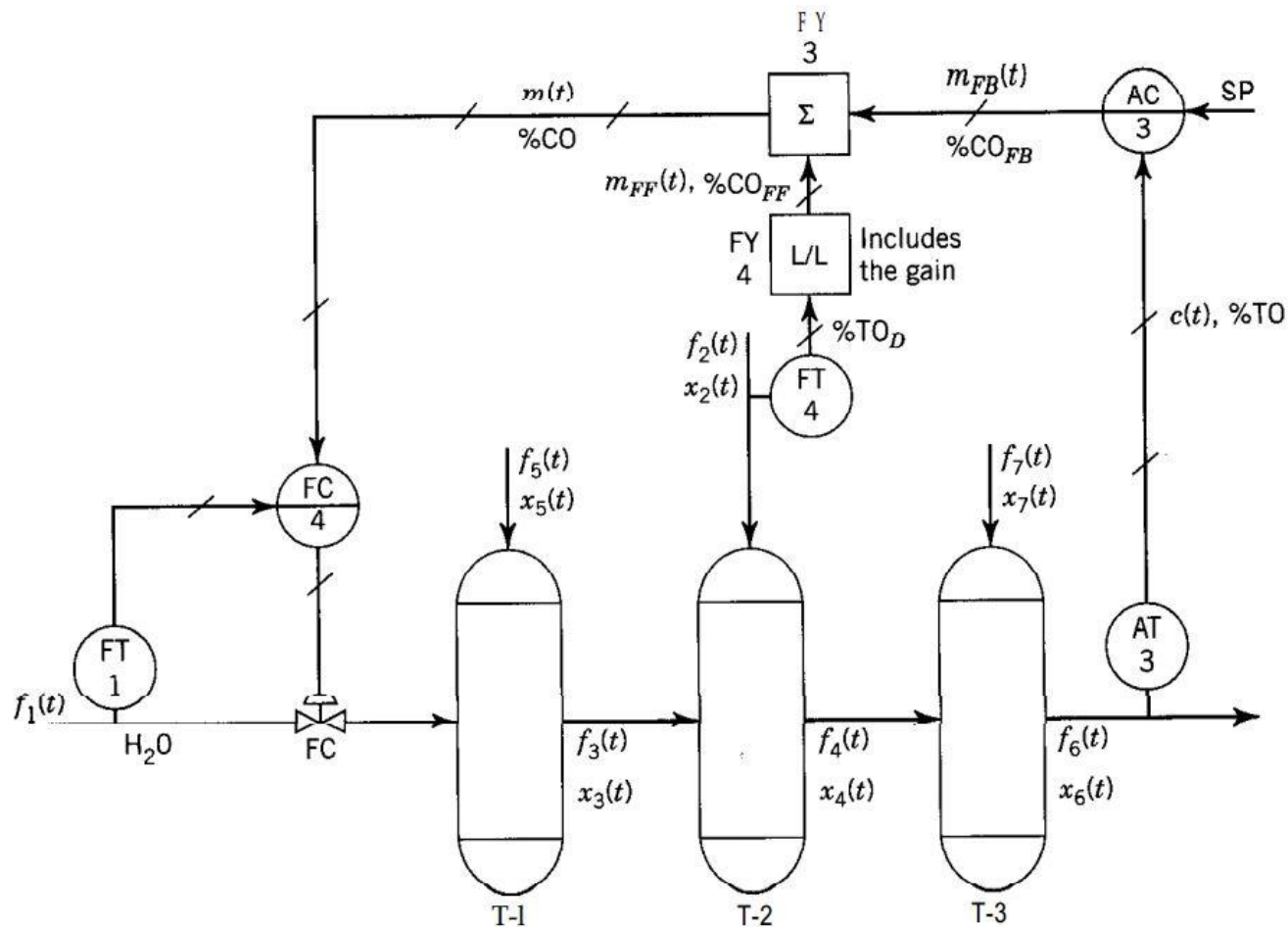
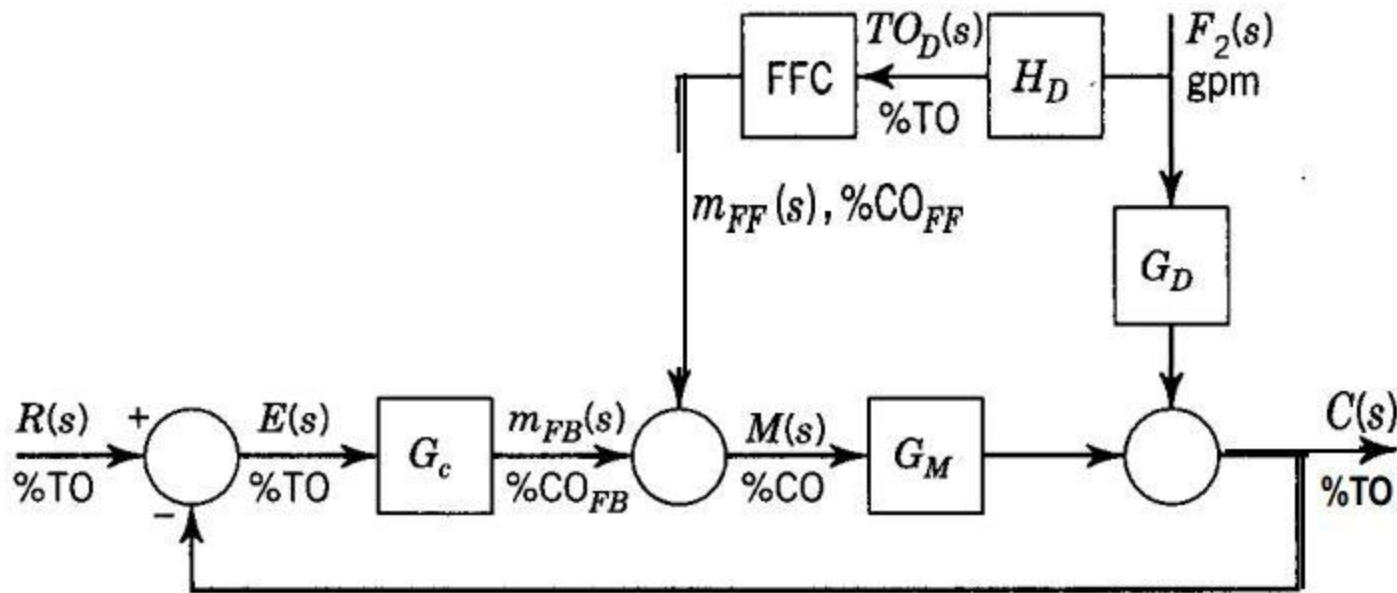
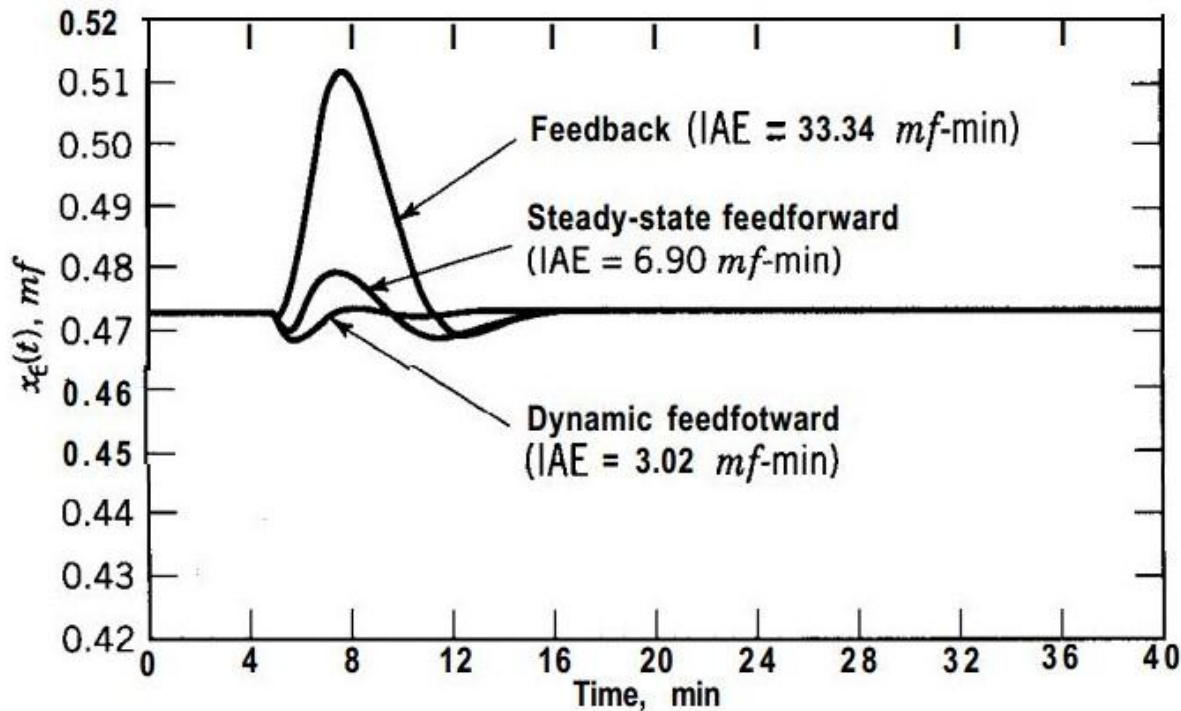


