[3] – Dinâmica de sistemas

PRO
USP
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
EPUSP

PRO3252
Automação e Controle

Mauro de Mesquita Spinola

Marcelo Schneck de Paula Pessôa

EPUSP-PRO

As perguntas de hoje

- Como podemos avaliar o desempenho de um sistema dinâmico?
- E como podemos avaliar um sistema de controle que estamos projetando?

Esta aula

- Conceitos importantes
- Diagramas causais
- Diagramas e equações de Forrester
- Exemplo: simulação de sistemas contínuos

Conceitos importantes

❑ sistema

- Combinação de **componentes** que **interagem** e realizam um um certo objetivo
- Exs. automóvel, cidade, linha de montagem, economia, corpo humano, sistema digestivo etc.
- Jay W. Forrester estudou os sistemas industriais (1961) e depois aplicou os mesmos conceitos a sistemas sociais e econômicos

❑ abordagem sistêmica

- enfatiza as conexões entre as várias partes que constituem um todo

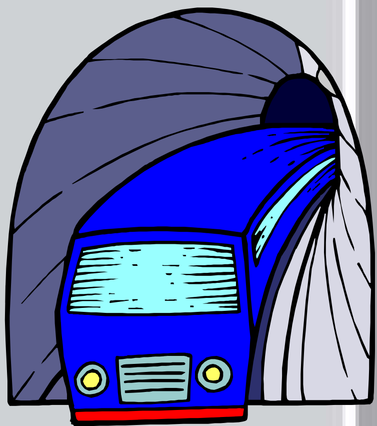
Conceitos importantes

- **planta**
  - objeto físico a ser controlado
  - Exs.: forno, avião, reator químico

- **processo**
  - operação a ser controlada
  - Exs.: químico, econômico, biológico

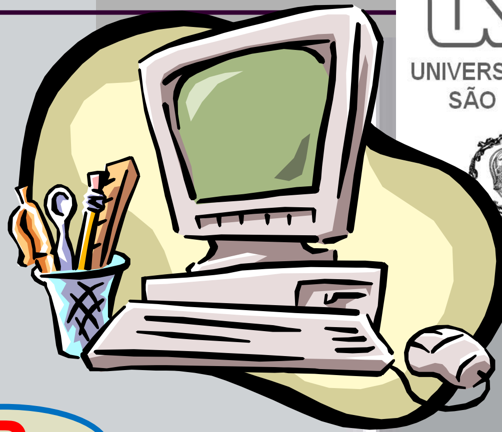
Conceitos importantes

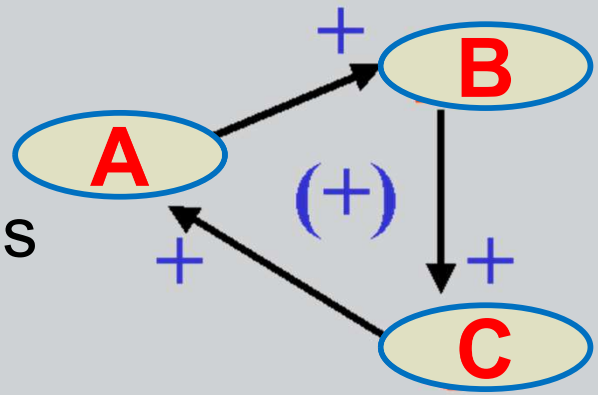
- **modelo**
  - **Representação abstrata** de um sistema real
  - **Simplificação**: a essência da construção de um modelo
  - composto por:
    - um conjunto de **definições** que permitem identificar os elementos que constituem o modelo
    - um conjunto de **relações** que especificam as interações entre os elementos que aparecem no modelo

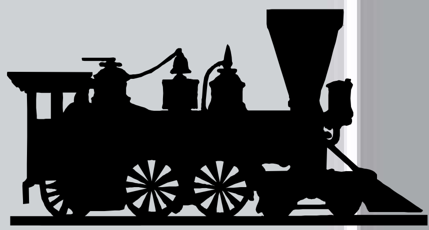


Conceitos importantes

- modelo pode ser:
  - físico
  - concepção mental
  - matemático
  - computacional
  - uma combinação destes



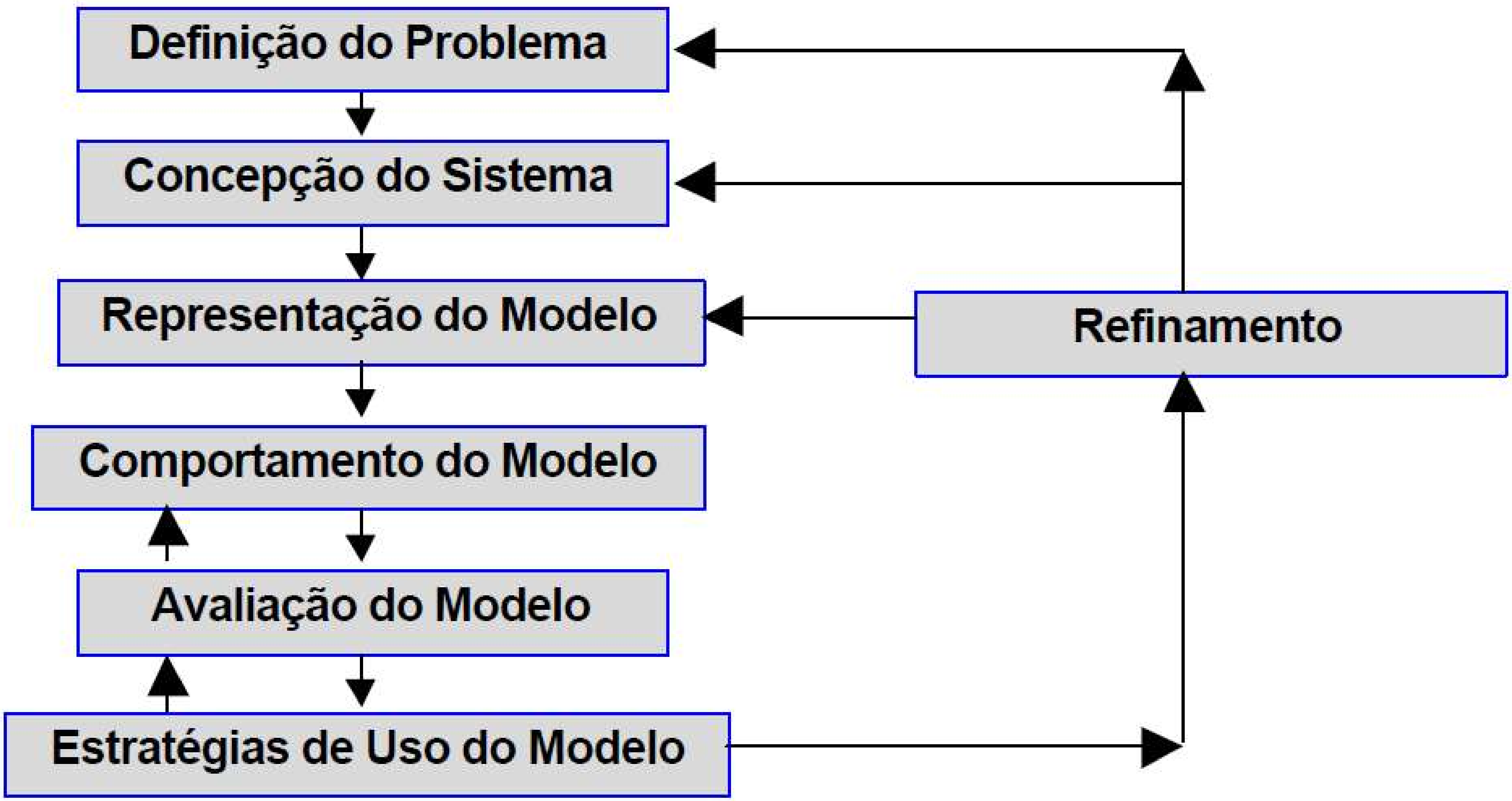




Conceitos importantes

- **simulação**
  - **imitar** alguma coisa (ex. criança brincando de casinha)
  - geralmente envolve algum tipo de **modelo** ou representação simplificada

