

custo

Malhas de controle:
Tipos de controladores e
funcionamento

Profª Ninoska Bojorge

Controle de Processos

Os processos industriais são operados em condições dinâmicas...

- resultantes de constantes perturbações no sistema
- ou causadas por mudanças propositalis no ponto de operação para atender à programação da produção

Esta dinâmica é modificada (compensada) por ação de **MALHAS DE CONTROLE**, para manter a estabilidade da operação e atender às especificações de processo.

Necessidades da automatização na planta

O sistema de controle se implanta principalmente para levar a cabo de forma automática as seguintes tarefas:

- **Processos contínuos:** regulação de uma variável (manter uma variável em um valor de referencia ou set-point).

Não obstante, em alguns casos, pela complicação do processo, não se pode regular uma variável de forma totalmente automatizada. Em tais situações o controle se faz mediante aviso com alarmes e intervenção direta do operário, como ocorre em algumas malhas de controle (p. ex. obtenção de CO₂ em fornos de decomposição da pedra calcária).

- **Processos descontínuos:** regulação de uma variável e sequenciamento de operações.

Alguns processos funcionam seguindo uma sequencia de operações programáveis, que se leva a cabo mediante sinais de entrada desde o processo e ordens desde a unidade de controle.

Funcionalidade do Controle de Processo

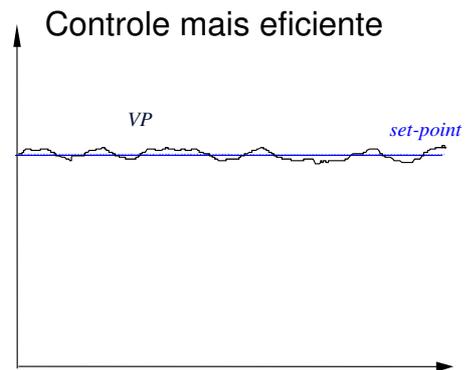
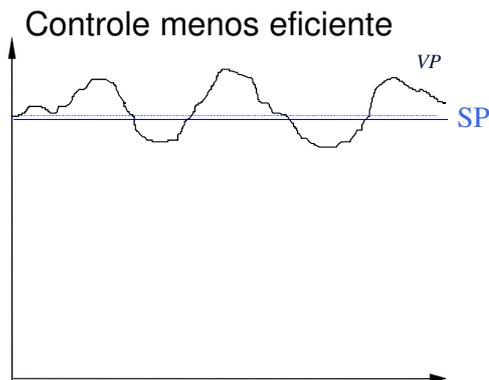
Objetivos de um sistema de controle

- Suprimir a influência de perturbações externas
- Garantir a estabilidade do processo
- Otimizar o desempenho de um processo

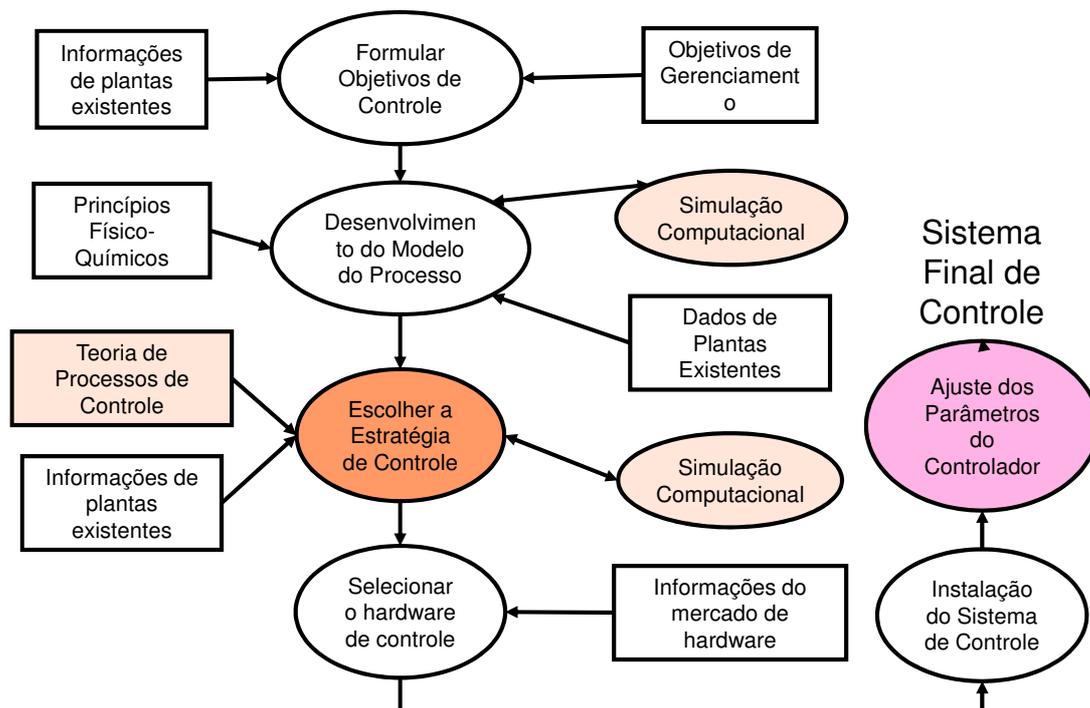
Eficiência do Sistema de Controle

Com um controle mais eficiente tem-se:

- um menor desvio padrão na saída
- uma maior proximidade entre o set-point e a especificação
- uma maior otimização



Principais Etapas no Desenvolvimento de Sistemas de Controle



Fonte: Chemtech

Definições

INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

Conjunto de instrumentos que permitem fazer o controle do processo.

São instrumentos capazes de emitir e receber sinais.

ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Filosofia básica de controle.

Define os instrumentos e a disposição física destes ao longo da planta.

Malha de Controle

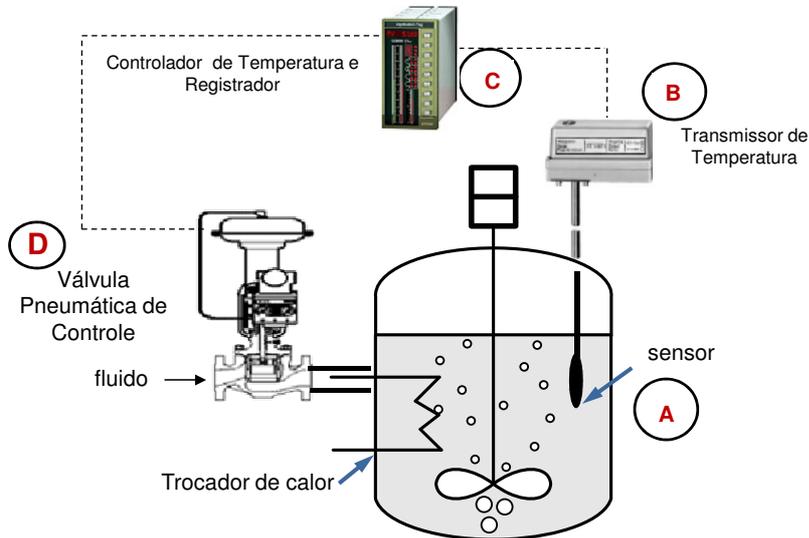
MALHA DE CONTROLE

Representação prática da estratégia de controle. Composta por:

- 1) Processo
- 2) Instrumentos de Medição:
Informam de modo contínuo os valores das variáveis de processo.
- 3) Instrumentos de Controle
Fazem a tomada de decisão e ação de atuação sobre o processo.
- 4) Instrumentos de Atuação
Permitem implementar a ação de correção.

Malha de Controle

O TT fornece o sinal (PV), que representa o estado do processo sendo controlado. Os TIC compara o PV com o SP e abre e fecha o EFC para manter o processo estável.



