

167657 - Controle para Automação
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de Brasília

Introdução

Geovany A. Borges
gaborges@ene.unb.br

Controle de sistemas dinâmicos

■ Modelos de processo

- Modelo em espaço de estados (contínuo)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{w}, t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, t) \quad (2)$$

- Modelo em espaço de estados (discreto)

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_{k+1}, t_k) \quad (3)$$

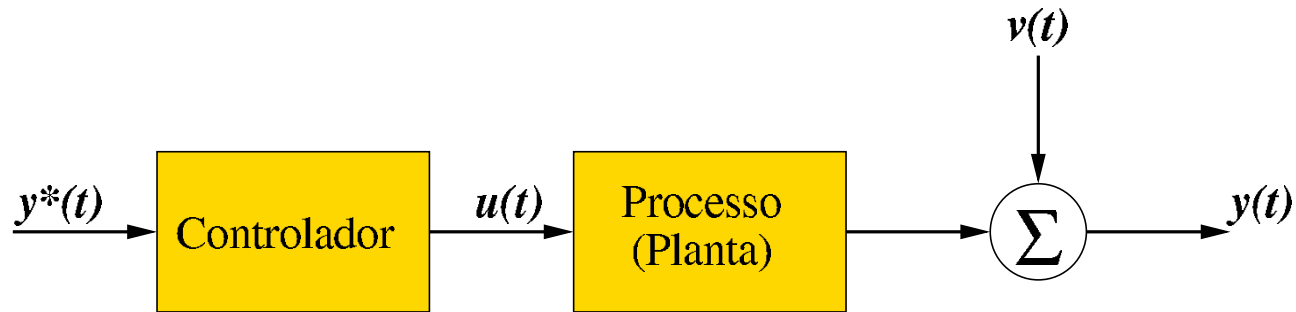
$$\mathbf{y}_k = \mathbf{g}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k, t_k) \quad (4)$$

com $\mathbf{w}(k)$ e $\mathbf{v}(k)$ sendo processos Gaussianos com média nula e

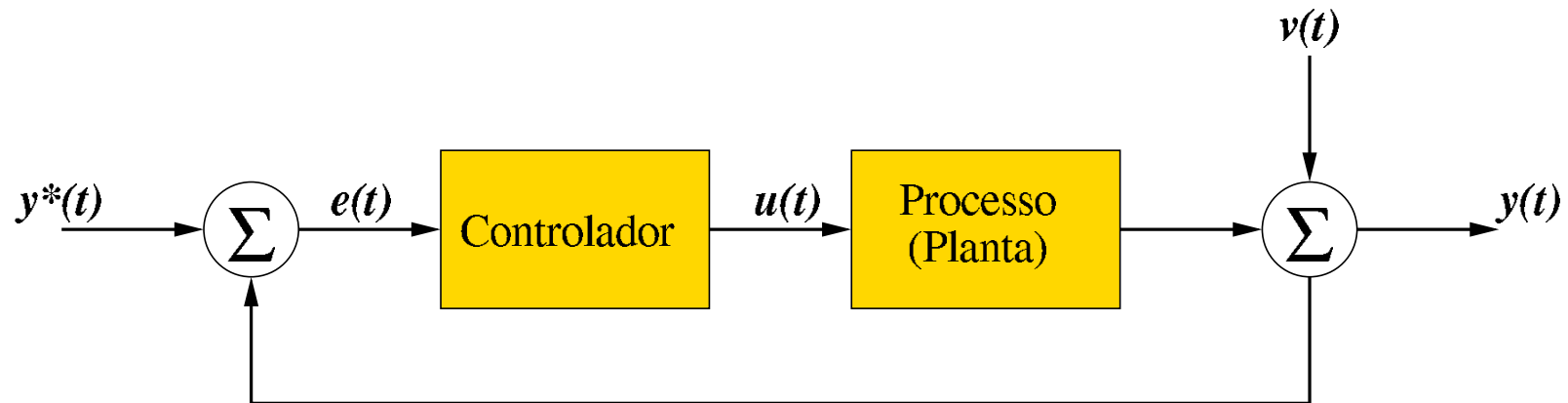
$$\begin{aligned} E\{\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(k)\} &= \mathbf{R}_v(k), & E\{\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(k)\} &= \mathbf{R}_w(k), & E\{\mathbf{v}(k)\mathbf{w}^T(k)\} &= \mathbf{R}_{vw}(k) \\ E\{\mathbf{x}(0)\} &= \mathbf{x}_0, & E\{\mathbf{x}(0)\mathbf{x}^T(0)\} &= \mathbf{R}_{x_0}, \end{aligned} \quad (5)$$

Controle de sistemas dinâmicos

■ Controle direto vs. controle realimentado



(a)

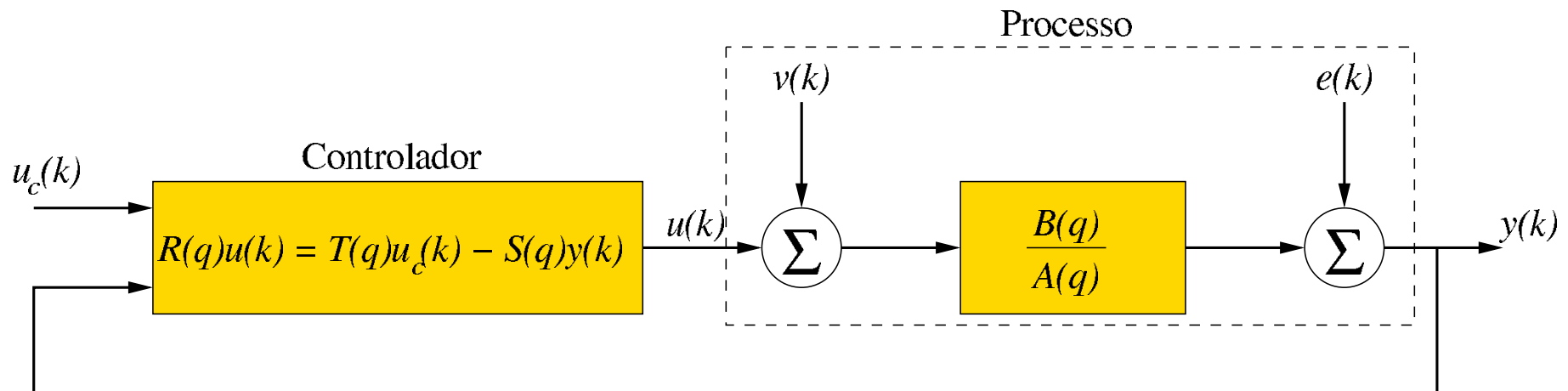


(b)

Controle de sistemas dinâmicos

■ Técnicas de controle (linear e não-linear)