Etapas para modelagem e simulação

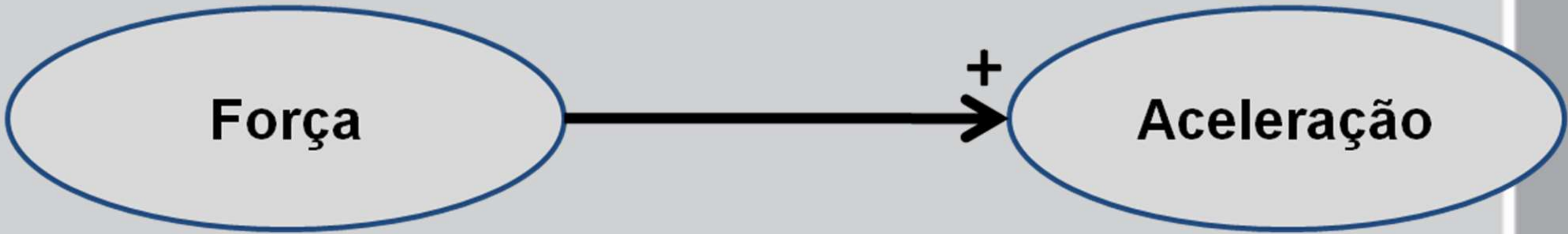


Conceitos importantes

All models are wrong, some are useful

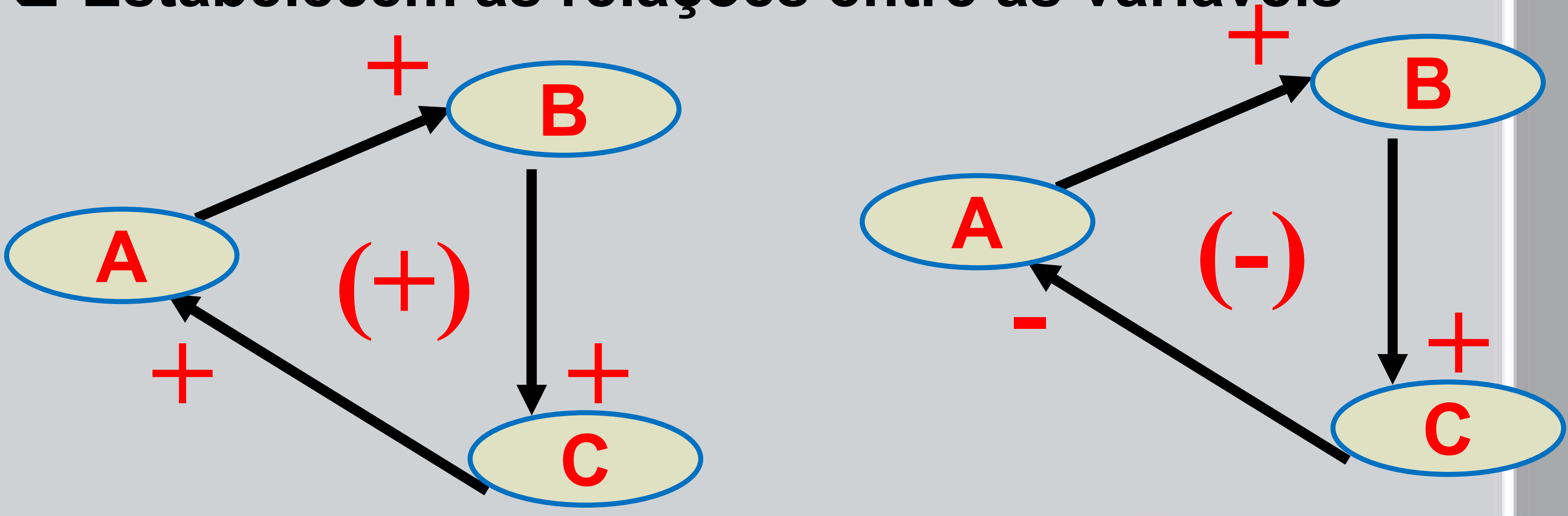
George Edward Pelham Box

Diagramas causais

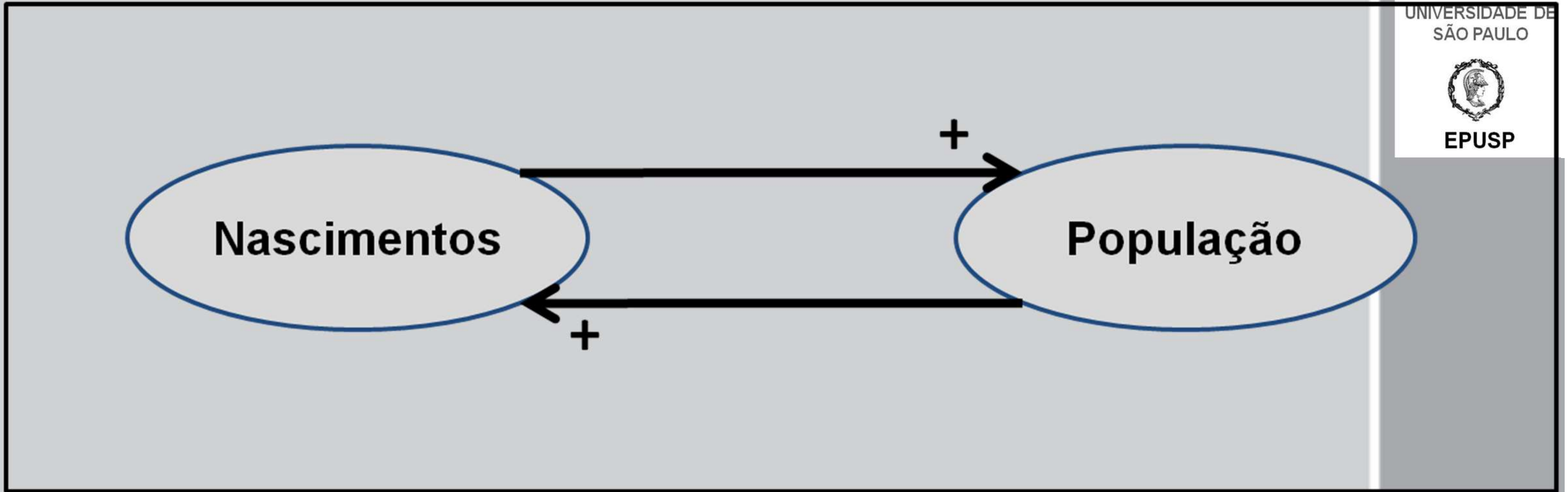


Diagramas causais

- Relação causa-efeito
- Permitem conhecer a estrutura de um sistema dinâmico
- Especificam as variáveis do sistema
- Estabelecem as relações entre as variáveis



Diagramas causais



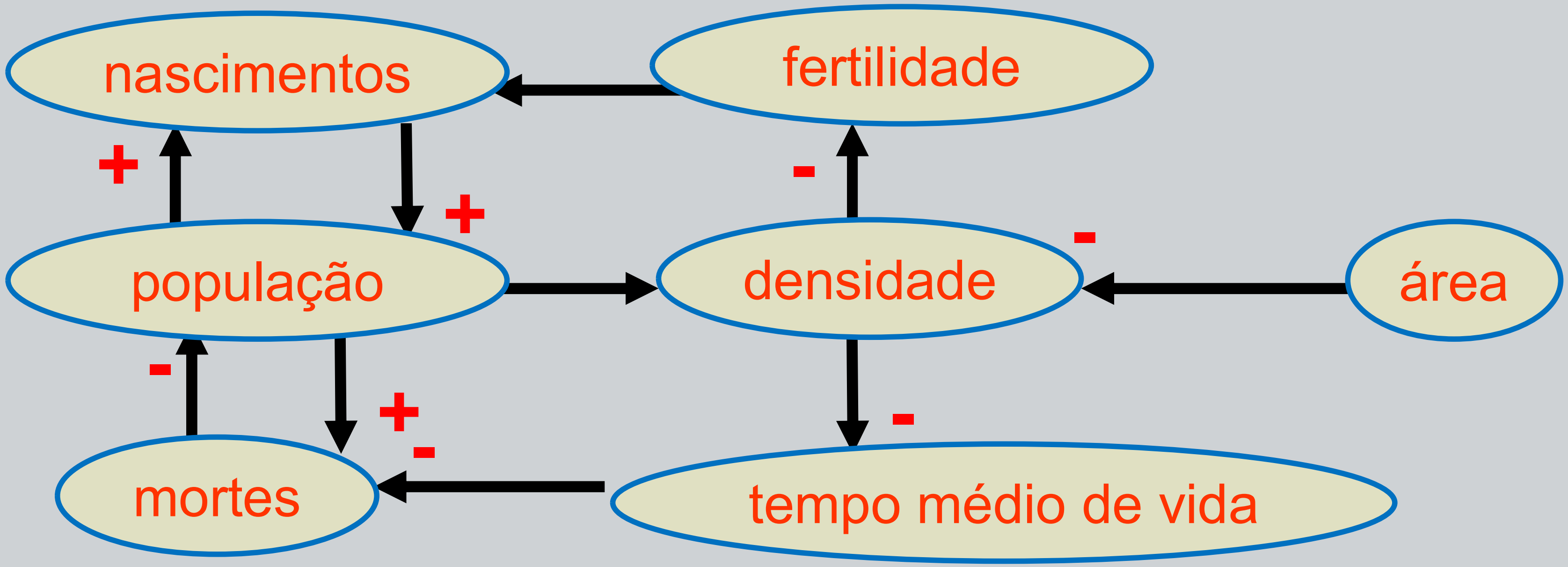
- **exemplos**
  - crescimento de uma população

Diagramas causais

❑ **exemplos**

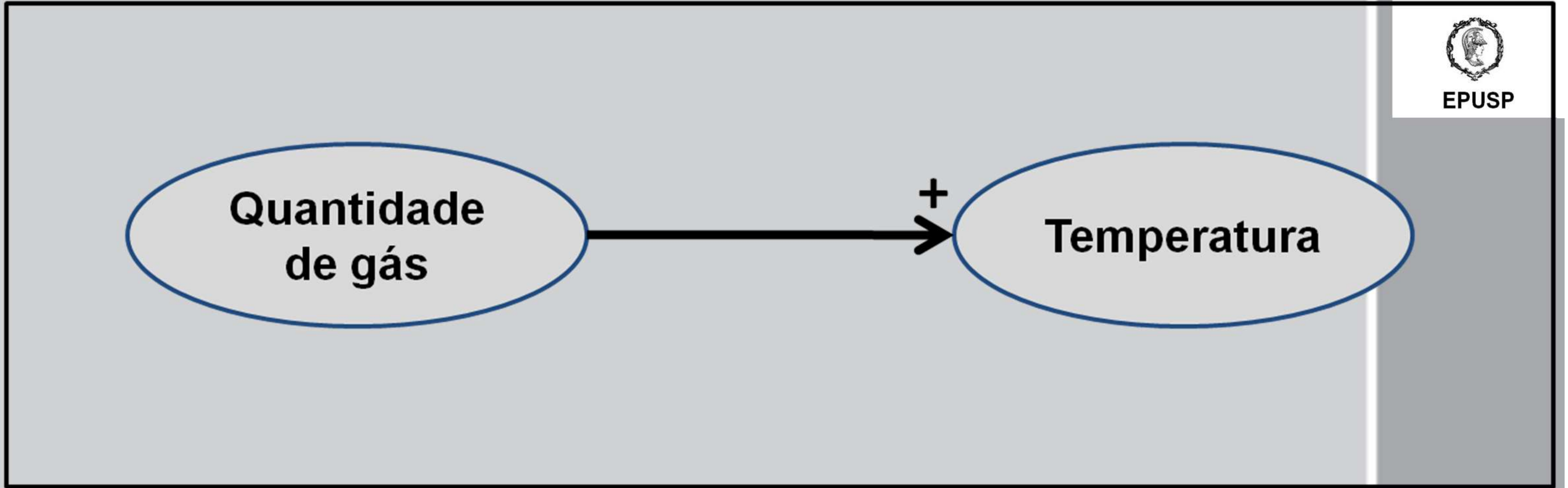
- crescimento e regulação de uma população