Diagrama de Blocos da Implementação dos Controladores



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

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

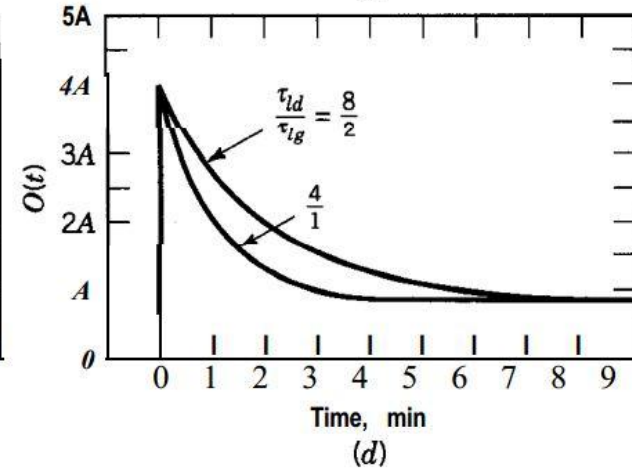
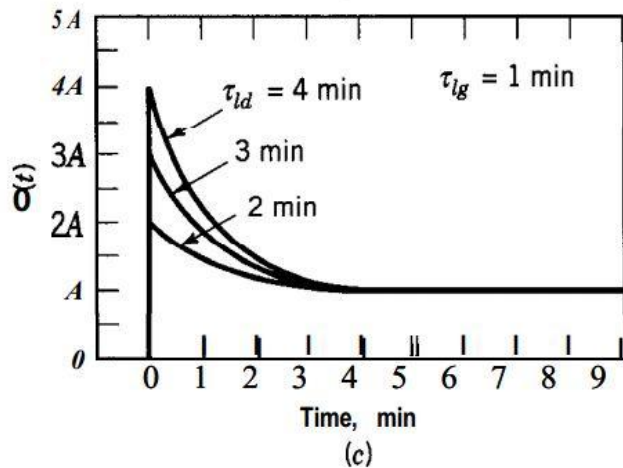
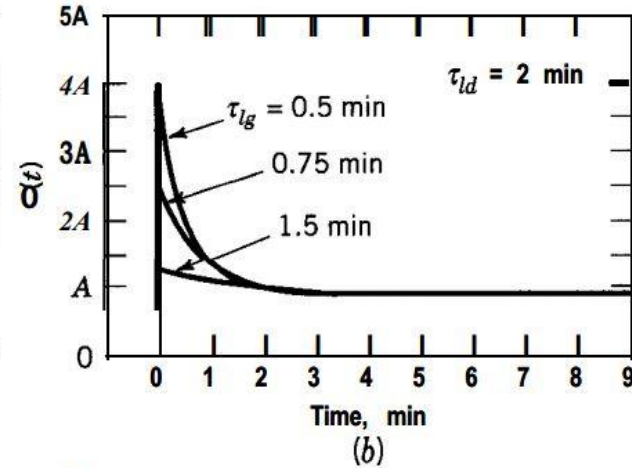
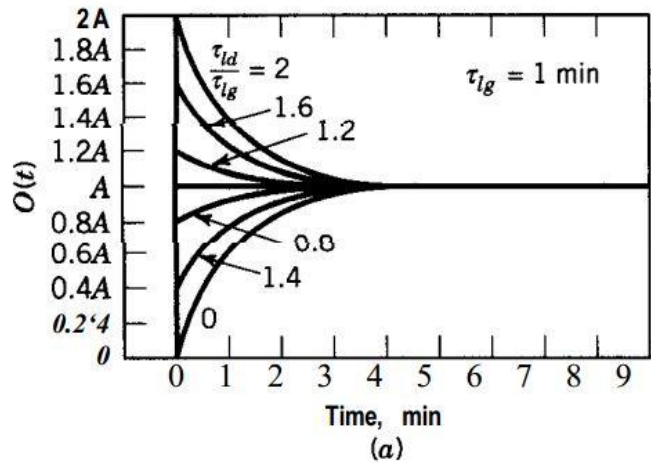
τ_{ld} : cte. tempo de avanço

τ_{lg} : cte. tempo de atraso

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

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

Controlador Avanço-Atraso (*Lead-Lag*)



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)
- $\tau_{ld}/\tau_{lg} = 1,39$ (se $f_2(t)$ varia 1%, a saída de FFC varia $(0,891)(1,39)=1,238\%$)
- Controle de realimentação compensa inexatidão 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