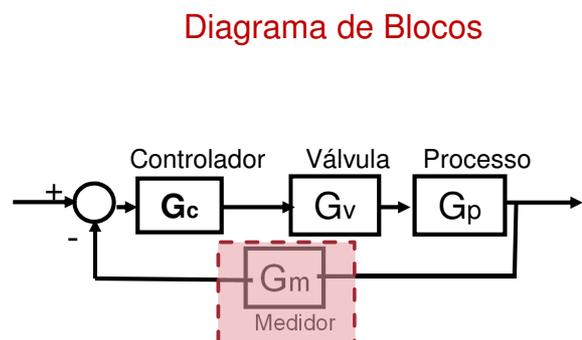
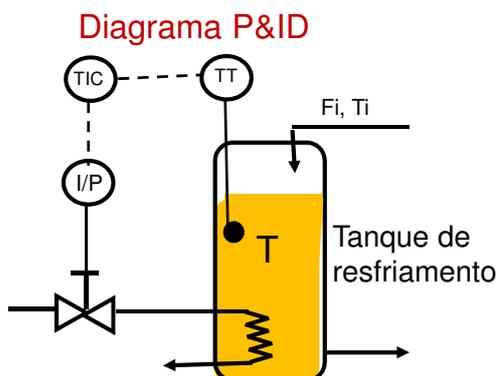
Malha de Controle

DIAGRAMA P&ID

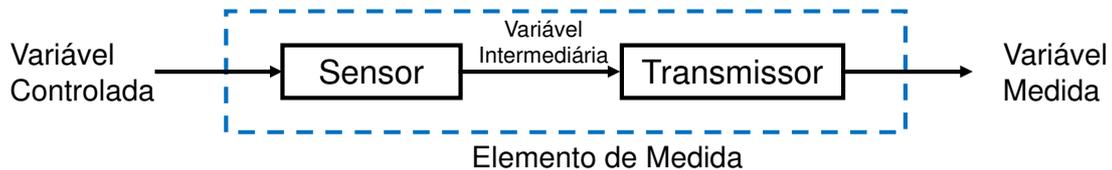
Representação gráfica do fluxograma de processo simplificado acrescido do fluxograma de instrumentação.

DIAGRAMA DE BLOCOS

Representação gráfica em forma de blocos dos sinais emitidos pelos elementos da malha de controle.



A maior parte dos instrumentos pode ser dividida em:



SENSOR: Definido pelo tipo e princípio de medição envolvido

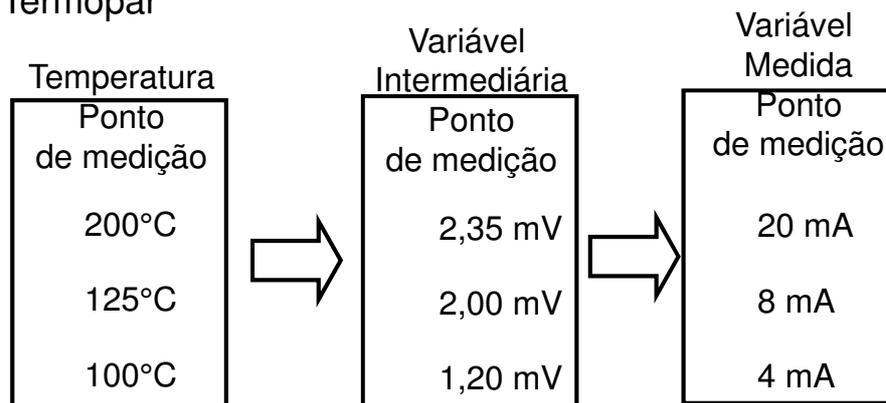
TRANSMISSOR: Transmite o sinal de grandeza física em sinal padrão.

Instrumentos de Medição e Transmissão

TIPOS DE SINAL

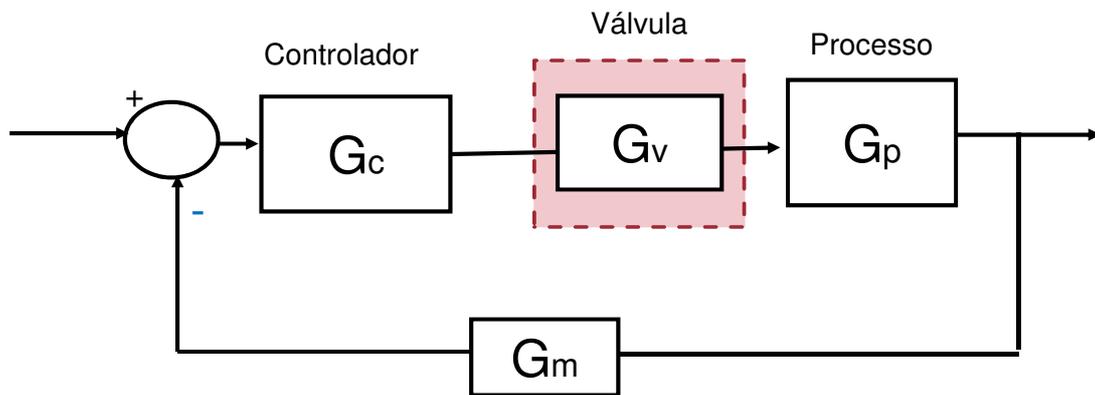
- Pneumático: 3 a 15 psi
- Eletrônico (analógico): 4 a 20 mA
- Fieldbus (digital)

Exemplo: Termopar



Elemento Final de Controle

Diagrama de Blocos – Malha de controle realimentada



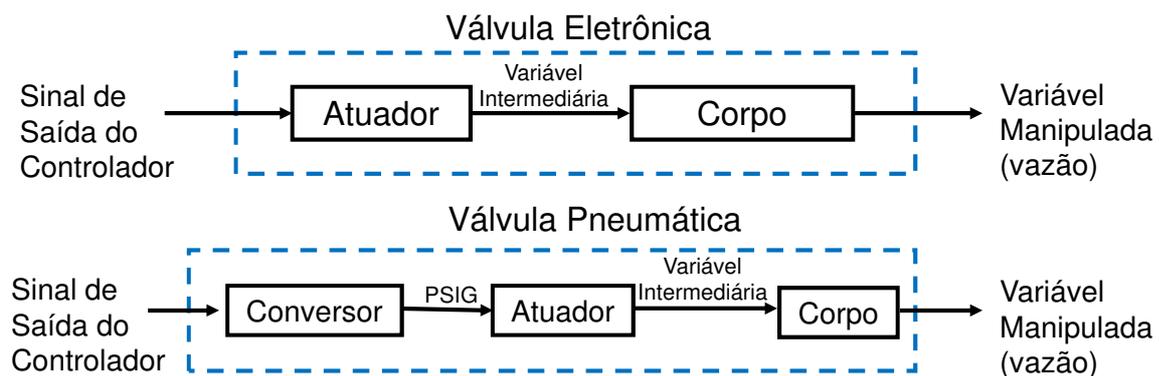
13

Elemento Final de Controle

- Motores;
- Termoresistores;
- **Válvulas de controle**; etc.

As válvulas de Controle podem ser eletrônicas ou pneumáticas (95%).

COMPONENTES PRINCIPAIS



Elemento Final de Controle

COMPONENTES PRINCIPAIS

A) CONVERSOR

Converte o sinal elétrico em sinal de pressão (4-20 mA → 3-15 psi).

B) ATUADOR

Recebe sinal do controlador ou conversor e aciona a haste da válvula.

C) CORPO

Composto pelas partes internas diretamente ligada ao processo.

Elemento Final de Controle

AÇÃO DAS VÁLVULAS DE CONTROLE

A escolha da ação das válvulas é de fundamental importância para à segurança do processo e para a escolha dos parâmetros do controlador.

A) AR PARA ABRIR (ou Sinal para Abrir)

Também chamada de Ação Direta ou Falha Fecha. Quanto **maior** o sinal, **maior** a abertura da válvula.

