

Controle de Processos Industriais: Indicadores, Controle Moderno e Tecnologias

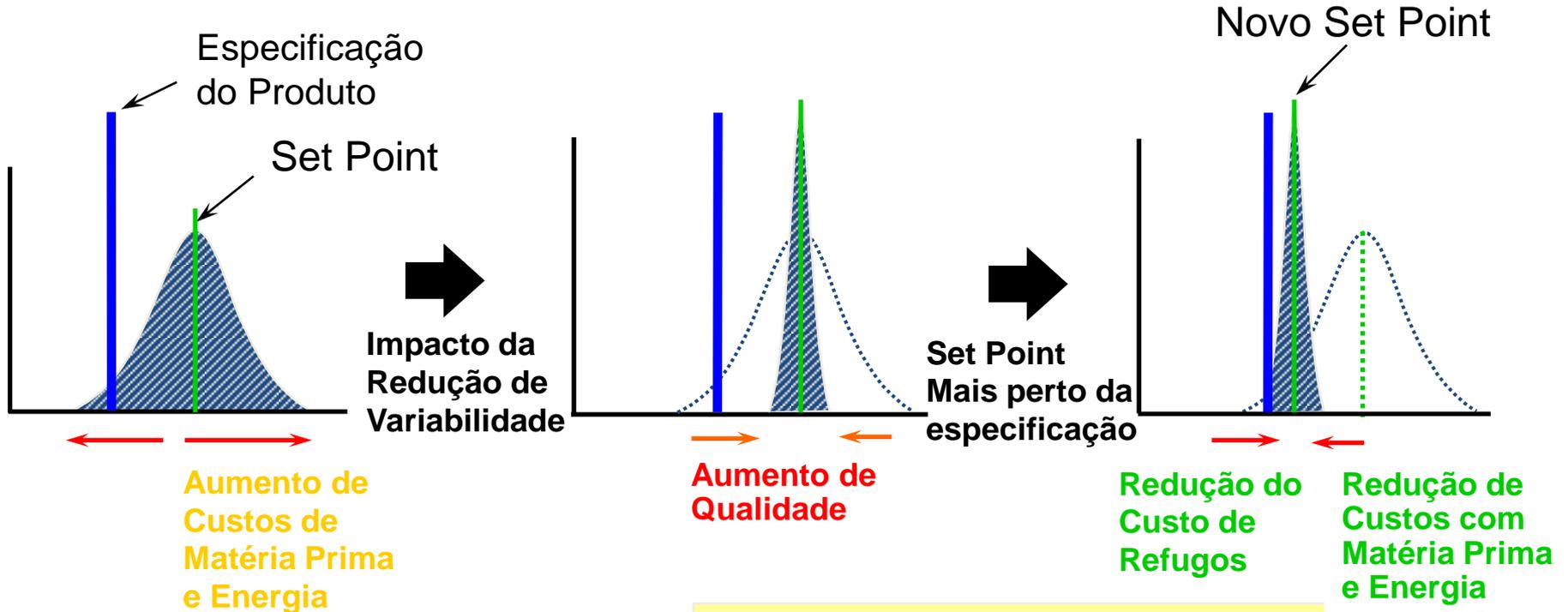
Prof. Eduardo Stockler Tognetti

Depto. Engenharia Elétrica

Universidade de Brasília - UnB

Indicadores de Desempenho

Variabilidade



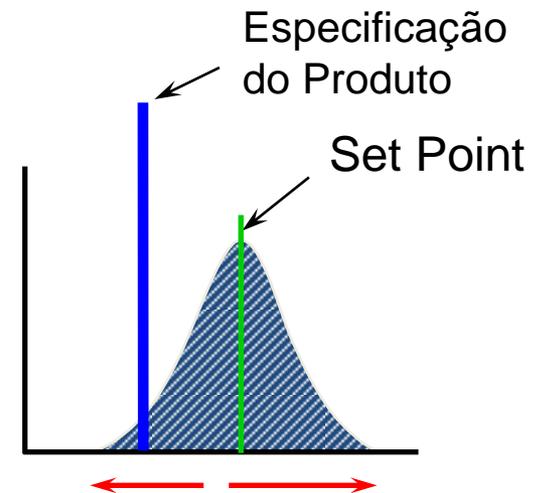
$$\text{Variabilidade} = \frac{2\sigma}{\mu} 100\%$$
 ou