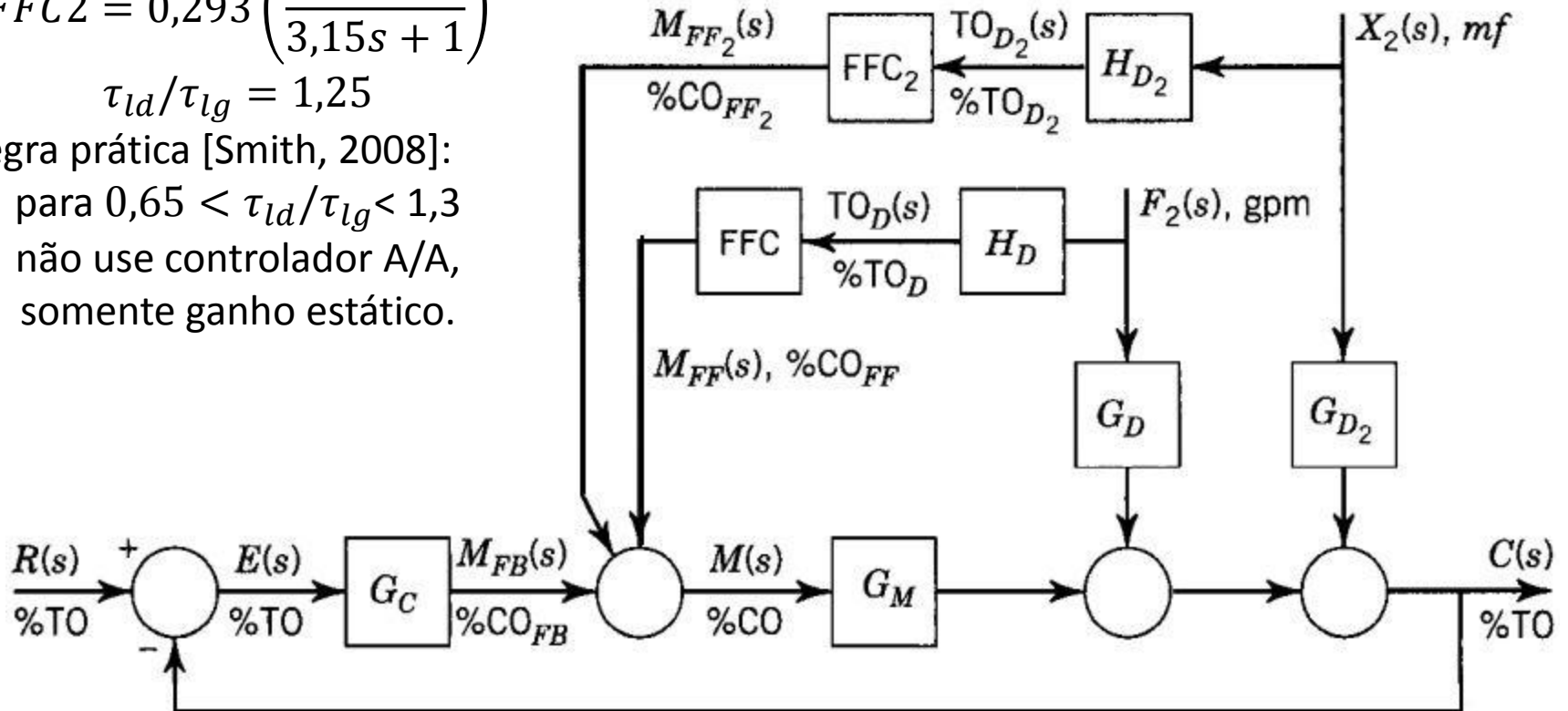
Ex.: $f_2 = 1500 \text{ gpm}$ (FT-4 em 50%), $S = m_{FB}(t) + (1)(50\%)(0,891) - 44,55 = m_{FB}(t)$
Ex.: $f_2 = 1800 \text{ gpm}$ (FT-4 em 60%), $S = m_{FB}(t) + 53,49 - 44,55 = m_{FB}(t) + 8,91\%$
- Forma automática: $S = K_x m_{FB}(t) + K_y m_{FF}(t) + B$, $B = \{B_{FB} \text{ ou } B_{FF}\}$
 1. Originalmente $B_{FB} = B_{FF} = 0$
 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 $x_2(t)$

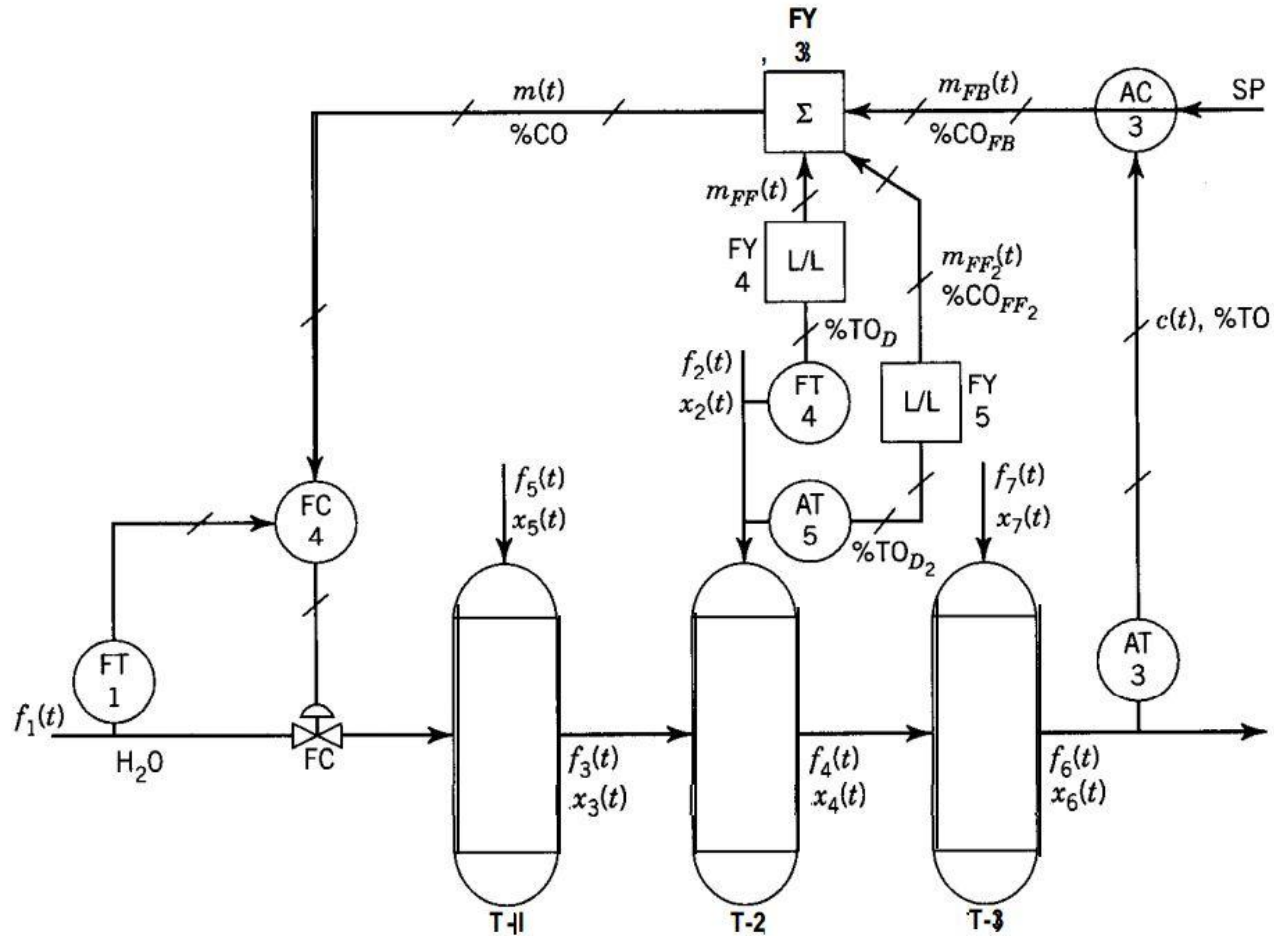
$$FFC2 = 0,293 \left(\frac{3,82s + 1}{3,15s + 1} \right)$$

