

Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília

Tópicos em Controle de Processos 2

Introdução

Geovany A. Borges
gaborges@ene.unb.br

Controle convencional de processos

■ Processos típicos



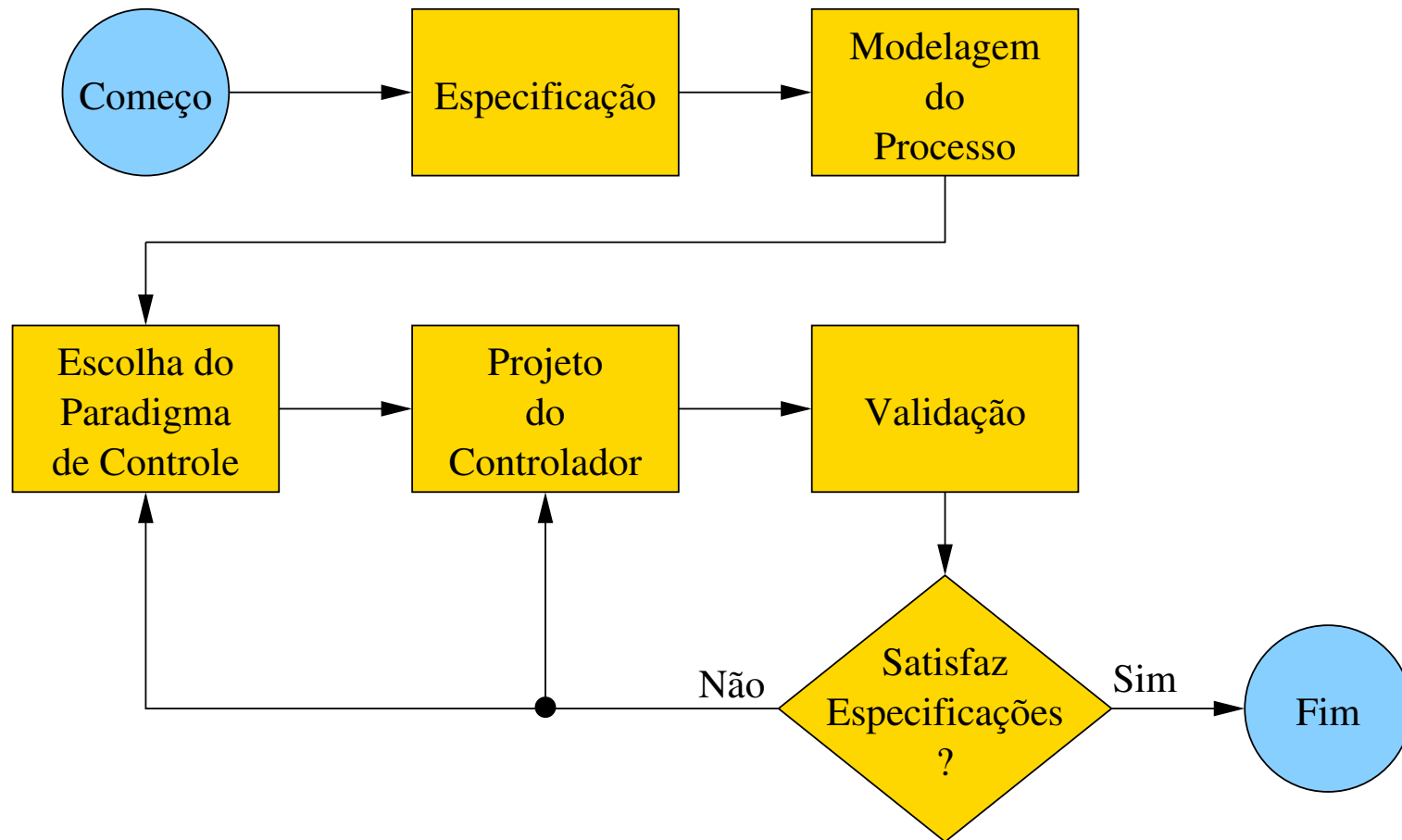
(a) Servos



(b) Steel Mill