$$\text{Variabilidade} = \frac{2\sigma}{\text{faixa}} 100\%$$

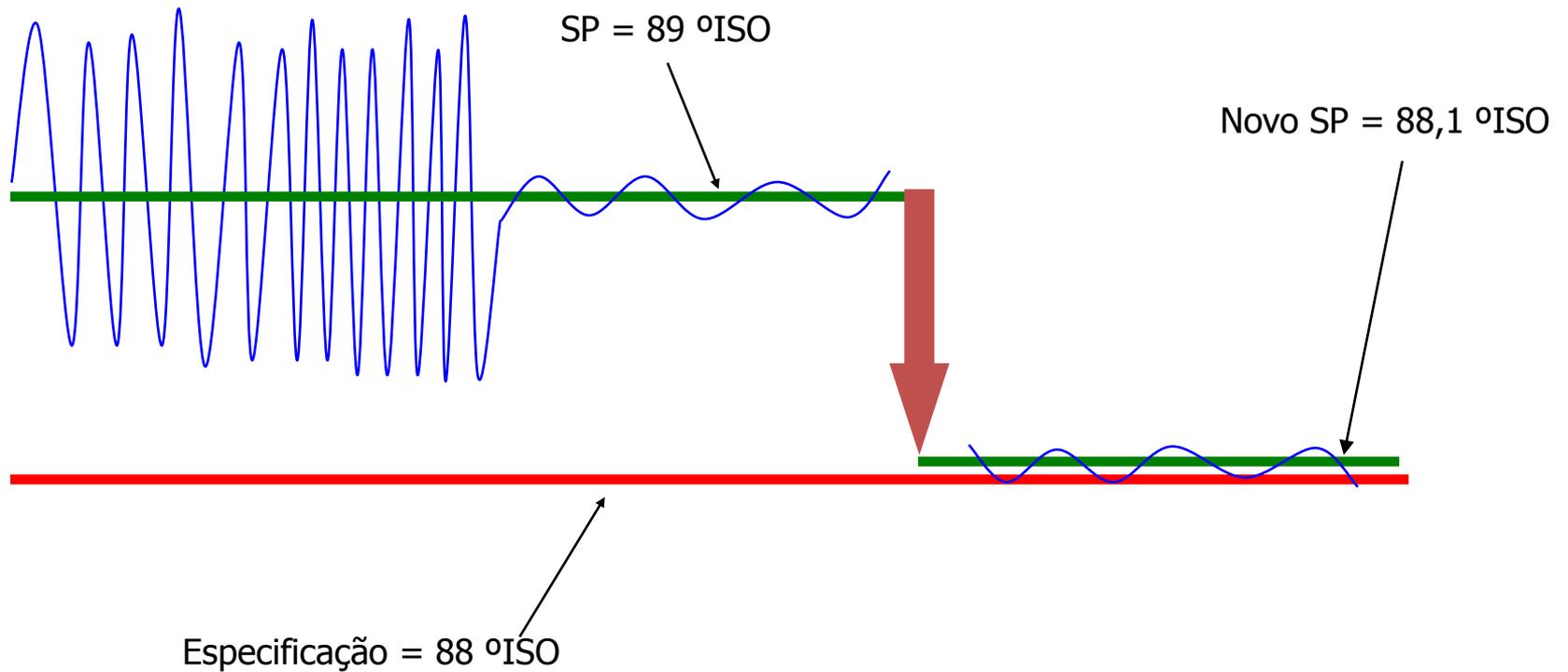
↓	Refugo e Matéria Prima	
↑	Produtividade	\$\$\$
↑	Qualidade do Produto	

Variabilidade no Processo

- Reação desbalanceada
 - Produto fora de especificação
 - Maior consumo de matéria prima, insumos e energia
- Maior desgaste dos instrumentos de campo
 - Aumento do custo com manutenção e pessoal
- Paradas não prevista
 - Diminuição da disponibilidade da planta e produtividade



EFEITO DA MARGEM DE SEGURANÇA DO OPERADOR (EX.: CONTROLE DE ALVURA)



Outros Indicadores

- Número de reversões
- Tempo em manual (%)
- Tempo em saturação (%)
- Erros médio, IAE, ISE, ITAE, ITSE
- Desvio padrão (2σ)
- Indicadores com peso econômico
- Desempenho no tempo
- Resposta em frequência

Desafios do Controle de Processos

Malhas de Controle

- Estatísticas
 - 30% das malhas em manual
 - 30% problemas em sensores, atuadores
 - 20% projeto errado e/ou inadequado
 - 85% mal sintonizadas (30% sem sentido)
 - 85% com desempenho insatisfatório
 - 90% das plantas tem um de seus turnos de operadores melhor que os outros
- Somente 20% das malhas operam melhor em automático que em manual !