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

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

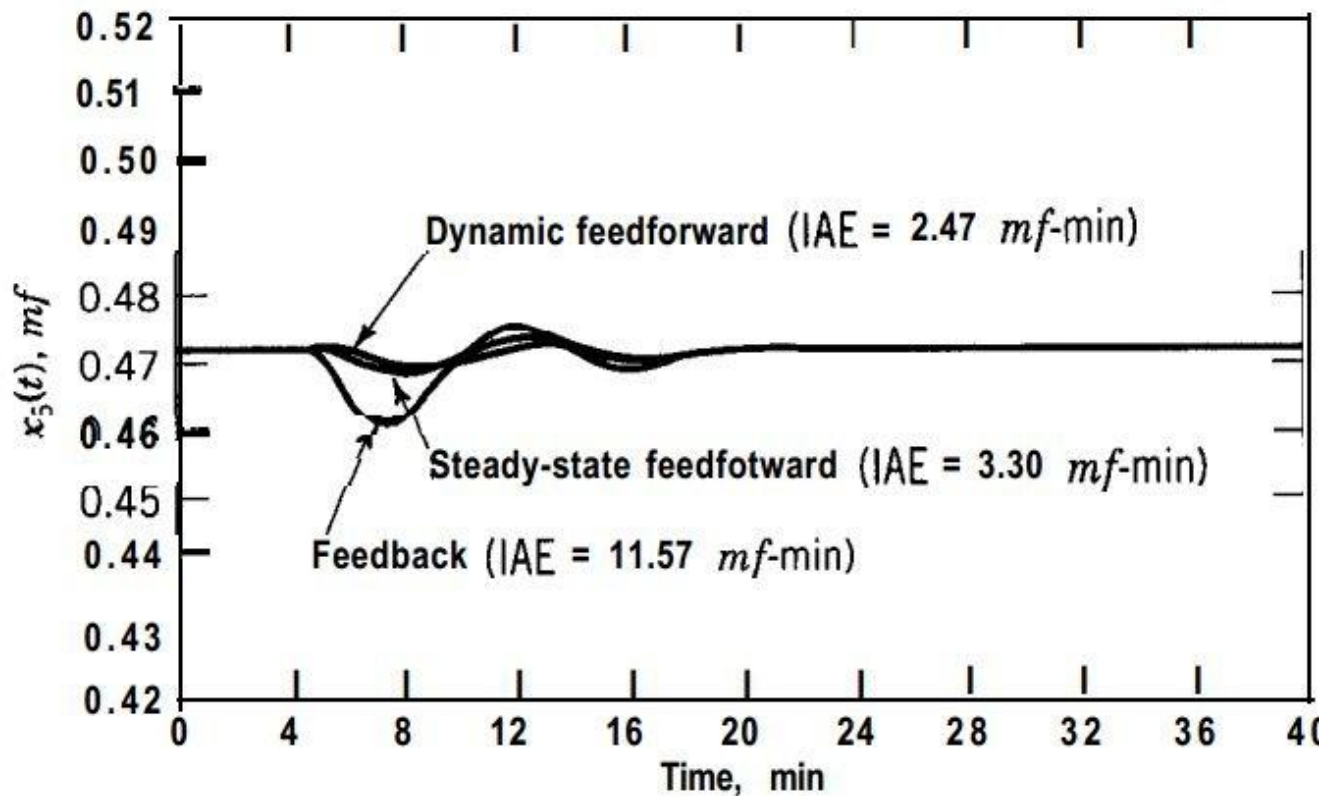


Implementação da compensação do distúrbio em $x_2(t)$



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

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

Balanços

$$\begin{aligned}\rho \bar{f}_5 + \rho f_1(t) + \rho f_2(t) + \rho \bar{f}_7 - \rho f_6(t) &= 0 \\ \rho \bar{f}_5 \bar{x}_5 + \rho f_2(t) x_2(t) + \rho \bar{f}_7 \bar{x}_7 - \rho f_6(t) x_6^{SP}(t) &= 0\end{aligned}$$