B) AR PARA FECHAR (ou Sinal para Fechar)

Também chamada de Ação Reversa ou Falha Abre. Quanto **menor** o sinal, **maior** a abertura da válvula.

Elemento Final de Controle

Air-to-Open vs. Air-to-Close Control Valves

AR PARA ABRIR (A.A.) OU FALHA FECHA (F.F.)

Com o aumento da pressão de ar na cabeça da válvula, a haste do atuador desloca-se de baixo para cima, provocando a abertura da válvula.

Com a diminuição da pressão do ar, a haste se deslocará de cima para baixo até provocar o assentamento do obturador na sede, fechando a válvula.



VÁLVULA DE AÇÃO REVERSA ($K_v > 0$)

AR PARA FECHAR (A.F.) OU FALHA ABRE (F.A.)

Com o aumento da pressão de ar na cabeça da válvula, a haste do atuador desloca-se de cima para baixo até provocar o assentamento do obturador na sede, fechando a válvula.

Com a diminuição da pressão do ar, a haste se deslocará de baixo para cima, abrindo a válvula.



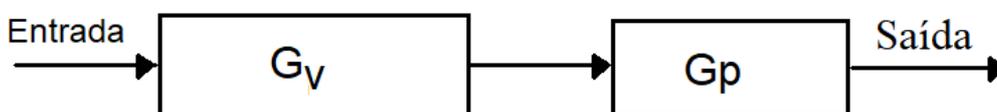
VÁLVULA DE AÇÃO DIRETA ($K_v < 0$)

Representação do Controle

Diagrama de Blocos – Malha Aberta

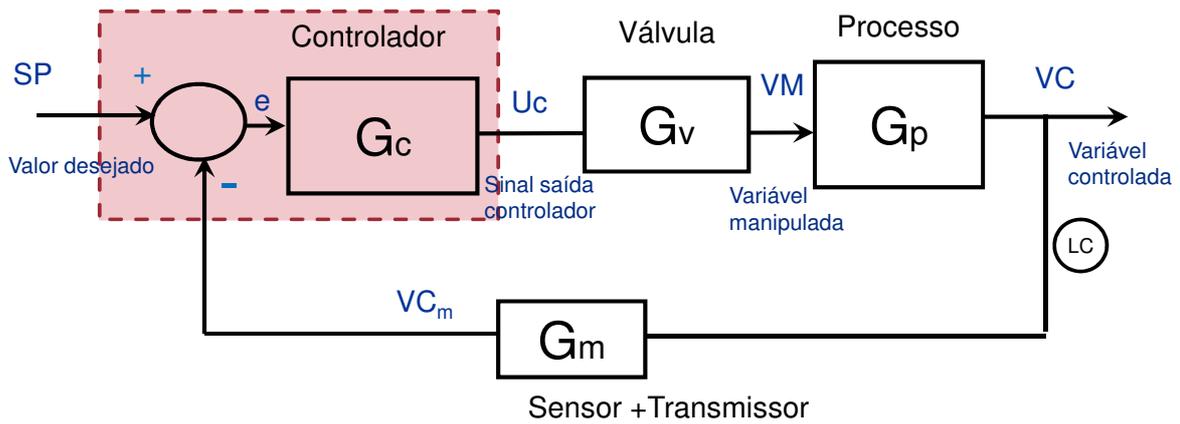


Ou, mais simples:



Representação do Controle

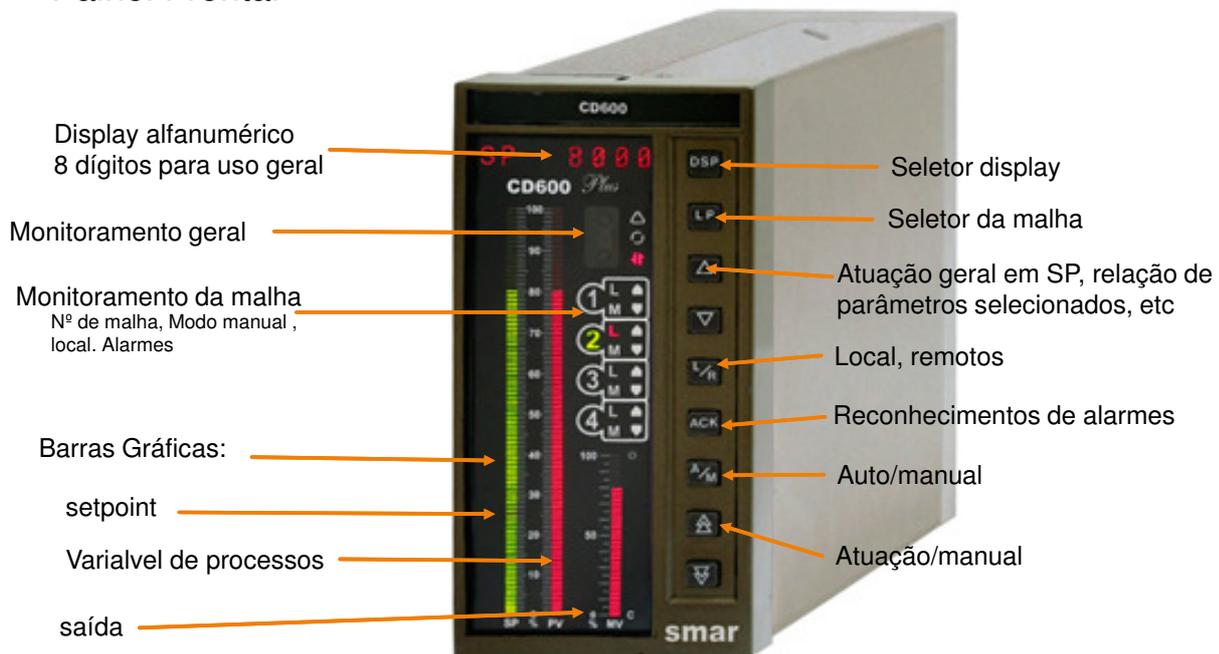
Diagrama de Blocos – Malha de controle realimentada



19

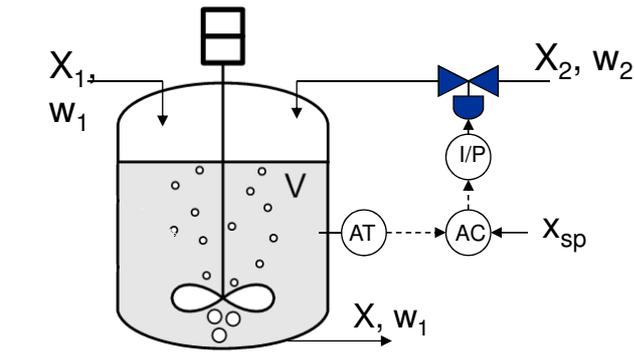
Controlador Industrial MultiLoop - Exemplo