- Controle clássico: compensadores avanço/atraso, controle PID, espaço de estados, observadores de estado, ... [1]
- Controle polinomial: alocação dos pólos e zeros (SISO)



$$y = \frac{BT}{AR + BS}u_c + \frac{BR}{AR + BS}v + \frac{AR}{AR + BS}e \quad (6)$$

Controle de sistemas dinâmicos

■ Técnicas de controle (linear e não-linear)

- Controle ótimo: critério de custo (MIMO, variante no tempo)

$$J = E\left\{\sum_{k=0}^{N-1} [\mathbf{x}^T(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k)\mathbf{R}(k)\mathbf{u}(k)] + \mathbf{x}^T(N)\mathbf{S}\mathbf{x}(N)\right\} \quad (7)$$

com $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ e $\mathbf{S}$ sendo matrizes simétricas e definidas positivas [2]. Lei de controle: determinar $\mathbf{u}^*(k)$ tal que

$$\mathbf{u}^*(k) = \arg \min_{\mathbf{u}(k)} J \quad (8)$$

sendo $\mathbf{u}(k) = -\mathbf{L}(k)\mathbf{x}(k)$.

Controle de sistemas dinâmicos

■ Técnicas de controle (linear e não-linear)

- Controle robusto: considere o sistema contínuo

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}_1(t) + \mathbf{B}_2u_2(t) \quad (9)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

com $\mathbf{u}_1$ sendo a entrada do sistema e u_2 sendo uma entrada de perturbação (escalar). O problema do controle H_∞ consiste em determinar uma lei de controle tal que seja minimizado o pior caso

$$\sup_{u_2} \min_{\mathbf{u}_1} L_\gamma(\mathbf{x}(0), \mathbf{u}_1, u_2)$$

com

$$L_\gamma(\mathbf{x}(0), \mathbf{u}_1, u_2) = |\mathbf{x}(T)|_{\mathbf{Q}_f}^2 + \int_0^T \left[|\mathbf{x}(t)|_{\mathbf{Q}}^2 + |\mathbf{u}_1(t)|^2 - \gamma^2 |u_2(t)|^2 \right] dt$$

e $\mathbf{Q}, \mathbf{Q}_f \geq \mathbf{0}$ e $\gamma > \gamma_{\min}$. A solução deste problema é dada por [3]

$$\mathbf{u}_1(t) = -\mathbf{K}(t)\mathbf{x}(t) = -\mathbf{B}_1\mathbf{P}(t)\mathbf{x}(t)$$

com $\mathbf{P}(t)$ sendo solução da seguinte equação diferencial de Riccati (EDR):

$$\dot{\mathbf{P}}(t) = -\mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \mathbf{Q} + \mathbf{P}(t)(\mathbf{B}_1\mathbf{B}_1^T - \gamma^{-2}\mathbf{B}_2\mathbf{B}_2^T)\mathbf{P}(t), \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(T) = \mathbf{Q}_f. \quad (12)$$

Controle de sistemas dinâmicos

■ Técnicas de controle (linear e não-linear)

- Controle preditivo: critério de custo (MIMO, variante no tempo). Ex.: Controle Horizonte Recedente.

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \|\mathbf{y}(k+i) - \mathbf{y}^*(k+i)\|_{\mathbf{Q}_1(k)}^2 + \sum_{i=0}^{N_3} \|\Delta \mathbf{u}(k+i)\|_{\mathbf{Q}_2(k)}^2 \quad (13)$$

com $\mathbf{Q}_1$ e $\mathbf{Q}_2$ sendo matrizes simétricas e definidas positivas, $N_3 < N_2$.
Lei de controle: determinar $\mathbf{u}^*(k), \dots, \mathbf{u}^*(k+N_3)$ tal que

$$\mathbf{u}^*(k), \dots, \mathbf{u}^*(k+N_3) = \arg \min_{\mathbf{u}(k)} J \quad (14)$$

Aplicar $\mathbf{u}^*(k)$. Realizar este procedimento a cada instante de amostragem.

Controle de sistemas dinâmicos

- Outras técnicas de controle (linear e não-linear)
 - Controle adaptativo [4]: baseado na estimação em tempo real de um modelo do processo. O controlador é atualizado ao mesmo tempo que o modelo estimado.
 - Controle por modelo interno.
 - Controle por modos deslizantes.
 - Controle baseado no conhecimento (neural, fuzzy, ...)
 - ⋮

Controle de sistemas dinâmicos

■ Estimação ótima (filtragem estocástica)

- Filtro de Kalman: estimação de estado de modelos lineares estocásticos:

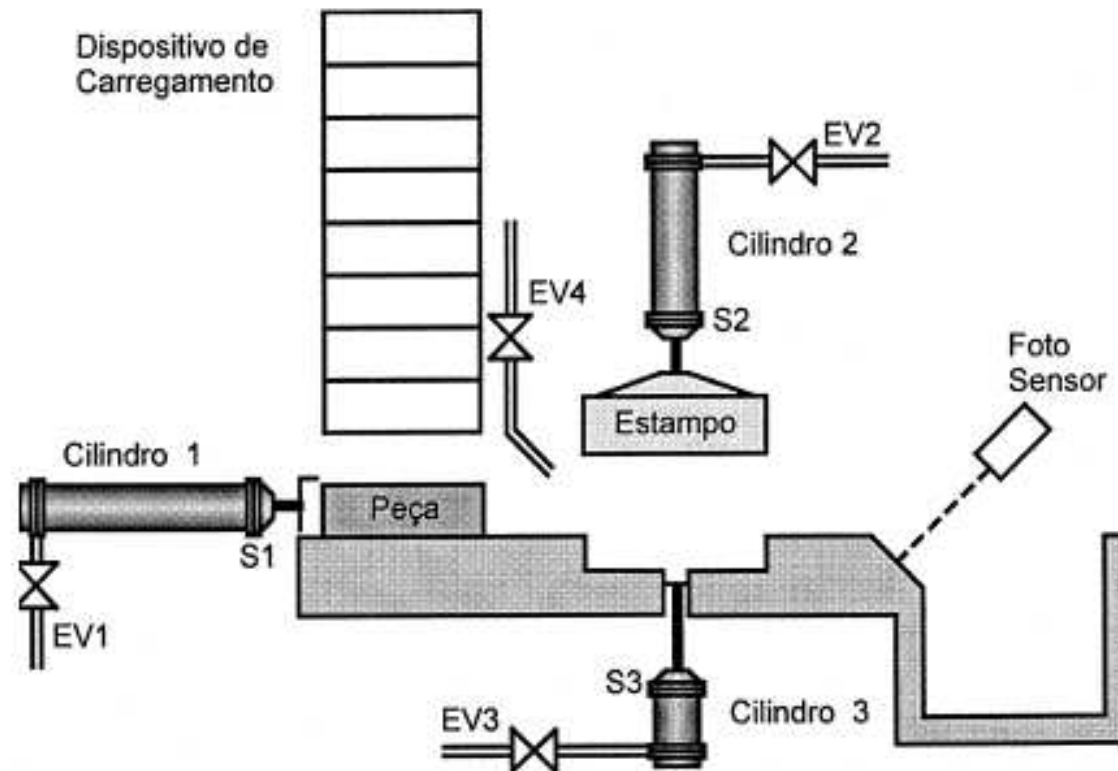
$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k+1) \quad (15)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (16)$$

com $\mathbf{w}(k) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{Q}(k))$ e $\mathbf{v}(k) \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R}(k))$ sendo processos gaussianos representando incertezas na evolução das variáveis de estado $\mathbf{x}(k)$ e na medição $\mathbf{y}(k)$, respectivamente [5][6].

