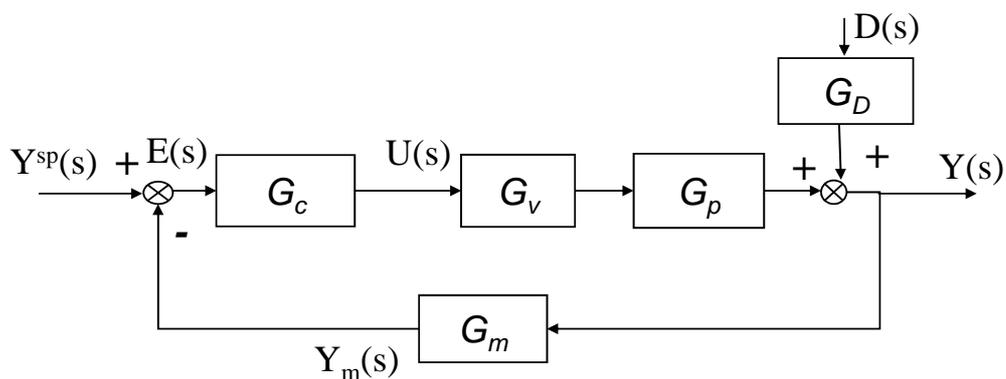


Introdução ao Controle Antecipatório (Feedforward control)

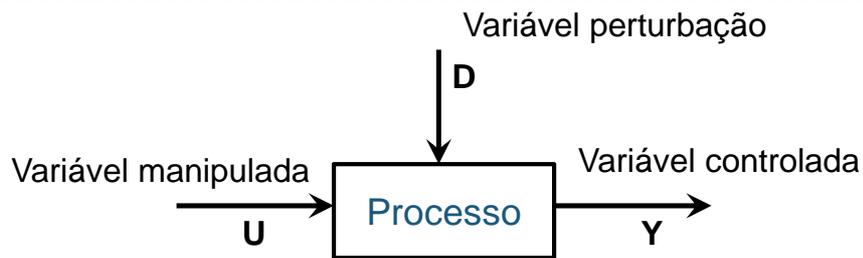
Profª Ninoska Bojorge

Controle Básico Realimentado (*Feedback*)



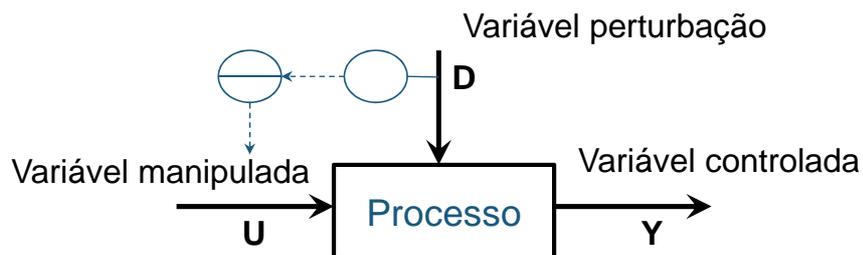
- Vantagem: Correção rápida com a mudança do valor de referência.
- Desvantagem: Resposta lenta à distúrbios.

Controle Antecipatório



- **Objetivo do Controle:** Manter Y no seu setpoint, Y_{sp} , apesar dos distúrbios.
- **Controle Feedback:**
Medir e comparar com Y_{sp} de modo a ajustar U e manter Y em Y_{sp} .
Amplamente utilizado (por exemplo, controladores PID)
O Feedback é um conceito-chave

Controle Antecipatório



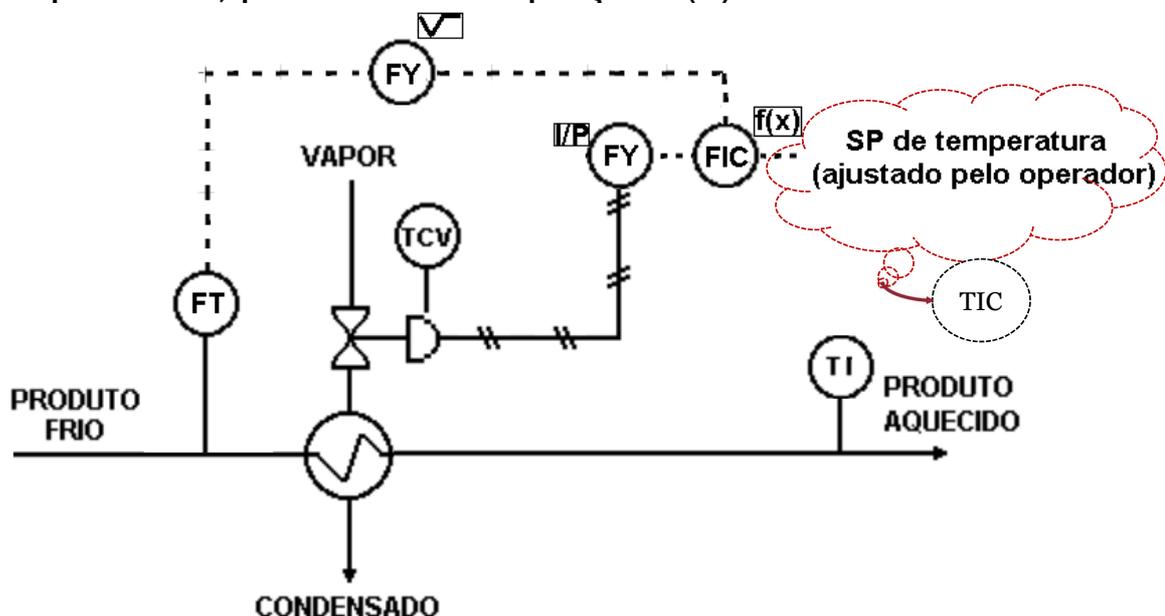
- **Controle Feedforward:**
 - mede D , ajusta U a fim de manter Y em Y_{sp} .
 - observe que a variável controlada não é medida.