Diagramas causais



- **exemplos**
  - crescimento e regulação de uma população

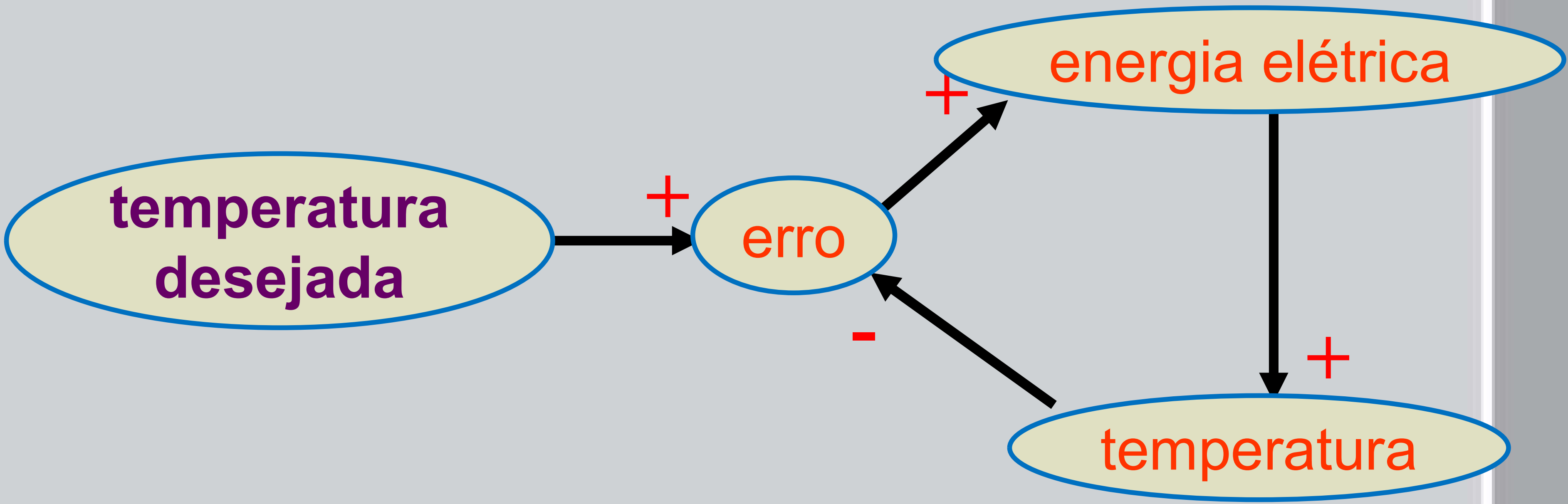
Malha aberta e fechada



- Malha aberta, exemplo: forno de um fogão doméstico

Malha aberta e fechada

- Malha fechada, exemplo: forno de uma padaria



Exercício:

- Observar o diagrama causal e explicar o fenômeno

- Tempo: 5 minutos

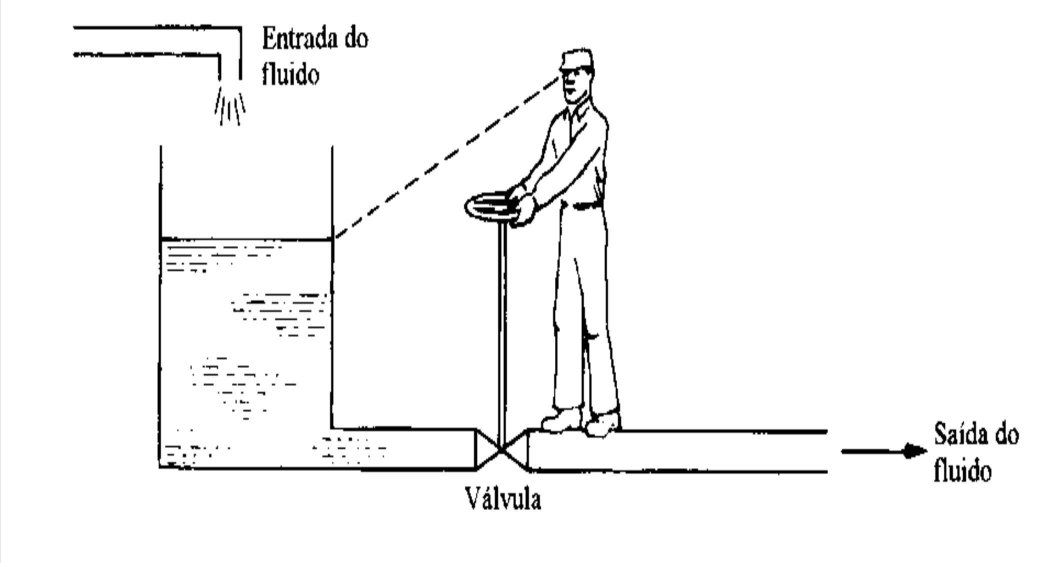
Exercício: ler diagramas causais (Prof. João Arantes)

Exercicio

- **Um sargento parava todo dia às 9 horas da manhã em uma joalheria e acertava o seu relógio com um cronômetro colocado na janela. Certo dia, o sargento entrou na loja e indagou o seu proprietário acerca da precisão do cronômetro. "Este cronômetro está de acordo com a hora do observatório nacional"? "Não", respondeu o proprietário. "Eu o acerto todos os dias às 5 horas da tarde com o tiro do canhão do forte". E continuou: "Diga-me, sargento, por que o senhor para todos os dias em frente a minha loja e observa o seu relógio". O sargento então respondeu: "Eu acerto o meu relógio com o seu cronômetro, pois sou eu quem dispara o canhão do forte".**
  a) O sistema descrito acima é de malha aberta ou fechada?
  b) Se o cronômetro da joalheria atrasa 1 minuto a cada 24 horas e o relógio do sargento atrasa 1 minuto a cada 8 horas, qual é o erro entre a hora que o canhão deveria ser disparado e a hora em que é efetivamente disparado após 15 dias? Considere como instante inicial aquele em que o sargento dispara um tiro de canhão pela primeira vez.

Exercício

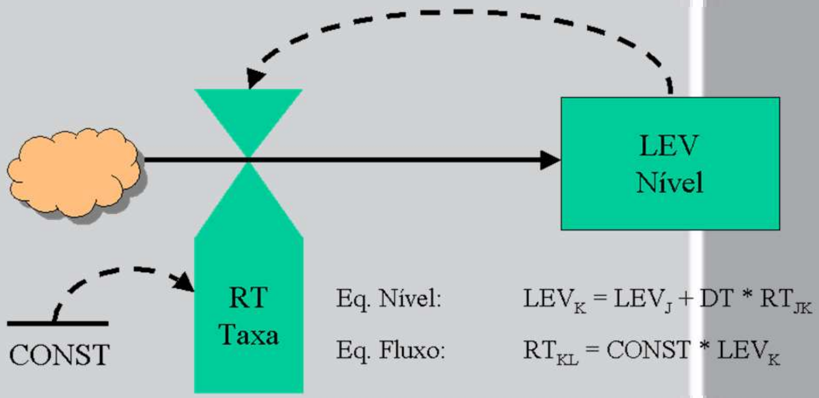
- Sistema de controle manual. Sistemas de controle usavam no passado um operador humano como parte do sistema de controle de malha fechada. Desenhe o diagrama de blocos do sistema mostrado abaixo.



Diagramas e equações de Forrester

❑ Diagramas de Forrester

- variável de **NÍVEL** (variável de estado)
  - Exs. nível, temperatura, número de carros num estacionamento
- variável de **FLUXO** (taxa, variação de algum nível no tempo)
  - Exs.vazão, taxa de entrada de automóveis num estacionamento



Diagramas e equações de Forrester

❑ Símbolos

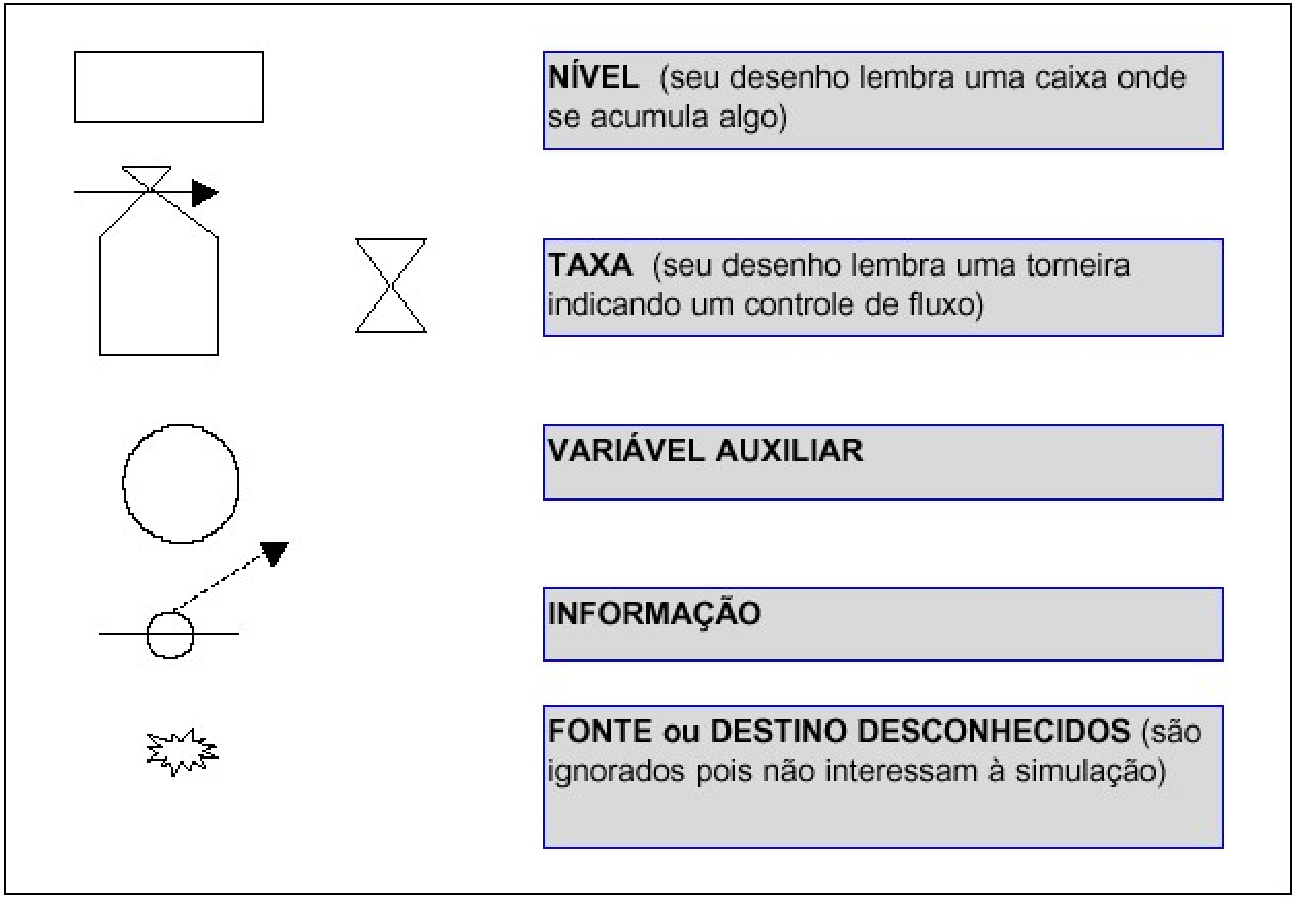


Figura 4 – Símbolos utilizados nos Diagramas de Forrester.