Problemas Típicos Encontrados

Medição

- Variabilidade
- Ruído
- Não-linearidade

Controle

- Projeto/conceito ruim
- Em manual
- Sintonia

Válvula

- Saturada
- Com Agarramento
- Com Folga

Processo

- Distúrbios
- Mudanças do operador
- Interações entre variáveis

Dinâmicas Complexas em Processos Industriais



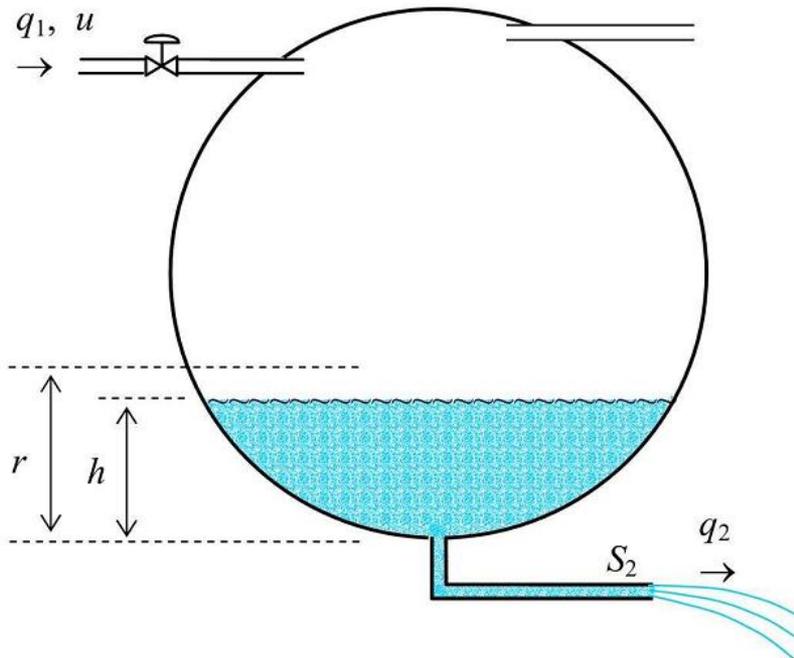
Dinâmicas Complexas

- É possível garantir estabilidade e desempenho para toda faixa de operação?
- Como projetar sistemas de controle baseado em critérios ótimos?
- Como garantir que as especificações serão atendidas sob incertezas dos modelos?
- Como projetar controladores multivariáveis de modo integrado?

