

Implementação prática de controladores

Prof. Eduardo Stockler Tognetti

estognetti@ene.unb.br

Depto. Enga. Elétrica

Laboratório de Automação e Controle

<http://www.ene.unb.br/estognetti>

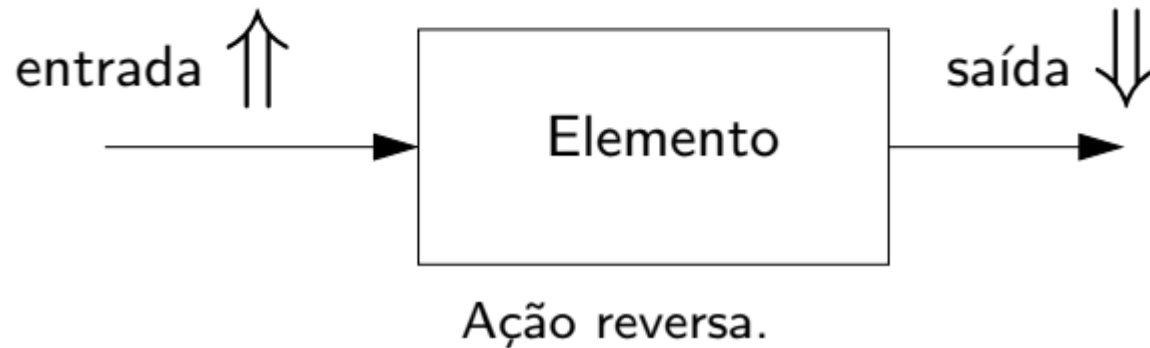
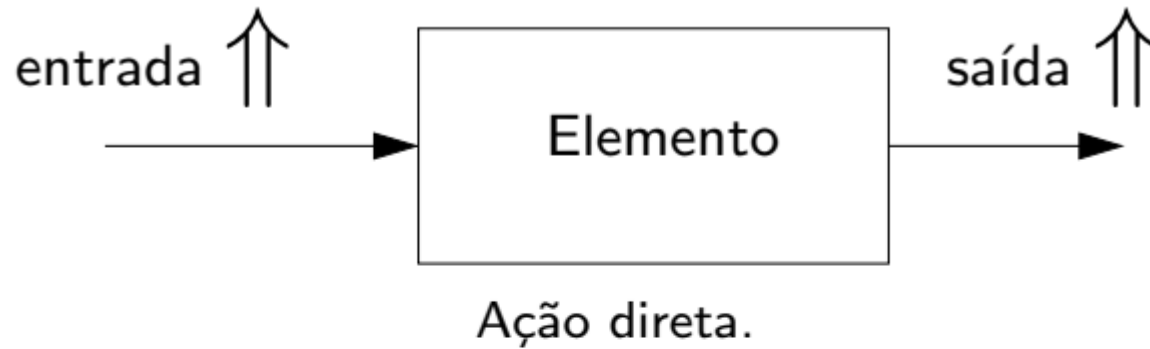
Disciplina Laboratório de Controle de Processos

Universidade de Brasília – UnB, Brasil

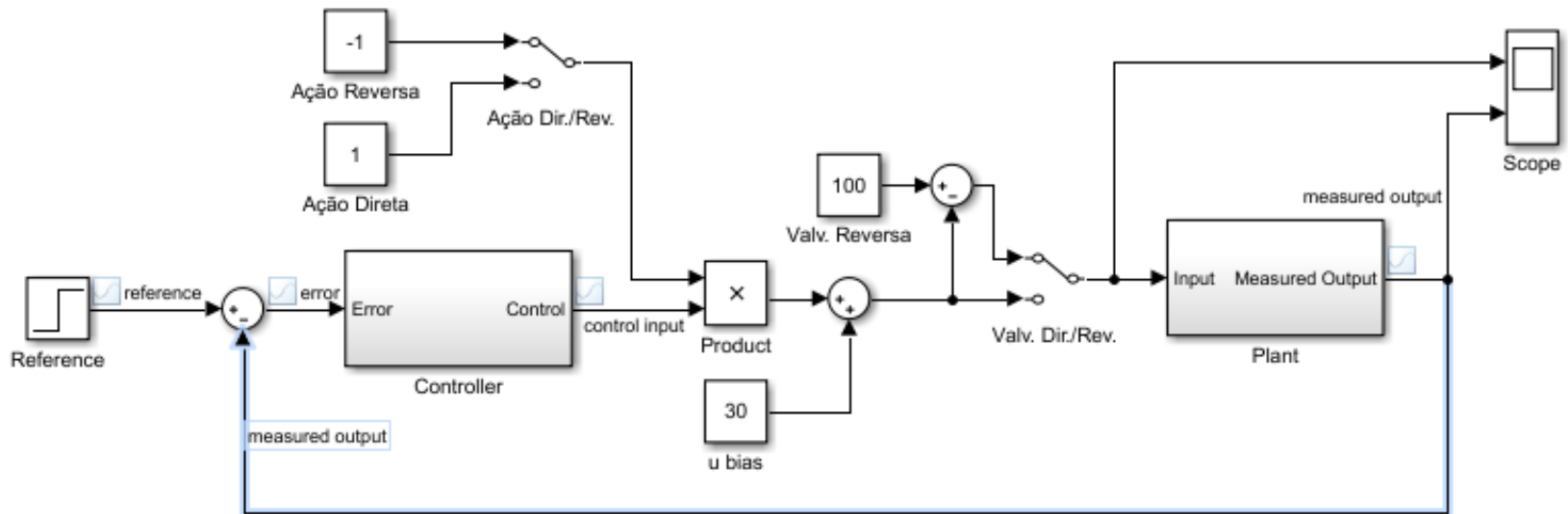
2021

Ação direta e reversa dos
elementos de uma malha

Ação direta e reversa dos elementos de uma malha



Válvula com ação reversa



- Válvulas pneumáticas de controle podem ser instaladas com ar para abrir ou ar para fechar (com retorno por mola) por questões de segurança.
- Em caso de falta de ar comprimido (queda de energia ou falha do compressor) a válvula retorna à condição de segurança.