Diagramas e equações de Forrester

- Exemplo: crescimento de uma cidade e seus efeitos na construção civil

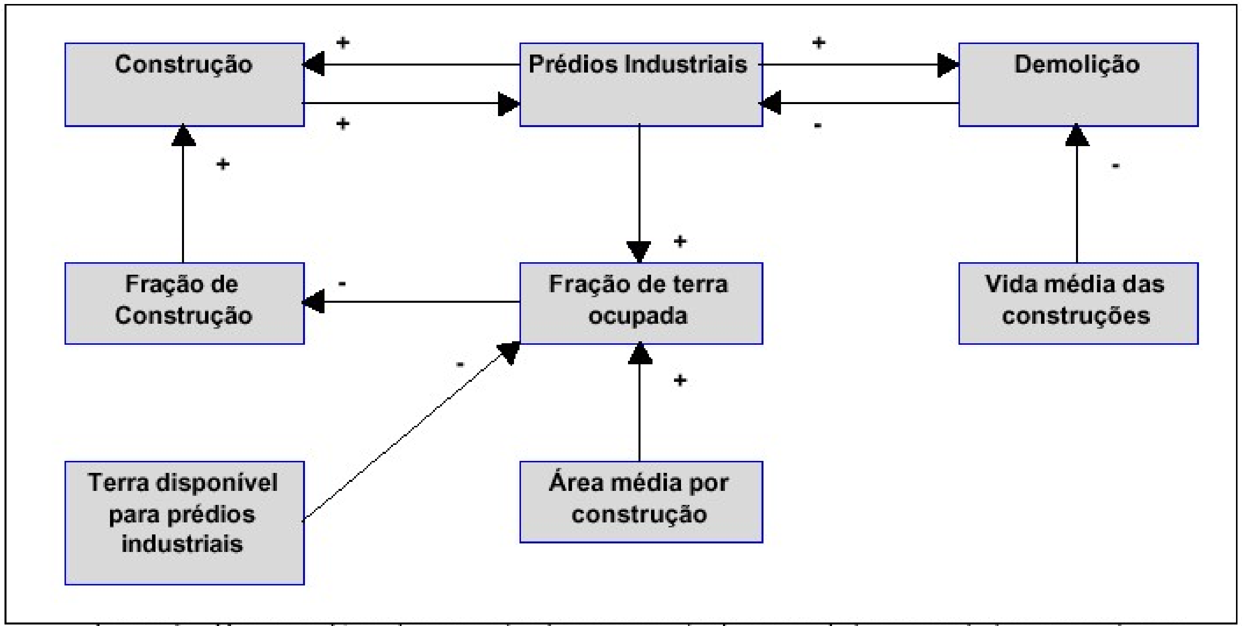


Figura 5 – Diagrama Causal representando crescimento de uma cidade e seus efeitos na construção civil.

Diagramas e equações de Forrester

- Exemplo: crescimento de uma cidade e seus efeitos na construção civil

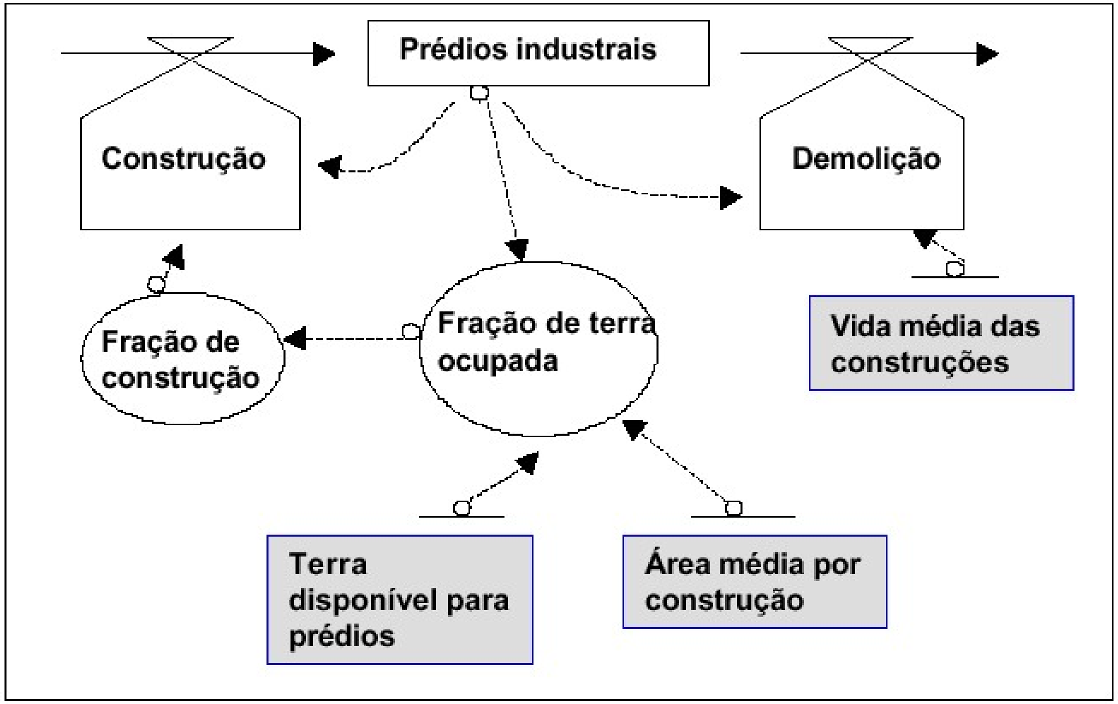


Figura 6 – Diagrama de Forrester para o crescimento da cidade.

Forno de padaria

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

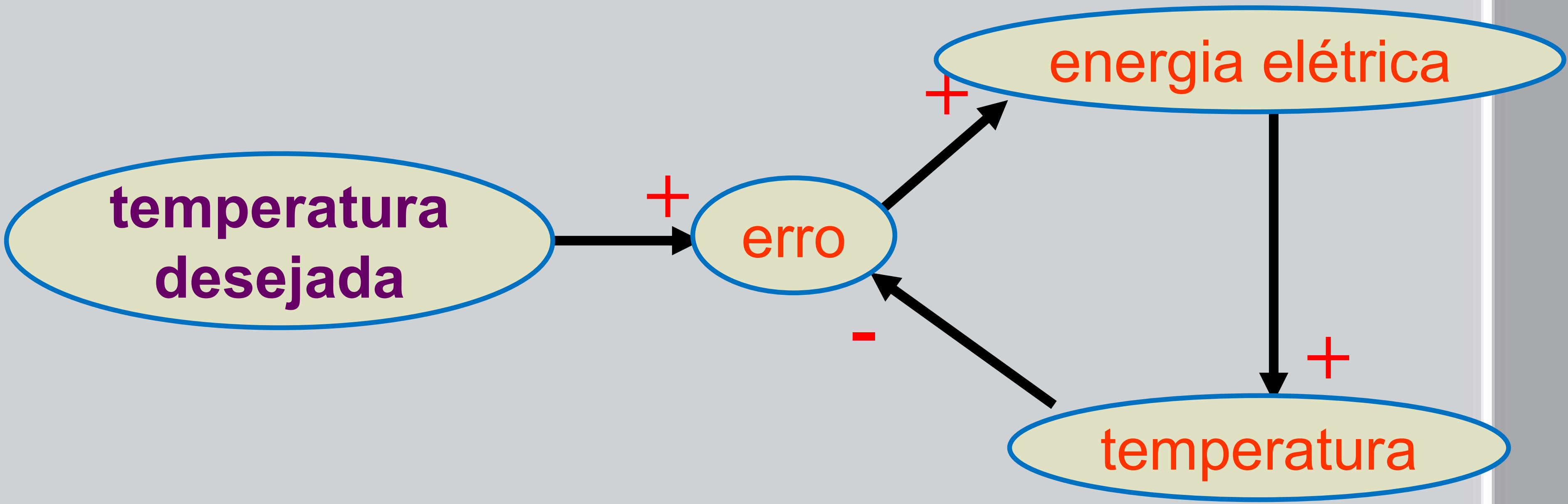
EPUSP

Controle de temperatura:

- Fazer o diagrama causal do fenômeno (Fig.3.6)
- Fazer o diagrama de Forrester (Fig.3.8)
- Escrever as equações de Forrester
- Simular em planilha Excel
- Simulação no Vensim