Painel Frontal

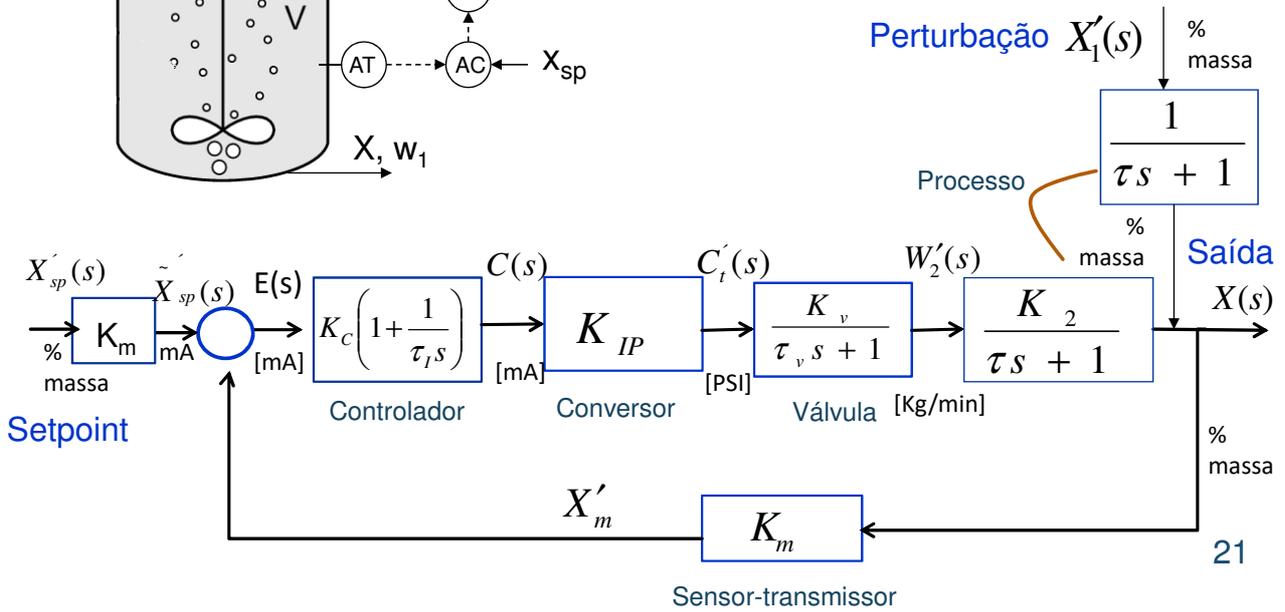


20

Exemplo: Sistema de mistura de correntes



Relembrando Exemplo da aula anterior



Exemplo: Sistema de mistura de correntes

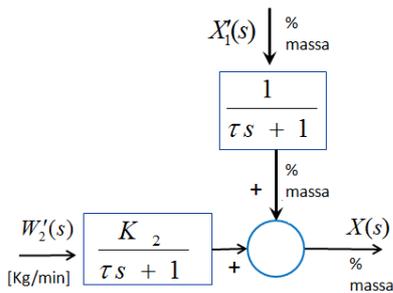
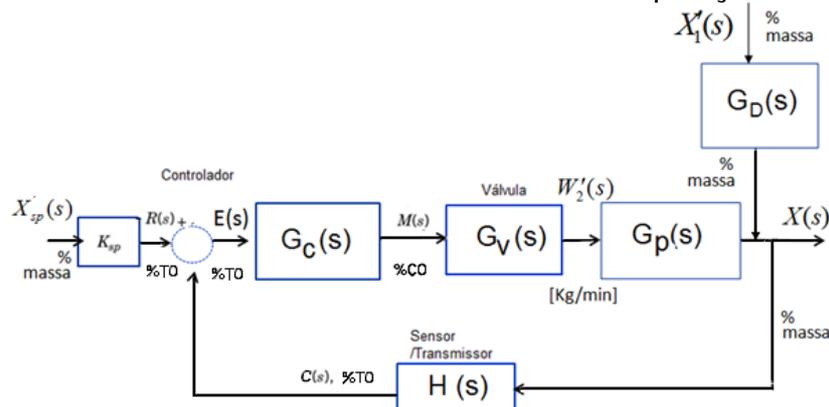


Diagrama de Blocos do tanque de mistura

Diagrama de Blocos da malha de controle da Composição no tanque



Função de Transferência - Malha fechada

Analisando a malha fechada, temos:

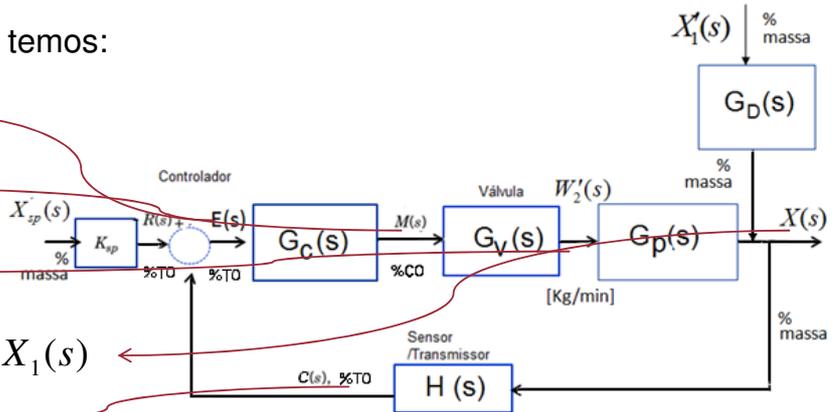
$$E(s) = K_{SP} X_{sp} - C(s)$$

$$M(s) = G_C(s)E(s)$$

$$W_2(s) = G_V(s)M(s)$$

$$X(s) = G_P(s)W_2(s) + G_D(s)X_1(s)$$

$$C(s) = H(s)X(s)$$



23

Função de Transferência - Malha fechada

Analisando a malha fechada, temos:

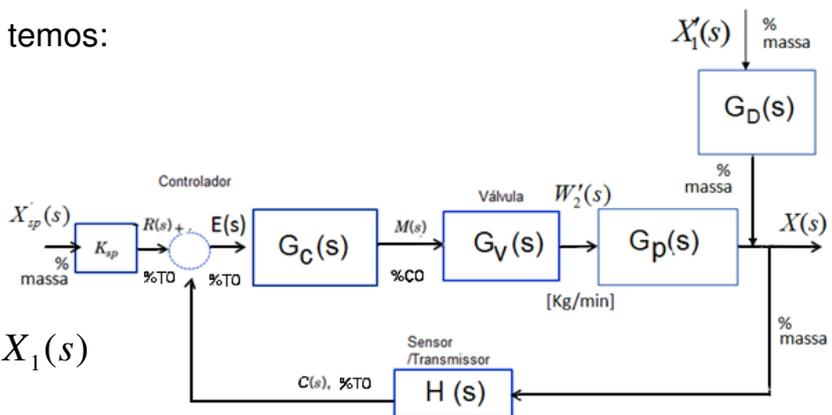
$$E(s) = K_{SP} X_{sp} - C(s)$$

$$M(s) = G_C(s)E(s)$$

$$W_2(s) = G_V(s)M(s)$$

$$X(s) = G_P(s)W_2(s) + G_D(s)X_1(s)$$

$$C(s) = H(s)X(s)$$



$$X(s) = G_P(s)W_2(s) + G_D(s)X_1(s)$$

$$X(s) = G_P(s)G_V(s)M(s) + G_D(s)X_1(s)$$

$$X(s) = G_P(s)G_V(s)G_C(s)[K_{sp} X_{sp} - H(s)X(s)] + G_D(s)X_1(s)$$

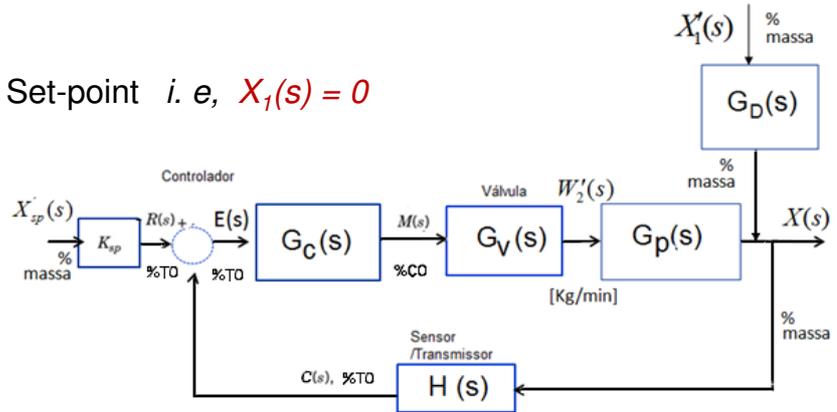
$$[1 + G_P(s)G_V(s)G_C(s)H(s)]X(s) = K_{sp}(s)G_C(s)G_V(s)G_P(s)X_{sp}(s) + G_D(s)X_1(s)$$