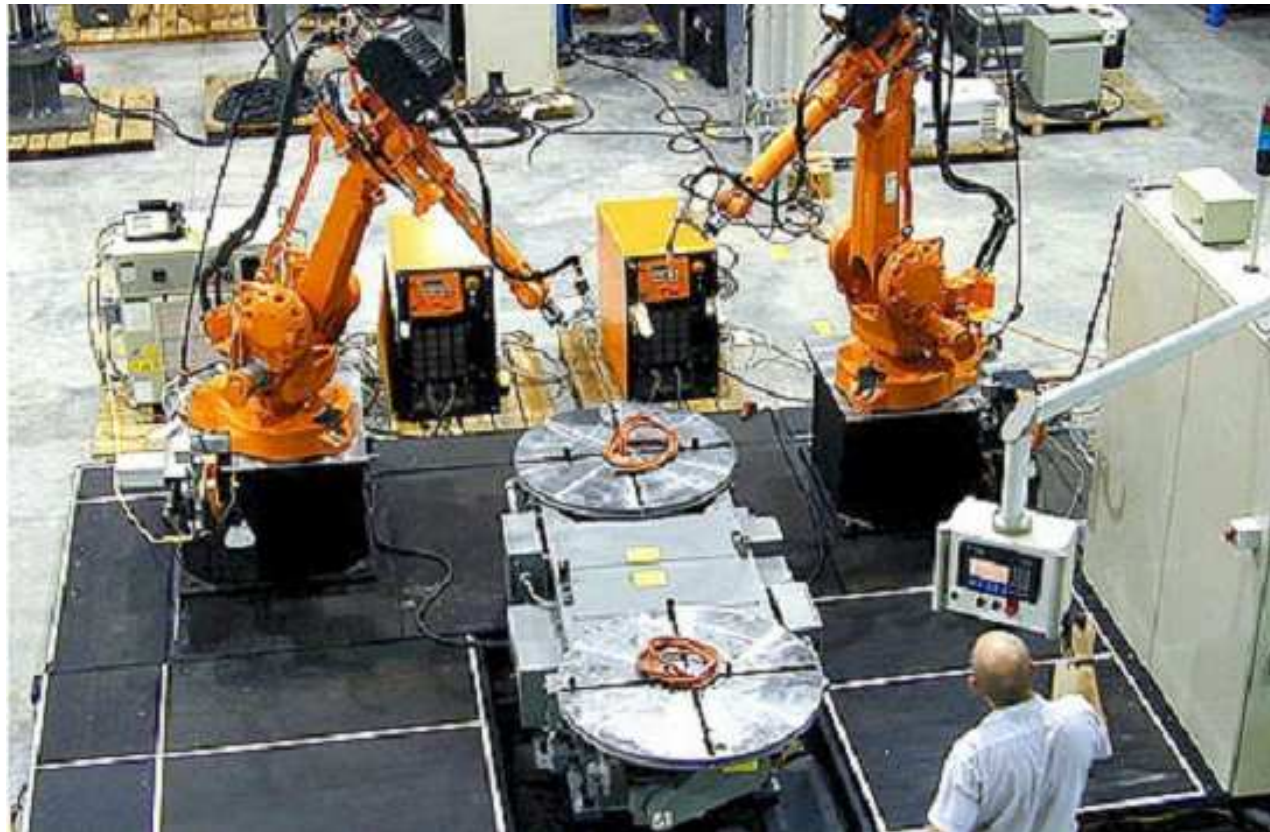
Processos de controle para automação

- Máquinas e processos (seqüência lógica bem definida, regido por eventos)



Processos de controle para automação

- Células de manufatura flexível (seqüência de eventos indefinida *a priori*)



Processos de controle para automação

■ Plantas industriais (sistemas híbridos)