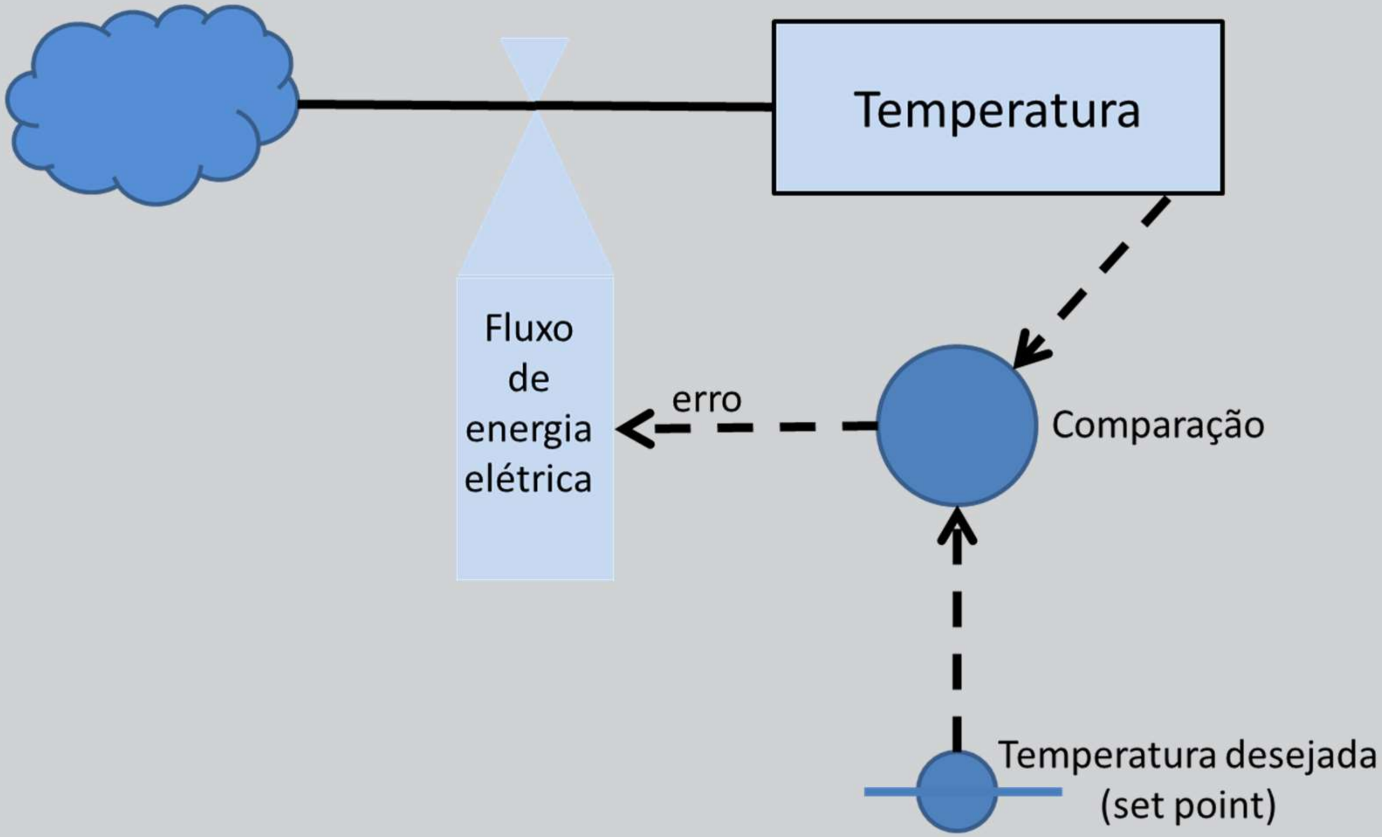
Forno de padaria

- Diagrama causal



Forno de padaria

❑ Diagrama de Forrester

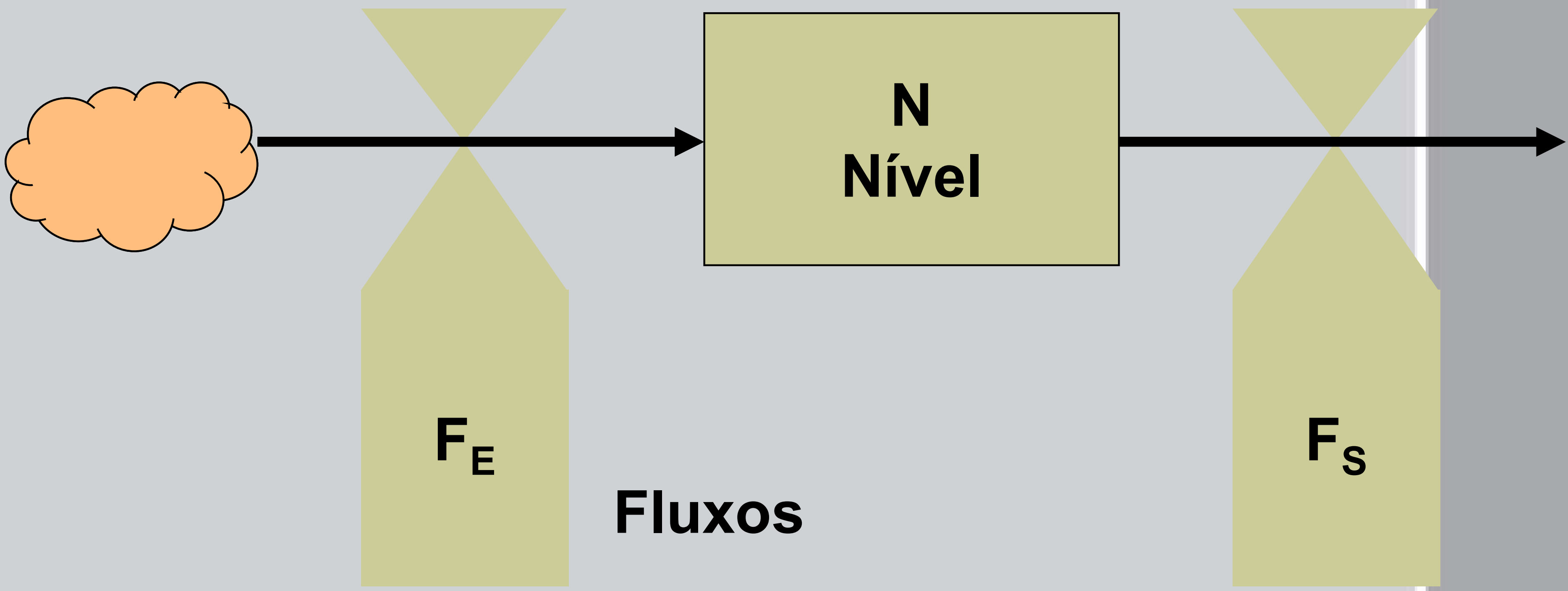


Exercício

- **Usando a notação, fazer o diagrama de Forrester do crescimento populacional**

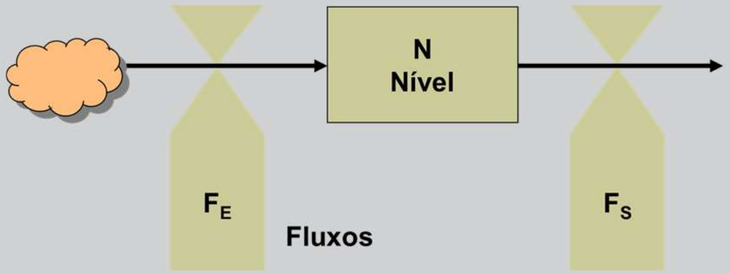
- **Tempo: 5 minutos**

Diagramas e equações de Forrester



Diagramas e equações de Forrester

- Equações do modelo



$$\frac{dN(t)}{dt} = F_E(t) - F_S(t)$$

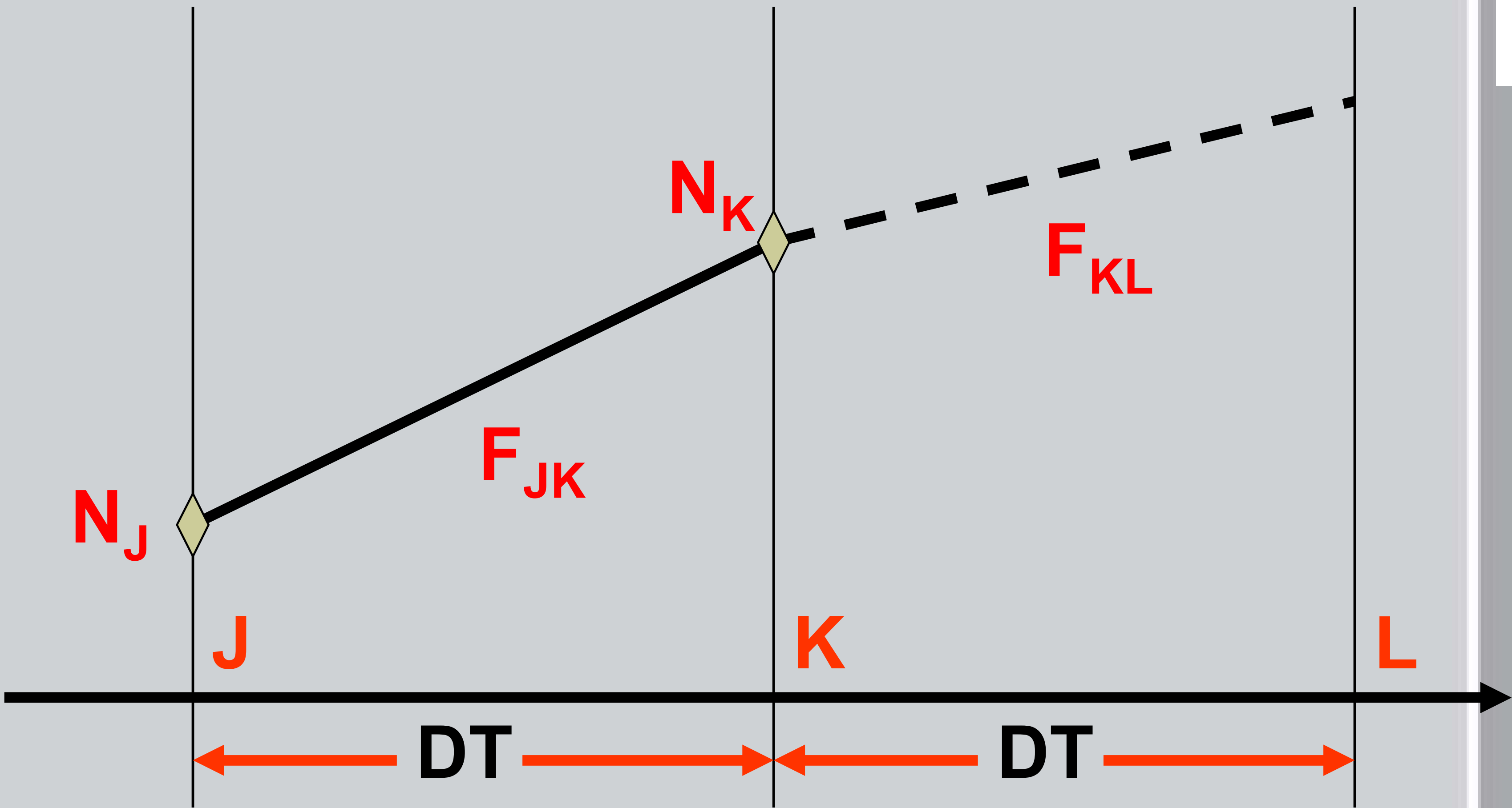
N(t): variável de nível

$F_E(t)$ e $F_S(t)$: variáveis de fluxo

$$N(t + DT) = N(t) + DT * [F_E(t) - F_S(t)]$$

(integração numérica)