24

Função de Transferência - Malha fechada

$$[1 + G_P(s)G_V(s) G_C(s) H(s)]X (s) = K_{SP}(s)G_C(s)G_V(s)G_p(s)X_{sp}(s) + G_D(s)X_1(s)$$

Considerando, variação no Set-point *i. e.*, $X_1(s) = 0$



Então:

$$\frac{X(s)}{X_{sp}(s)} = \frac{K_{sp} G_p(s) G_V(s) G_C(s)}{1 + H(s) G_p(s) G_V(s) G_C(s)}$$

25

Função de Transferência - Malha fechada

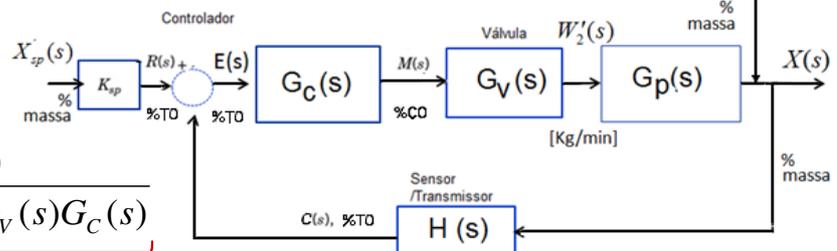
$$[1 + G_P(s)G_V(s) G_C(s) H(s)]X (s) = K_{SP}(s)G_C(s)G_V(s)G_p(s)X_{sp}(s) + G_D(s)X_1(s)$$

Agora, considerando somente variação na Carga

$$X_{SP} = 0$$

Assim,

$$\frac{X(s)}{X_1(s)} = \frac{G_D(s)}{1 + H(s)G_p(s)G_V(s)G_C(s)}$$



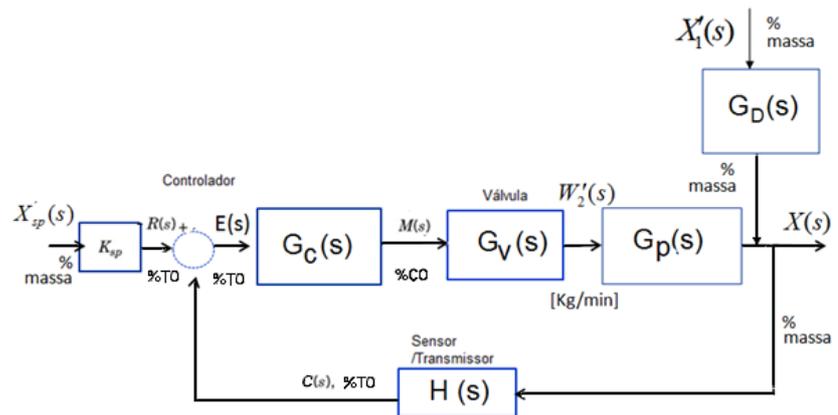
Observa-se que na equação característica:

$$H(s)G_p(s)G_V(s)G_C(s) = \left(\frac{\%TO}{\%massa} \right) \left(\frac{\%massa}{Kg / min} \right) \left(\frac{Kg / min}{\%CO} \right) \left(\frac{\%CO}{\%TO} \right)$$

= Adimensional

26

Função de Transferência - Malha fechada

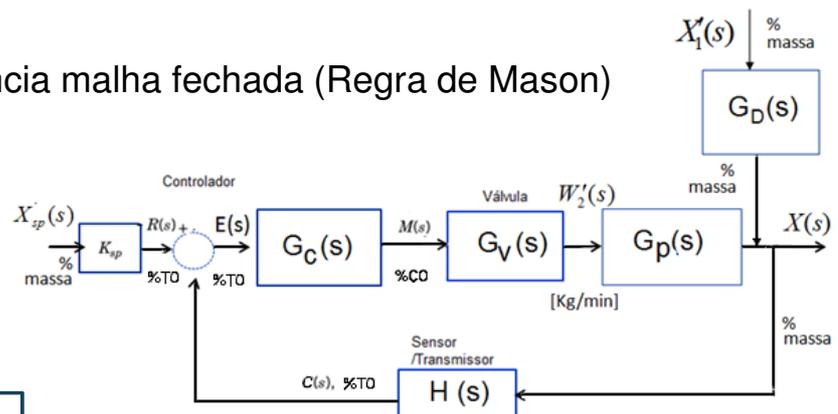


No caso geral, perturbações simultâneas a resposta será:

$$X(s) = \frac{K_{sp} G_p(s) G_V(s) G_C(s)}{1 + H(s) G_p(s) G_V(s) G_C(s)} X_{sp}(s) + \frac{G_D(s)}{1 + H(s) G_p(s) G_V(s) G_C(s)} X_1(s)$$

Função de Transferência - Malha fechada

A função de transferência malha fechada (Regra de Mason)



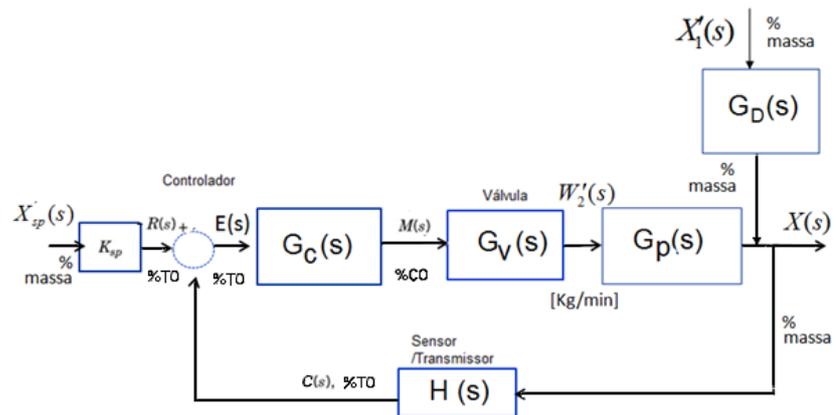
Regra de Mason:

$$\frac{Z}{Z_i} = \frac{\pi}{1 + \pi_f}$$

Z = Variável de saída
 Z_i = Variável de Entrada
 Π = produto no caminho de Z_i a Z
 Π_f = produto de cada função de transferência na malha de retroalimentação

Função de Transferência - Malha fechada

$$\frac{Z}{Zi} = \frac{\pi}{1 + \pi_f}$$



$$X(s) = \frac{K_{sp} G_p(s) G_V(s) G_C(s)}{1 + H(s) G_p(s) G_V(s) G_C(s)} X_{sp}(s)$$

$$X(s) = \frac{G_D(s)}{1 + H(s) G_p(s) G_V(s) G_C(s)} X_1(s)$$

Elemento Controlador

CONTROLADORES

Equipamentos responsáveis pela tomada de decisão de corrigir os desvios que ocorrem na variável controlada.

TIPOS DE CONTROLADORES

A) Contínuos:

Continuamente recebem o sinal, tomam decisão e enviam o sinal.

B) Descontínuos:

Trabalham com sinais discretos. Ex: Controlador lógico programável (CLP).

Elemento Controlador

CONTROLADORES CONTÍNUOS

Executam duas funções:

A) COMPARAÇÃO

Comparam os valores das variáveis medidas com o valor do *set-point*.

B) CORREÇÃO

Calcula a modificação que deve ser feita à variável manipulada de modo a controlar o processo.

Elemento Controlador

POSIÇÃO DOS CONTROLADORES

A) MANUAL

Saída de controle é independente do modo de controle.

B) AUTOMÁTICO

Saída de controle é função do modo de controle (não há interferência direta do operador).

Ação do Controlador

AÇÃO DOS CONTROLADORES

Está diretamente ligada à ação dos elementos finais de controle (e não o contrário).