Controle Antecipatório

- Controlador Feedforward mede a perturbação e toma ação antecipadas na planta evitando a propagação do erro.
- O controle antecipatório mede uma ou mais variáveis de entrada, prediz seu efeito no processo a atua diretamente sobre a variável manipulada.

Controle Antecipatório

- É necessário saber exatamente a equação do processo que relaciona a vazão de entrada do fluido com a temperatura, por meio da equação $f(x)$.



Feedforward vs. Feedback Control

7

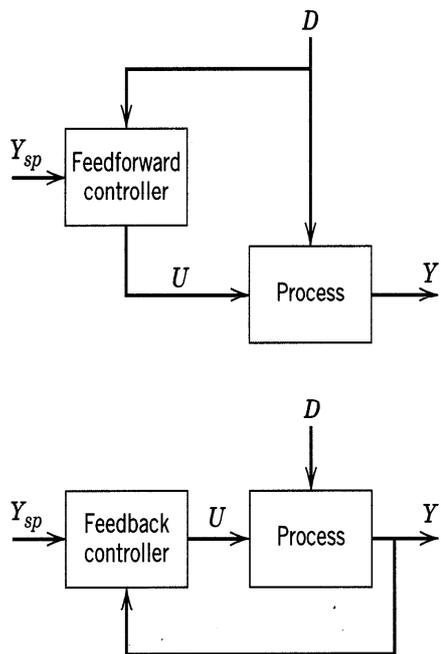
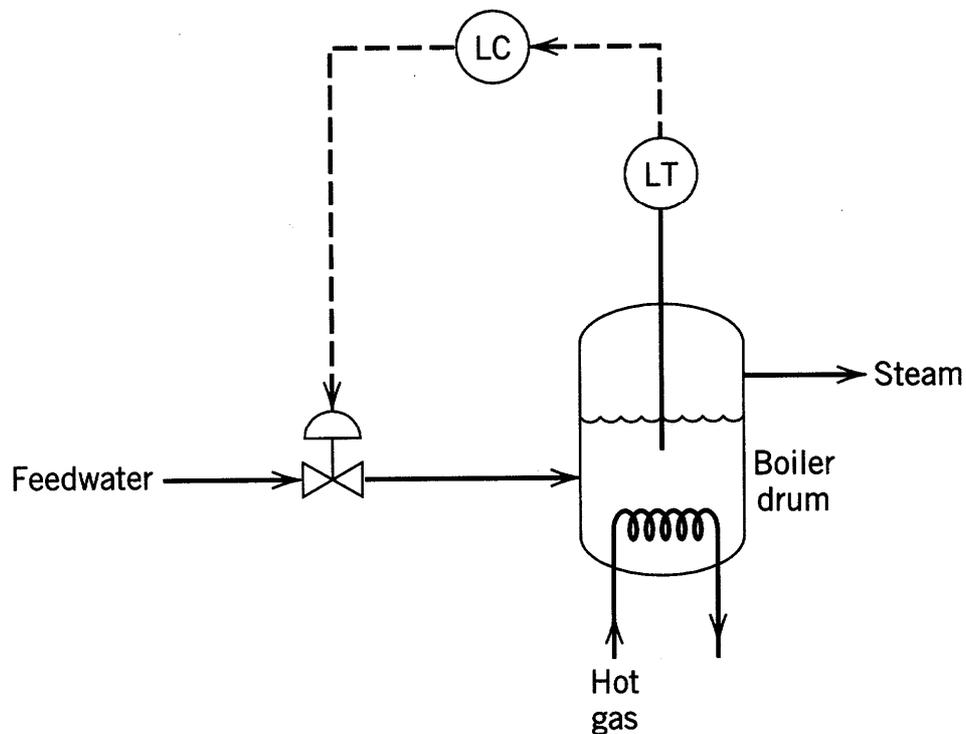


Figure 15.1 Simplified block diagrams for feedforward and feedback control.



8

Figure 15.2 Feedback control of the liquid level in a boiler drum.