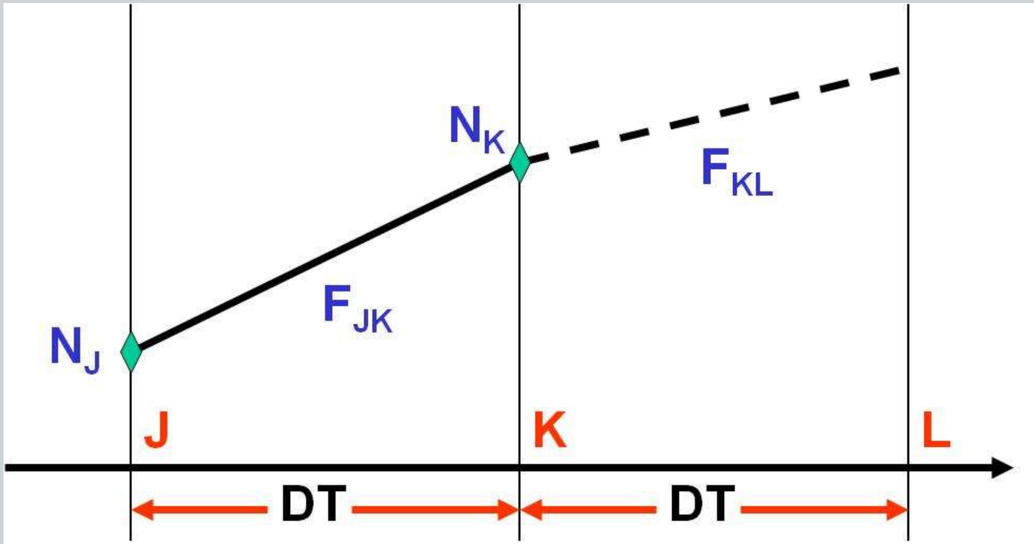
Diagramas e equações de Forrester



Diagramas e equações de Forrester

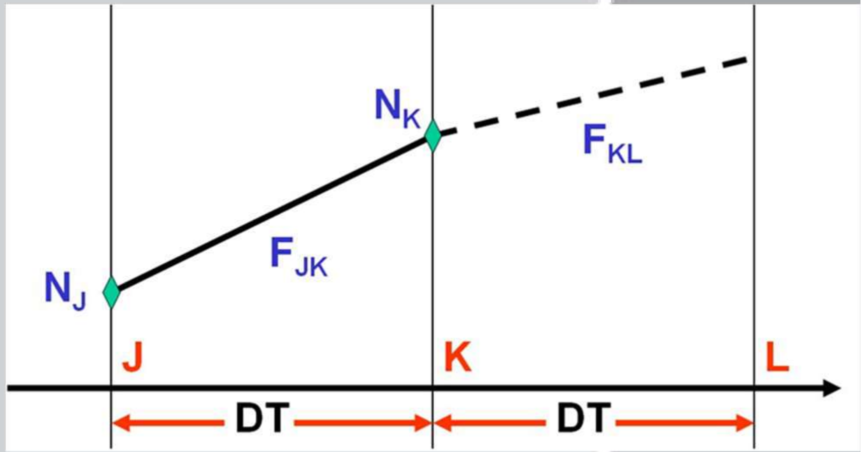
- $N_K = N_J + F_{JK} * DT$ (Equação de nível)

- $F_{KL} = f\ (N_K, N_J)$ (Equação de fluxo)



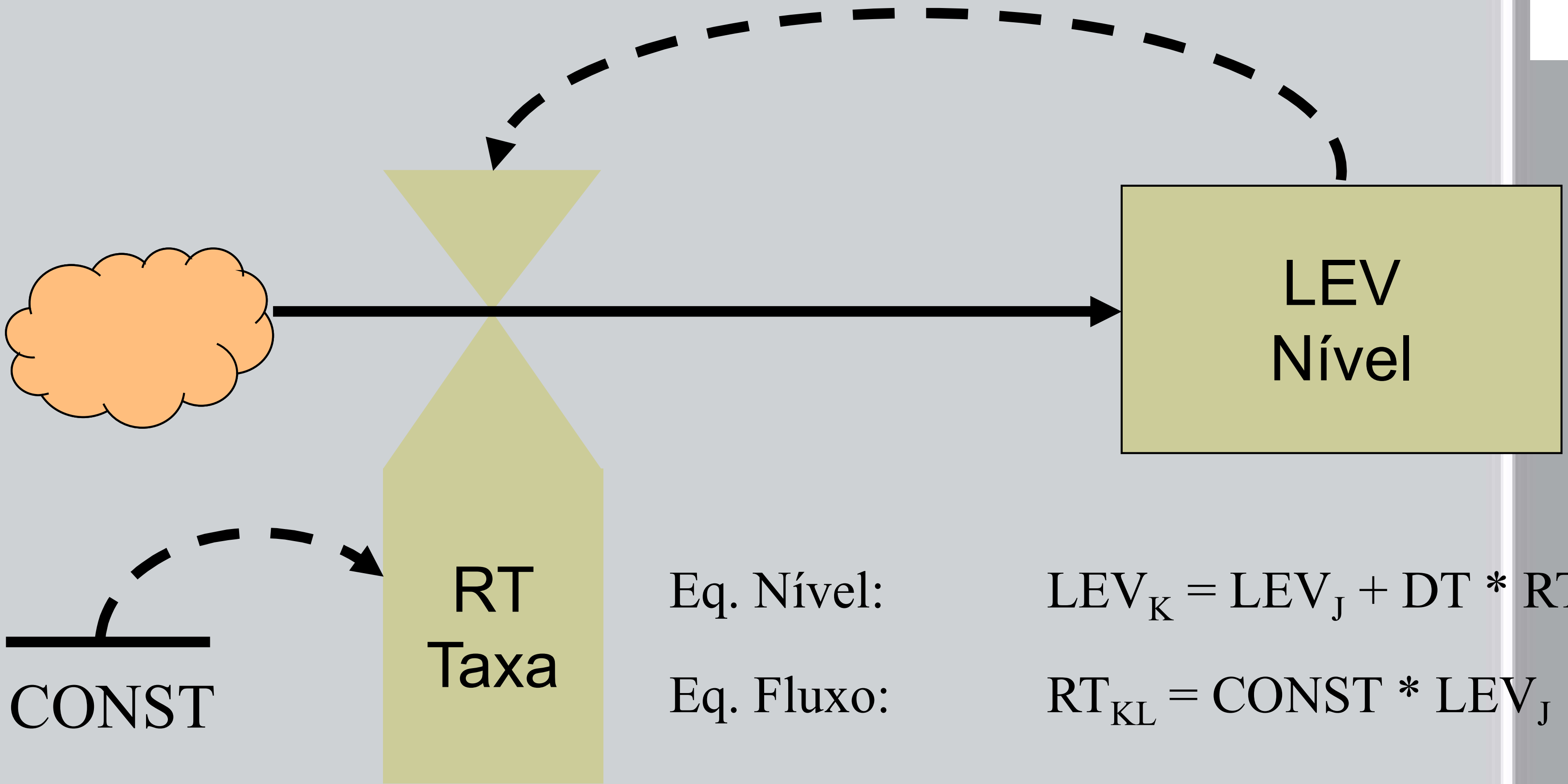
Forno de padaria

- Equações de Forrester
  - Equação de nível
    - TEMP.K = TEMP.J + FLUX.JK * DT
  - Equação de fluxo
    - FLUX.KL = ERRO.K * CT
  - Equações auxiliares
    - ERRO.K = SP - TEMP.K