A) AÇÃO DIRETA ($K_c < 0$)

Para um **aumento** na variável medida o controlador **umenta** o sinal de saída.

B) AÇÃO REVERSA ($K_c > 0$)

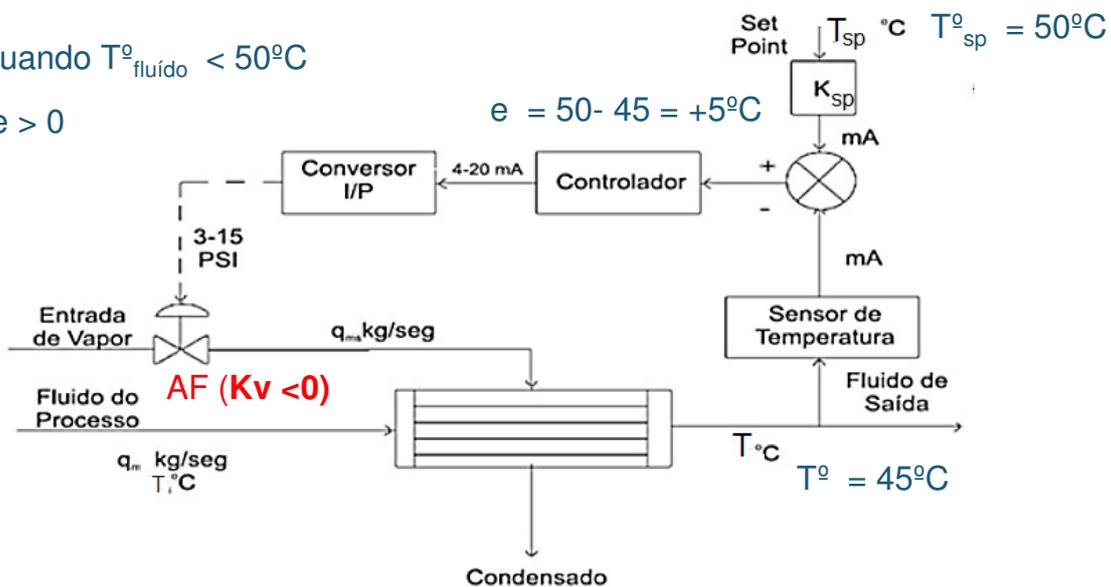
Para um **aumento** na variável medida o controlador **reduz** o sinal de saída.

Ação do Controlador

Suponhamos um processo térmico, no qual fixa-se a T_{sp}° em 50°C , de modo que pode verificar-se que o erro é negativo para valores superiores a 50°C , ou se

quando $T_{\text{fluido}}^{\circ} < 50^{\circ}\text{C}$

$e > 0$



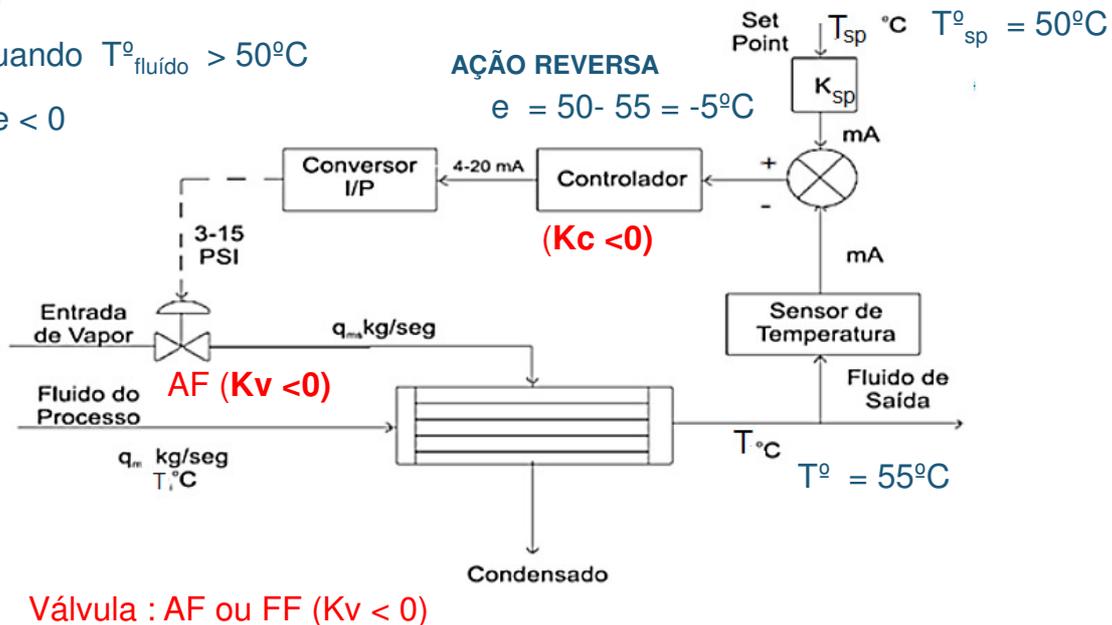
Válvula : AF ou FF ($K_v < 0$)

Ação do Controlador

Suponhamos um processo térmico, no qual fixa-se a T_{sp}^o em 50°C , de modo que pode verificar-se que o erro é negativo para valores superiores a 50°C , ou se

quando $T_{\text{fluido}}^o > 50^{\circ}\text{C}$

$e < 0$



35

Ação do Controlador

Suponhamos um processo térmico, no qual fixa-se a T_{sp}^o em 50°C , de modo que pode verificar-se que o erro é negativo para valores superiores a 50°C , ou seja:

Como os valores de erro e ação de controle estão a variar de forma reversa, diz-se que o controlador deverá funcionar no modo **ação reversa**

O controle de Temperatura (T^o) é um exemplo típico de controle com Ação Reversa (Em inglês "Reverse Action").

Quando os sinais de erro e de ação de controle funcionam de forma direta, diz-se que o controlador funciona com **ação direta** ("Direct Action")

36

Ação do Controlador

Dica chave:

O produto geral de todos os ganhos de todos os componentes da malha de controle feedback deve ser positivo.

K_c	K_v	K_p	K_m
+	+	+	+
-	-	+	+

K_c e K_v : devem ter o mesmo sinal

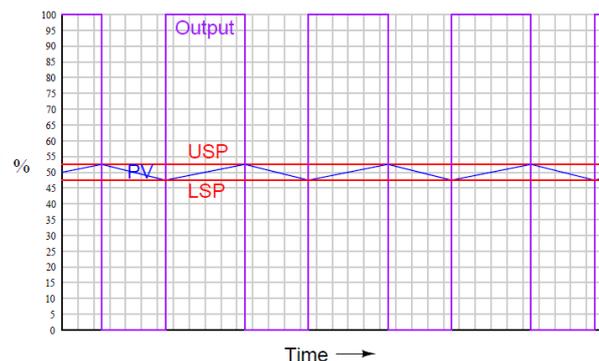
37

Modos de Controle Convencional

A) DUAS POSIÇÕES (ON-OFF)

Exige que a válvula seja posicionada em algum ponto entre totalmente fechada e totalmente aberta.

Quase sempre presente em malhas de controle já que constitui um importante método de intertravamento do processo garantindo a segurança da operação.