Simulação de uma válvula I

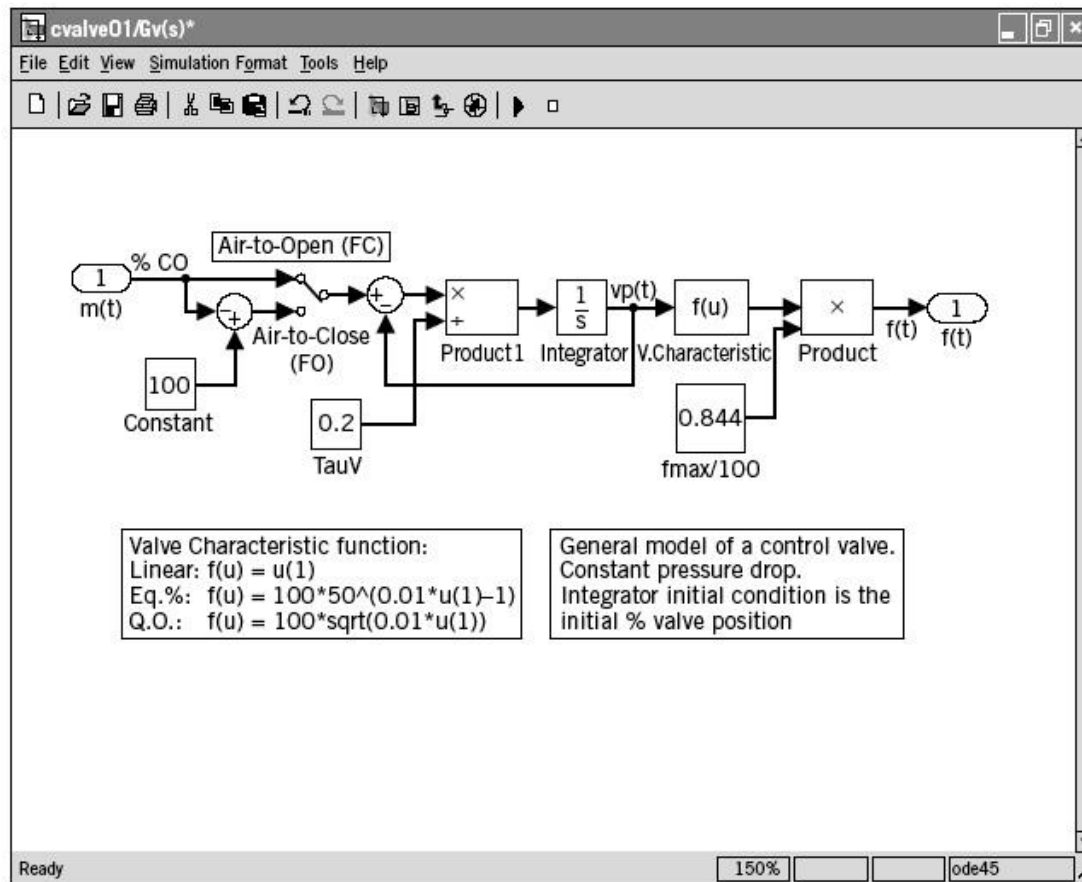
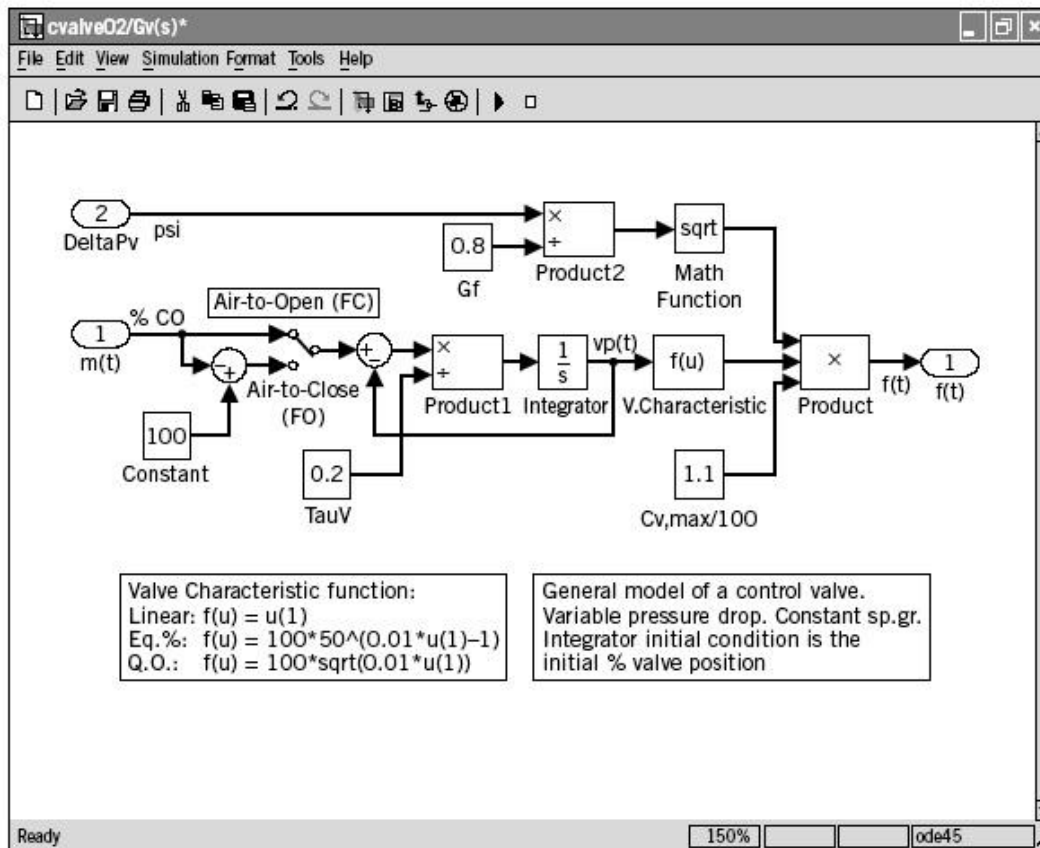


Figure 13-4.1 Simulink block diagram for a general control valve with constant pressure drop.

Simulação de uma válvula II



$$f_{max} = C_v \sqrt{\frac{\Delta p_v}{G_f}}$$

G_f : densidade relativa do líquido

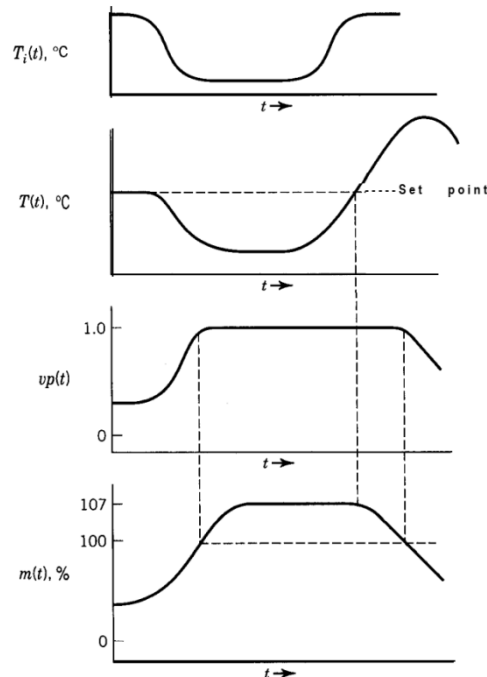
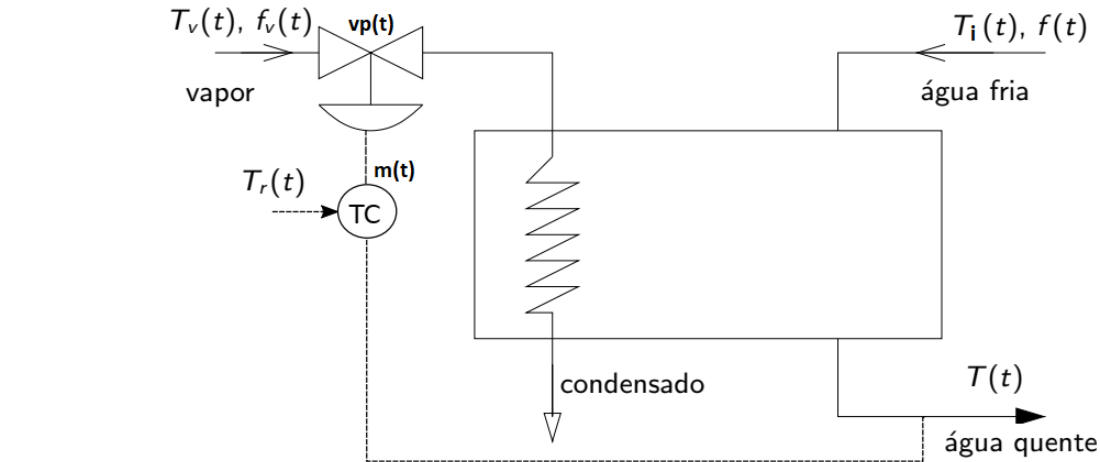
Δp_v : queda de pressão Através da válvula

Figure 13-4.2 Simulink block diagram for a control valve with variable pressure drop and constant specific gravity.

Saturação no sinal de controle e
integral windup

Exemplo

Trocador de calor:



- Variação na temperatura da corrente de entrada
- Temperatura controlada cai abaixo da referência (set-point)
- Válvula do fluido de aquecimento totalmente aberta (saturação)
- Sinal de saída do controlador passa de 100% (**windup**) para aumentar T (limitação de 107% implementada em software)

Implementação de um controlador PI com anti-windup

Diagrama de blocos:

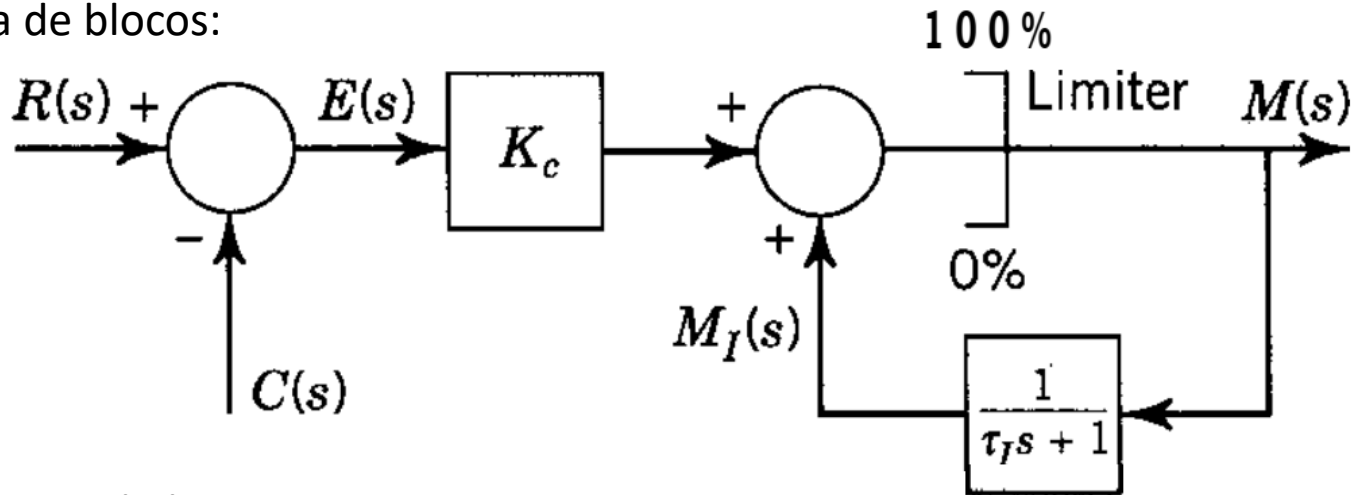
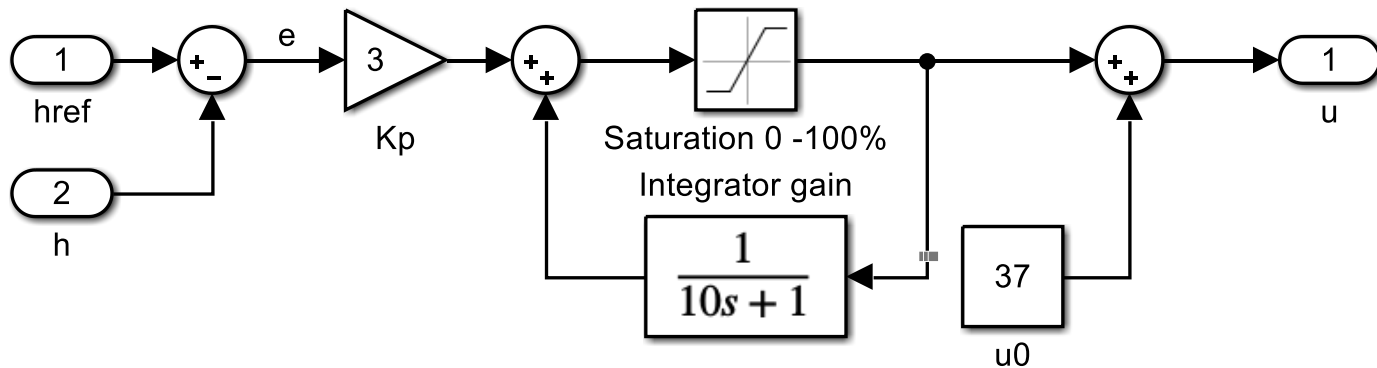


Diagrama Simulink:



Forma alternativa de controlador PI com anti-windup

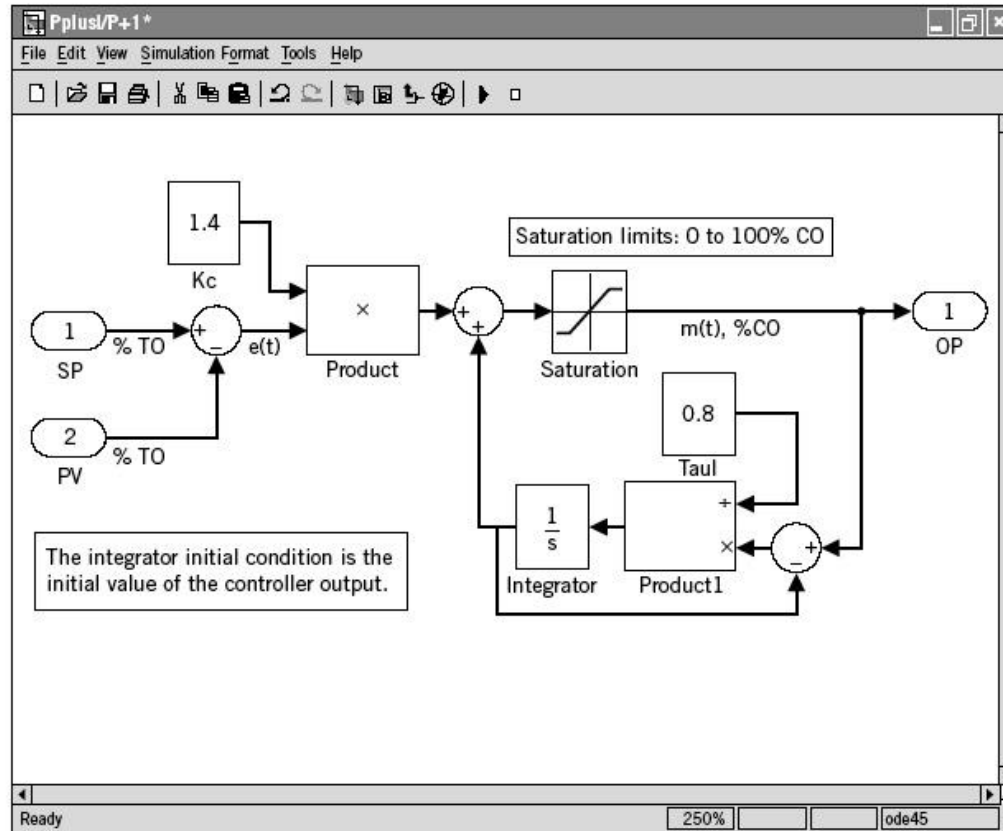


Figure 13-4.3 Simulink block diagram for proportional-integral (PI) controller with saturation limits.

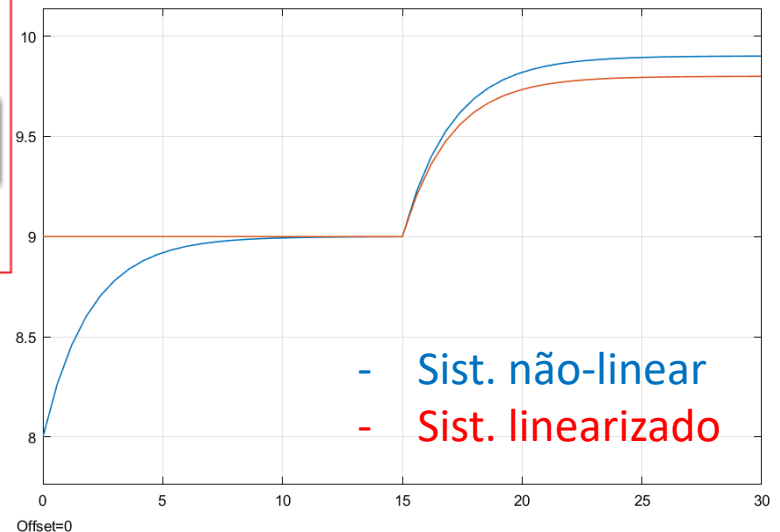
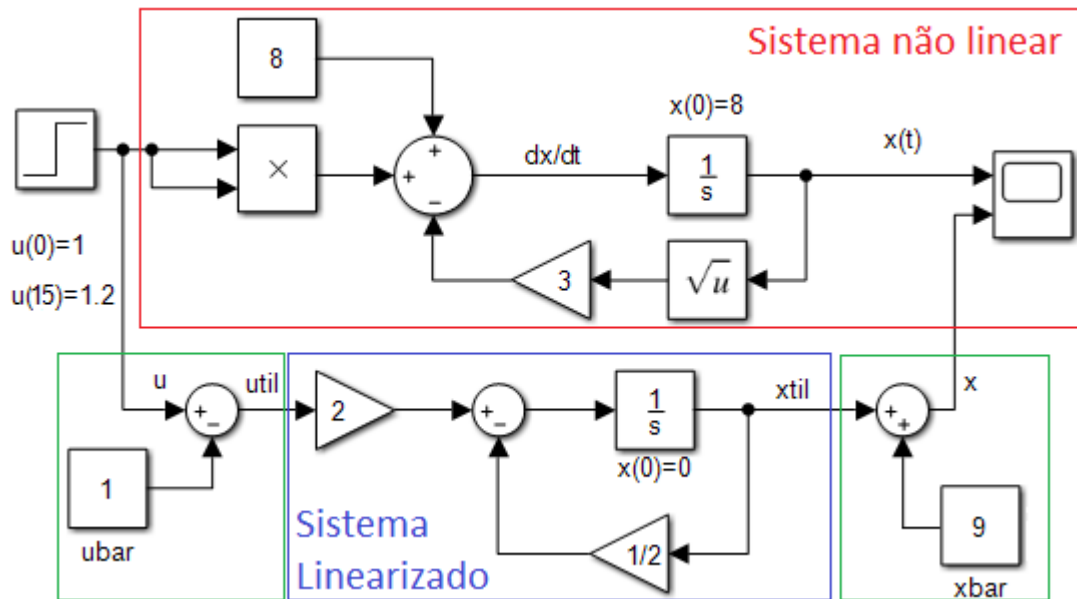
Linearização e variável de desvio