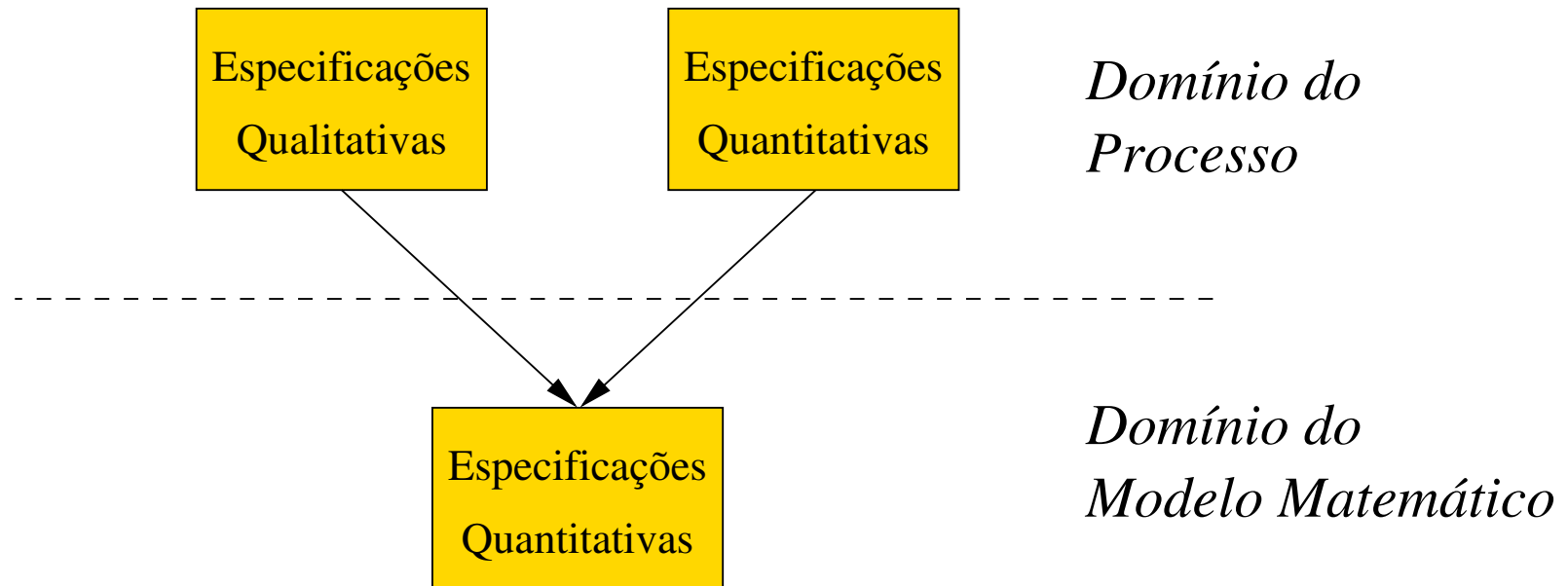
Controle convencional de processos

■ Fluxograma de projeto



Controle convencional de processos

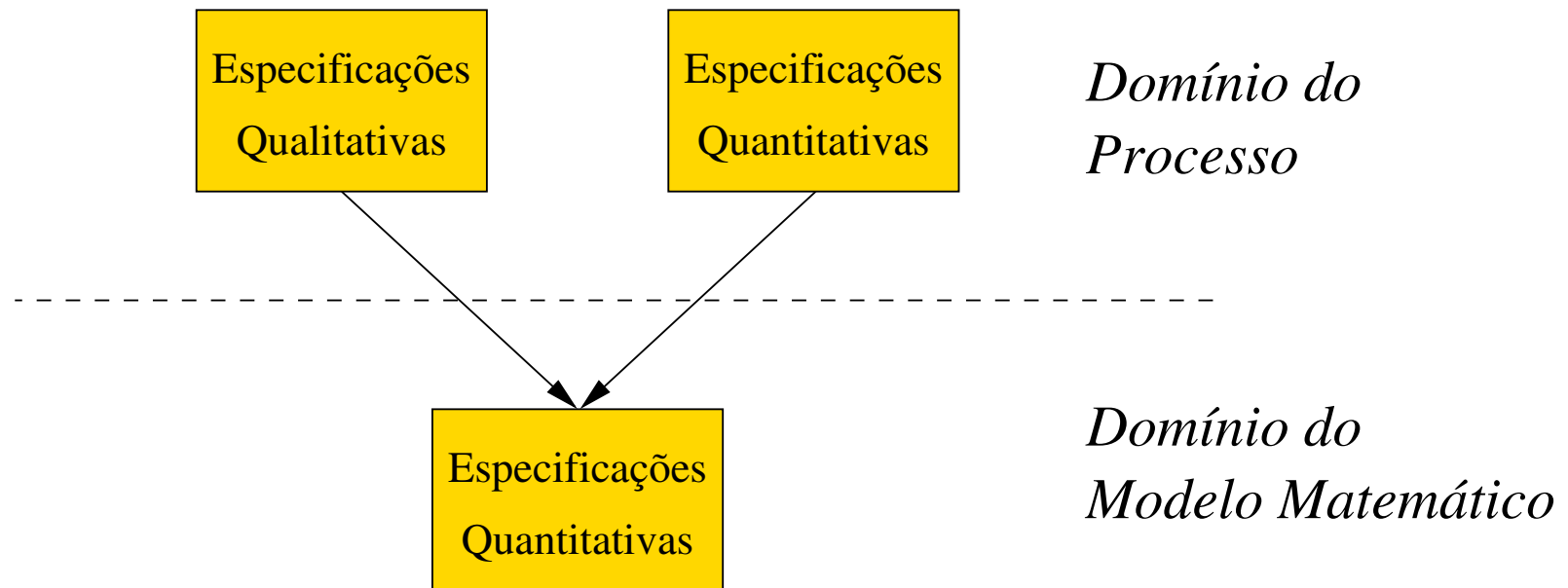
■ Especificações



- *Domínio do processo:*
Valores nominais, variação máxima, margem de erro, intervalos de operação, ...