Dinâmicas Não-Lineares

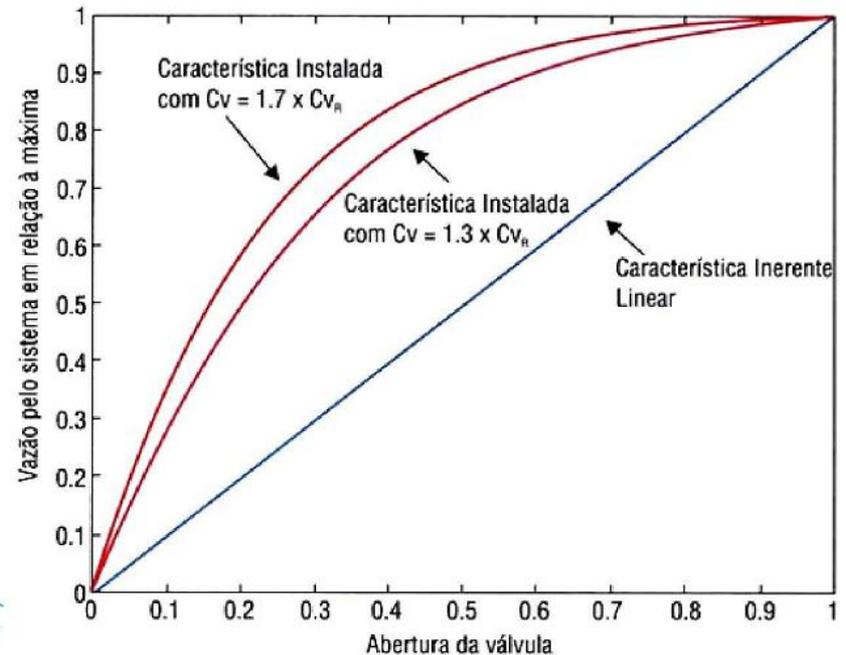
Controle de nível de um tanque esférico

$$S(h)\dot{h}(t) = u(t) - S_2\sqrt{2gh(t)} \quad (1)$$



Válvula de controle

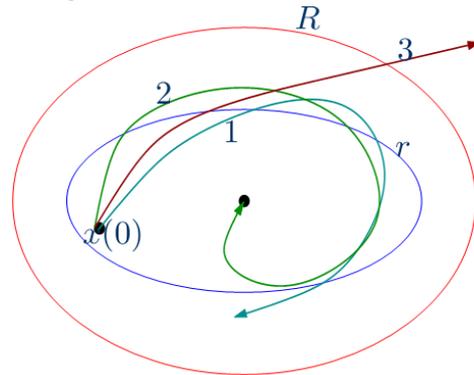
$$Q(a) = Q_{max} \sqrt{\frac{C^2 + 1}{C^2 + f(a)^{-2}}} \quad (2)$$



Sistemas Não-Lineares

$$\dot{x} = f(x, u), \quad y = h(x, u), \quad z = g(x, u)$$

1. Caracterização da estabilidade dos pontos de equilíbrio



- 1 : Estável
- 2 : Assintoticamente Estável
- 3 : Instável

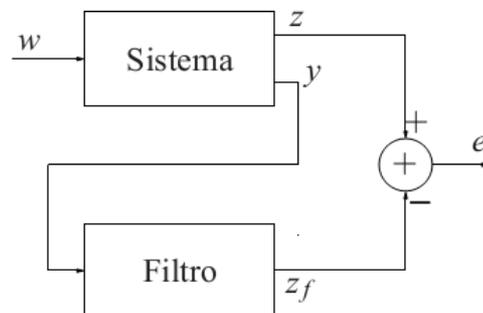
$$(i) \quad u = \gamma(x) \quad (Kx, K\hat{x}, Ky)$$

2. Síntese de controladores

$$(ii) \quad \dot{x}_c = A_c x_c + B_c y$$

3. Filtragem

$$u = C_c x_c + D_c y$$



Teoria de Lyapunov

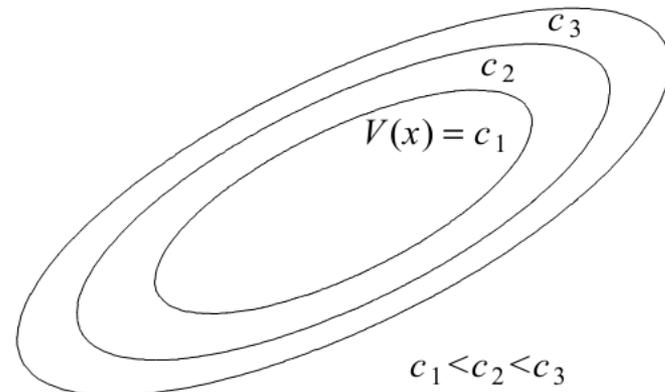
- Função energia
- Condição suficiente de estabilidade (para uma dada $V(x)$)

Teorema de Lyapunov:

Se existir $V(x)$ tal que $V(0) = 0$ e $V(x) > 0$,

$\forall x \in D \setminus \{0\}$, $\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) < 0$, então a

origem é assint. estável.