Modos de Controle Convencional

B) CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

É o mais completo dos modos de controle convencionais pois soma as características dos três modos básicos

Descrito na forma paralela como:

$$E(t) = SP(t) - VM(t)$$
$$SC(t) = K_c E(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t E(t) dt + \tau_D \frac{dE(t)}{dt}$$

E na forma não-interativa como:

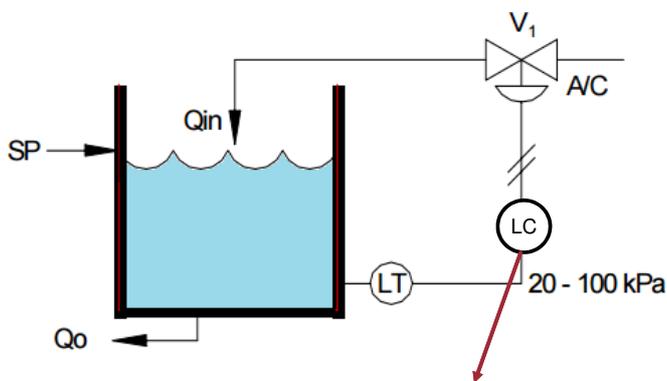
$$E(t) = SP(t) - VM(t)$$
$$SC(t) = K_c \left(E(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t E(t) dt + \tau_D \frac{dE(t)}{dt} \right)$$

SC (t): Sinal de saída do controlador (tb denotado como u(t))

39

Modos de Controle Convencional

B) CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)



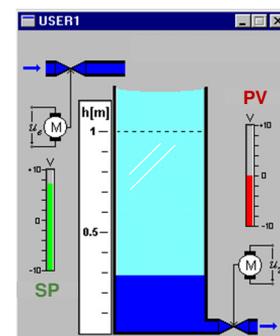
When there is an error, the controller makes a change in its output.

It determines:

How much? Proportional Mode

How long? Integral Mode

How fast? Derivative Mode



40

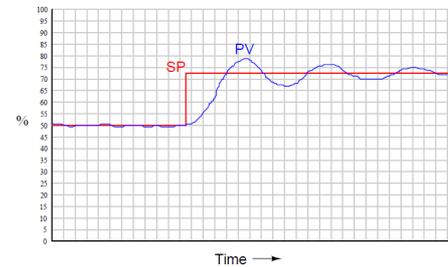
Modos de Controle Convencional

B) CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

São os modos de controle convencionais mais completo, pois soma as características dos três modos básicos (P + I + D)

- Função de Transferência do controlador PID

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_C \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$



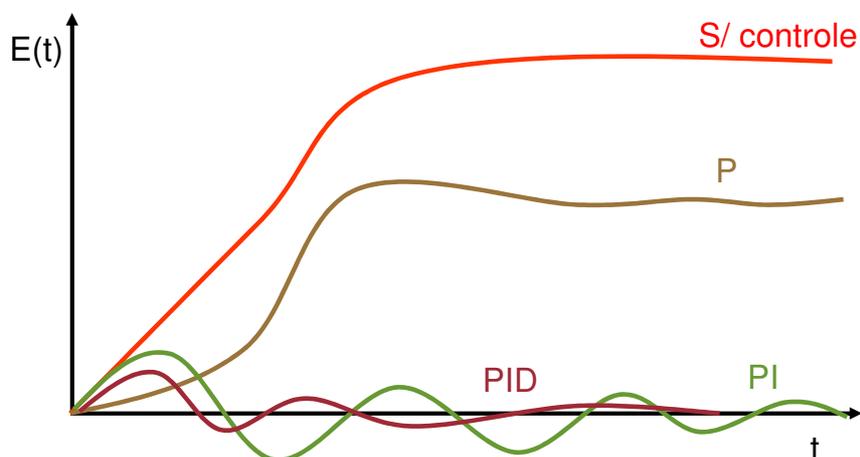
- O três termos de sinais do controle

$$U(s) = K_C E(s) + K_i \frac{1}{s} E(s) + K_d s E(s)$$

41

Modos de Controle Convencional

COMPARAÇÃO ENTRE OS MODOS DE CONTROLE



Controle Proporcional

Controle Proporcional

$$SC = bias + K_C e(t)$$

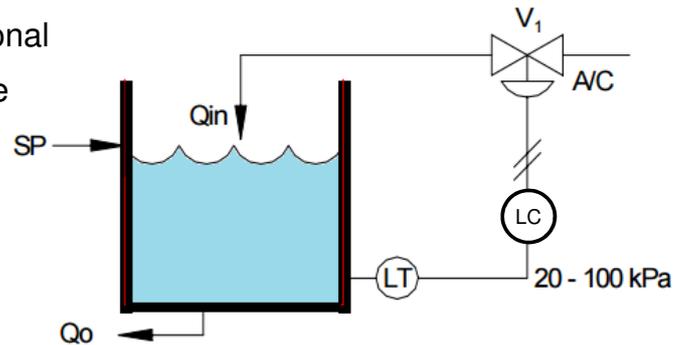
onde

$e(t) = PV - SP$ (ação Direta)

$e(t) = SP - PV$ (ação Reversa)

K_C = ganho proporcional

SC: saída do controle



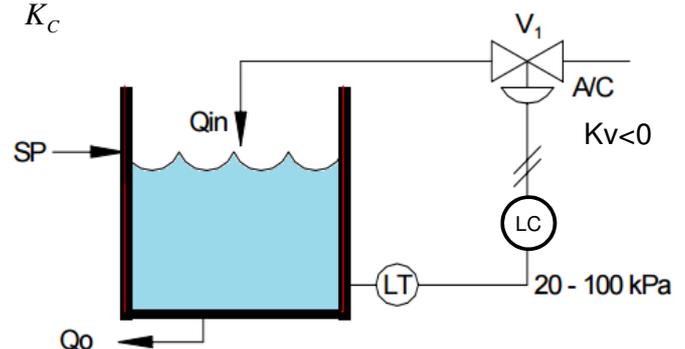
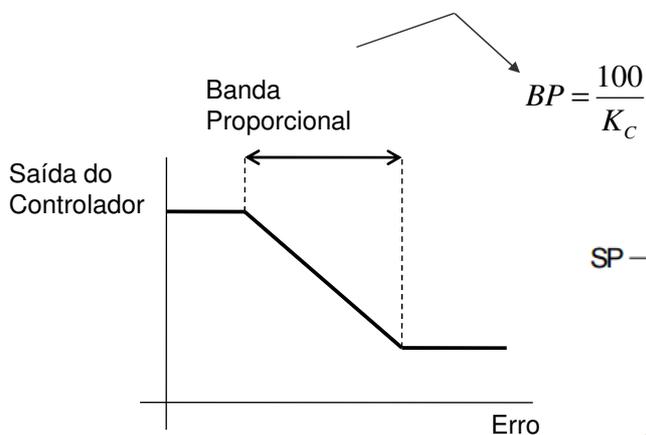
43

Controle Proporcional

Controle Proporcional

$$SC = bias + K_C e(t)$$

$$\text{ganho, } K_C = \frac{100\%}{BP} = \frac{\% \Delta \text{válvula}}{\% \Delta \text{processo}}$$



44

Controle Proporcional

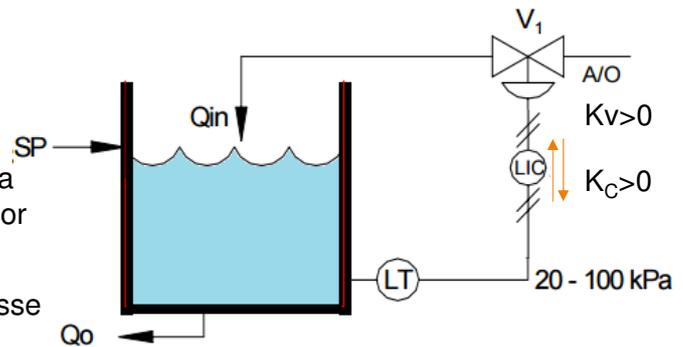
Controle Proporcional

Em um sistema prático uma das principais considerações é Modo de falha da válvula.

No nosso exemplo de um tanque aberto com uma válvula na entrada seria razoável assumir que a válvula deve **fechar-se** em caso de uma **falha** no fornecimento de ar, para evitar o transbordamento do tanque, ou seja, uma **válvula de ar para abrir**.