Controle convencional de processos

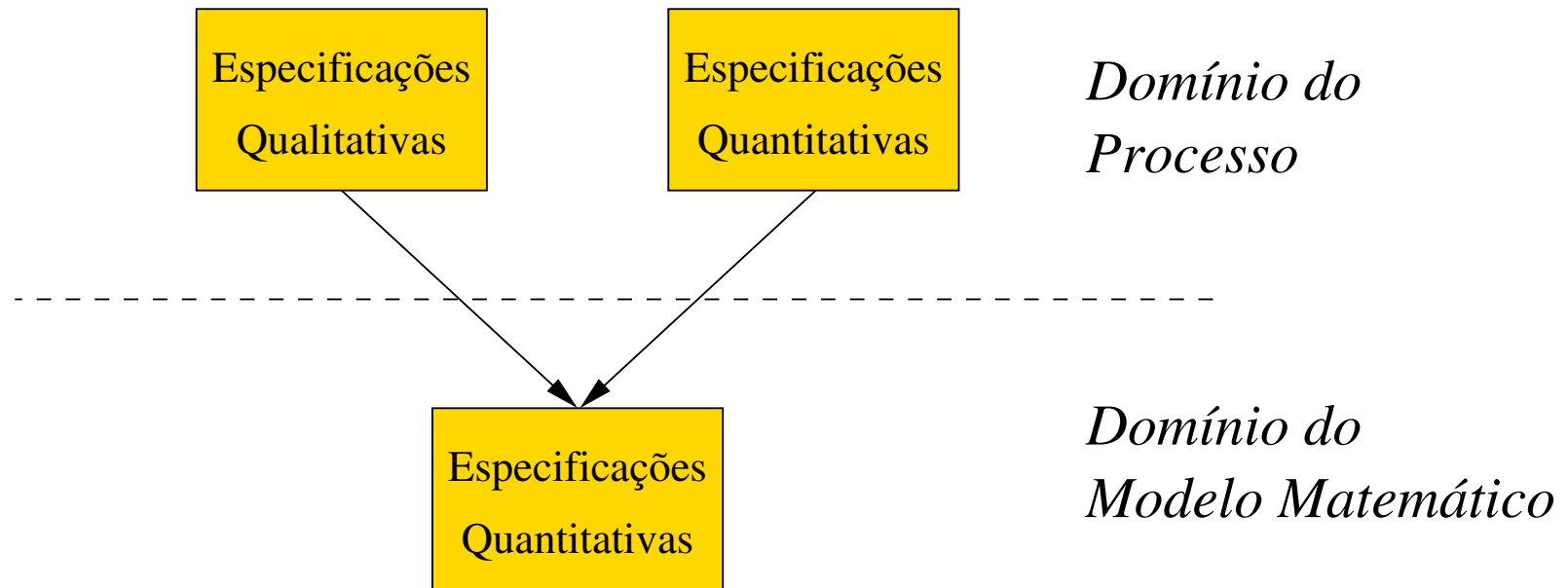
■ Especificações



- *Domínio do modelo matemático:*
Domínio: analógico, discreto, eventos discretos, ...

Controle convencional de processos

■ Especificações



- *Domínio do modelo matemático:*
Características: pólos dominantes, zeros, banda passante, tempo de resposta, frequência de ressonância, ...

Controle convencional de processos

■ Modelamento: estrutura (caso linear)

- *Modelo Entrada/Saída (E/S)*

Domínio do tempo contínuo: $\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \mathbf{H}(\mathbf{t}) * \mathbf{u}(\mathbf{t})$

Domínio do tempo discreto: $\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(q)\mathbf{u}(k)$

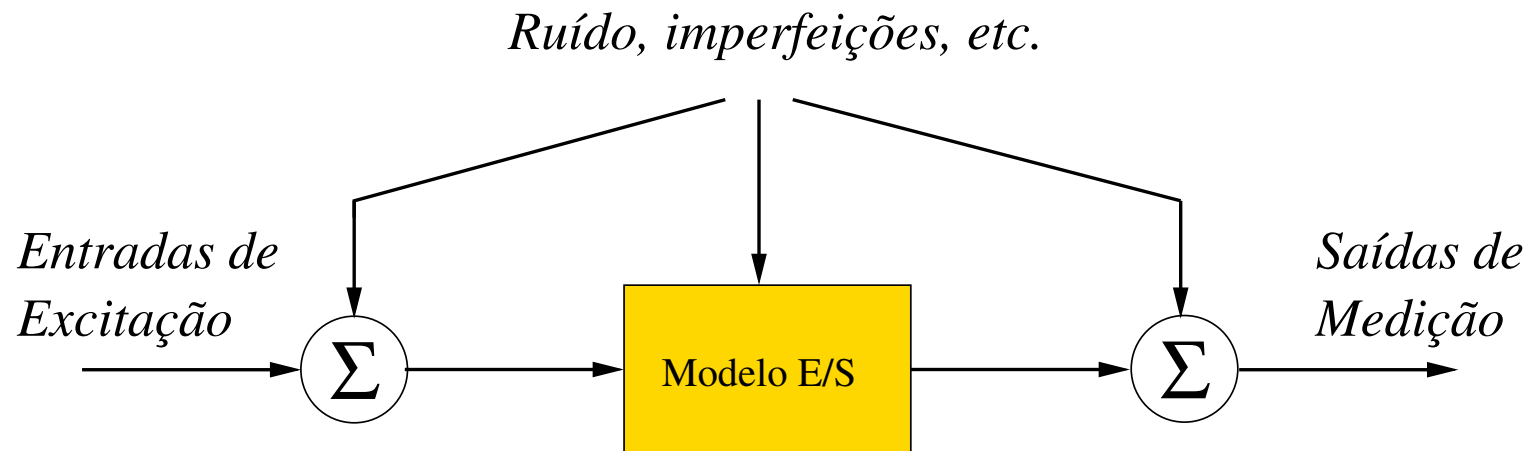
- *Modelo em Espaço de Estados*

Domínio do tempo contínuo:
$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t) \end{cases}$$

Domínio do tempo discreto:
$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{cases}$$