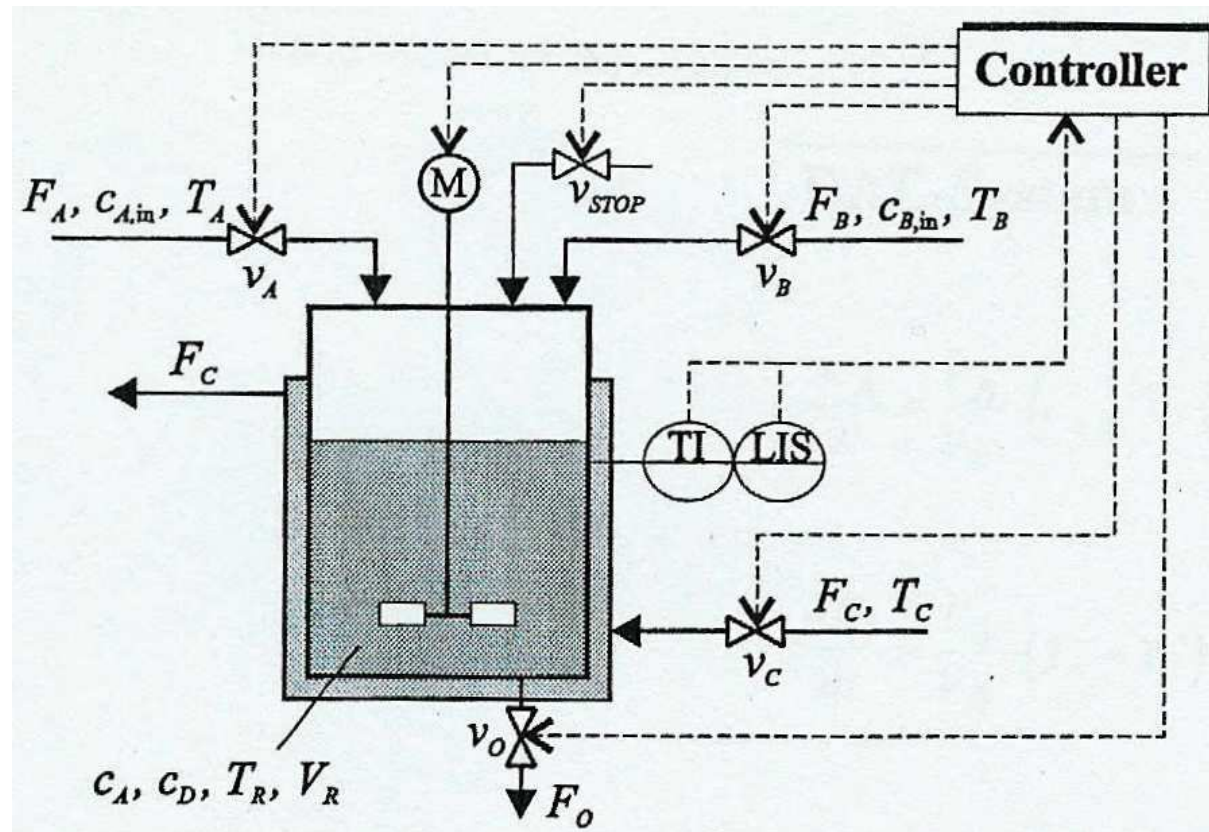
(c) forno de usinagem de aço



(d) dispositivos

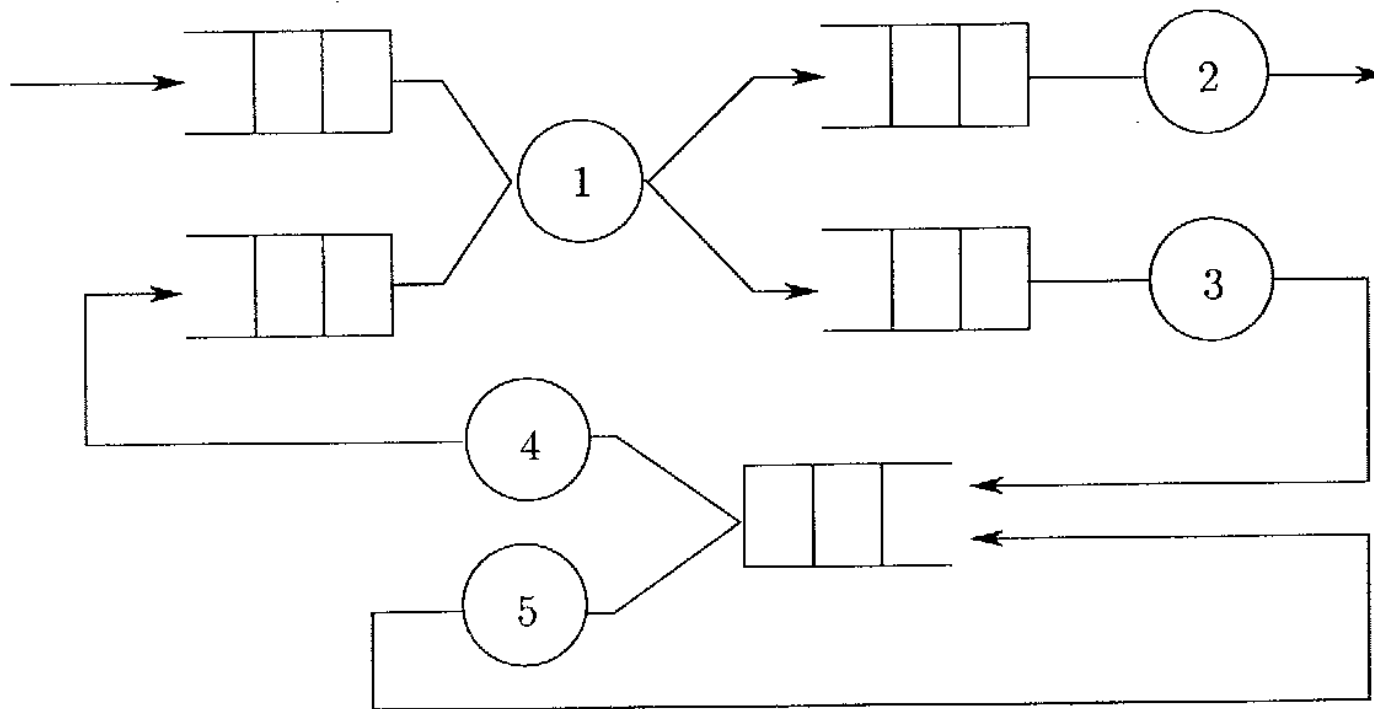
Processos de controle para automação

■ Processos químicos (sistemas híbridos) [7]



Processos de controle para automação

- Sistemas com filas (manufatura, redes de computadores, ...)