Classes de Sistemas Não-Lineares

- Sistemas polinomiais
- Bilinearidades
- Restrições nos estados
- Componentes não-lineares



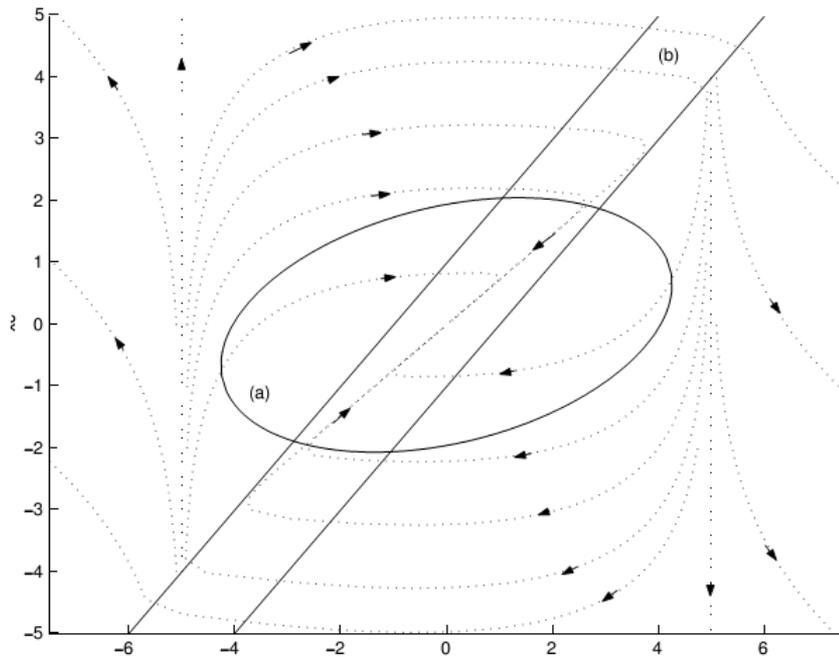
- Saturação
- Histerese
- Folga

Exemplo:

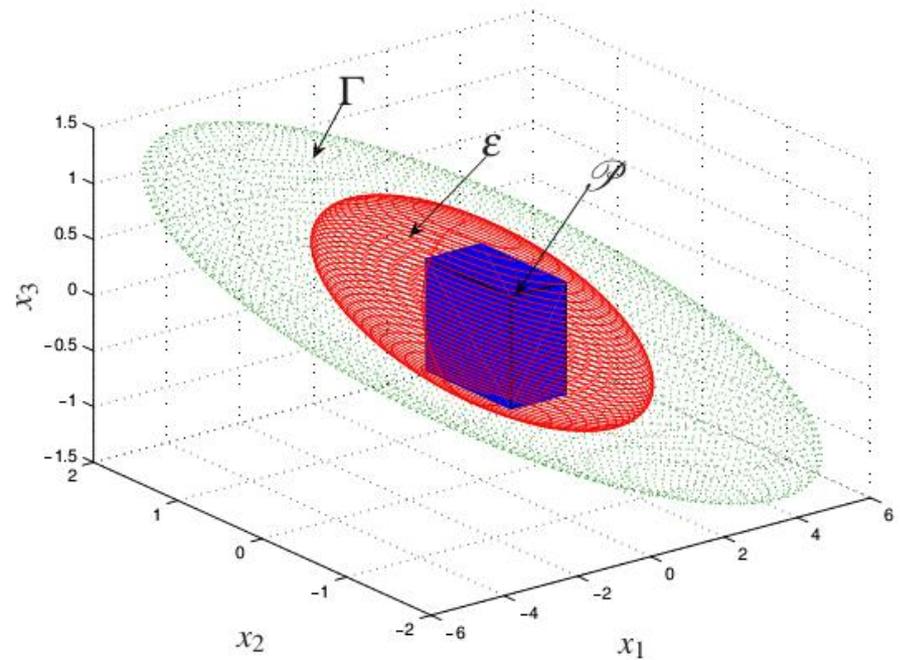
$$\dot{x} = Ax + B\phi(x, u) + g(x)$$

Região de Atração

Saturação do sinal de controle



Sistema bilinear



Linearização

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$f(0,0) = 0$ e f continuamente diferenciável no domínio $D_x \times D_u$ que contém a origem ($x = 0, u = 0$)

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x}(x, u) \right|_0, \quad B = \left. \frac{\partial f}{\partial u}(x, u) \right|_0$$

Problema: assumindo (A, B) estabilizável, projetar ganho K tal que $(A + BK)$ Hurwitz

$$u = Kx$$

Sistemas Lineares

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

- Condições necessárias e suficientes
- Formulação em um problema convexo (ex. LMIs, do inglês *linear matrix inequalities*)
- Função de Lyapunov quadrática $\vec{V}(x) = x'Px$

Se existir $P = P' > 0$ tal que

$$A'P + PA < 0$$

então a origem é um ponto de equilíbrio assintoticamente estável.