Controle convencional de processos

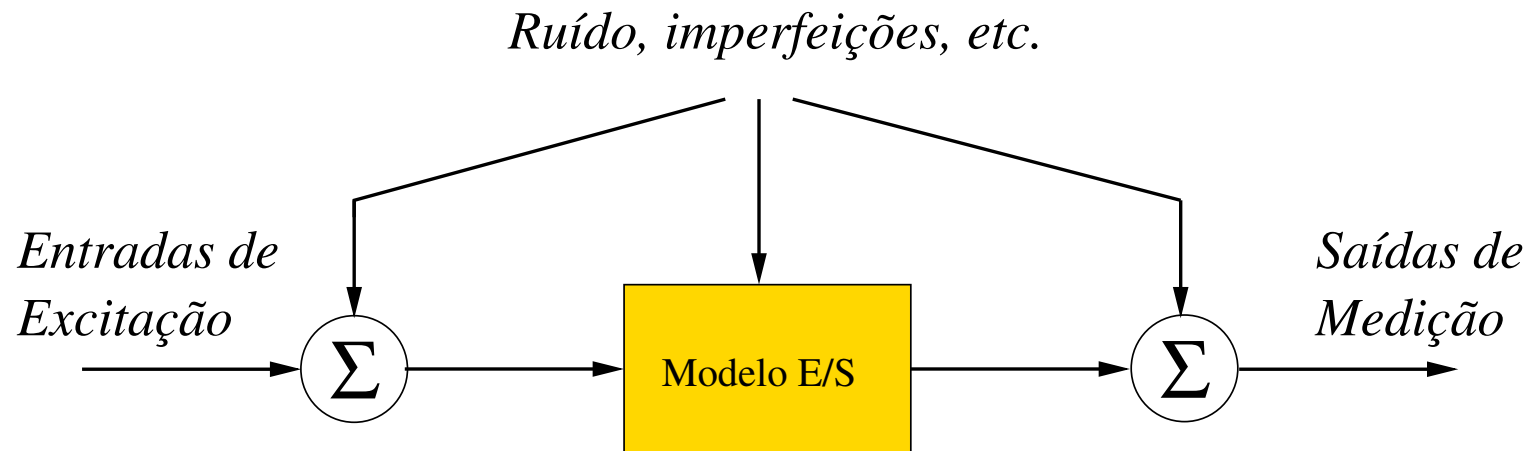
■ Modelamento: identificação de sistemas



- *Estudar fenômenos envolvidos;*
- *Determinar as variáveis de interesse (determinísticas e estocásticas);*
- *Escolher um modelo (pode depender do paradigma de controle);*
- *Verificar a adequação qualitativa do modelo (com relação às especificações);*

Controle convencional de processos

■ Modelamento: identificação de sistemas

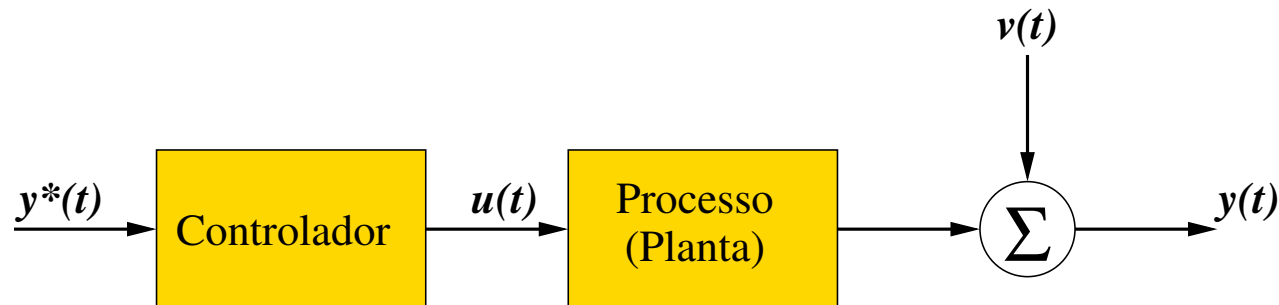


- *Determinar os parâmetros do modelo:*
 - Medição direta (experimental)
 - Métodos computacionais (experimental)
 - Adhoc (baseada na experiência)
- *Validar o modelo (critérios de satisfação);*