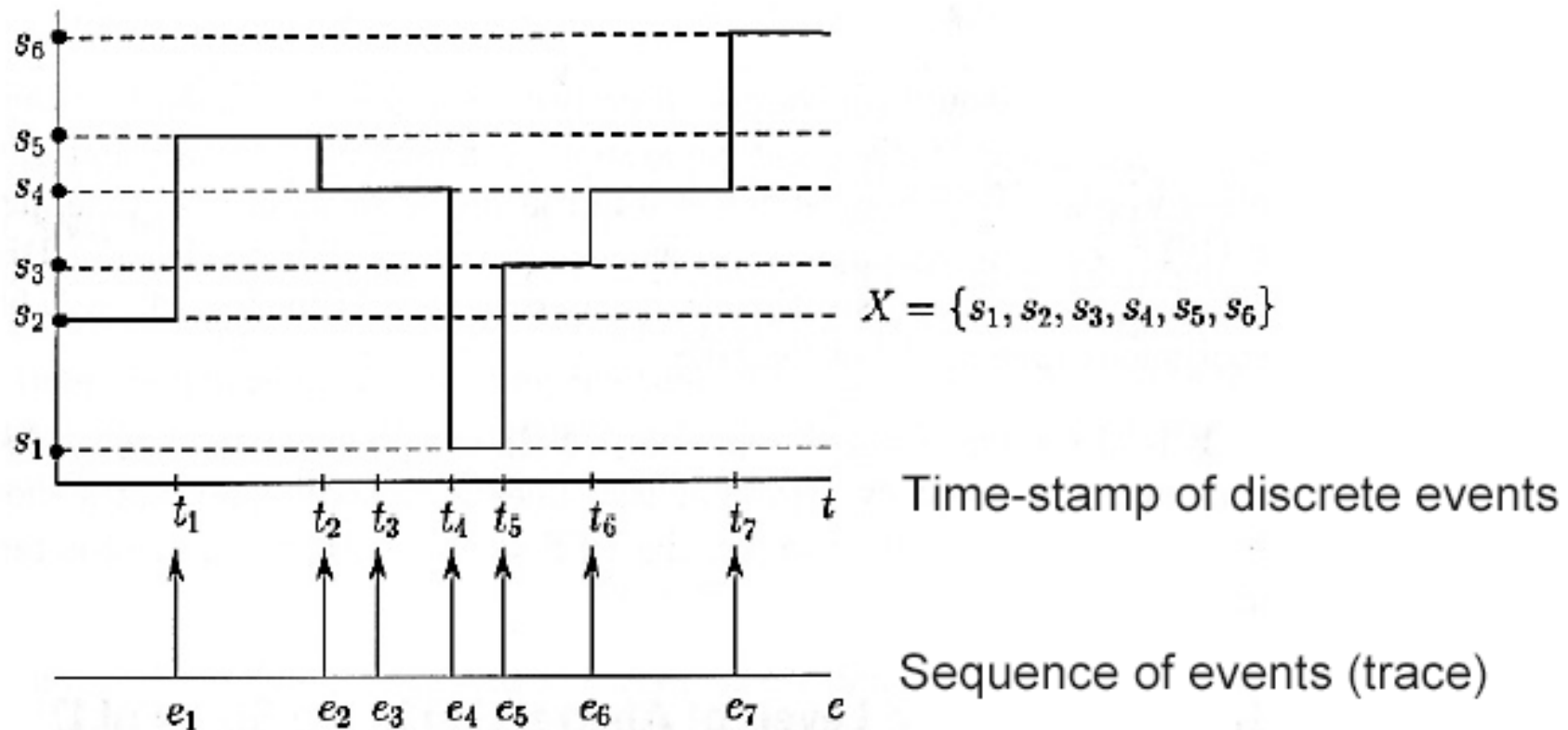


Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

- SEDs: Sistemas cuja evolução depende da ocorrência de eventos *assíncronos* com o tempo.
- Estados em SED (orientado ao problema):
 - $X = \{\text{LIGADO, DESLIGADO}\}$: possíveis estados de um interruptor;
 - $X = \{\text{VAZIO, BAIXO, ALTO, TRANSBORDANDO}\}$: possíveis estados de um tanque de fermentação.
- Eventos em SED:
 - $E = \{\text{MSG_RECEBIDA, MSG_ENVIADA}\}$: eventos de uma interface serial;
 - $E = \{c, i, f, d\}$: eventos de uma máquina de manufatura: c: chegada de material, i: iniciado procedimento de corte, f: conclusão do procedimento de corte, d: despacho do material.

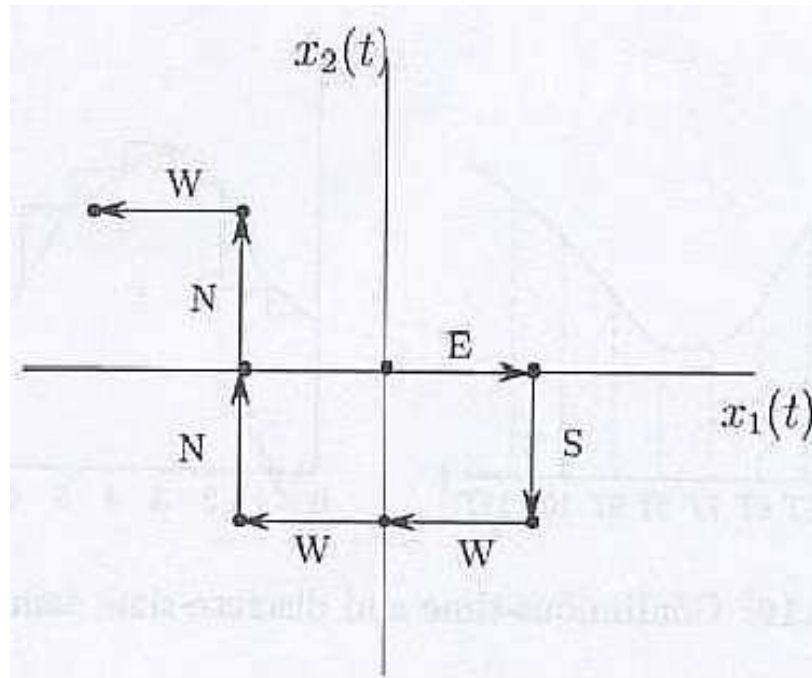
Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

- Perfil temporal (ou realização) de um SED [8]: pares (e_i, t_i) , $i = 1, 2, \dots$



Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

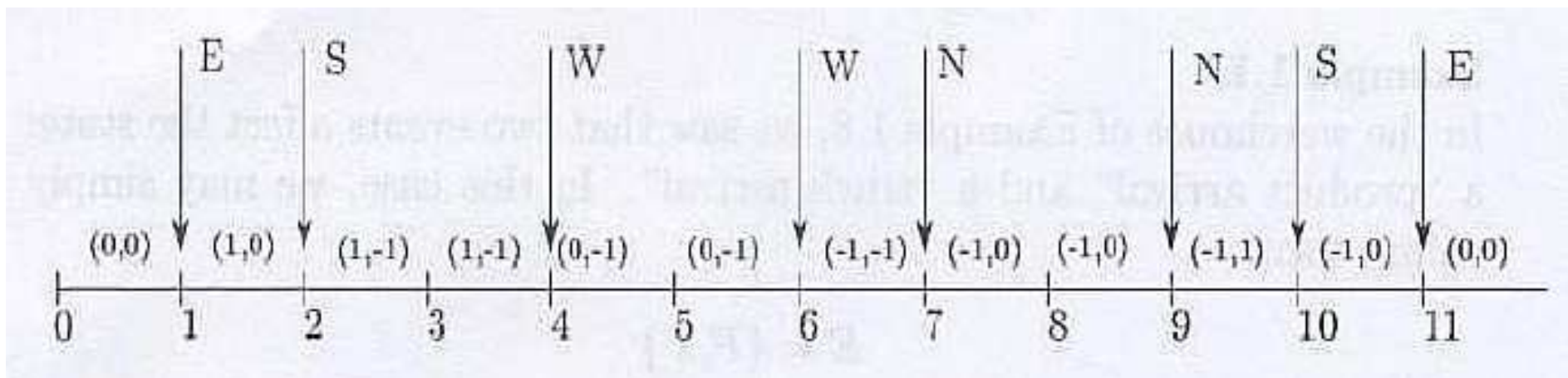
- Exemplo: passeio aleatório em 2D (random walk) [8]:
 - Estados: coordenadas $X = \{(x, y) : x, y = \dots, -1, 0, 1, \dots\}$
 - Eventos: movimentos $E = \{N, S, E, W\}$ independentes de X , *i.e.*, $\Pr\{E|X\} = \Pr\{E\}$.
 - Diagrama de fase:



Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

■ Exemplo: passeio aleatório em 2D (random walk) [8]:

- Estados: coordenadas $X = \{(x, y) : x, y = \dots, -1, 0, 1, \dots\}$
- Eventos: movimentos $E = \{N, S, E, W\}$ independentes de X , *i.e.*, $\Pr\{E|X\} = \Pr\{E\}$.
- Diagrama de eventos:



Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

- Classificação de formalismos de modelamento para SEDs [9]:

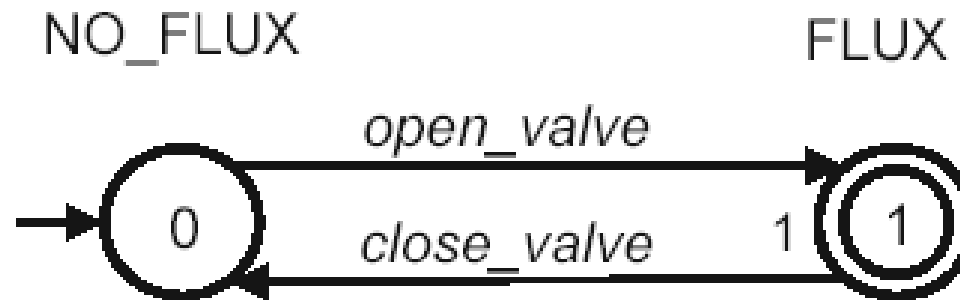
	Timed	Untimed
Logical	<i>Temporal logic -></i> <i>timed -></i>	<i>Finite State Machines;</i> <i>Petri Nets</i>
Algebraic	<i>Min-Max Algebra</i>	<i>Finitely Recursive Process;</i> <i>Comm. Sequential Process</i>
Performance	<i>Markov Chains;</i> <i>Queueing Networks;</i> <i>GSMP / Simulation</i>	

Stochastic => <= Deterministic

Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

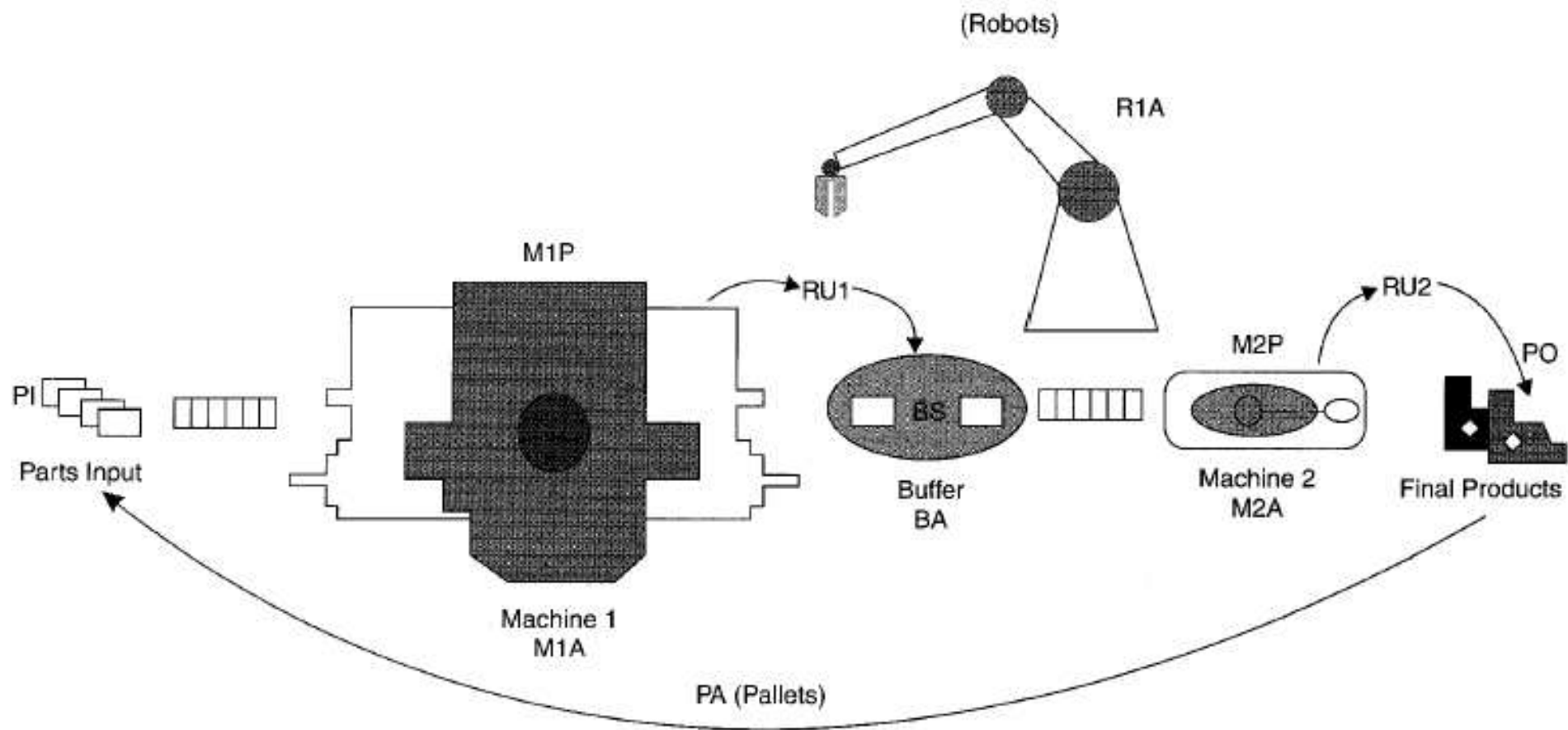
■ Modelamento por Autômatos finitos: válvula.

- Estados: $X = \{FLUX, NO_FLUX\}$
- Eventos: $E = \{open_valve, close_valve\}$



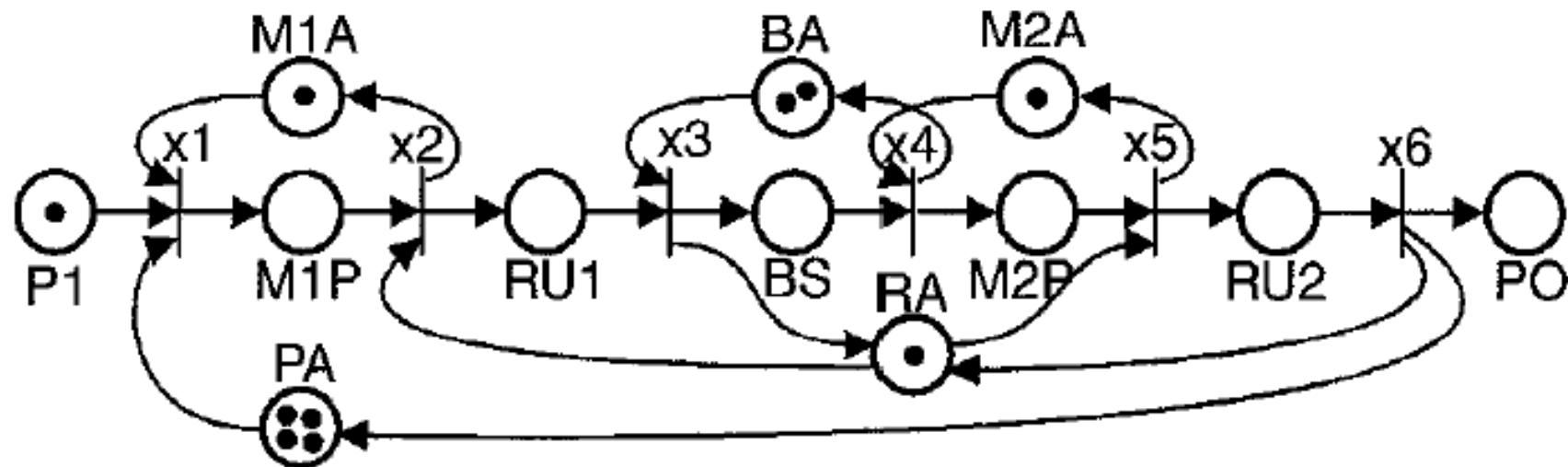
Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

- Modelamento por Redes de Petri: célula de manufatura [10].