O controlador de nível que irá executar essa função é chamado de indireto ou controlador reverso ($\uparrow \downarrow$).

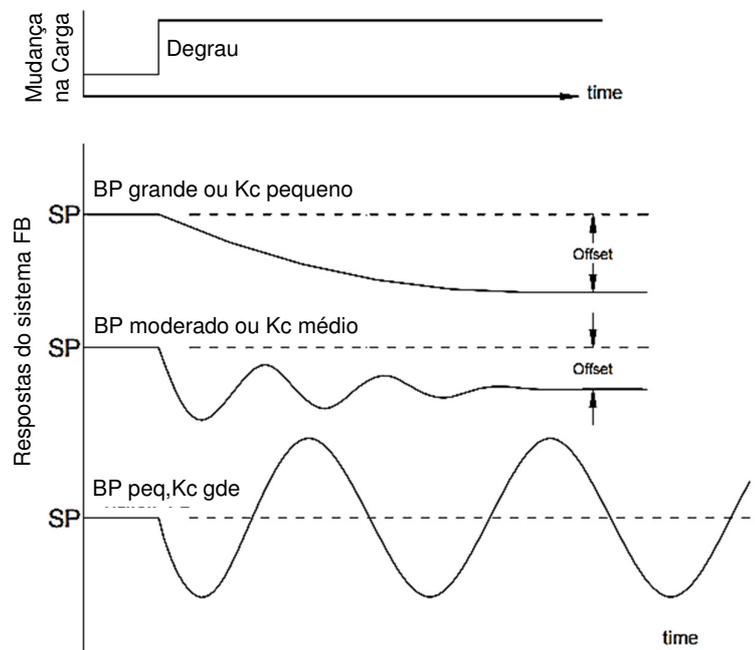
Pode ser visto que, se a ação da válvula fosse escolhida para **ar para fechar**, então, esta inversão não teria sido necessário e um controlador de funcionamento **direto** ($\uparrow \uparrow$) poderia ter sido utilizado.



45

Controle Proporcional

Controle Proporcional



46

Controle Proporcional Integral

O valor da saída do controlador depende dos seguintes fatores:

- ▶ a direção,
- ▶ magnitude e duração do erro de controle,
- ▶ o ganho do controlador e
- ▶ ação do controlador: direta ou reversa.

Controle Proporcional Integral

$$CO = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_r} \int e(\tau) d\tau \right]$$

Onde

$e(t)$ = PV-SP (ação Direta)

$e(t)$ = SP-PV (ação Reversa)

K_c é o ganho proporcional

T_r é o tempo integral

CO (do inglês, Control output) Sinal de saída de controle

Tempo Integral

- O tempo integral T_r é expresso em minutos por repetição;
- Termo que origina-se do teste de colocar o controlador em um erro fixo e verificar quanto tempo a ação integral leva para produzir a mesma mudança na saída do controlador que o controlador proporcional tem com ganho igual a 1 (ação integral repete a ação proporcional);

Offset zero

- Por causa da ação integral, este modo da estratégia de controlador não possui desvio permanente;
- Este fato ocorre porque a ação integral armazena o histórico do erro e permite um valor da VM diferente de zero a partir de um instante de tempo, mesmo com o valor do erro sendo zero a partir deste mesmo instante.

Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

- O modo derivativo é também chamado de controle de variação;
- Um controlador PID modula sua saída, cujo valor depende dos seguintes fatores: *direção, magnitude e duração e taxa de variação do erro de controle*; *ganho do controlador*, que depende do ganho proporcional, ganho integral e ganho derivativo, todos ajustáveis; e *ação do controlador*: direta ou reversa.

Controlador PID

$$CO = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_r} \int e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

$e(t) = PV - SP$ (ação Direta)

$e(t) = SP - PV$ (ação Reversa)

K_p é o ganho proporcional

T_r é o tempo integral

T_d é o tempo derivativo

- **É chamado de PID paralelo clássico;**

Controlador PID Paralelo

Usando Laplace:
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{sT_r} + T_d s \right]$$

- O termo derivativo apresenta problemas de implementação;
- Uma solução bastante utilizada na prática é usar um filtro na parte derivativa:

$$D(s) \cong \frac{T_d s}{1 + \alpha T_d s}$$

- Em que o termo α é pequeno $< 1/8$;

Controlador PID Série

- Em função desta dificuldade de implementação do termo derivativo, os fabricantes de controladores analógicos utilizaram o algoritmo de controle do tipo Série ou Interativo:

$$U(s) = K_p \left[\frac{1 + T_d s}{1 + \alpha T_d s} \right] \left[1 + \frac{1}{sT_r} \right] E(s)$$

$$G_{PI} = K_p \left[1 + \frac{1}{sT_r} \right] E(s)$$

$$U(s) = \left[\frac{1 + T_d s}{1 + \alpha T_d s} \right] G_{PI}(s)$$

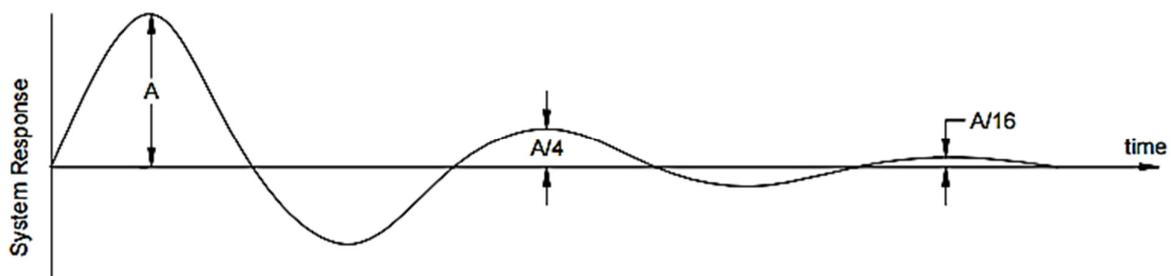
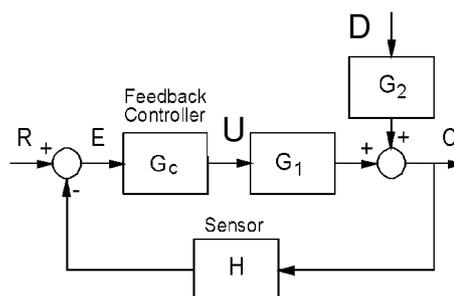
Modo de Controle

RESUMINDO

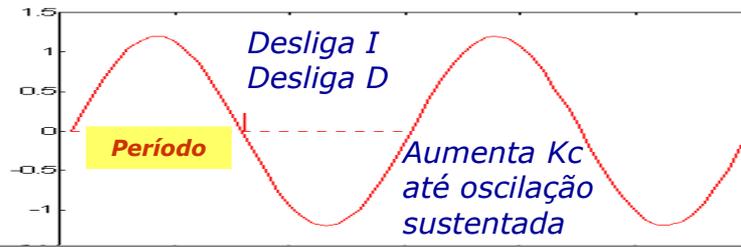
- **Controle proporcional:** acelera a resposta de um processo controlado; produz *off-set*
- **Controle integral:** elimina *off-set*; produz respostas lentas, com longas oscilações; se o ganho proporcional é aumentado para acelerar a resposta, o sistema se torna mais oscilatório e tende à instabilidade
- **Controle derivativo:** antecipa futuros erros e introduz a ação apropriada; introduz efeito estabilizante na resposta da malha de controle

55

Sintonia de $\frac{1}{4}$ pelo ganho último



Sintonia de 1/4 pelo ganho último



$$G_c(t) = Bias + K_c \left\{ E(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t E(t') dt' + \tau_D \frac{dE(t)}{dt} \right\}$$

	K_c	t_I	t_D
P control	$K_u / 2$		
PI control	$K_u / 2.2$	$P_u / 1.2$	
PID control	$K_u / 1.7$	$P_u / 2$	$P_u / 8$