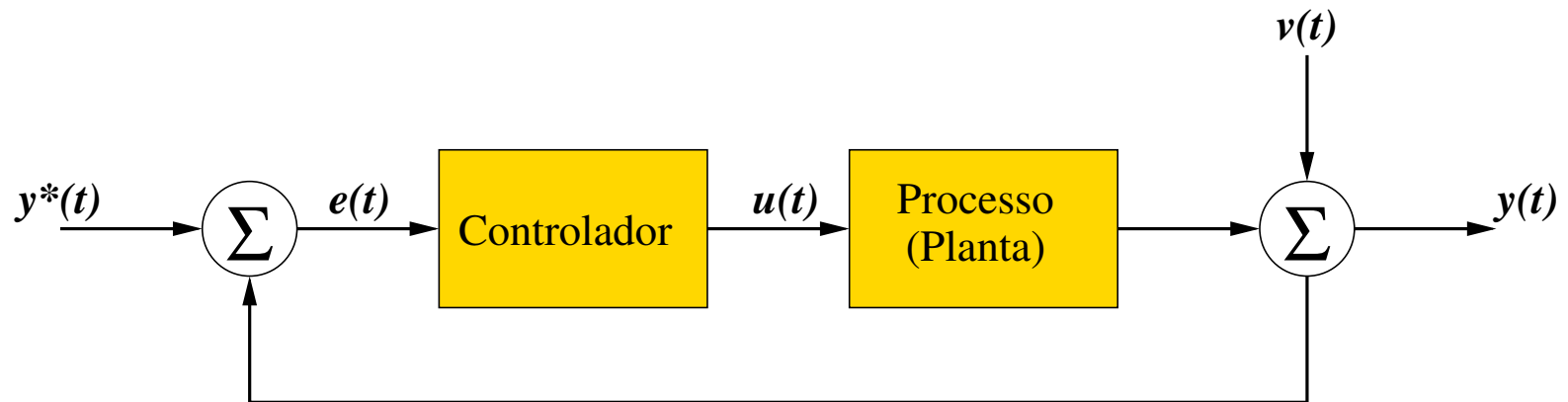
Controle convencional de processos

■ Paradigmas de controle: conceitos

- *Controle Direto vs. Controle Realimentado*



(a) Controle Direto

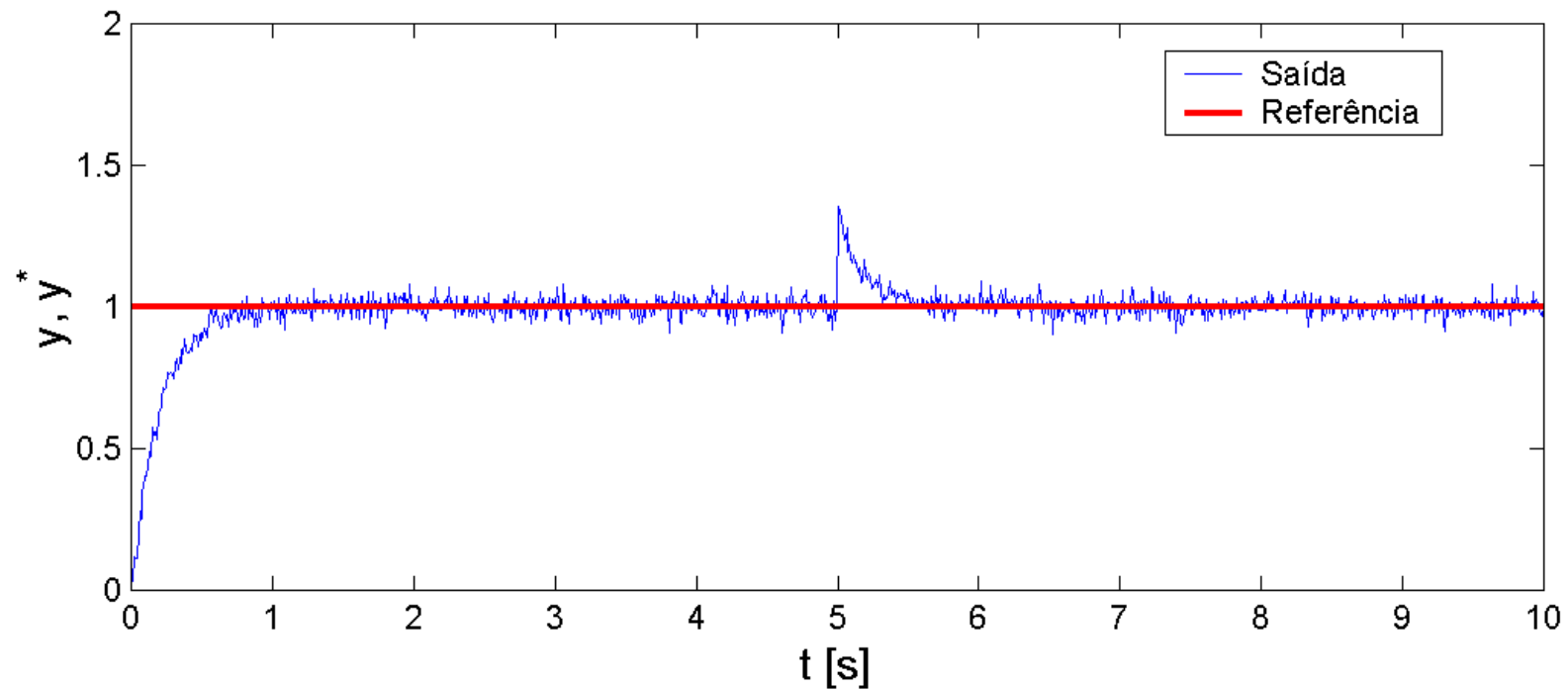


(b) Controle Realimentado

Controle convencional de processos

■ Paradigmas de controle: conceitos

- *Regulagem vs. Rastreamento (Tracking)*

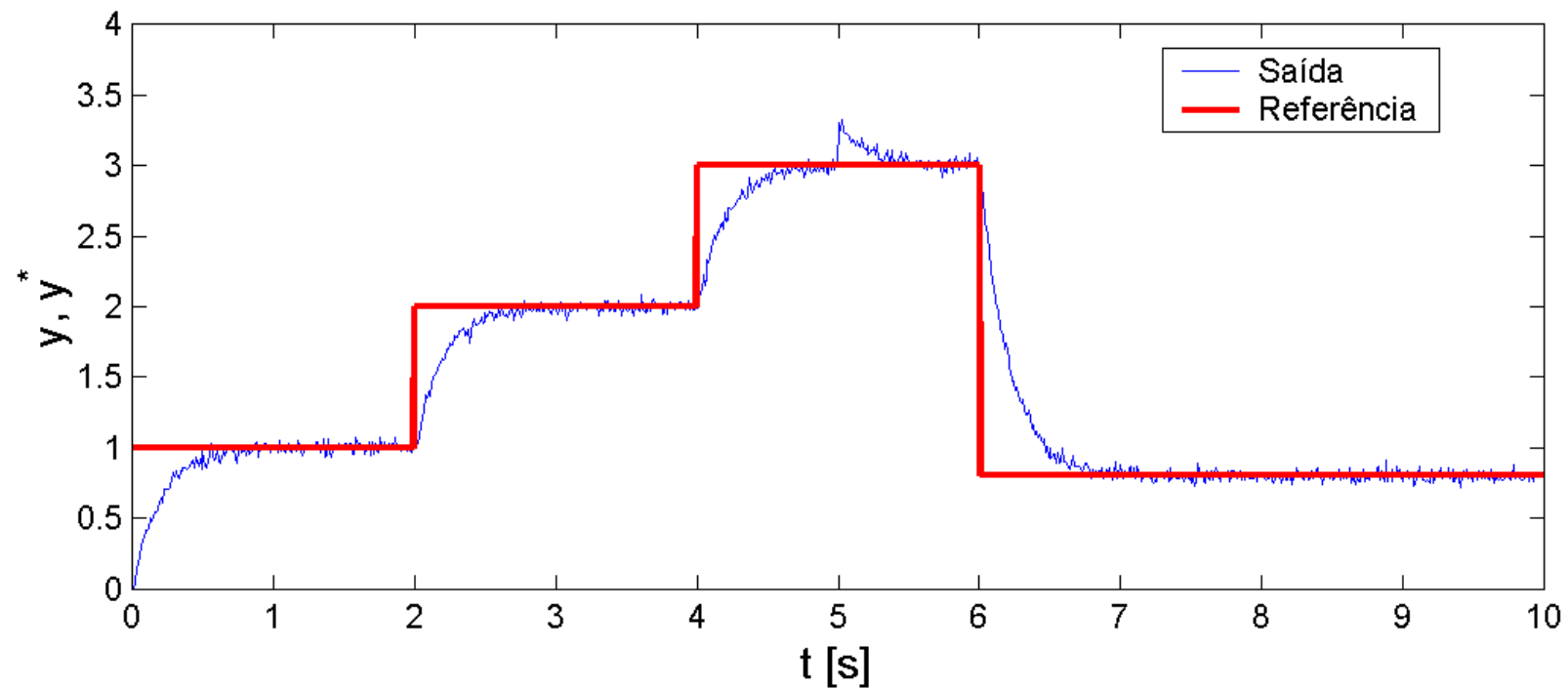


(a) Regulagem

Controle convencional de processos

■ Paradigmas de controle: conceitos

- *Regulagem vs. Rastreamento (Tracking)*



(b) Rastreamento

Controle convencional de processos

■ Paradigmas de controle: técnicas

- *Compensadores em avanço e atraso:*

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K \frac{(s + z)}{(s + p)}$$

- Compensador em avanço de fase: $|z| < |p|$
- Compensador em atraso de fase: $|z| > |p|$

- *Controle Proporcional + Integral + Derivativo (PID):*

$$u(t) = K_p e(t) + K_d e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau,$$

ou ainda

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s}$$