Exemplo (*sistema linearizado*)

Considere o sistema

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= e^{x_2}u \\ \dot{x}_2 &= x_1 + x_2^2 + e^{x_2}u \\ \dot{x}_3 &= x_1 - x_2\end{aligned}$$

Problema: projetar lei de controle $u = Kx$

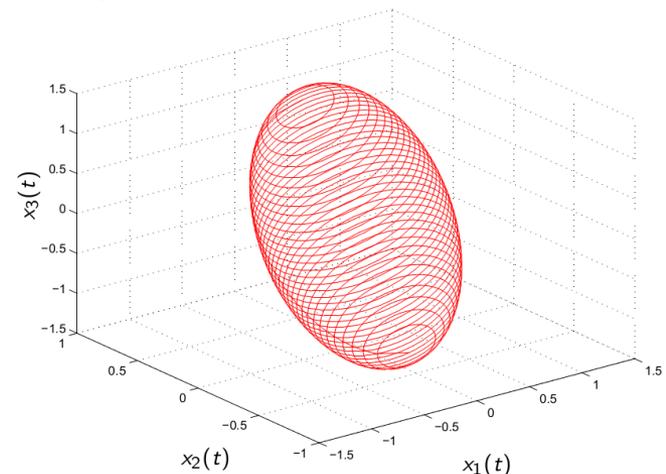
Do sistema linearizado

$$\exists W = W' > 0: AW + WA' + BZ + Z'B' < 0 \rightarrow K = ZW^{-1}$$

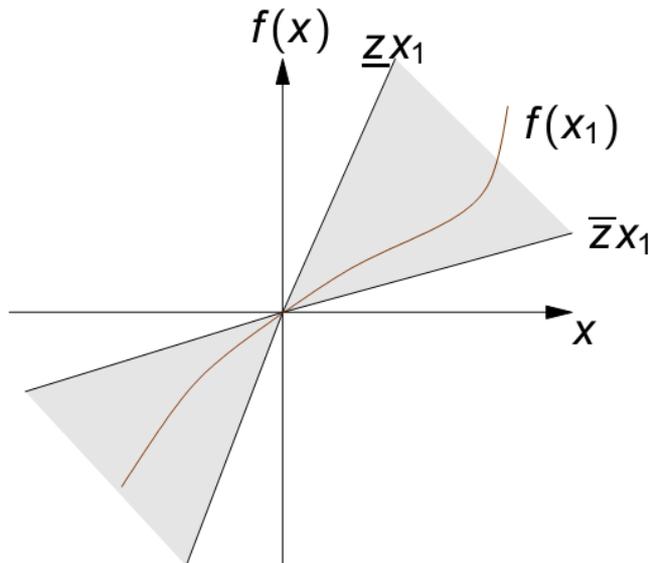
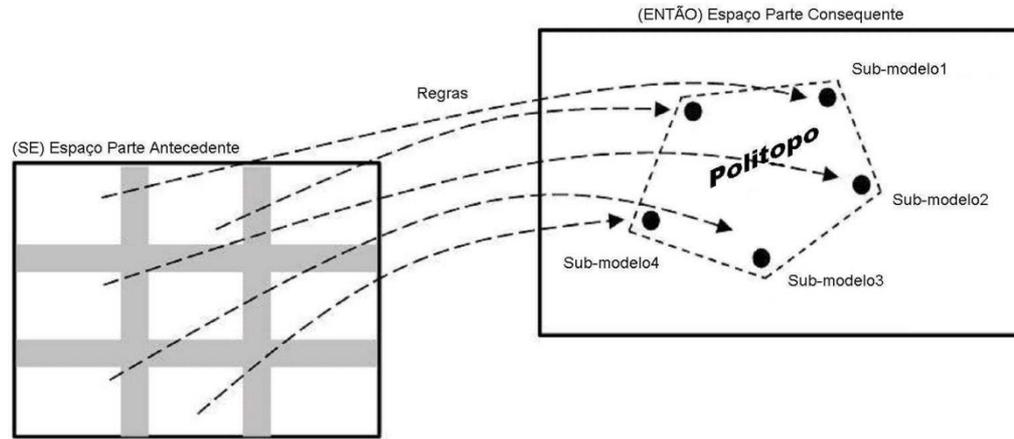
Domínio de estabilidade $D = \{x \in R^n: \dot{V}(x) < 0\}$

Estimativa da região de atração

$$\Omega = \{x \in R^n: V(x) < c\} \subseteq D$$



Representação Fuzzy Takagi-Sugeno



Condição de setor → descrição exata em $\Omega(x)$.