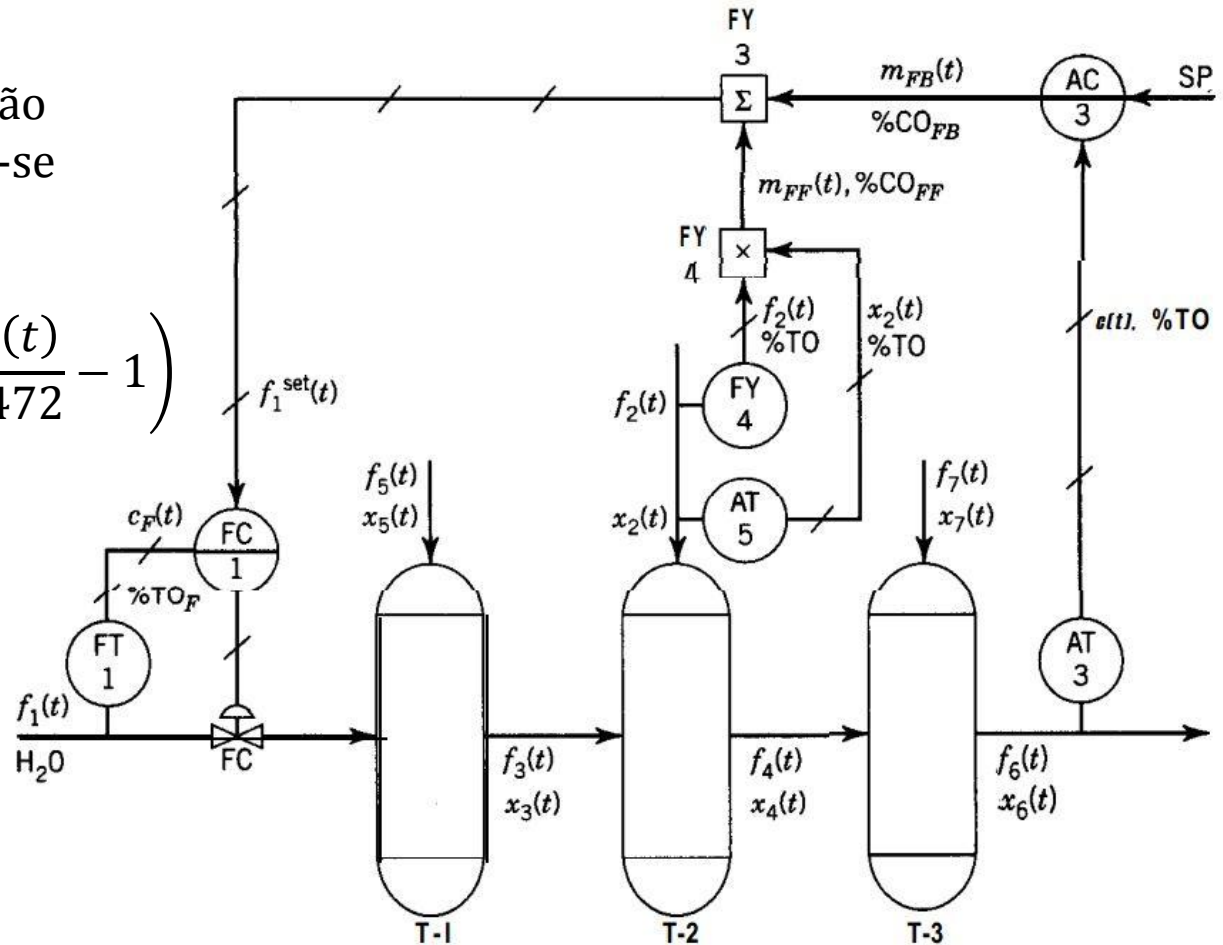
Resolvendo o conjunto de equações

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

Implementação 1

Para o sinal de realimentação significando Δf_1 , considera-se
 $x_6^{SP}(t) = 0,472$
 e implementa-se

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

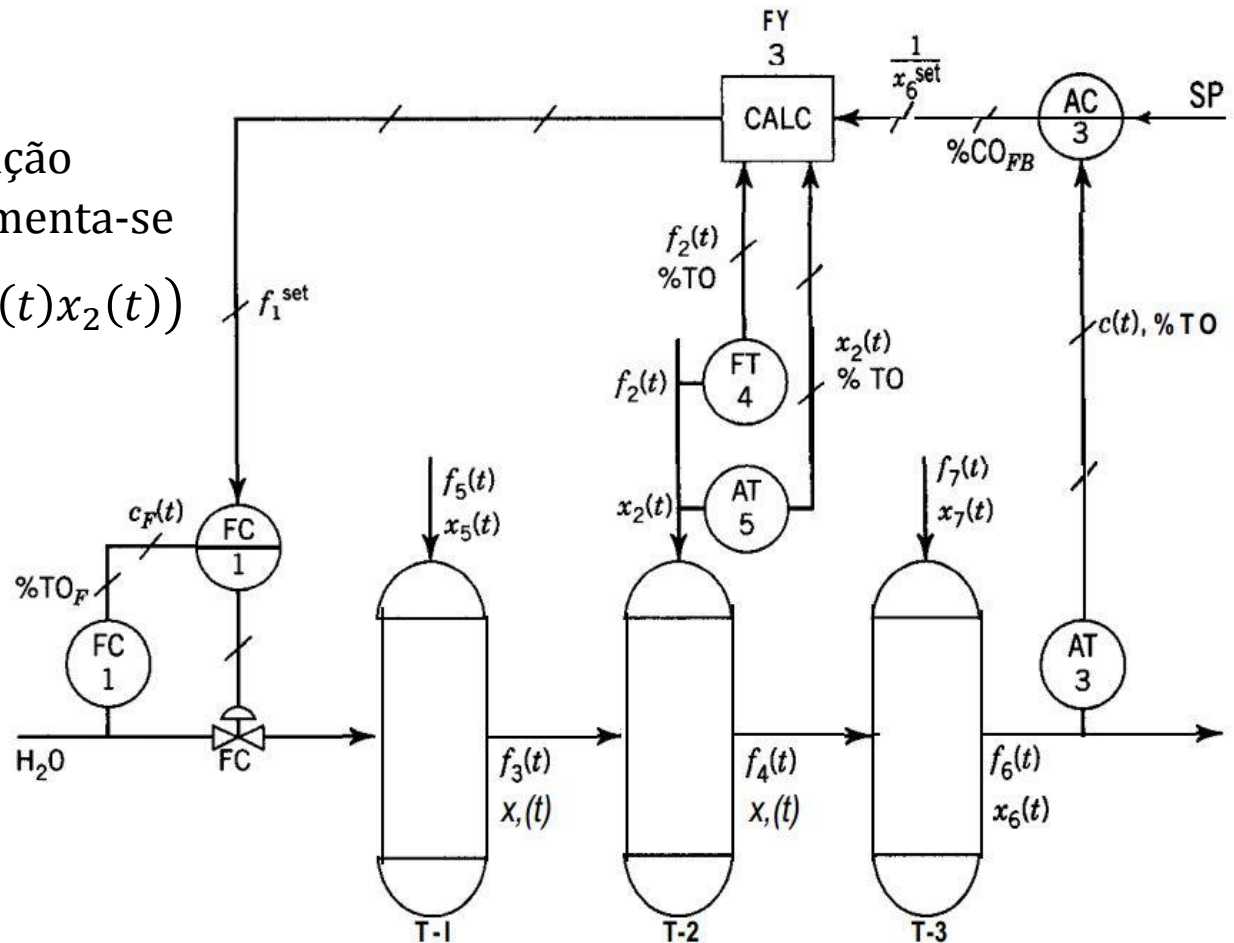


Implementação 2

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

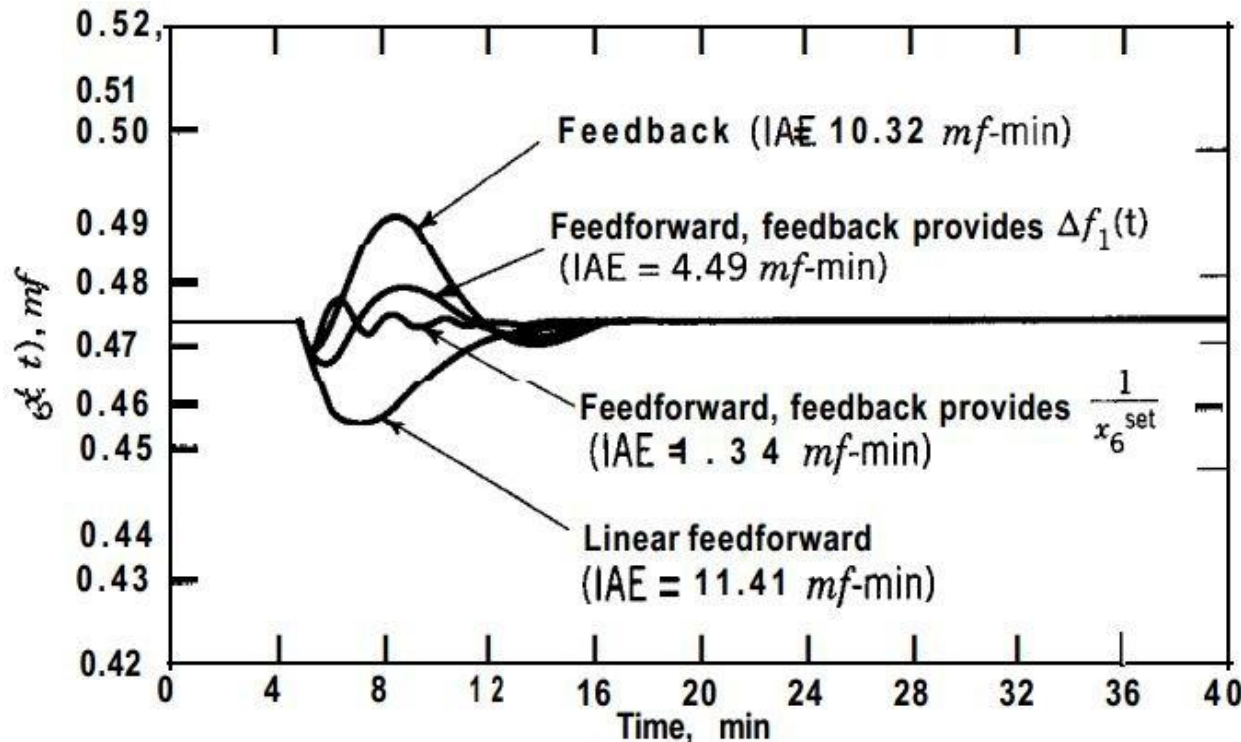
$$f_1(t) = \frac{1}{x_6^{SP}(t)} (850 + f_2(t)x_2(t) - f_2(t) - 1000)$$