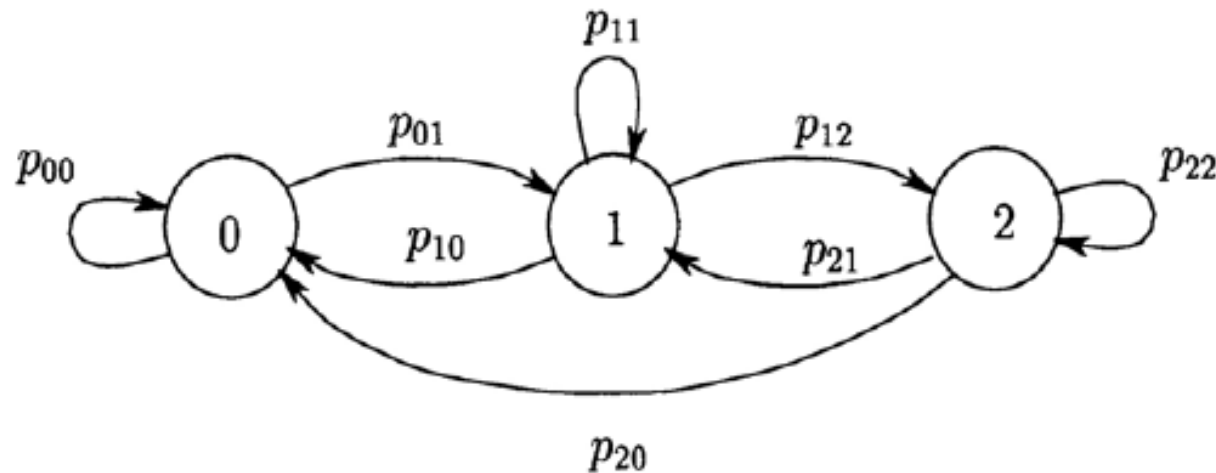
Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

- Modelamento por Redes de Petri: célula de manufatura [10].



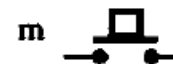
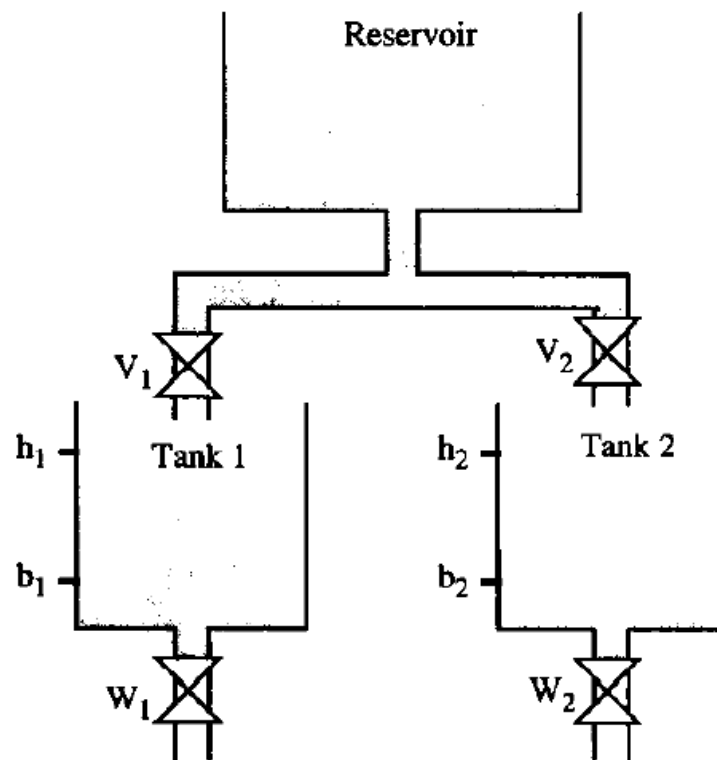
Sistemas dinâmicos a eventos discretos (SEDs)

- Modelamento por Cadeias de Markov: microcomputador com dois processadores [8].
 - Estados: X_k número de tarefas sendo executadas pelo sistema no instante k . $\dim(X_k) = 3$ e o sistema pode processar 0, 1 ou 2 tarefas no mesmo intervalo de escalonamento (*slot*).
 - Probabilidades: se no slot atual i tarefas estão em execução, p_{ij} representa a probabilidade de passar para j tarefas no próximo slot.



Tecnologia de sistemas de automação

- Especificação do algoritmo de controle por SFC (Grafcet): preenchimento de tanques.