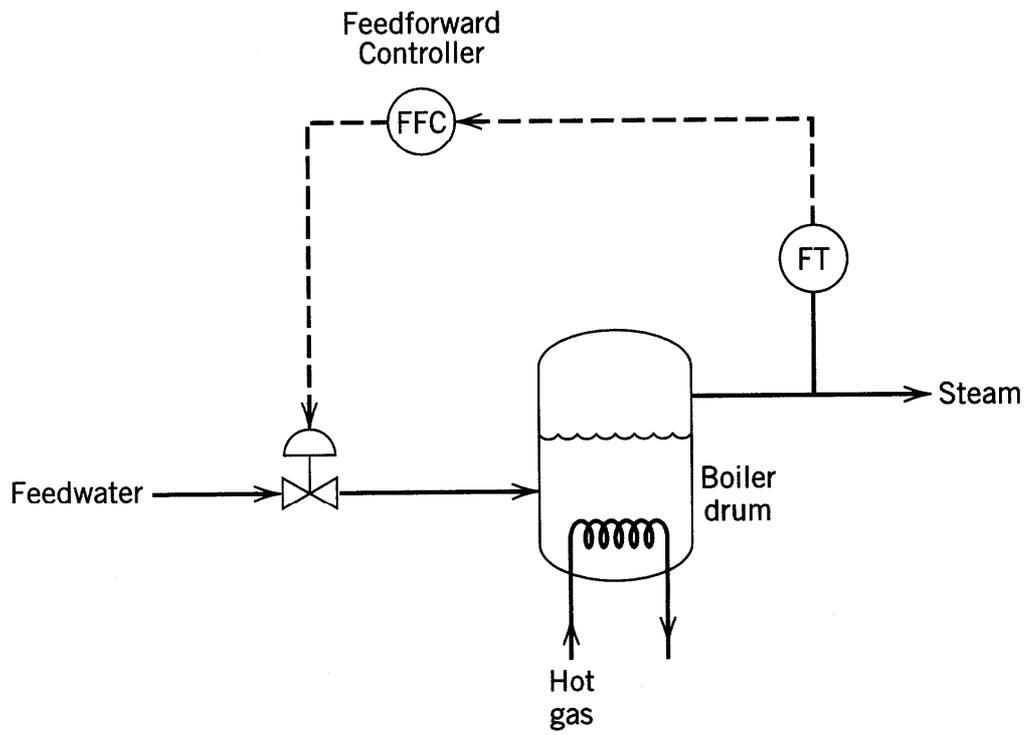


Figure 15.3 Feedforward control of the liquid level in a boiler drum.

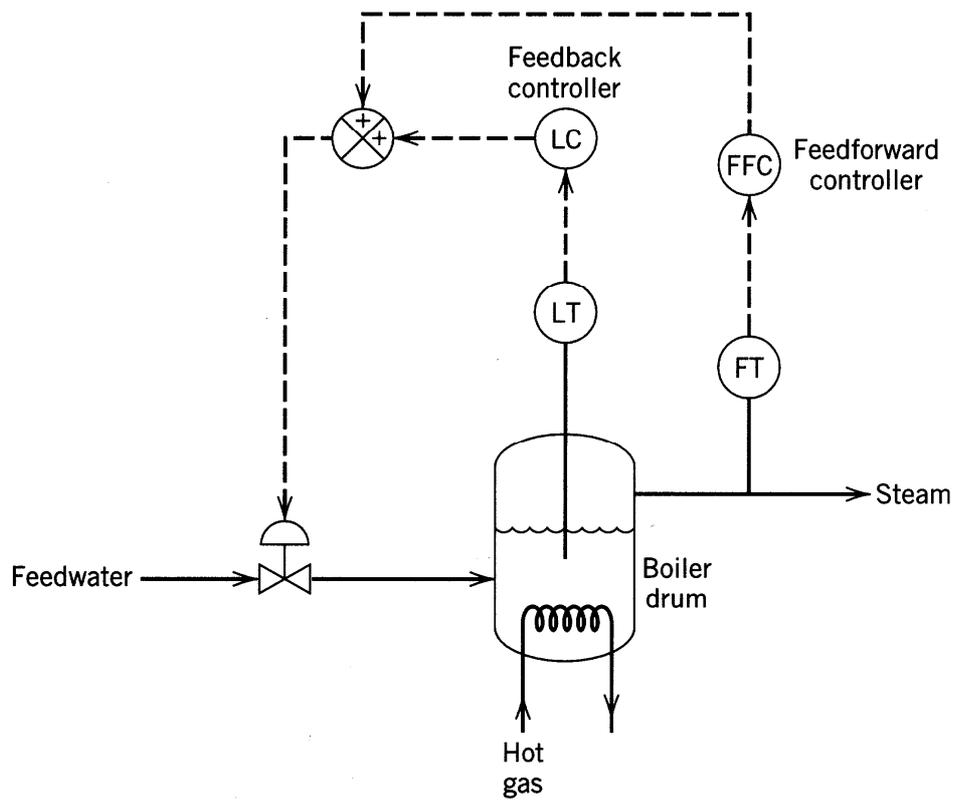


Figure 15.4 Feedforward-feedback control of the boiler drum level.

Controle Antecipatório



O controle antecipatório puro irá funcionar apenas se forem consideradas características estáticas e dinâmicas do processo (temperatura do fluido, vazão do fluido, atrasos, etc).

Comparação do controle Feedback e FeedForward

12

1) Controle Feedback (FB)

Vantagens:

- Ação corretiva ocorre independentemente da origem e tipo de perturbações.
- Requer pouco conhecimento sobre o processo.
- Versátil e robusto (condições mudar? Pode ter controlador re-ajustado).).

Desvantagens:

- Controle FB não toma nenhuma ação corretiva até que um desvio na variável controlada ocorre.
- Controle FB é incapaz de corrigir um desvio do SP , no momento da sua detecção. Teoricamente não é capaz de atingir “controle perfeito”.
- Para distúrbios frequentes e graves, o processo não pode resolver por si só.