Reescrevendo como

$$\dot{x} = f(x, u) = \xi(x, u)x + \gamma(x, u)u$$

tem-se

$$\dot{x} = A(\mu)x + B(\mu)u$$

válido em $\Omega(x)$.

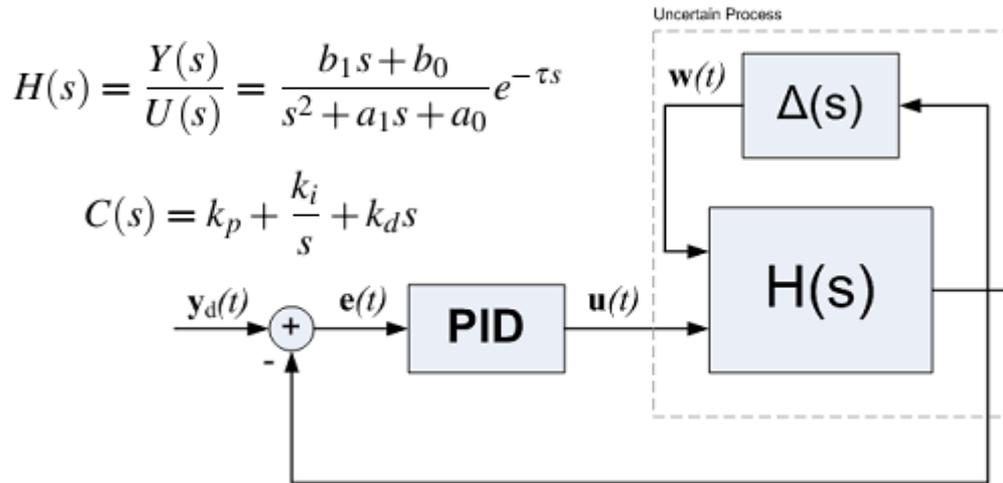
Sistemas Lineares

- Casos especiais:
 - Incertos $\rightarrow A(\alpha)$
 - Variantes no tempo $\rightarrow A(t)$
 - LPV $\rightarrow A(\alpha(t))$
 - Chaveados $\rightarrow A_i(\alpha)$
 - Com atrasos $\rightarrow \dot{x}(t) = A(\alpha)x(t - \tau) + B(\alpha)u(t - \eta)$

$$A(t)'P(t) + P(t)A(t) + \dot{P}(t) < 0 \quad \longrightarrow \quad P(t) \quad ???$$

- Como \downarrow conservadorismo (necessidade) ?
- Desempenho ? Robustez ? Discreto (NCS) ?

Exemplo: projeto PID via LMIs



$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} e^{-\tau s}$$

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t - \tau)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -a_0 & -a_1 & 0 \\ b_0 & b_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}' = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Lei de controle PID:

$$u(t) = \mathbf{K}\mathbf{F}\mathbf{x}(t)$$

Sistema em malha fechada:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{A}_d\mathbf{x}(t - \tau) + \mathbf{B}_w w(t)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + d_w w(t)$$

$$u(t) = [k_p \quad k_d \quad k_i] \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & 0 \\ 0 & b_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + k_d b_1 \dot{x}_2(t)$$

$$\mathbf{A}_d = \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{F}$$

Projeto via Lyapunov (LMI):

$$\begin{bmatrix} \mathcal{L}_{11} & \tau^2 \mathbf{B}\mathbf{L} + \tau \mathbf{R} & \tau^2 \mathbf{R}\mathbf{A}' & \tau \mathbf{R}\mathbf{C}' & \tau \mathbf{B}_w \\ * & -\tau^2 \mathbf{M} - \tau \mathbf{R} & \tau^2 \mathbf{L}'\mathbf{B}' & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ * & * & -\tau \mathbf{R} & \mathbf{0} & \tau \mathbf{B}_w \\ * & * & * & -\mathbf{I} & d_w \\ * & * & * & * & -\mu \mathbf{I} \end{bmatrix} < 0$$

Muito obrigado!

estognetti@ene.unb.br