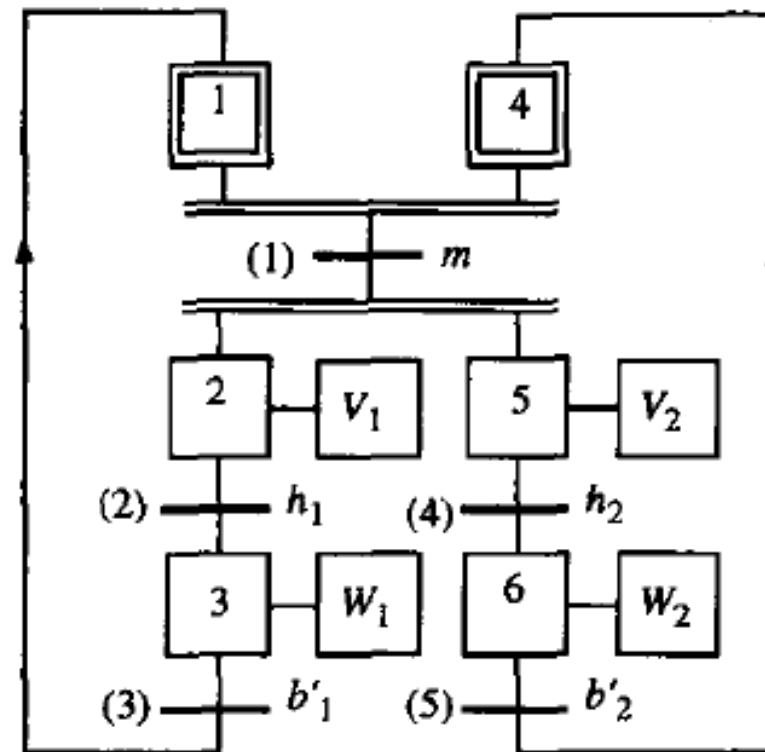


b_i or $h_i = 1$ if level higher than the line

V_i or $W_i = 1$ if valve open

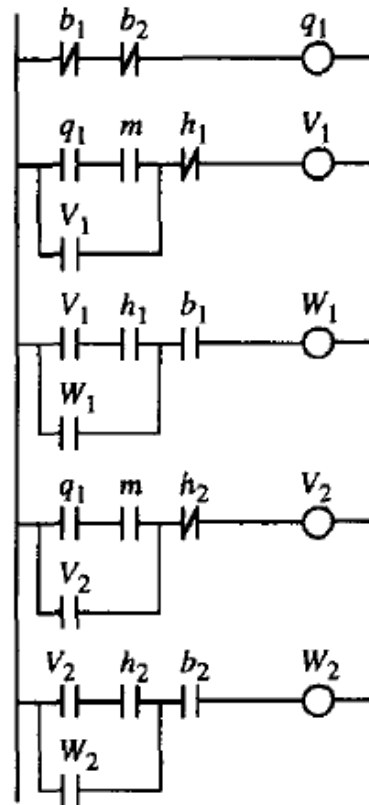
Tecnologia de sistemas de automação

- Especificação do algoritmo de controle por SFC (Grafcet): preenchimento de tanques.



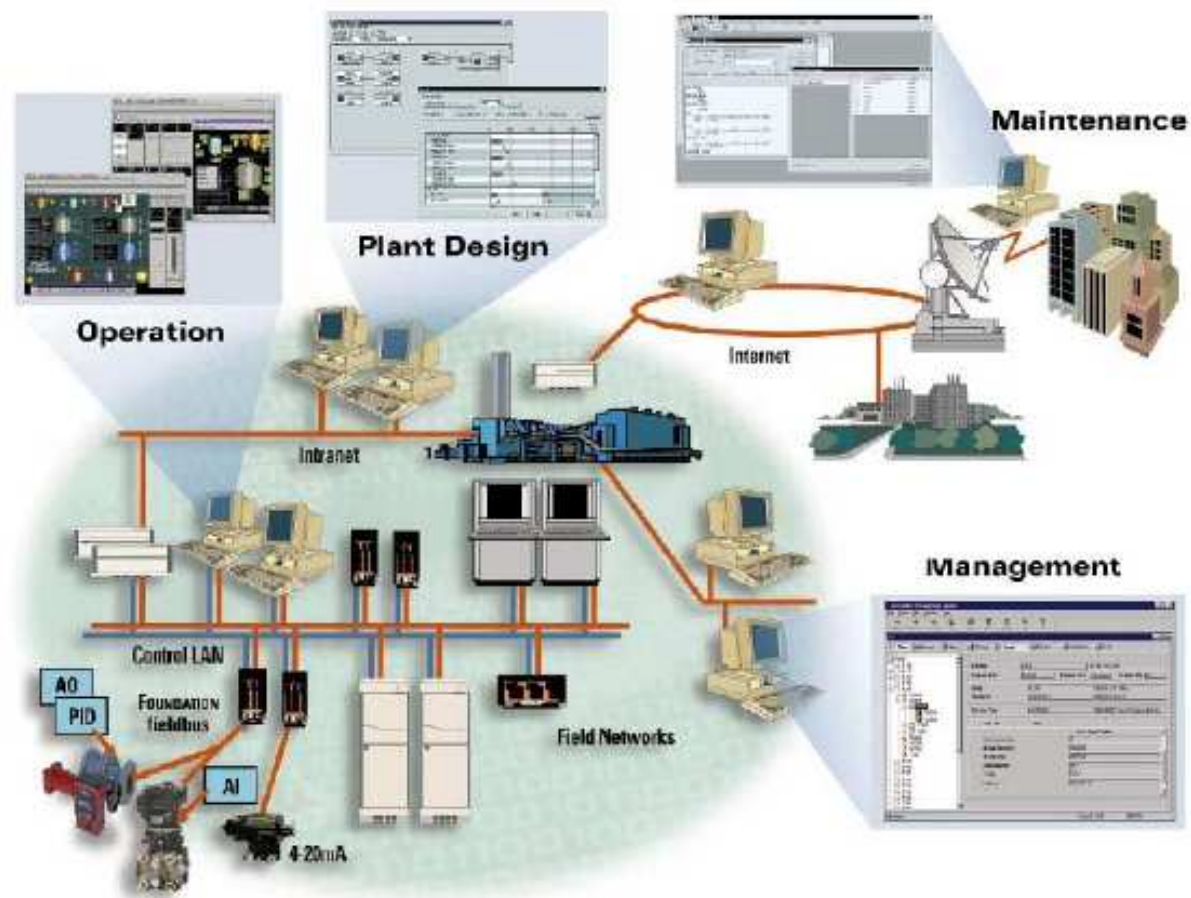
Tecnologia de sistemas de automação

- Implementação em Ladder: preenchimento de tanques.



Tecnologia de sistemas de automação

- Sistemas de automação: redes, supervisórios.



Referências

- [1] FRANKLIN, J. P. G.; WORKMAN, M. *Digital control of dynamic systems*. 3rd. ed. [S.l.]: Addison Wesley Longman, Inc., 1997.
- [2] DYER, P.; MCREYNOLDS, S. *The computation and theory of optimal control*. [S.l.]: Academic Press, 1970.
- [3] BASAR, T.; BERNHARD, P. H_{∞} *Optimal Control and Related Minimax Design Problems*. [S.l.]: Birkhauser, 1995.
- [4] ÅSTRÖM, K.; WITTENMARK, B. *Computer Controller Systems: theory and design*. 2nd. ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1990.
- [5] JAZWINSKI, A. H. *Stochastic Processes and Filtering Theory*. [S.l.]: Academic Press, 1970.
- [6] CHUI, C.; CHEN, G. *Kalman filtering with real-time applications*. 3rd. ed. [S.l.]: Springer-Verlag, 1999.
- [7] ENGELL S. KOWALEWSKI, C. S. S.; STURBERG, O. Continuous-discrete interactions in chemical processing plants. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 7, p. 1050–1068, 2000.
- [8] CASSANDRAS, C.; LAFORTUNE, S. *Introduction to Discrete Event Systems*. Englewood Cliffs, N.J.: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] HO, Y.-C. Dynamics of discrete event systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 1, p. 3–6, 1989.

- [10] TACCONI, D.; LEWIS, F. A new matrix model for discrete event systems: application to simulation. *IEEE Control Systems Magazine*, v. 17, n. 5, p. 62–71, 1997.