Linearização e variável de desvio

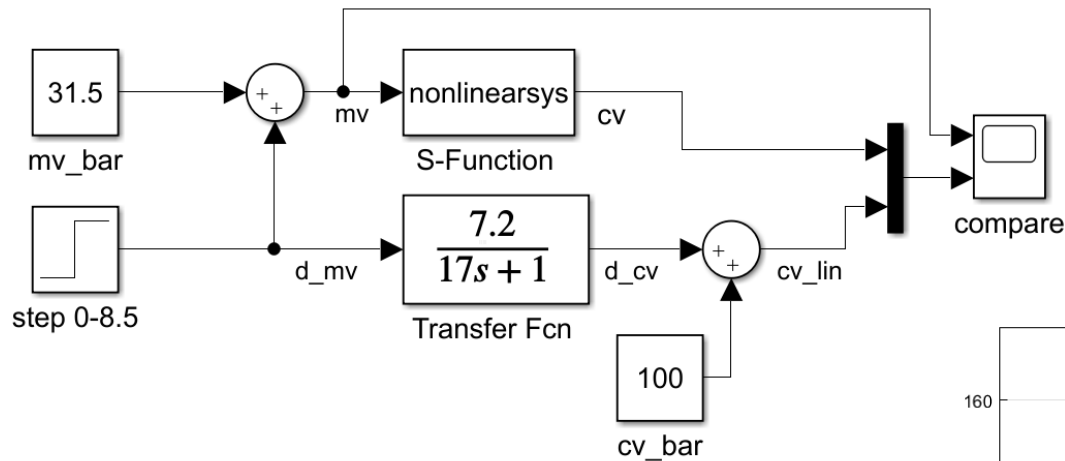
- Implementação de dinâmica não linear e sistema linearizado;
- Importância da conversão da variável de desvio em absoluta e vice-versa no sistema linearizado;
- Linearização é exata somente no ponto de operação.

$$\frac{dx(t)}{dt} = 8 - 3\sqrt{x(t)} + u(t)^2 \quad \longrightarrow \quad \frac{d\tilde{x}(t)}{dt} = \left(-\frac{3}{2\sqrt{\bar{x}}}\right)\tilde{x}(t) + (2\bar{u})\tilde{u}(t)$$

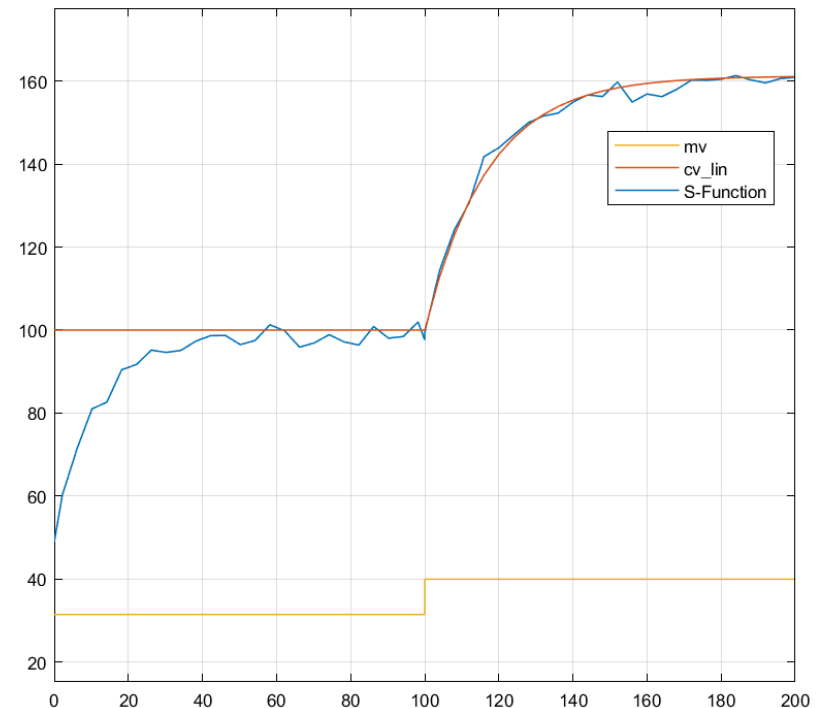
$(\bar{x}, \bar{u}) = (9, 1)$
 $\tilde{x}(t) = x(t) - \bar{x}, \quad \tilde{u}(t) = u(t) - \bar{u}$



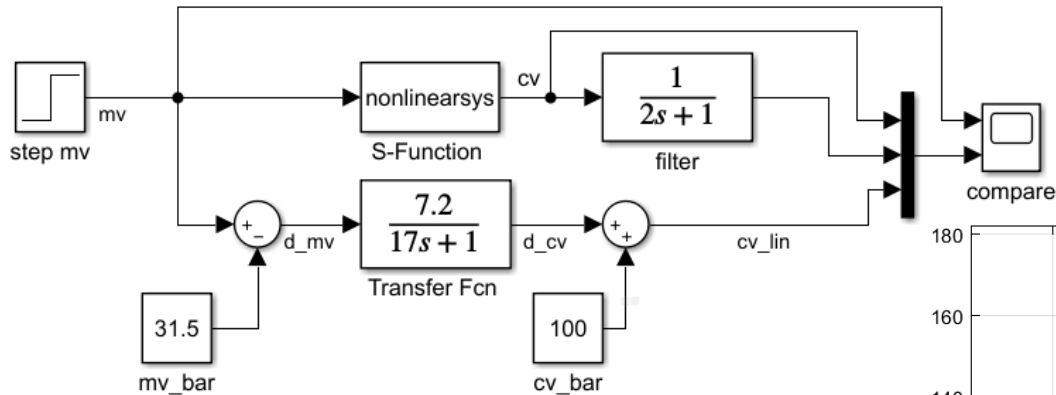
Comparação da resposta de um sistema não linear com o linearizado



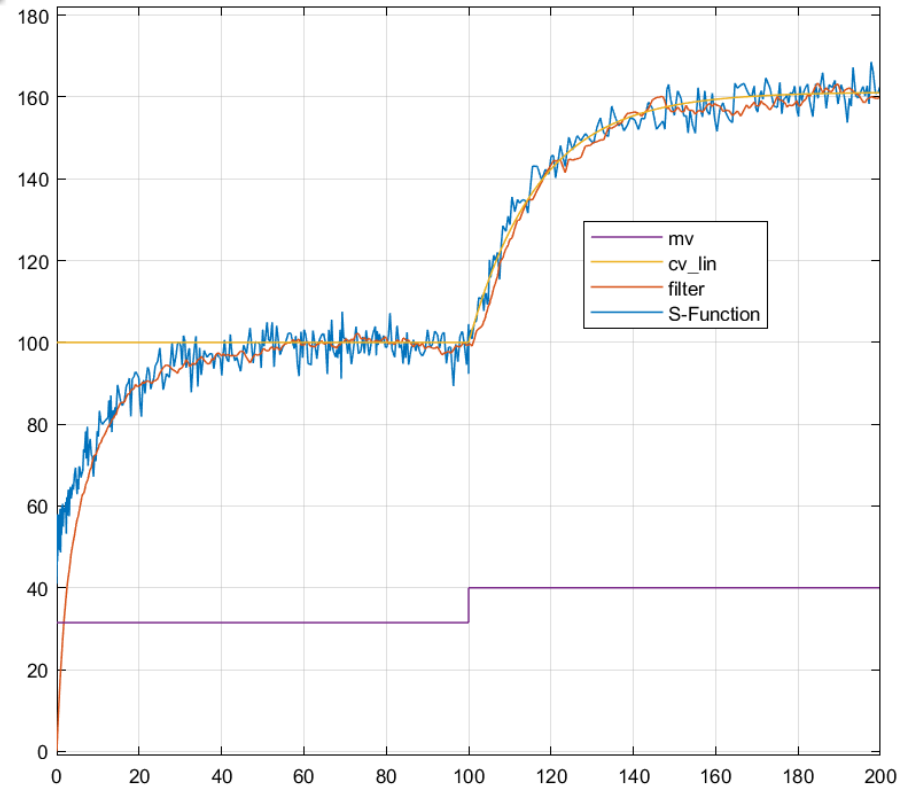
- Vars. absolutas: mv e cv
- Vars. desvio: d_mv e d_cv
- Degrau na mv:
 - De 31.5 para 40
- Resposta da cv:
 - De 100 para 161.2