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



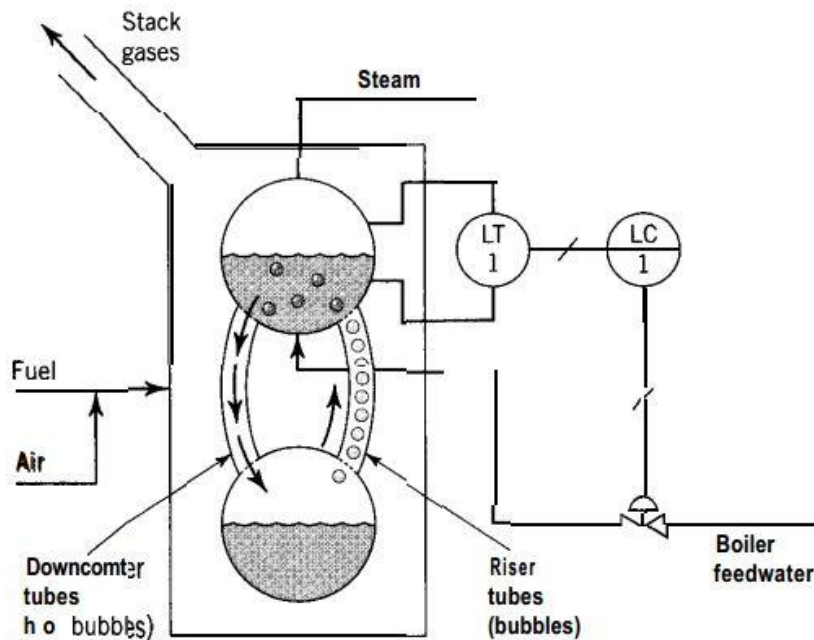
Obs.:

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)

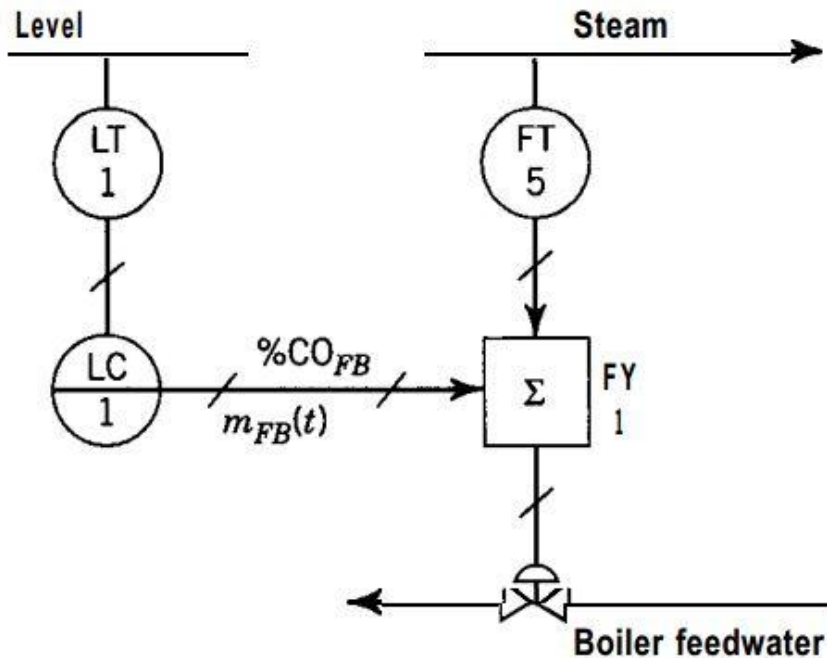
CONTROLE DE NÍVEL DE UMA CALDEIRA

Controle de “elemento único”



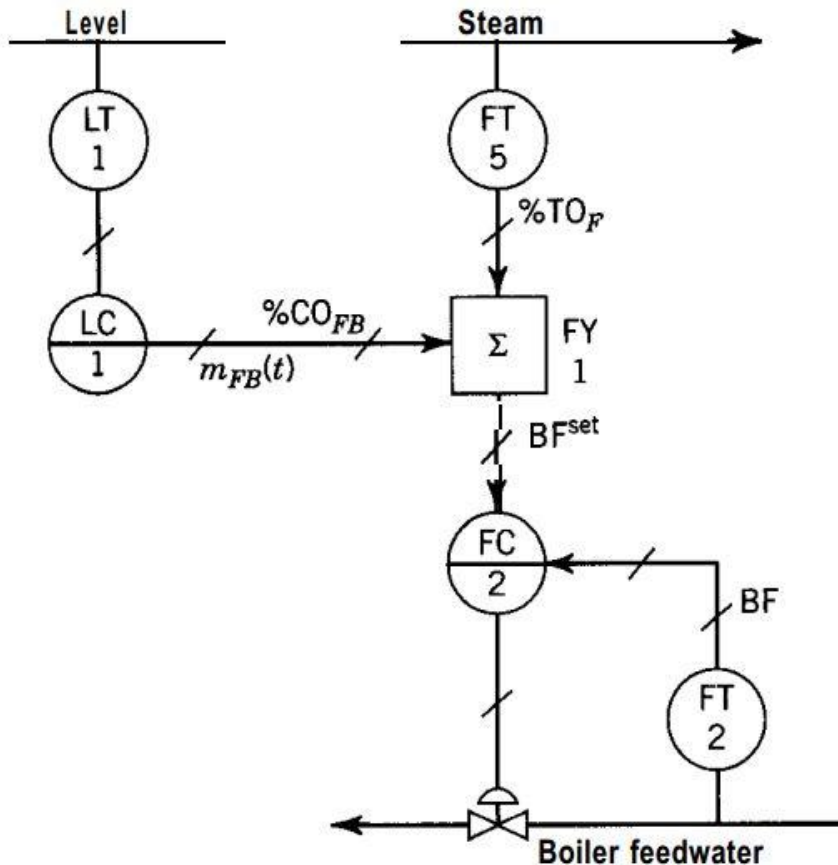
- Ao variar a pressão de vapor (variações de demanda) o nível varia devido a dilatação/ encolhimento das bolhas de vapor
- O controle de elemento único é recomendado nas caldeiras de carga constante
- Para o caso de demanda variável é necessário compensar o efeito dilatação/ encolhimento