Diagramas e equações de Forrester

- Exemplo: Realimentação positiva



Eq. Nível: $LEV_K = LEV_J + DT * RT_{JK}$

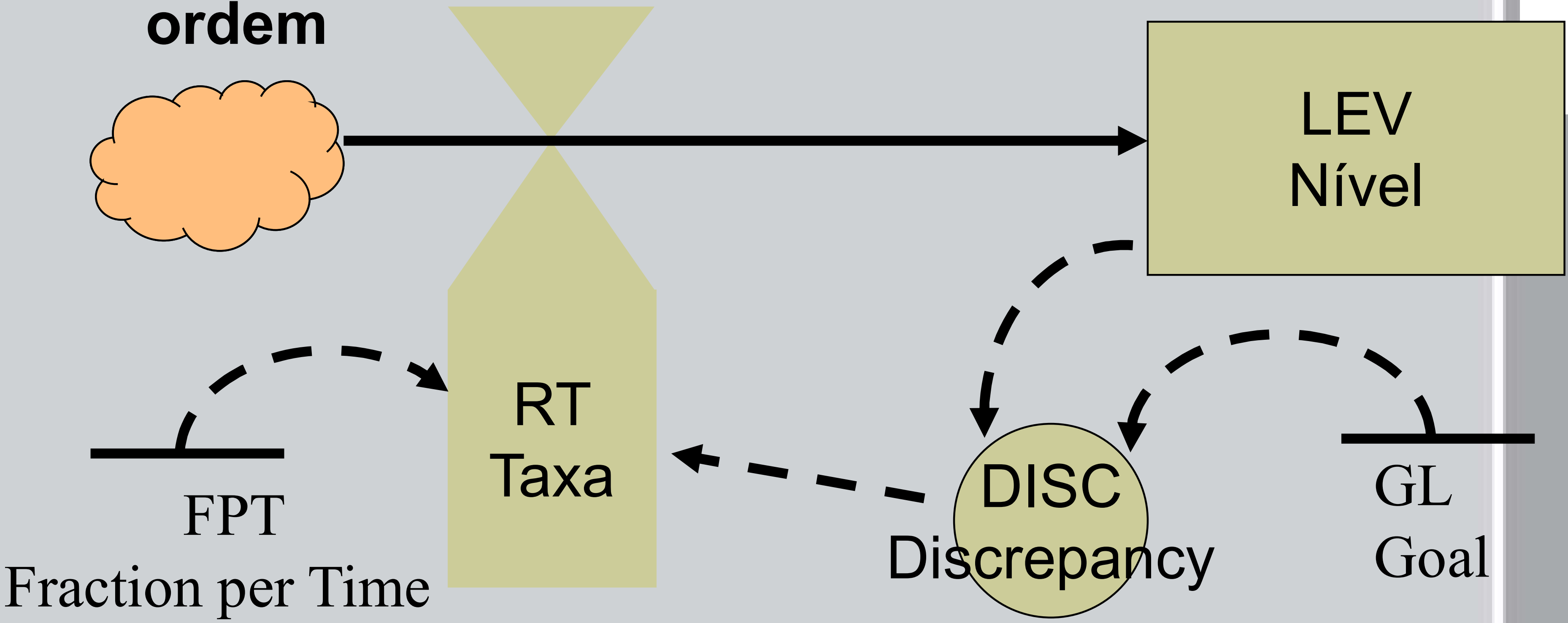
Eq. Fluxo: $RT_{KL} = CONST * LEV_J$

Simulação

- Exemplo: Realimentação positiva

Diagramas e equações de Forrester

- Exemplo: Realimentação negativa de primeira ordem



Eq. Nível: $LEV_K = LEV_J + DT * RT_{JK}$

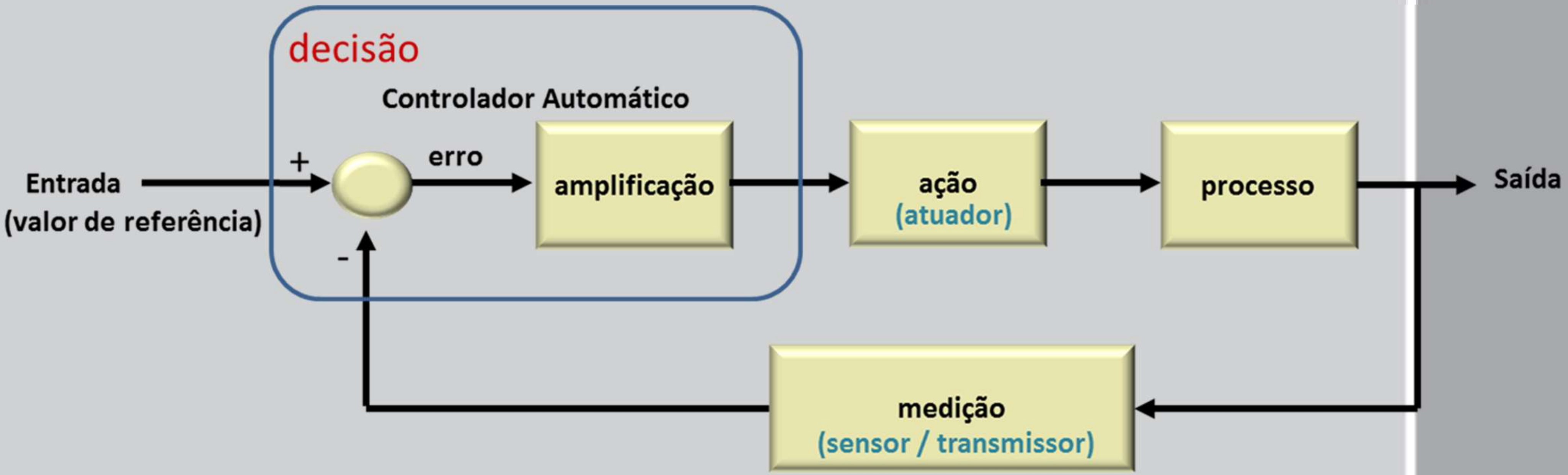
Eq. Fluxo: $RT_{JK} = FTP * DISC_J$

$DISC_J = GL - LEV_J$

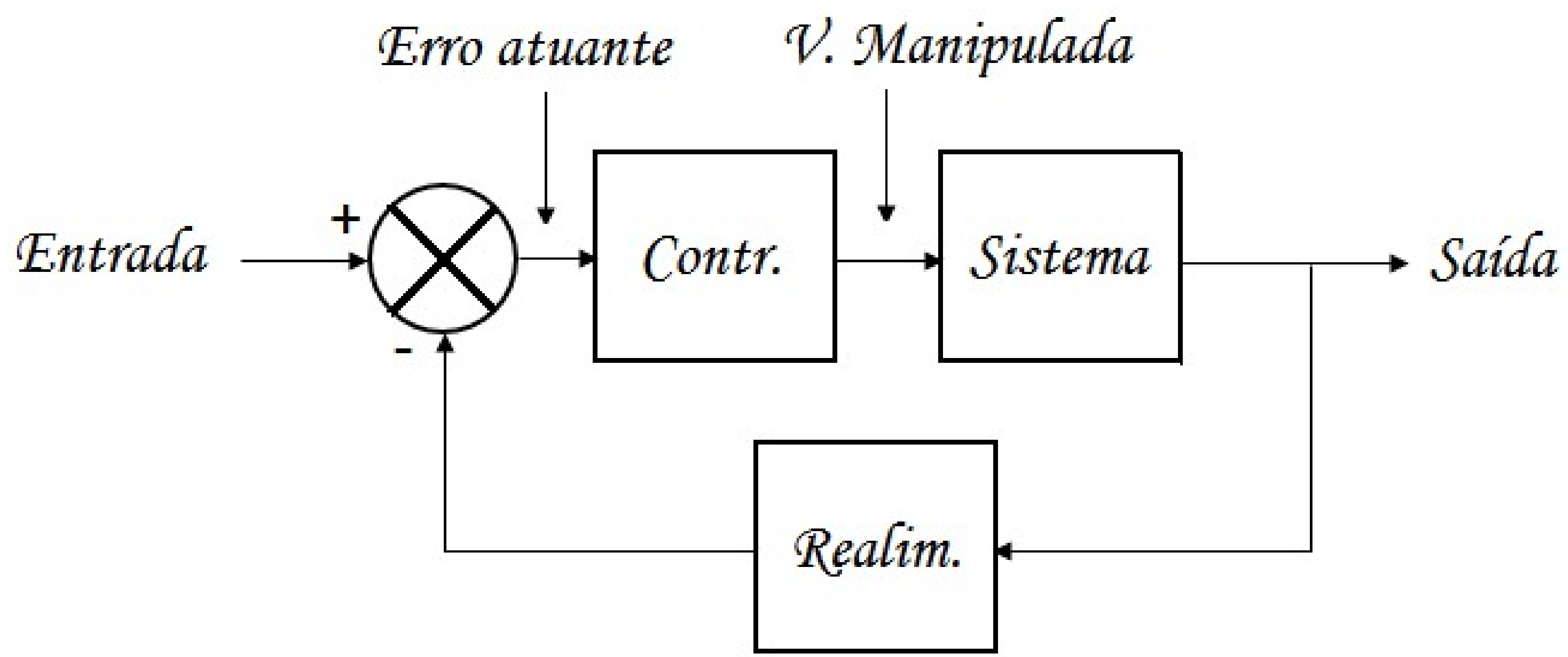
Simulação

- Exemplo: Realimentação negativa de primeira ordem

Controladores industriais



Controladores industriais

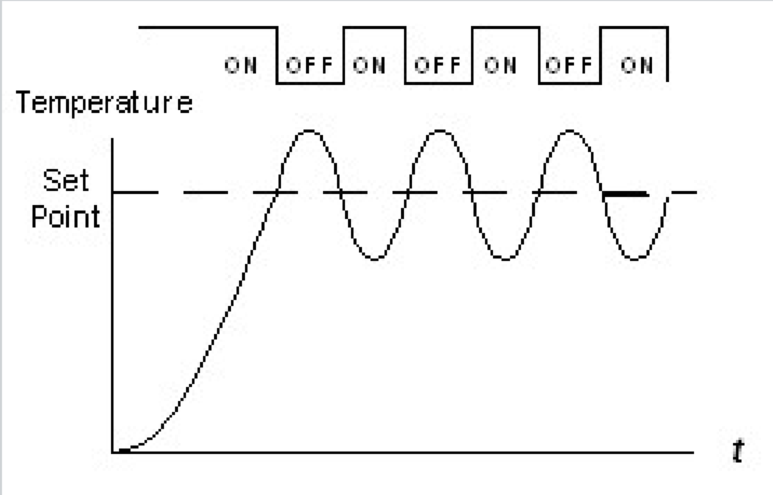


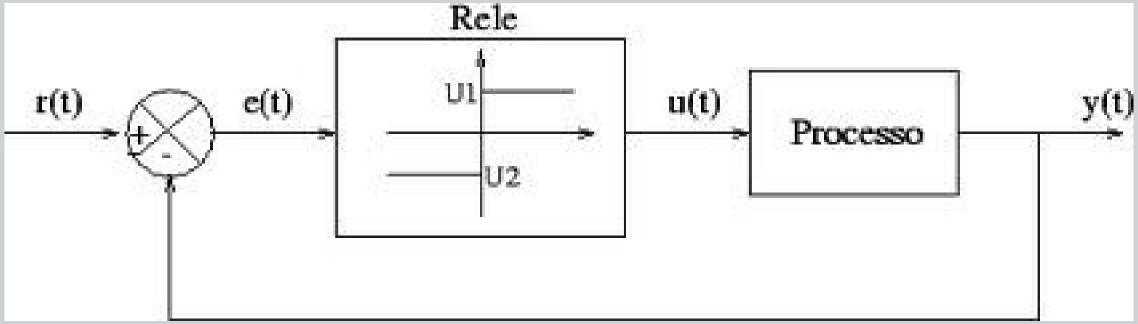
Controladores industriais

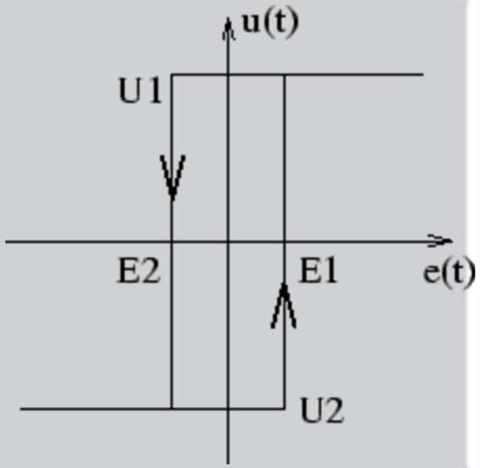
- Controladores de duas posições on-off
- Controladores proporcionais
- Controladores integrativos
- Controladores proporcional-integrativos
- Controladores proporcional-derivativos
- Controladores proporcional-integrativo-derivativos