Comparação do controle Feedback e FeedForward

13

2) Feedforward (FF) Control

Vantagens:

- Toma medidas corretivas antes que o processo seja perturbado (\neq controle FB).
- Teoricamente capaz de realizar o "controle perfeito"
- Não afeta a estabilidade do sistema

Desvantagens:

- Perturbação deve ser medida (\Rightarrow capital, custos operacionais)
- Requer mais conhecimento do processo a ser controlado (modelo de processo)
- Controladores ideais que resultam em "controle perfeito": pode ser fisicamente irrealizável
- Na pratica usa controladores, tais como unidades de lead-lag.

3) Controle Feedforward mais Feedback

Controle FF

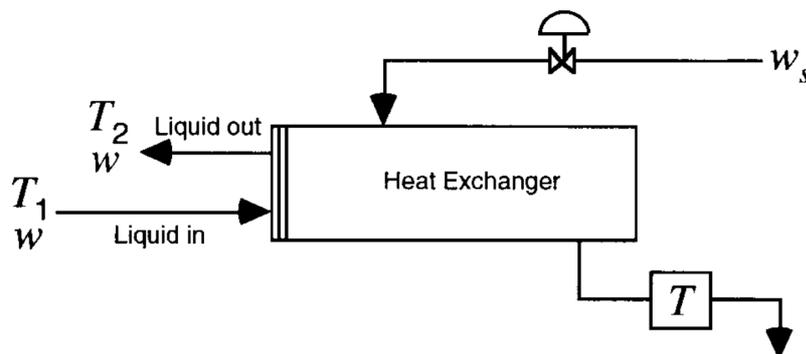
- Tenta eliminar os efeitos de distúrbios mensuráveis.

Controle FB

- Corrige os distúrbios imensuráveis, erros de modelagem, etc.

EXEMPLO : Trocador de calor

14



w = vazão líquido

w_s = vazão vapor

T_1 = temperatura do líquido entra

T_2 = temperatura do líquido que sai

• Objetivo:

- Manter T_2 no valor desejado (ou set-point), T_{sp} , apesar das variações na taxa de fluxo de entrada, w .
- Fazer isso através da manipulação de w_s .

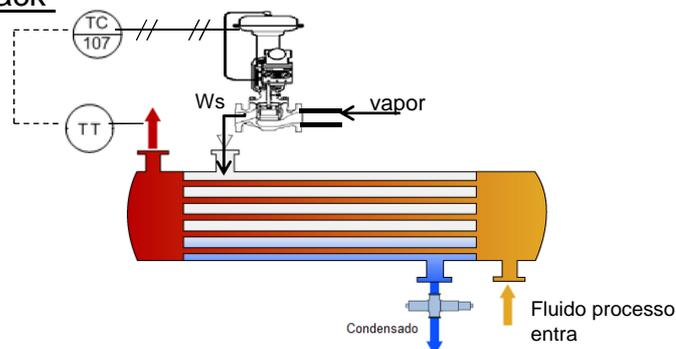
• Estrutura do controle Feedback:

Mede T_2 , compara T_2 a T_{sp} , ajusta w_s .

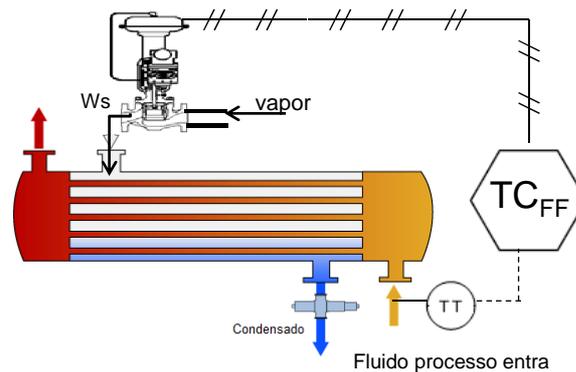
• Estrutura do controle Feedforward:

Mede w , ajusta w_s (sabendo T_{sp}), para controlar a saída temperatura, T_2 .

Controle Feedback



Controle Feedforward



Procedimento do projeto para controle antecipatório

17

- Lembrando que o controle FF requer algum conhecimento do processo (modelo).
- Balanço de Materiais e energéticos. Funções de transferência

- Procedimento

Aqui vamos usar balanços de materiais e energéticos para as condições de estado de equilíbrio.

Exemplo: Trocador de calor

Balanços de energia no estado de equilíbrio

calor transferido = calor adicionado
do fluxo de vapor ao processo

$$w_s \Delta H_v = wC(T_2 - T_1) \quad (1)$$

onde, $\Delta H_v \equiv$ calor latente de vaporização
 $C \equiv$ calor específico do fluido

Reordenando Eq. (1) temos,

$$w_s = \frac{C}{\Delta H_v} w(T_2 - T_1) \quad (2)$$

ou

$$w_s = Kw(T_2 - T_1) \quad (3)$$

com

$$K = \frac{C}{\Delta H_v} \quad (4)$$

Substituindo T_2 por T_{sp} já que T_2 não é medido:

$$w_s = Kw(T_{sp} - T_1) \quad (5)$$

- A equação (5) pode ser usada para os cálculos do controle FF realizado num computador).
- Seja K um parâmetro ajustável (útil para o ajuste).