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”

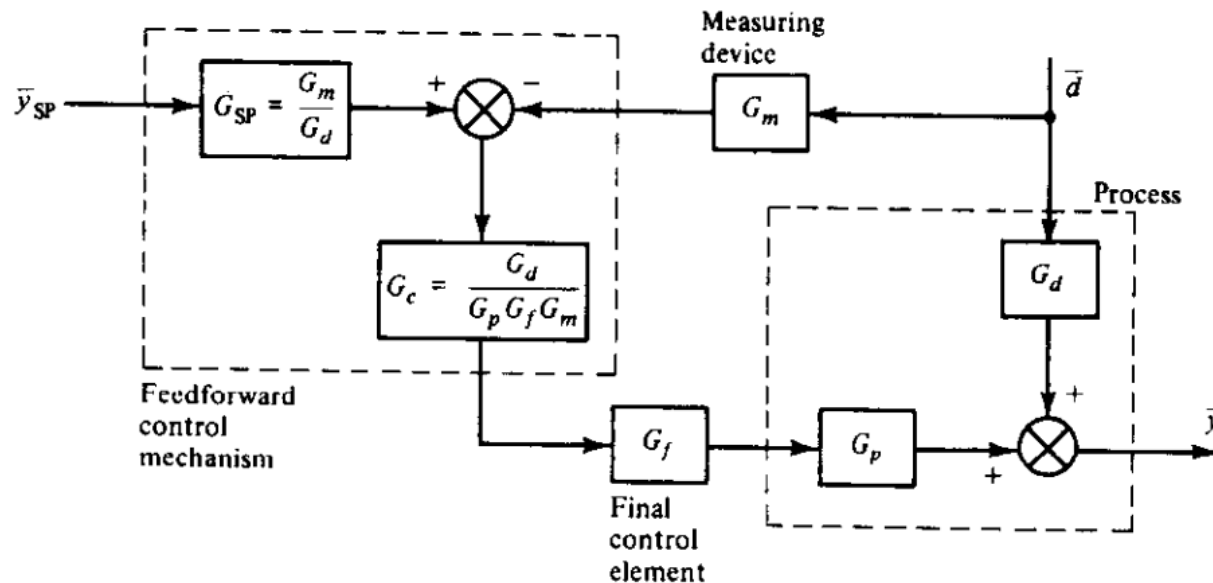


- O esquema de controle de três componentes compensa a queda de pressão variável na válvula de alimentação de água
- Adicionado um controlador de fluxo em cascata

Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

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

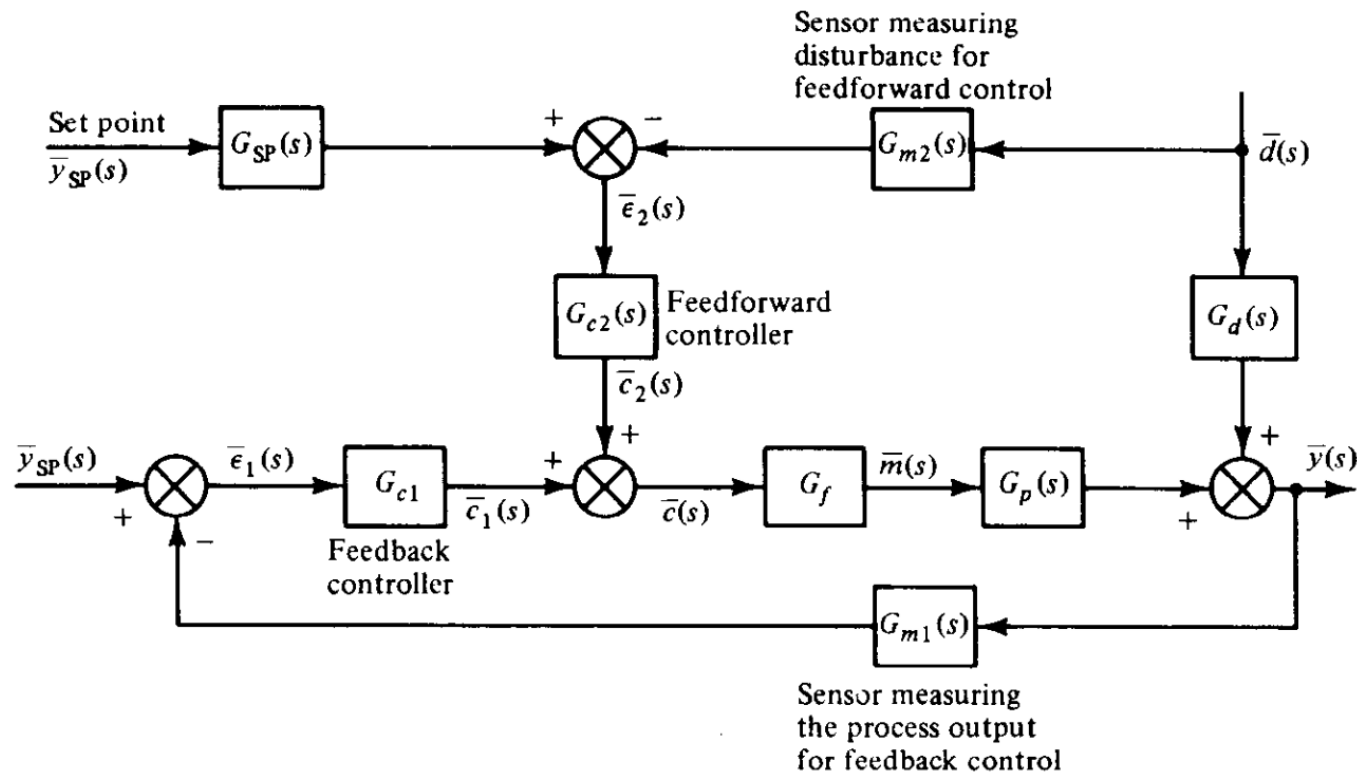


$$\bar{y} = G_p G_f G_c G_{SP} \bar{y}_{SP} + [G_d - G_p G_f G_c G_m] \bar{d} \quad \Rightarrow$$