Controle convencional de processos

■ Paradigmas de controle: técnicas

- *Alocação de pólos por realimentação de variáveis de estado:*
 - Seja um sistema representado sob forma de espaço de estados

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases}.$$

- Determinar a matriz $\mathbf{K}$ tal que a lei de controle $\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t)$ faça com que o sistema em malha fechada apresente a seguinte equação característica:

$$q(s) = s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \dots + \alpha_0.$$

- Este problema é resolvido usando a fórmula de Ackerman:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P}_c^{-1} q(\mathbf{A}),$$

com $\mathbf{P}_c$ sendo a matrix de controlabilidade.

Controle convencional de processos

- Exemplo industrial: controle de robô manipulador
 - O robô PA10 (Mitsubishi):

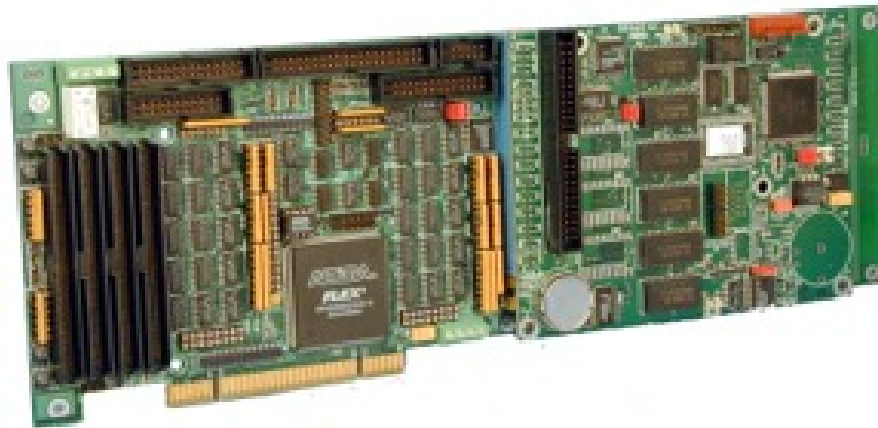


Características:

- Graus de liberdade: 6
- Massa total: 38 kg
- Capacidade de carga: 10 kg
- Velocidade máxima juntas: 57, 114 e 360 °/s