Vantagens do Procedimento

- cálculos simples
- o sistema de controle é estável e auto-regulador

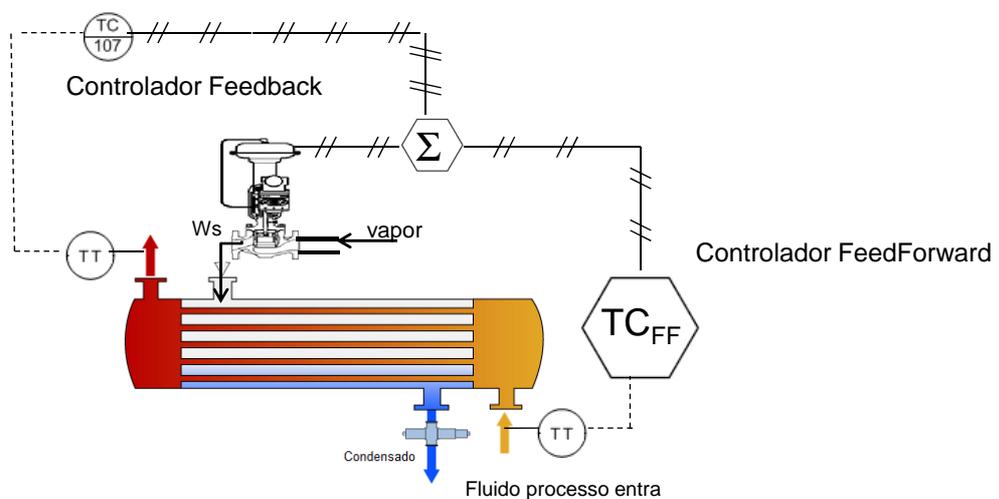
Falhas do Procedimento

- Não considera as condições de estado não estacionário, perturbações, etc
- Compensação em outras condições de carga precisa adicionar o controle FB

Compensação dinâmica

- para melhorar o controle durante condições adversas, adicionar compensação dinâmica ao procedimento acima. Exemplo: Unidades de avanço / atraso (Lead/lag)

Controle Feedforward/Feedback de um trocador de calor



1) Controle Feedback

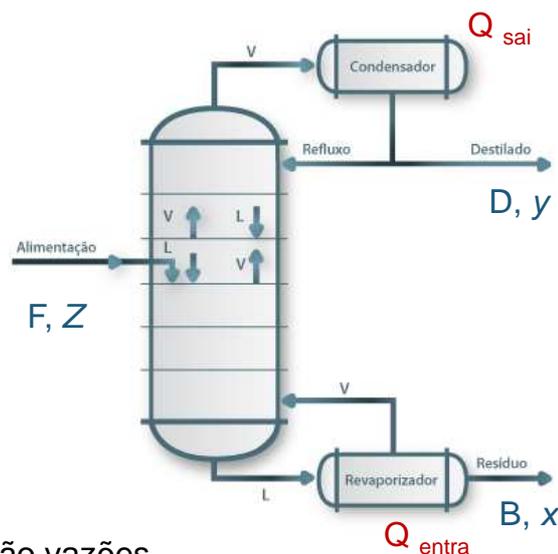
- Sensor-Transmissor de temperatura
- válvula de controle do vapor

2) Controle FB/FF

Instrumentação adicional

- Dois sensores-transmissores de vazão (para w e w_s)
- Transmissor de temperatura de T_1 (opcional).

EXEMPLO: Coluna de Destilação



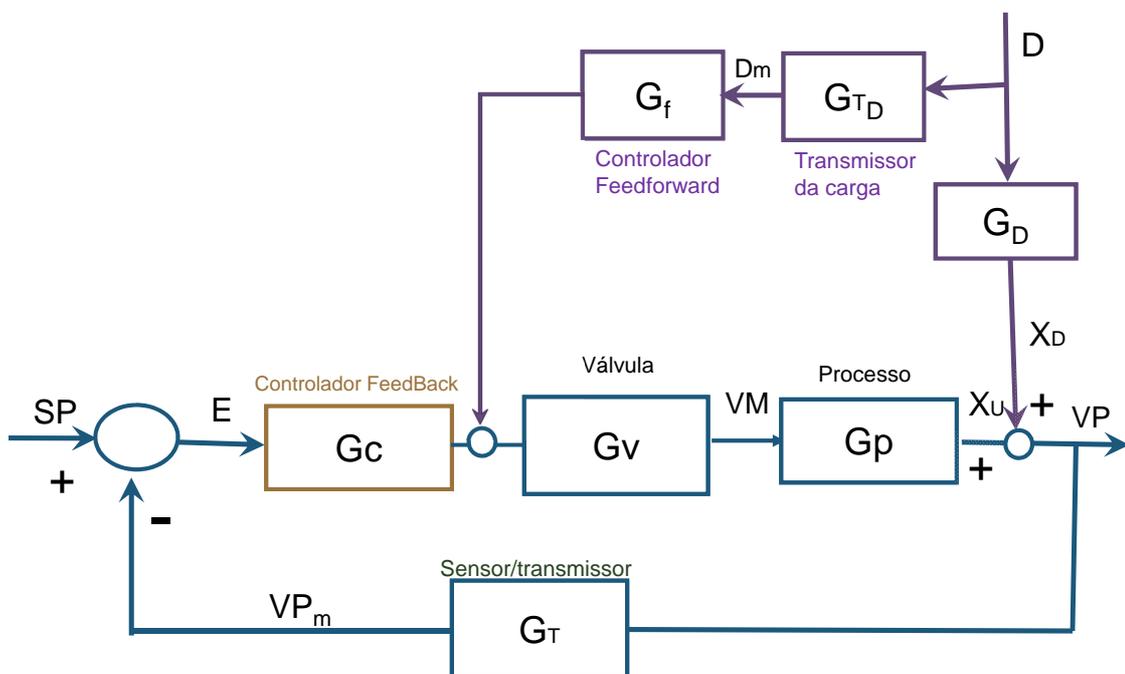
- Simbologia
 F, D, B são vazões
 z, y, x são frações molares do componente leve
- Objetivo controle:
 Controle de y apesar dos distúrbios em F e z manipulando D .
- Balanço massa : $F = D + B$;
 $Fz = Dy + Bx$