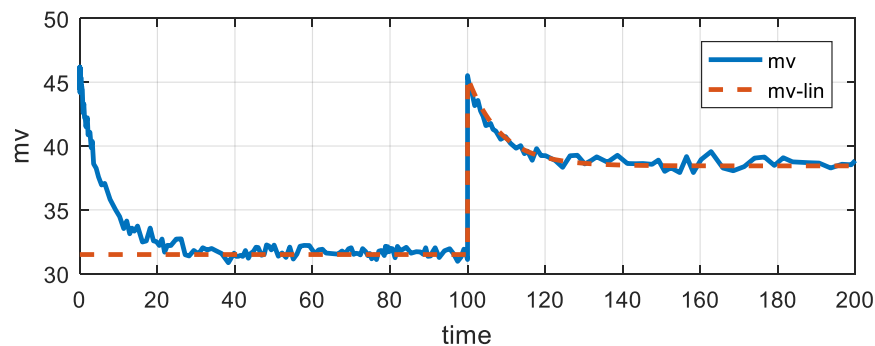
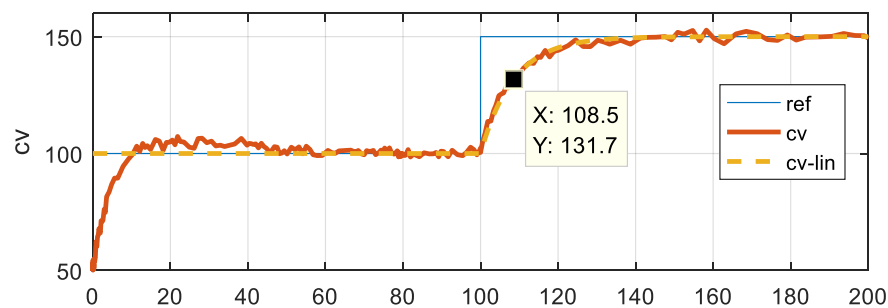
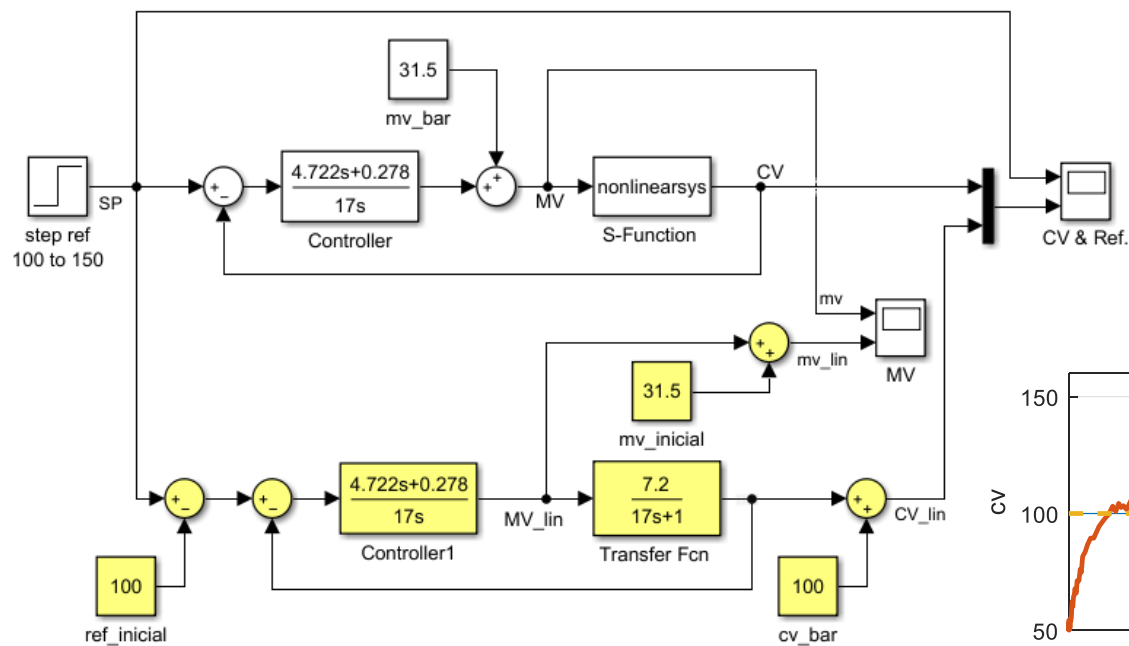
Comparação da resposta de um sistema não linear com o linearizado



- Obs.: o valor inicial após o filtro é zero
- Solução:
 - Aplicar degrau após sistema estar em regime permanente (t=100)
 - Inserir cond. inicial no filtro (próximo slide)



Comparação do sistema não linear com o linearizado em malha fechada

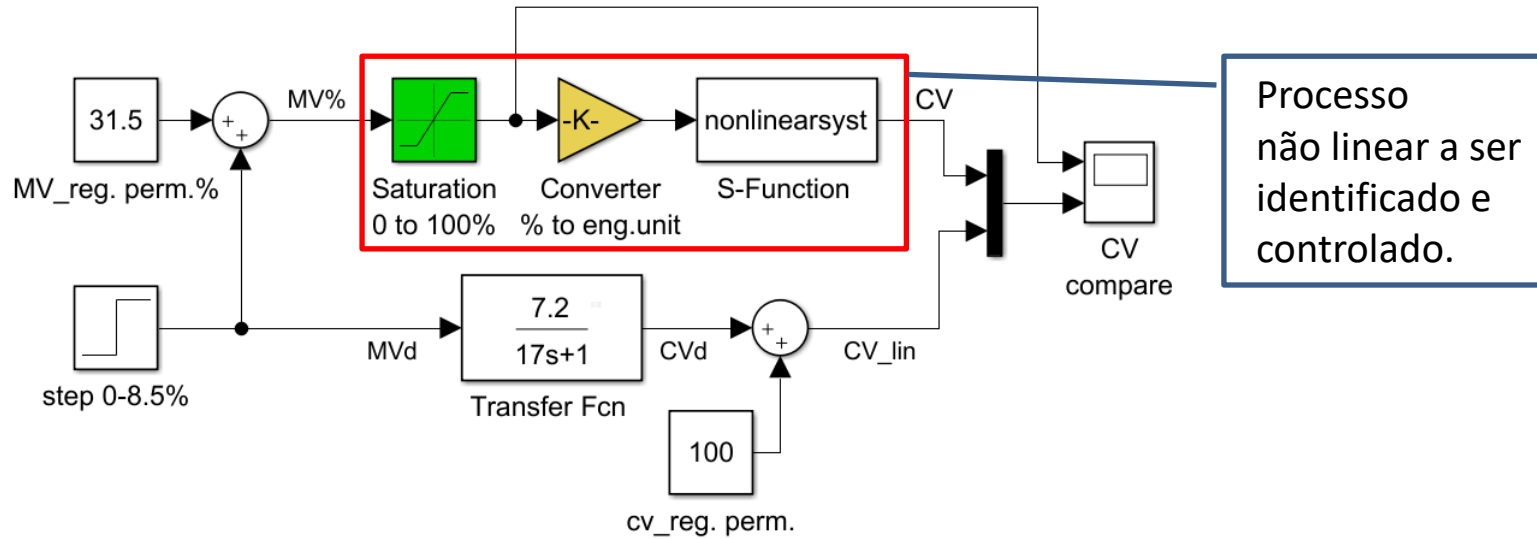


Projeto controlador:

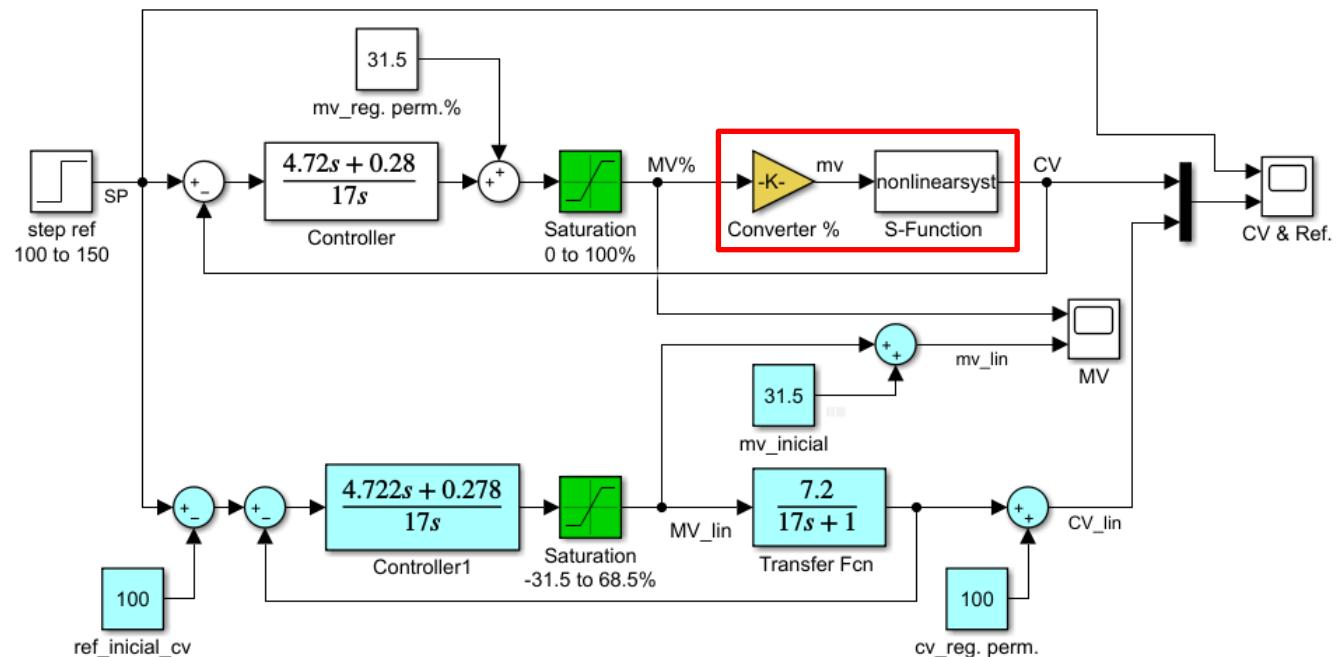
- IMC com cte. de tempo de malha fechada 8.5s (metade da cte. de tempo de malha aberta 17s).