Controladores de duas posições on-off

$$u(t) = U_1, \quad e(t) > 0$$
$$= U_2, \quad e(t) < 0$$



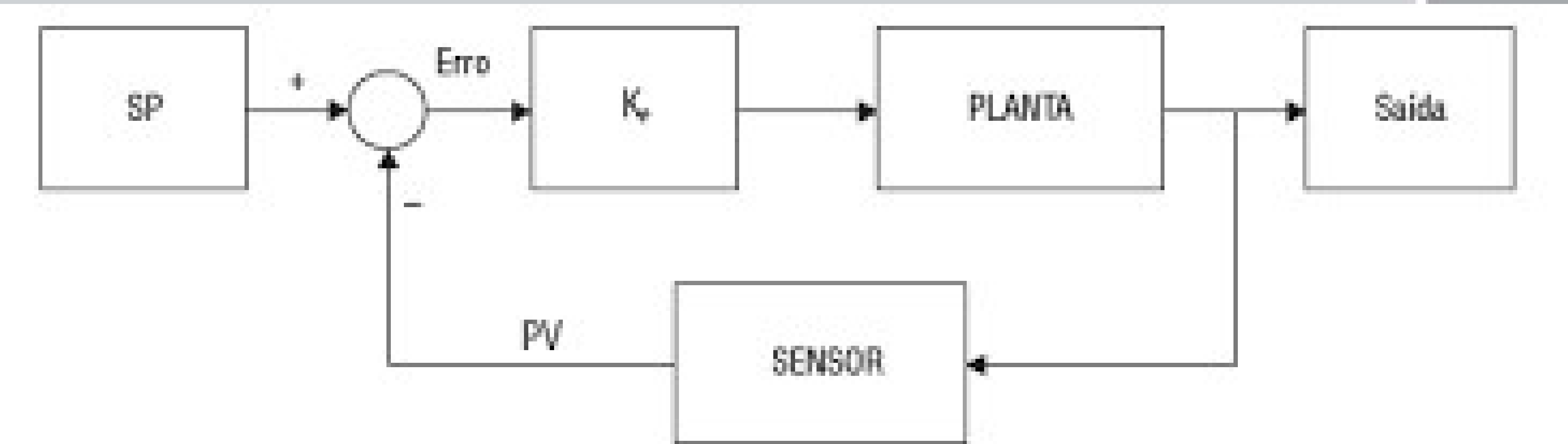




Controladores proporcionais

$$u(t) = K_p e(t)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

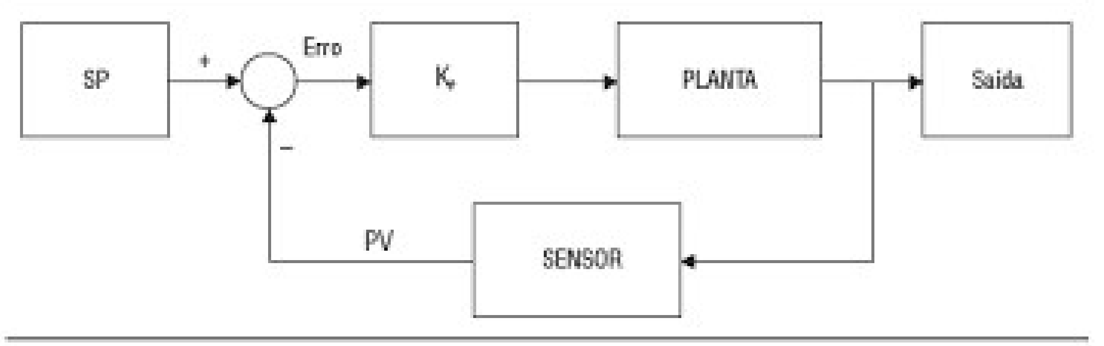


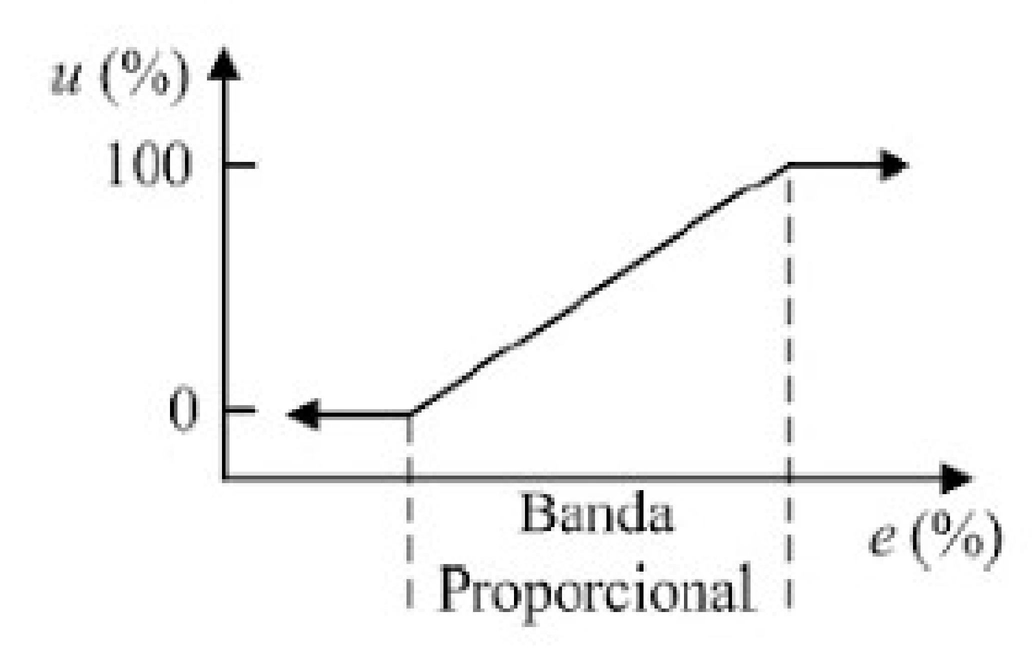
Controladores proporcionais

$$u(t) = K_p e(t)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

Figura 2.1 Controlador proporcional.



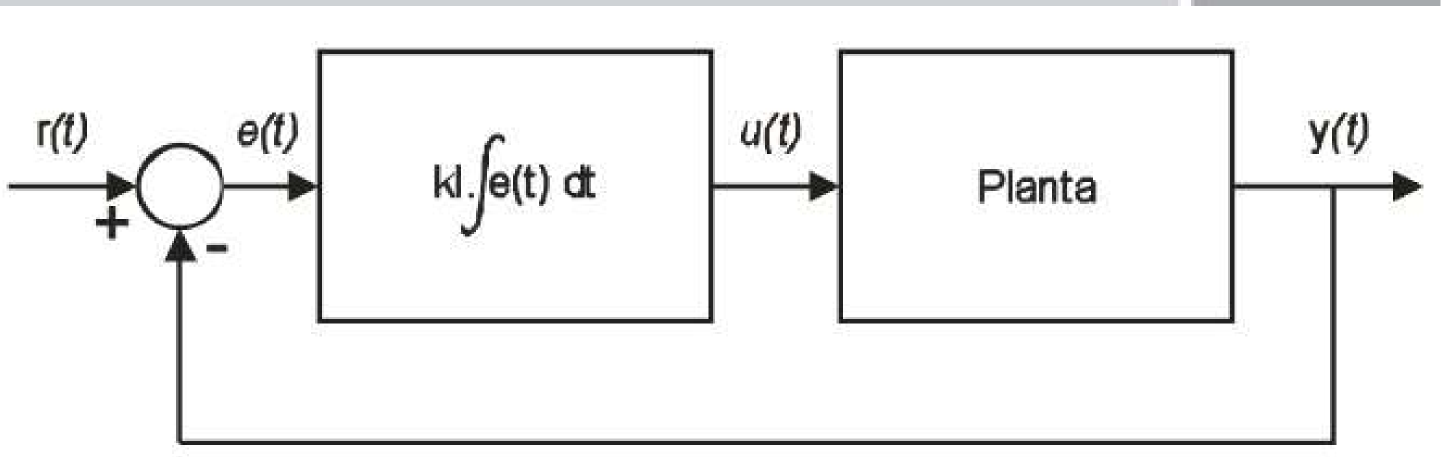


Controladores integrativos

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)\,dt$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$



Controladores proporcional-integrativos

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt]$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$$

T_i - tempo integrativo

Controladores proporcional-derivativos

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} = K_p[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s)$$

T_d - tempo derivativo

Controladores proporcional-integrativo-derivativos

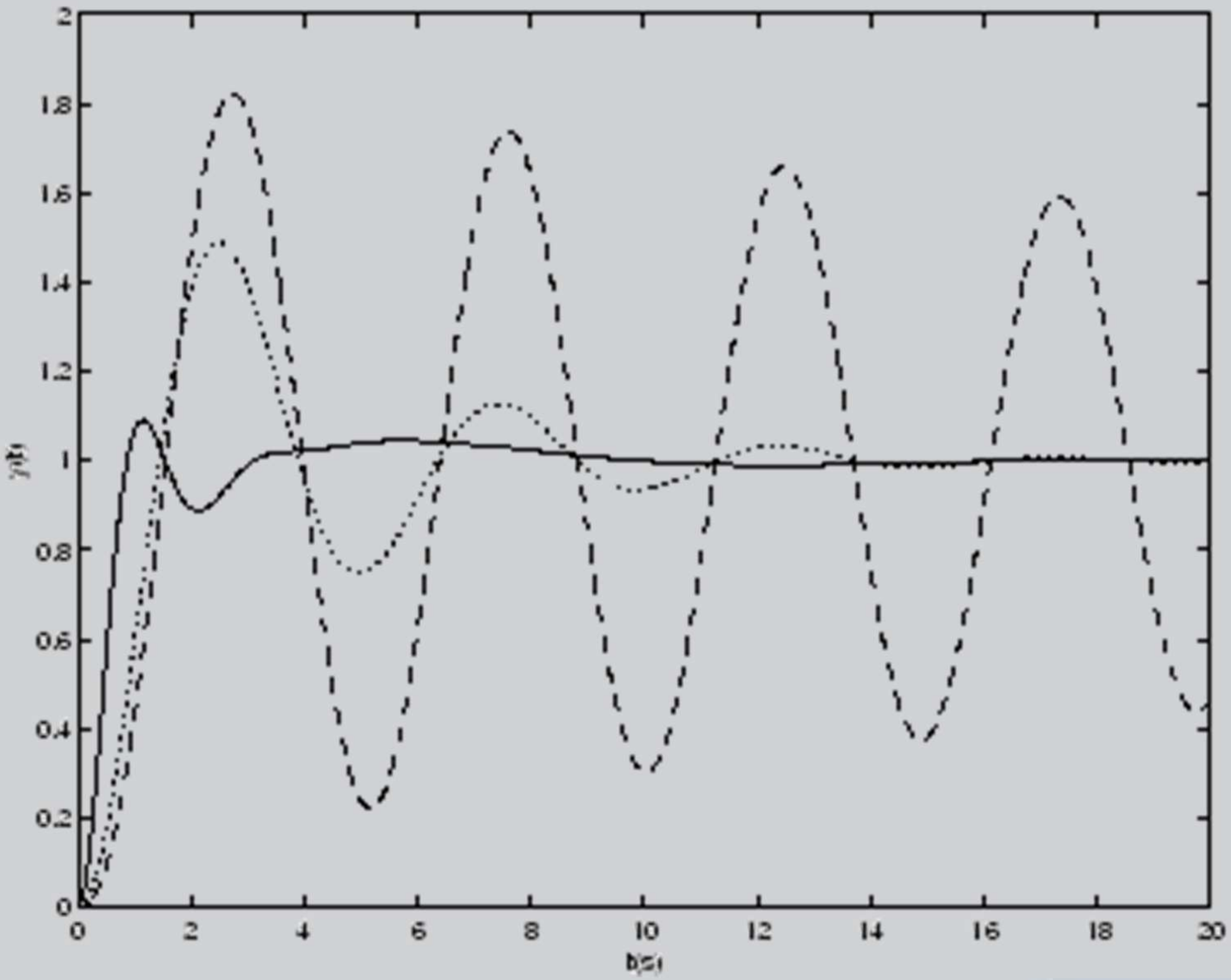
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$$

T_i - tempo integrativo
T_d - tempo derivativo

Controladores proporcional-integrativo-derivativos



Exercício de Simulação Dinâmica

Instruções:

- Baixar as instruções no Moodle
- Executar o exercício
- Entregar na data marcada

Próximas aulas

- Modelagem de sistemas dinâmicos usando Transformadas de Laplace

[3] – Dinâmica de sistemas

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

EPUSP

PRO3252 Automação e Controle

Mauro de Mesquita Spinola

Marcelo Schneck de Paula Pessôa

EPUSP-PRO