Combinando para obter

$$D = \frac{F(z - x)}{y - x}$$

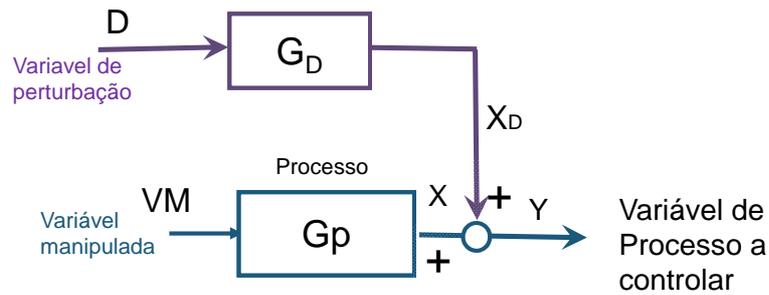
Substituindo y e x por seus valores set point, y_{sp} e x_{sp} :

$$D = \frac{F(z - x_{sp})}{y_{sp} - x_{sp}}$$

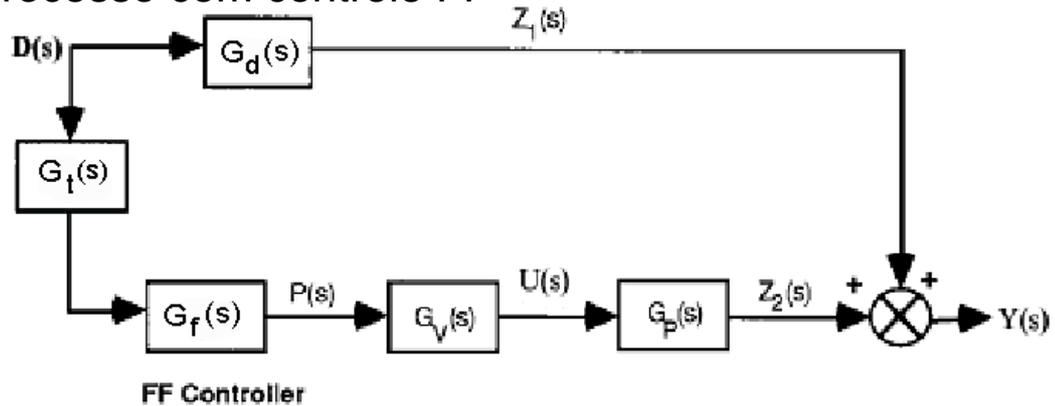


Análise do diagrama de Blocos

- Processo



- Processo com controle FF



25

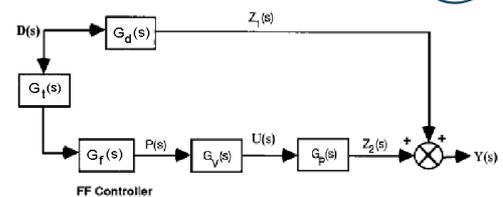
- Análise (omitindo "s" por conveniência)

26

$$Y = Z_1 + Z_2 \quad (1)$$

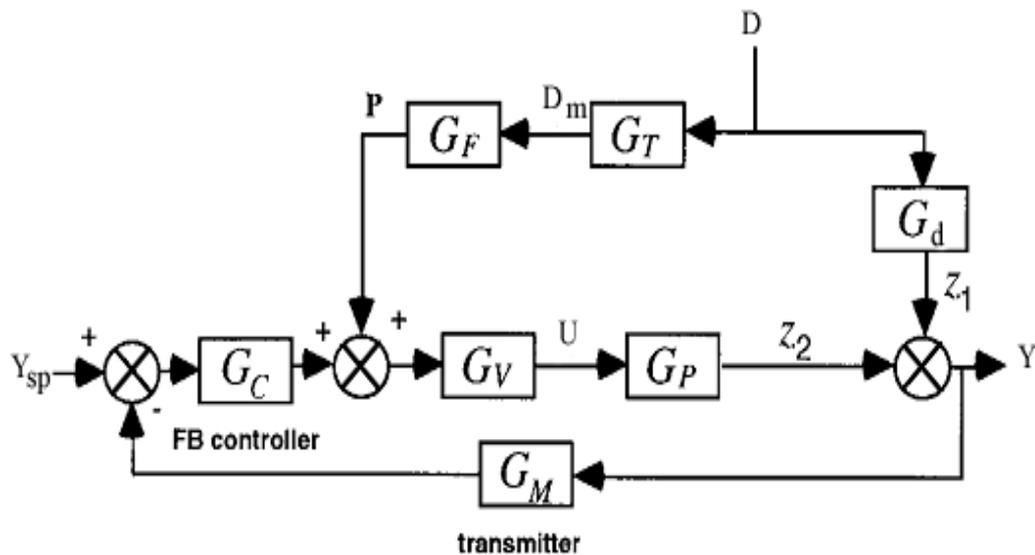
$$Y = G_d D + G_P U \quad (2)$$

$$Y = G_d D + G_P G_V G_f G_t D \quad (3)$$



Para o "controle ideal" queremos $Y = 0$, embora $D \neq 0$. Em seguida, reordenando Eq. (3), com $Y = 0$, dá uma equação do projeto.