Malha fechada com MV em % e saturação

Malha aberta:



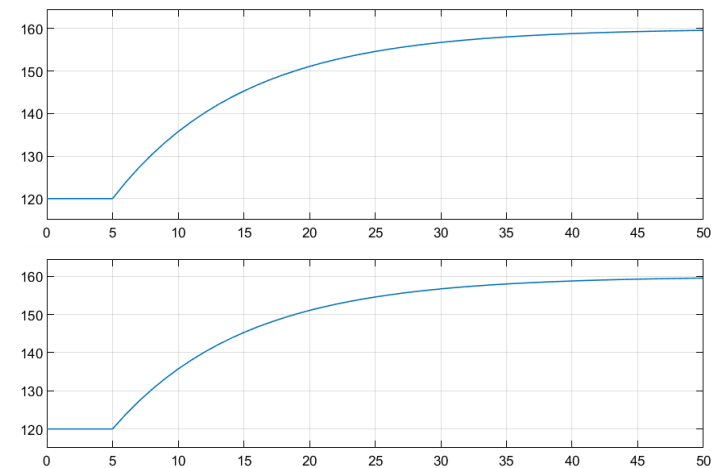
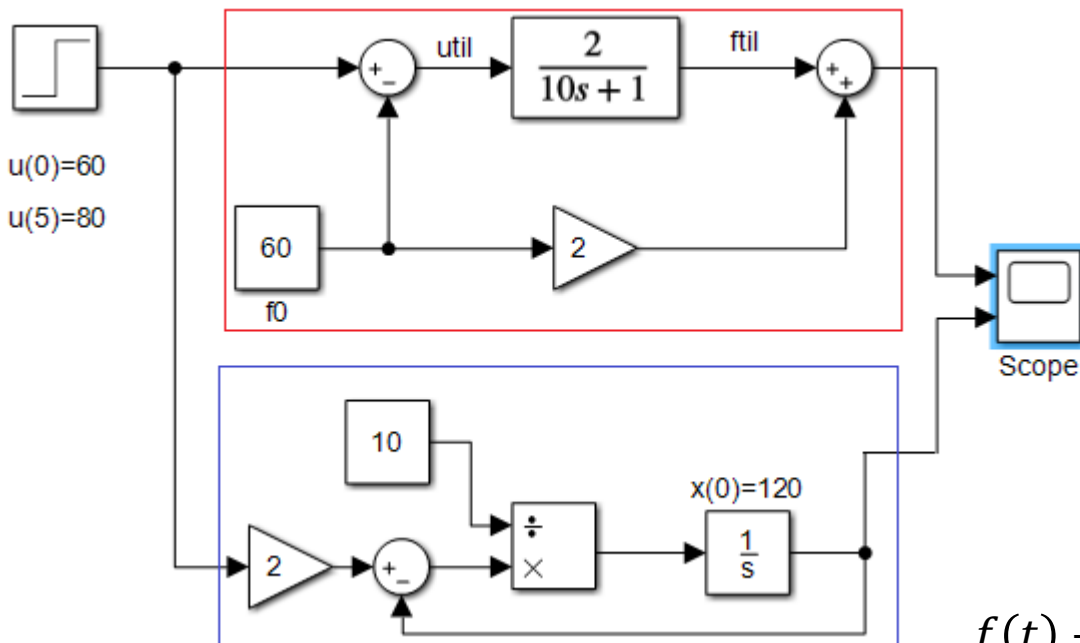
Malha fechada:



Função de transferência e condição inicial

Implementação de função de transferência com condição inicial não nula

- Funções de transferência (FT) possuem condição inicial nula;
- Variáveis de entrada e saída da FT são expressas em variáveis de desvio;
- Em simulações de dinâmicas não lineares em conjunto com FT pode haver distúrbio devido a presença de condição inicial nula nas FT's. Por exemplo, a saída de um controlador raramente é nula em regime permanente;
- Esse problema pode ser contornado pelas duas implementações abaixo:

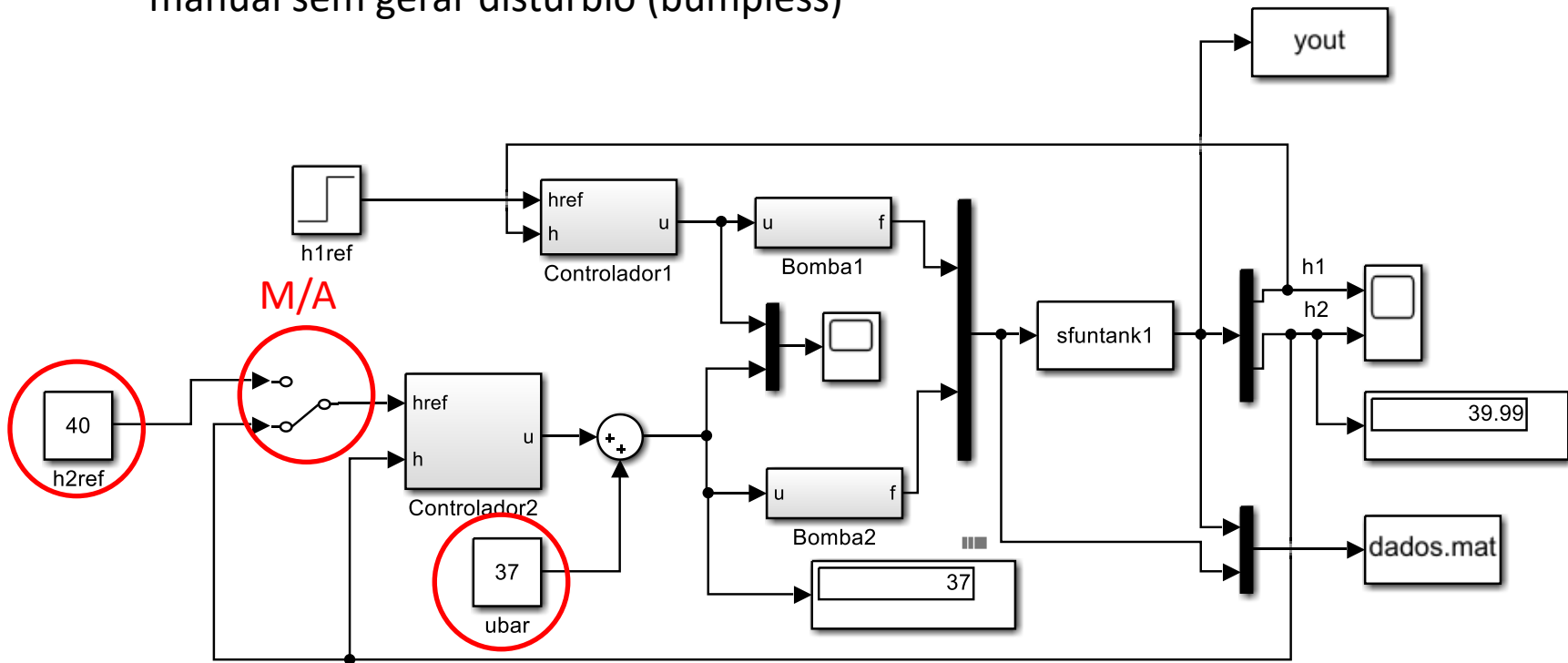


$$f(t) + 10\dot{f}(t) = 2u(t), \quad f(0) = 120$$

Transferência Bumpless
na passagem manual/automático
em controladores

Transferência Bumpless

- Passagem de controlador de manual para automático ou de automático para manual sem gerar distúrbio (bumpless)



Real-Time Pacer
Speedup = 50

Indicadores de desempenho de malhas de controle

Indicadores de desempenho

- Indicadores de desempenho clássicos na avaliação de malhas de controle.