Controle convencional de processos

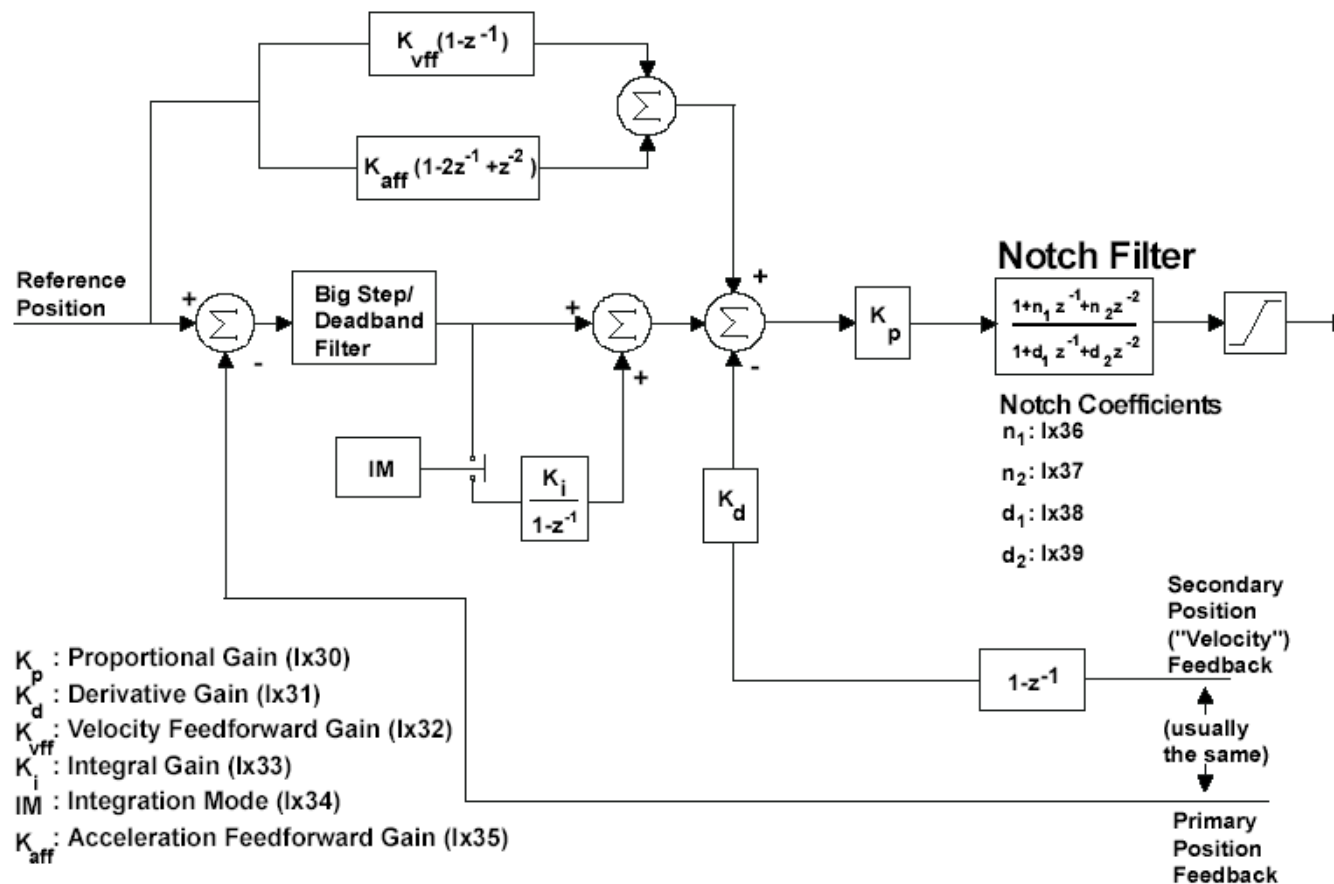
- Exemplo industrial: controle de robô manipulador
 - *O controlador de eixos PMAC2 (Delta Tau Data Systems):*



- Baseado em DSP da família 56k da Motorola;
- Controle independente de 4 a 6 eixos;
- Grande versatilidade de uso com atuadores e sensores;
- Interpolação de pontos de trajetória (spline, cúbica);
- Controle PID com auto-ajuste.

Controle convencional de processos

- Exemplo industrial: controle de robô manipulador
 - O contrador de eixos PMAC2 (Delta Tau Data Systems):



Controle convencional de processos

■ Vantagens das técnicas convencionais:

- *Análise e projeto relativamente simples e intuitivo;*
- *Ferramentas de projeto que garantem resultados (dados os modelos apresentados);*
- *Teoria bem fundamentada;*
- *Fácil implantação.*

Controle convencional de processos

■ Vantagens das técnicas convencionais:

- *Análise e projeto relativamente simples e intuitivo;*
- *Ferramentas de projeto que garantem resultados (dados os modelos apresentados);*
- *Teoria bem fundamentada;*
- *Fácil implantação.*

■ Desvantagens das técnicas convencionais:

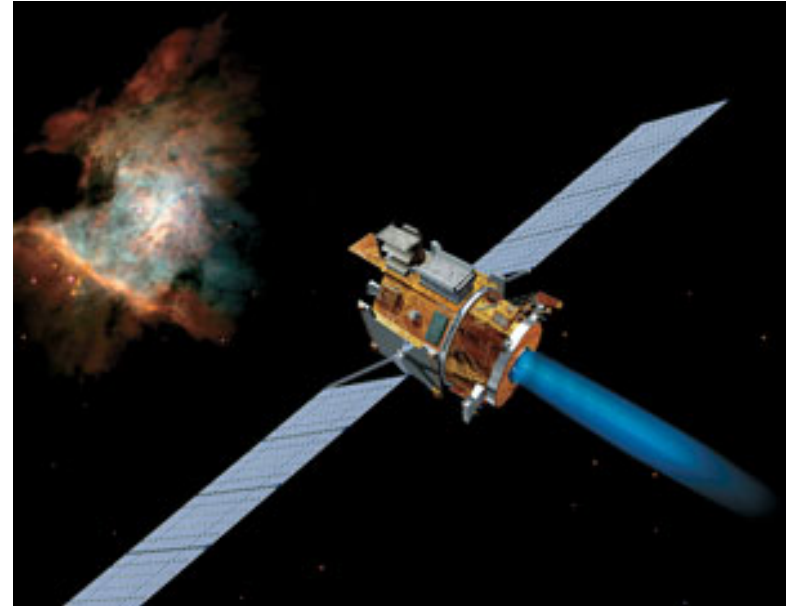
- *Necessidade de modelos exatos;*
- *Sistemas reais são inerentemente não-lineares;*
- *Robustificação é alcançada por meio de artifícios de projeto (e.g., ganho elevado em certa frequência);*
- *Com a evolução da tecnologia, cada vez mais aumenta o número de processos que não apresentam desempenho satisfatório quando controlados por uma técnica convencional.*