$$G_f = -\frac{G_d}{G_t G_V G_P}$$



Exemplos: Para simplificar, considere a expressão da equação de projeto FF, então:

$$G_f = -\frac{G_d}{G_t G_V G_P}$$

1) Suponha-se:

$$G_d = -\frac{K_d}{\tau_d s + 1}, \quad G_P = -\frac{K_P}{\tau_P s + 1}, \quad G_t G_V = 1$$

Assim,

$$G_f = -\left(\frac{K_d}{K_P}\right) \left(\frac{\tau_P s + 1}{\tau_d s + 1}\right) \quad (\text{lead/lag})$$

2) Agora considere-se

$$G_d = \frac{K_d}{\tau_d s + 1}, \quad G_P = \frac{K_P e^{-\theta s}}{\tau_P s + 1}$$

temos,

$$G_f = -\frac{K_d (\tau_P s + 1)}{K_T K_V K_P (\tau_d s + 1)} e^{+\theta s}$$

$e^{+\theta s}$ Implica previsão de futuros distúrbios

3) Suponha $G_P = \frac{K_P}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$, mesmo G_d

Logo,

$$G_f = \frac{K_d (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{K_T K_V K_P (\tau_d s + 1)}$$

é fisicamente irrealizável.

No entanto, os controladores de FF aproximados pode resultar em melhora significativa do controle.

Unidades Lead-Lag (LL)

- Comumente usada para prover uma compensação dinâmica do controle FF.
- Implementação mediante componentes análogos ou digitais
- Função de Transferência: $G_{LL}(s) = \frac{K(\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1} = \frac{\text{lead}}{\text{lag}}$
- Ajuste τ_1, τ_2, K

Se a unidade LL é usada como controlador FF,

$$\underset{\text{(disturbance)}}{D(s)} \rightarrow \boxed{\frac{K(\tau_1 s + 1)}{\tau_2 s + 1}} \rightarrow \underset{\text{(manipulated variable)}}{U(s)} \quad K = 1$$

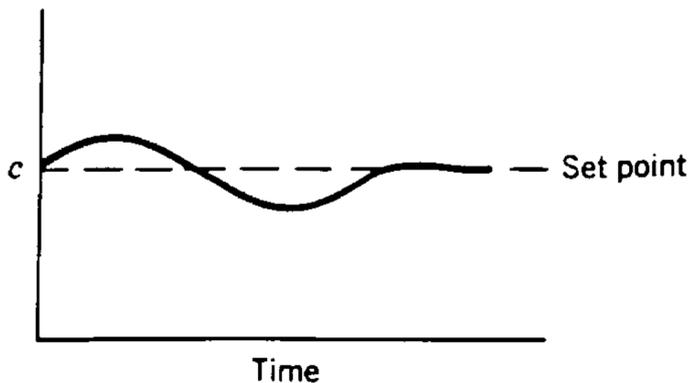
Para uma mudança degrau na unidade de carga,

$$U(s) = \left(\frac{\tau_1 s + 1}{\tau_2 s + 1} \right) \frac{1}{s}$$

Tomando transformada inversa,

$$u(t) = 1 + \left(\frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_2} \right) e^{-t/\tau_2}$$

Resposta desejada



áreas iguais acima e abaixo do ponto de ajuste; pequenos desvios

Segundo a literatura, áreas iguais implica que a diferença de τ_1 e τ_2 é correto. Sintonia subsequente (para reduzir o tamanho das áreas), τ_1 e τ_2 devem ser ajustado tal que $\tau_1 - \tau_2$ seja constante.

Por último: Sintonia do controlador FB

- Na configuração FB/FF.

Controlador FB pode ser ajustado usando técnicas convencionais (ex. Z&N, IMC, ITAE).

Análise de Estabilidade

- Função de transferência malha fechada

$$\frac{Y}{D} = \frac{G_d + G_T G_f G_V G_P}{1 + G_C G_V G_P G_M}$$

Determinando a Eq. para G_F

Para $Y=0$ e $D \neq 0$, se requer:

$$G_d + G_T G_f G_V G_P = 0$$

$$G_f = -\frac{G_d}{G_T G_V G_P}$$

Análise de Estabilidade

- Equação característica

$$1 + G_C G_V G_P G_M = 0$$

As raízes da equação característica determina a estabilidade do sistema.

Mas, essa equação não contém G_f .

Portanto, o controle FF não afeta a estabilidade do sistema de FB.