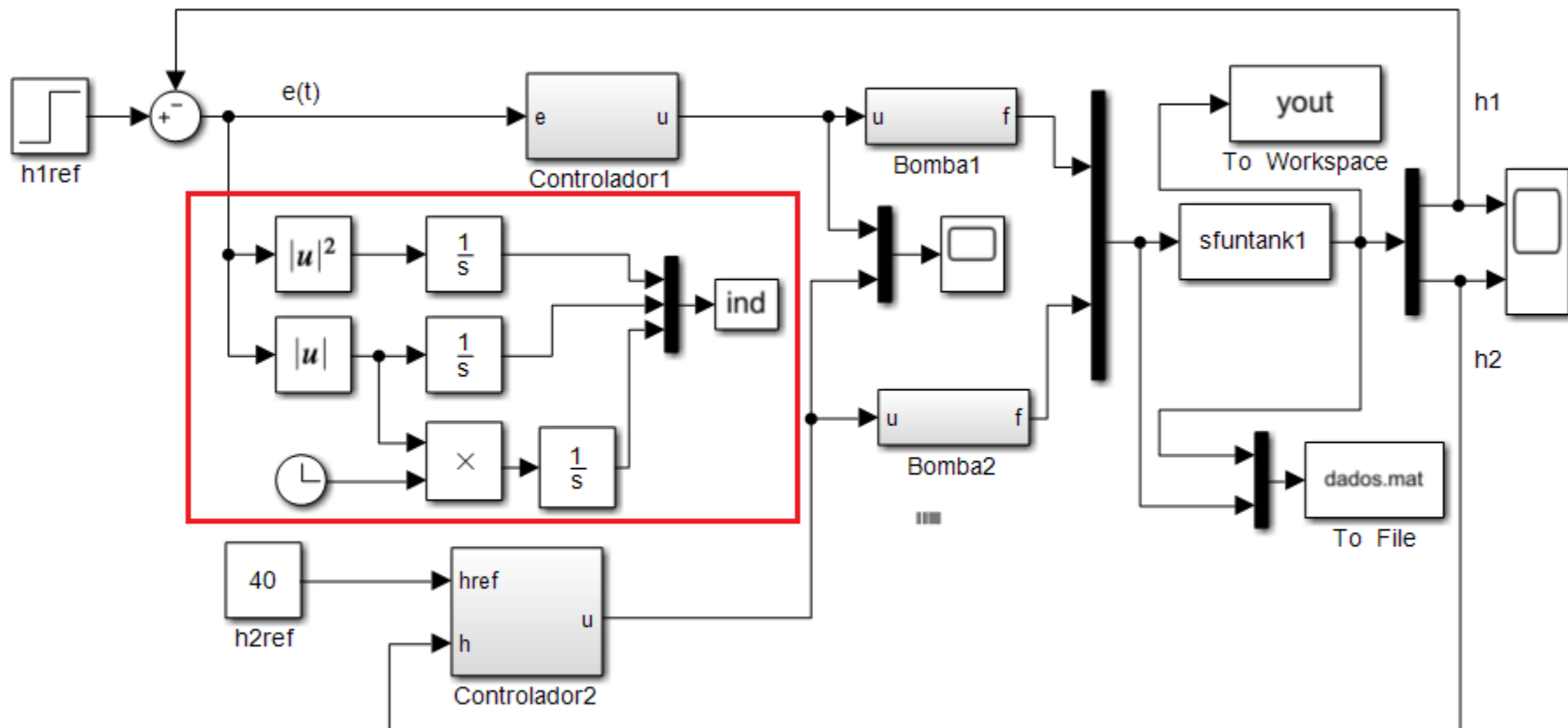
Índice de Desempenho	Descrição	Expressão
IAE	Integral do módulo do erro	$\int e(t) dt$
ISE	Integral dos erros ao quadrado	$\int e^2(t) dt$
ITAE	Integral do módulo do erro vezes o tempo	$\int t e(t) dt$

Em que o erro é dado pela diferença entre a referência e a variável controlada:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

- Normalmente usados de forma comparativa.

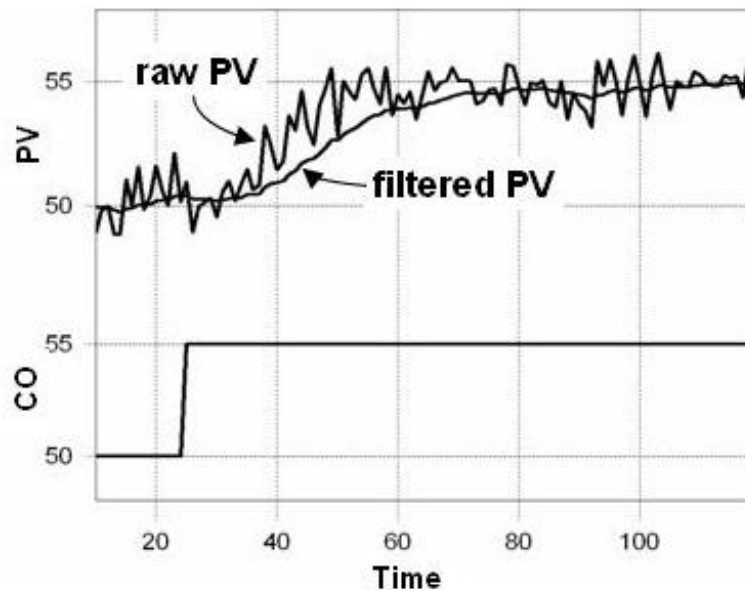
Exemplo



Filtro de sinais na malha de controle

Filtrando sinais na malha de controle

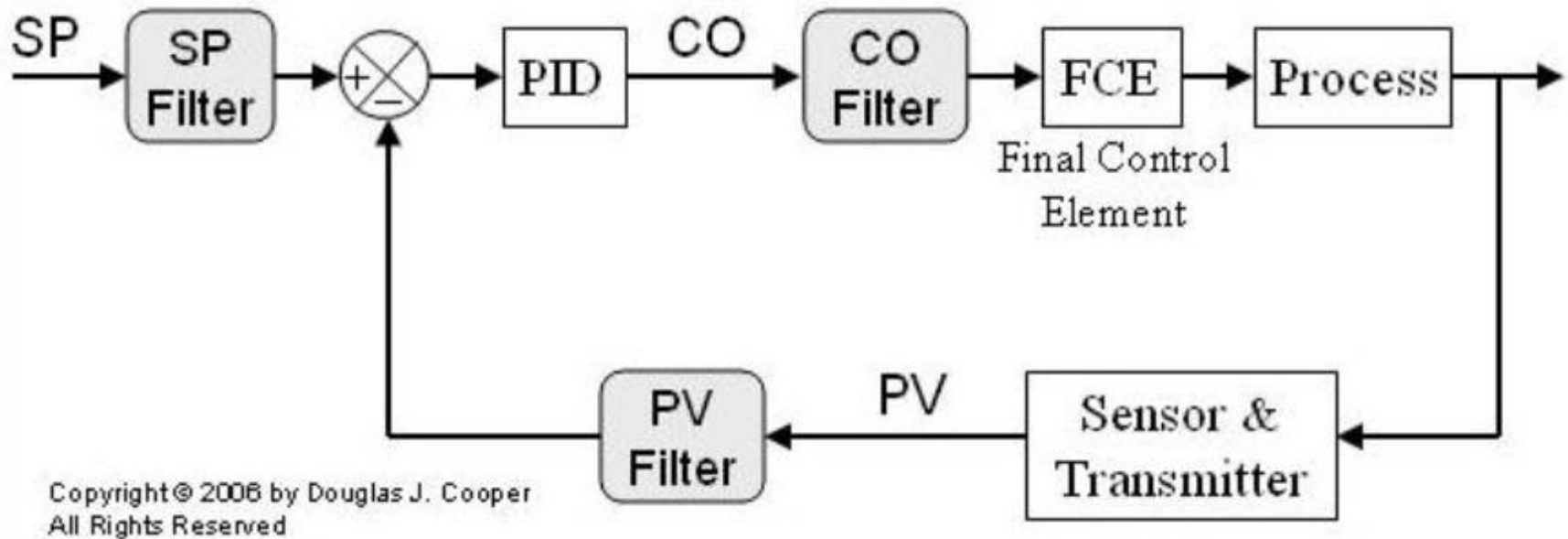
- O uso de filtros em malhas de controle pode ser útil para eliminar ruídos de medição e melhorar tempo de vida de atuadores.



Copyright © 2006 by Douglas J. Cooper
All Rights Reserved

- Mas atenção: filtros adicionam atrasos e se mal condicionados podem deteriorar o desempenho da malha!