Controle avançado de processos

■ Processos típicos



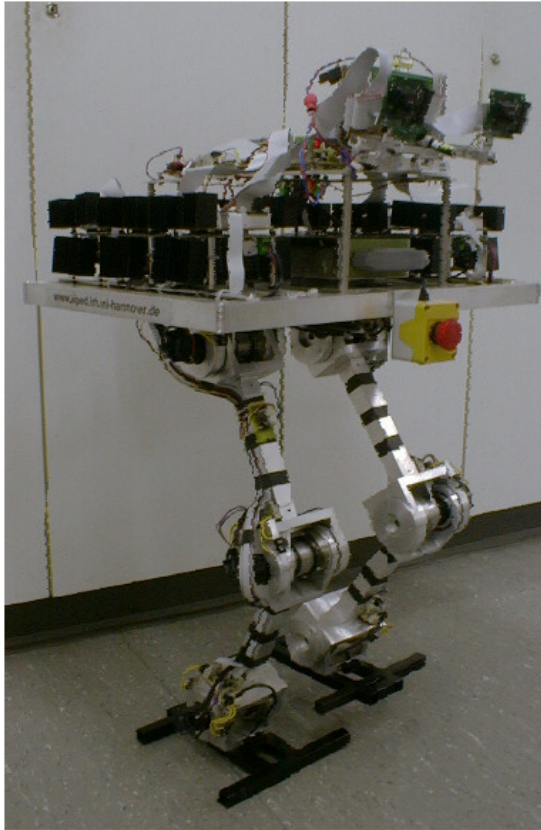
(a) Foguetes



(b) Satélites

Controle avançado de processos

■ Processos típicos



(c) Robôs bipedes



(d) Robôs móveis

Controle avançado de processos

■ Controle ótimo:

- Linear Quadratic Regulator (LQR) e Linear Quadratic Gaussian Regulator (LQG).

■ Controle preditivo:

- Generalized Predictive Control (GPC).

■ Controle robusto:

- $\mathcal{H}_2$ e $\mathcal{H}_\infty$.

■ Controle adaptativo:

- Self-Tuning Regulator (STR), Minimum Variance Adaptive Controller (MVAC), Model Reference Adaptive Controller (MRAC).

Controle avançado de processos

■ Controle estocástico:

- Minimum Variance, controladores com estimadores estocásticos (Kalman, MCMC), tal como o LQG.

■ Controle por aprendizado:

- Neural, fuzzy, genético e variantes.

■ Controle por estrutura variável:

- Sliding-Mode Control.

Direções futuras

- Aplicações de sucesso até o presente [Murray et al., 2003]:
 - *Aeronáutica e aero-espacial: controle de aeronaves, mísseis, veículos de lançamento e satélites;*
 - *Manufatura: controle de alta precisão, partido desde a indústria automotiva até a indústria de dispositivos microeletrônicos;*
 - *Sistemas industriais: monitoração baseada em sensores e ajustes nos processos;*
 - *Sistemas de comunicação: regulagem de sistemas de potência, gerenciamento de FIFOS em roteadores (teoria das filas), cancelamento adaptativo de ruído (filtragem estocástica).*

Direções futuras

■ Necessidades [Murray et al., 2003]: Métodos

- *Controle de sistemas com variáveis contínuas e simbólicas;*
- *Controle em ambientes distribuídos, assíncronos, e em rede;*
- *Coordenação de alto nível e autonomia;*
- *Síntese automática de algoritmos de controle, com validação integrada;*
- *Projeto de sistemas altamente confiáveis a partir de componentes não confiáveis.*

Direções futuras

■ Necessidades [Murray et al., 2003]: Áreas

- *Aeronáutica, aero-espacial e transporte:*
 - Aviões são cada vez maiores e sistemas de propulsão estão em constante evolução;
 - As estações espaciais estão cada vez maiores e as missões mais ousadas e mais distantes.
- *Sistemas de informação e redes:*
 - Usuários e sistemas autônomos de aquisição e atuação compartilham o mesmo meio de comunicação;
 - Deve-se lidar com o não-determinismo do tempo de resposta da rede, para aplicações de tele-operação;
 - Garantir a estabilidade da rede, mesmo com o aumento do número de laços locais.

Direções futuras

■ Necessidades [Murray et al., 2003]: Áreas

- *Robótica e máquinas inteligentes*
 - Aplicações crescentes em exploração, monitoração, medicina requerem autonomia e mais interação com humanos;
 - Aparecimento da robótica de diversão;
 - Homanóides na agricultura e na indústria de manipulação (futurista!?);
 - Controle de voo sem operador humano.
- *Biologia e medicina*
 - Engenharia reversa de redes biológicas de controle (e.g., ecologia, citologia);
 - Desenvolvimento de próteses e sistemas de integração.
- *Outras áreas*
 - Ciências do ambiente, economia, eletromagnetismo, nanoestruturas, sistemas de energia, etc.

Bibliografia

Referências

[Murray et al., 2003] Murray, R., Åström, K., Boyde, S., Brockett, R., and Stein, G. (2003). Future directions in control in an information-rich world. *IEEE Control Systems Magazine*, pages 20–33.