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

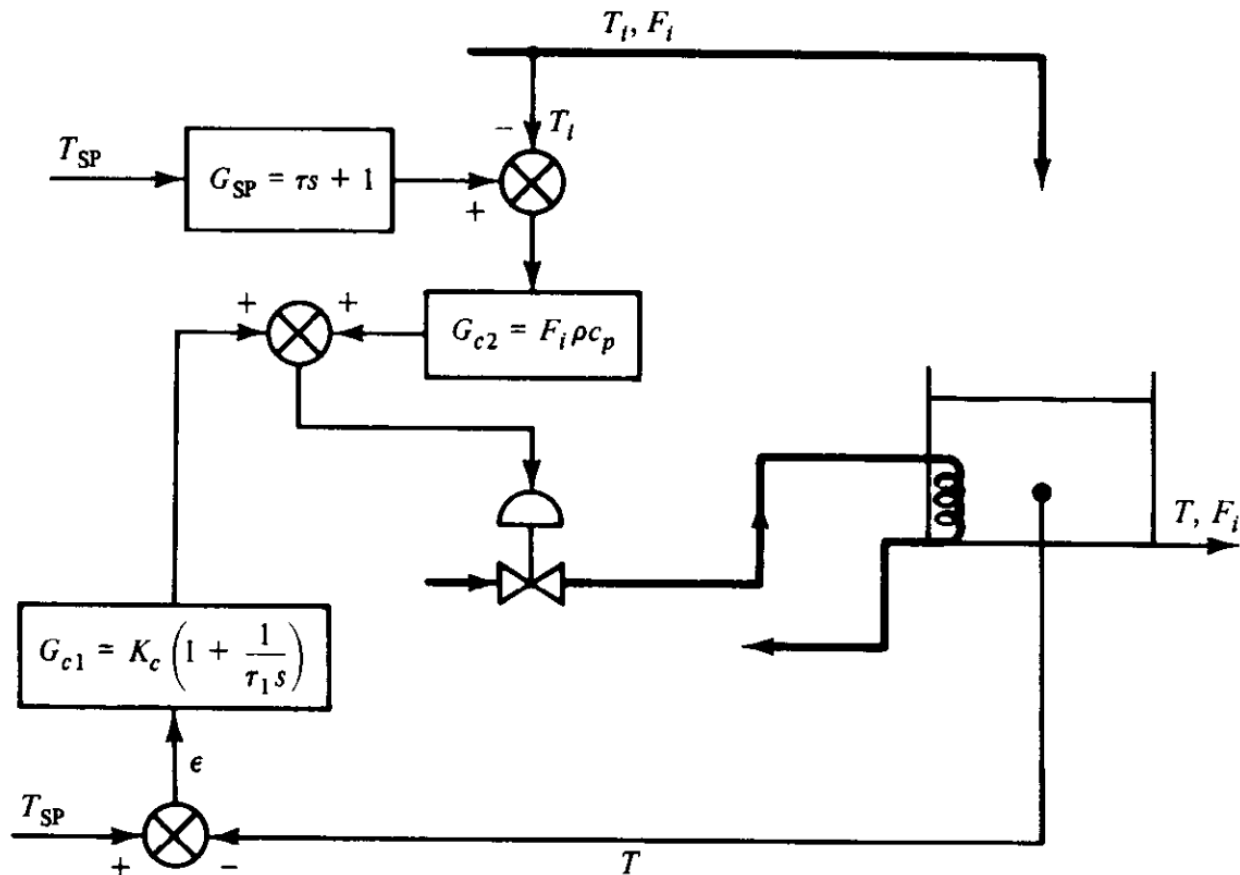
Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

- Controle antecipatório + controle realimentação



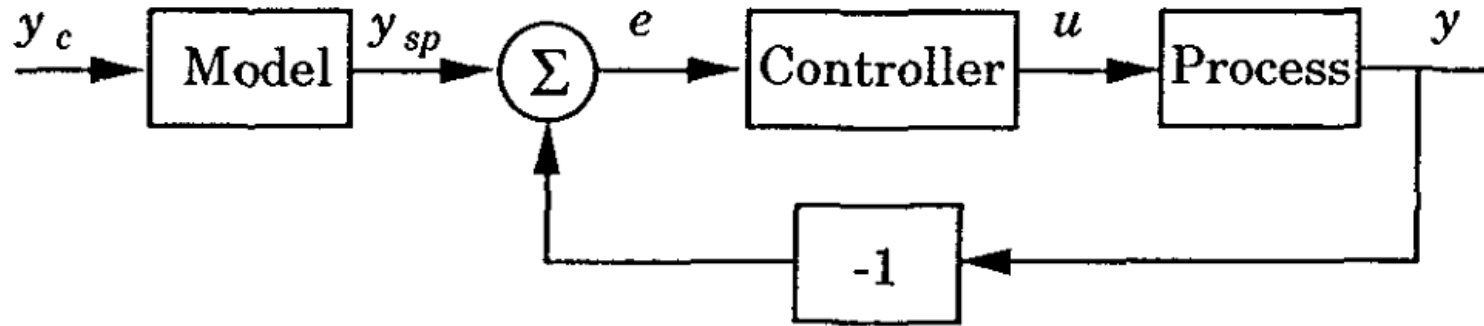
Controle Antecipatório para Seguimento de Trajetória

- Controle de tanque com aquecimento



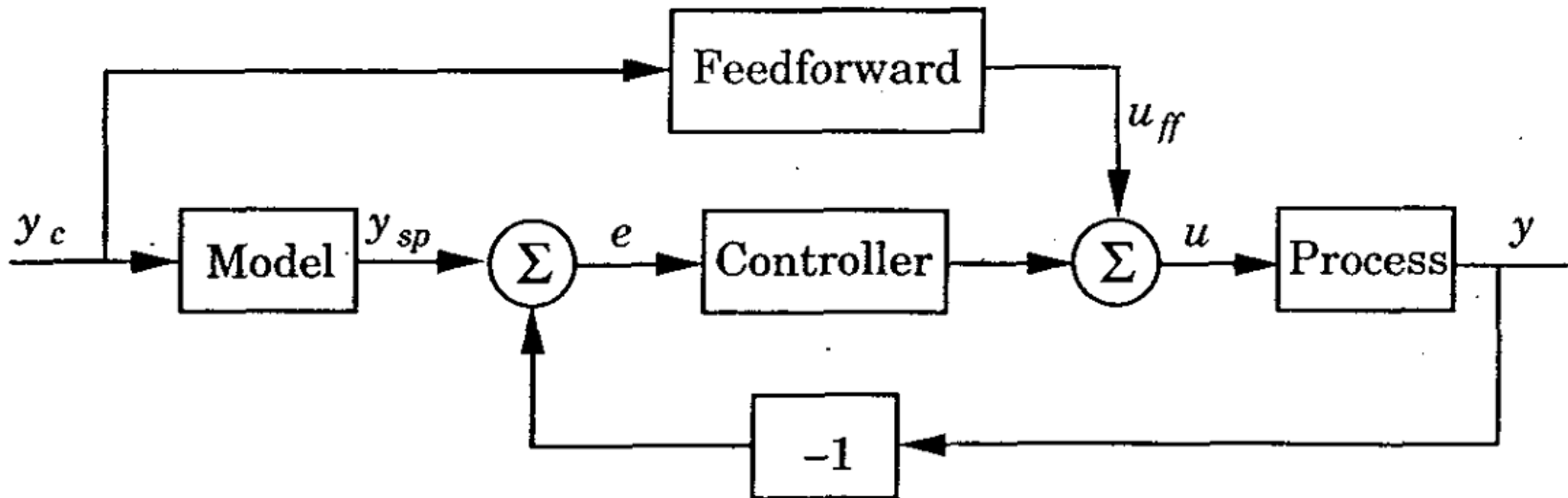
Seguimiento de Modelo (*Model Following*)

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