Uso de filtros externos na malha de controle



➤ Em geral, os filtros implementados são de 1ª ordem e ganho unitário.

Exemplo: $F(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$

Filtro na ação derivativa do PID

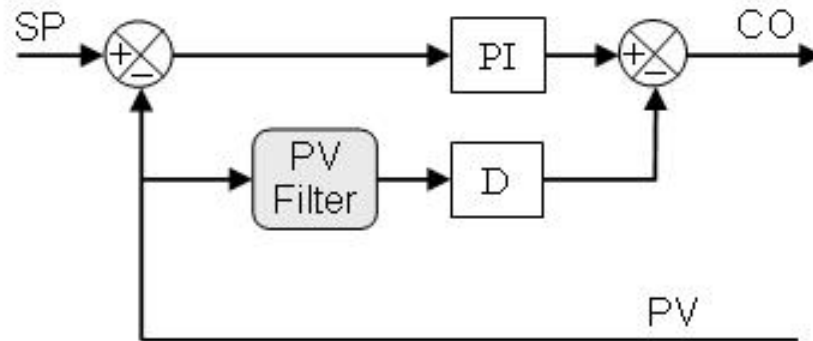
- A ação derivativa pode amplificar o ruído em sinais ruidosos ou de alta frequência;
- Exemplo de controlador PD com filtro de 1ª ordem na ação derivativa:

$$\frac{\tilde{U}(s)}{E(s)} = K_c \left(1 + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) = K_c \left(\frac{(\alpha + 1) T_d s + 1}{\alpha T_d s + 1} \right), \quad 1/(\alpha T_d) \gg 0$$

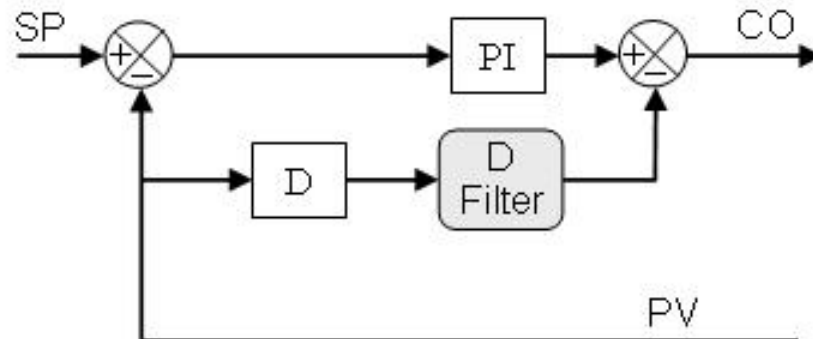
- Características:
 - Filtro de 1ª ordem com ganho unitário e constante de tempo $\tau = \alpha T_d$
 - Se αT_d pequeno, $\alpha \in [0,05, 0,2]$, então o filtro não afeta o desempenho da malha

Filtro na ação derivativa do PID

- Pode ser desejável filtrar o sinal de referência pois a derivada do sinal degrau produz um sinal de controle de grande amplitude.



Copyright © 2006 by Douglas J. Cooper.
All Rights Reserved

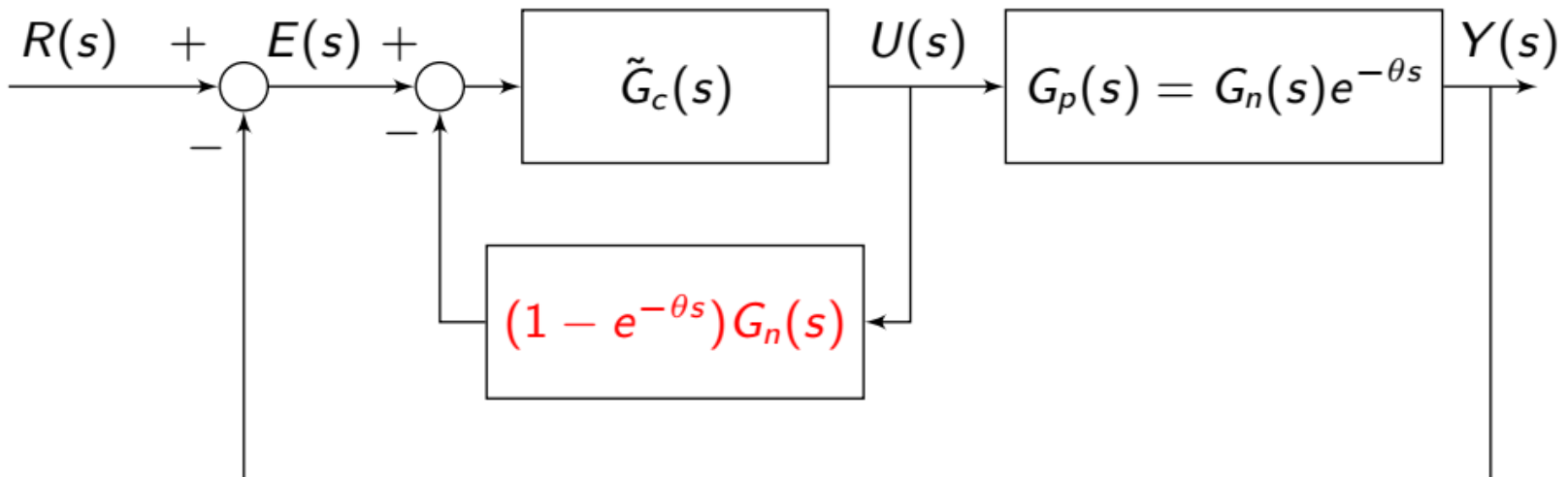


Copyright © 2006 by Douglas J. Cooper.
All Rights Reserved

Compensação de tempo morto

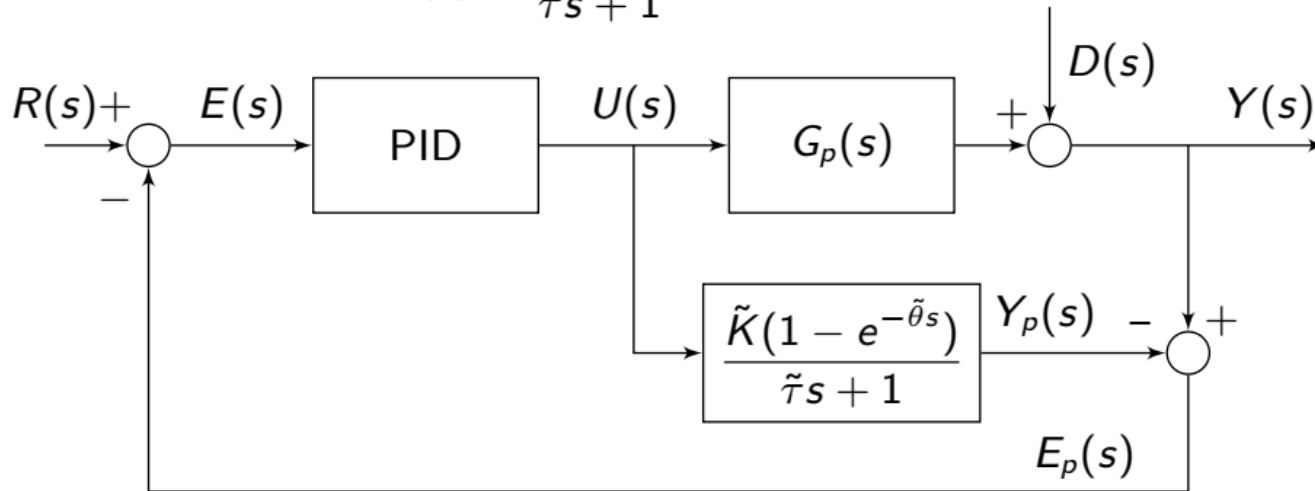
Preditor de Smith

- A compensação de atraso no tempo pode ser feita via Preditor de Smith (PS);
- O PS permite o projeto de controladores como se o sistema não tivesse atraso (se a compensação for perfeita);
- Se houver incerteza ou variação no atraso o PS pode deteriorar o desempenho da malha.
- Implementação:



Preditor de Smith

- Considere o processo $G_p(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$, tem-se



↪ Os parâmetros $(\tilde{K}, \tilde{\tau}, \tilde{\theta})$ representam um modelo da dinâmica do processo. Se o modelo for perfeito, o PID *não enxerga* o atraso,

$$E_p(s) = \frac{\tilde{K}}{\tilde{\tau}s + 1} U(s),$$

permitindo que o PID tenha um ganho proporcional bem maior do que teria sem o Preditor de Smith.

↪ Para maior robustez, considerar no projeto que apenas 60% do tempo morto é compensado, ou seja, utilizar no projeto $\tilde{\theta} = 0,4\theta$.