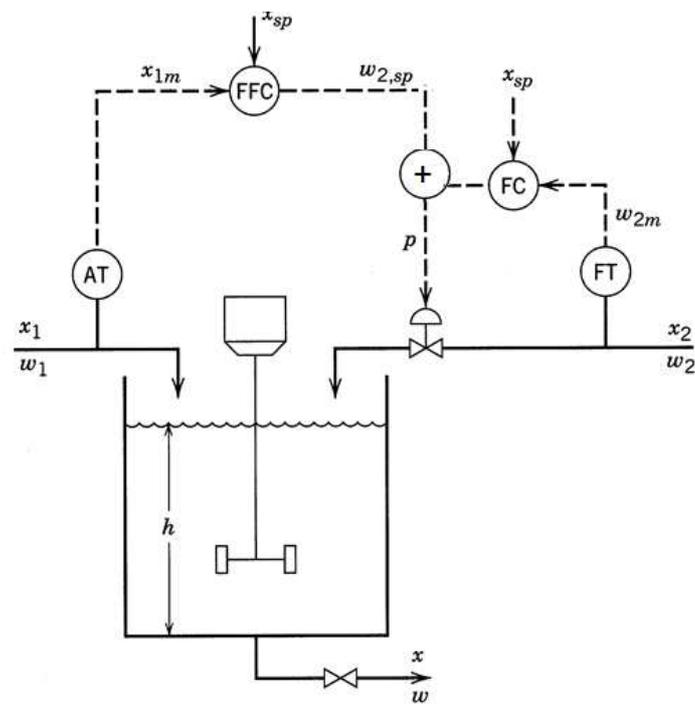


Figure 15.10 Feedforward control of exit composition using a flow control loop.

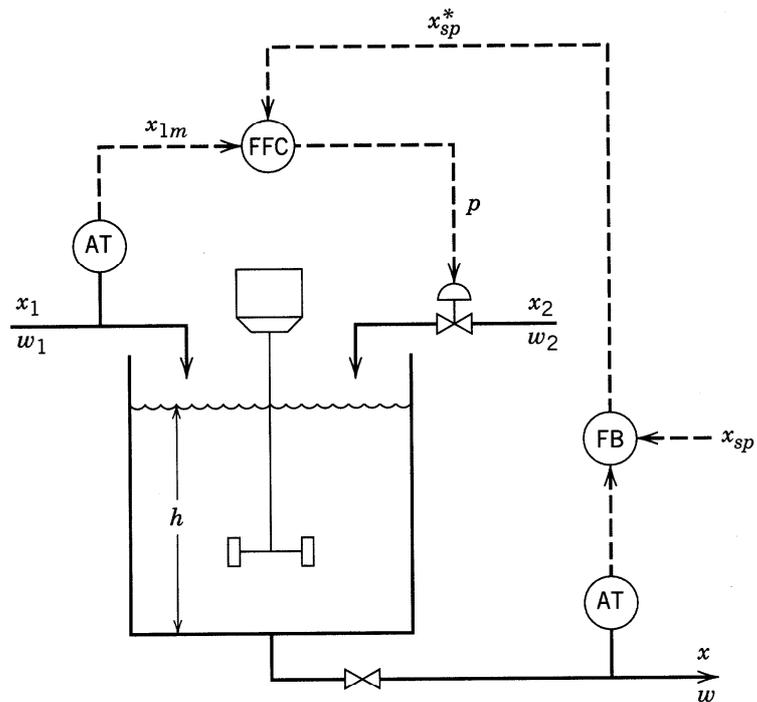


Figure 15.14 Feedforward-feedback control of exit composition in the blending system.

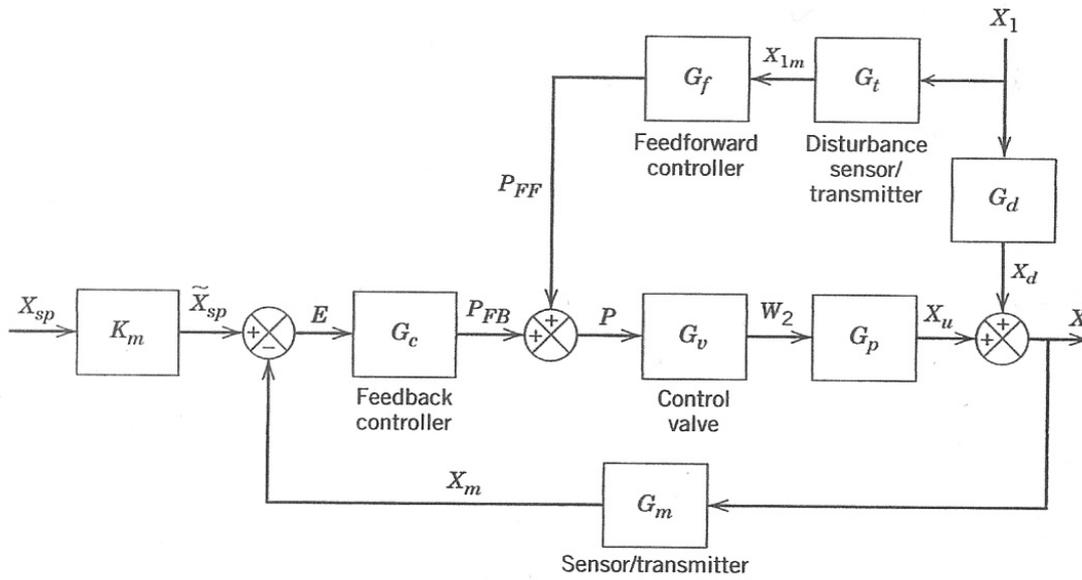


Figure 15.12 Block diagram for feedforward-feedback control of the blending system.