


[3] – Dinâmica de sistemas

PRO3252
Automação e Controle

Mauro de Mesquita Spinola
Marcelo Schneck de Paula Pessoa
EPUSP-PRO

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção




1

As perguntas de hoje

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

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessoa- EPUSP-PRO

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção




2

Esta aula

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

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 3

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção




3

Conceitos importantes

- sistema**
 - Combinação de **componentes** que **interagem** e realizam 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

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 4

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção



4

Conceitos importantes

- ❑ **planta**
 - objeto físico a ser controlado
 - Exs.: forno, avião, reator químico
- ❑ **processo**
 - operação a ser controlada
 - Exs.: químico, econômico, biológico

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 5


Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção



5


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



02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 6

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção



6

Conceitos importantes

PRO
USP
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
EPUSP

□ **modelo pode ser:**

- físico
- concepção mental
- matemático
- computacional
- uma combinação destes

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

7

7

Conceitos importantes

PRO
USP
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
EPUSP

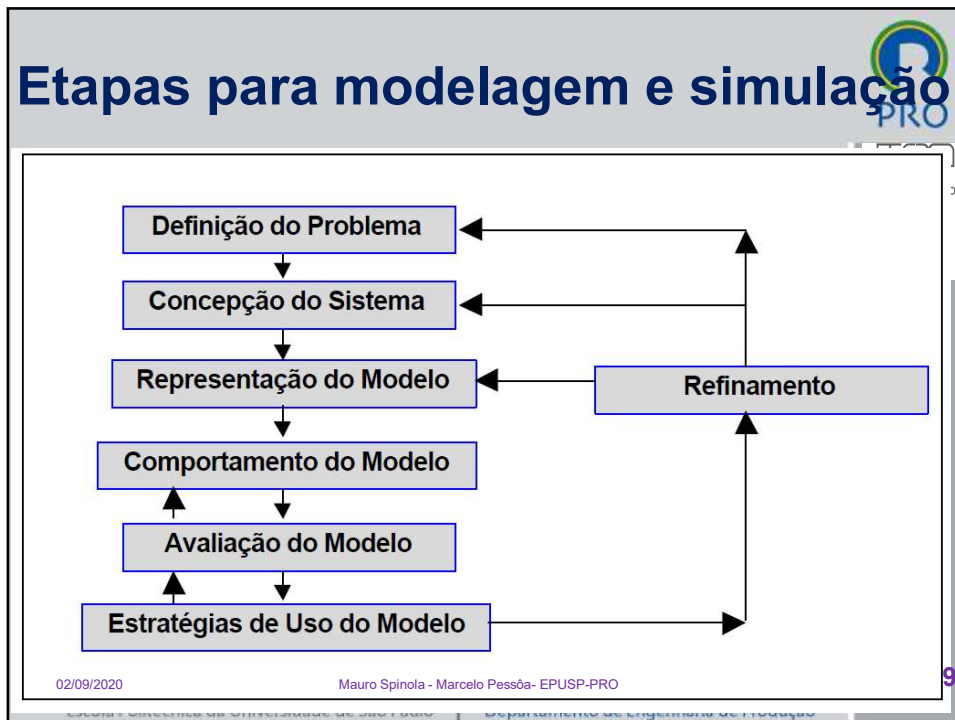
□ **simulação**

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

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

8

8



9

Conceitos importantes

All models are wrong, some are useful

George Edward Pelham Box


 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

 EPUSP

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 10
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

10

Diagramas causais

02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
11

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

11

Diagramas causais

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

02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
12

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

12

Diagramas causais

exemplos

- crescimento de uma população

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 13
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

13

Diagramas causais

exemplos

- crescimento e regulação de uma população

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 14
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

14

Diagramas causais

exemplos

- crescimento e regulação de uma população

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 15
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

15

Malha aberta e fechada

- Malha aberta, exemplo: forno de um fogão doméstico

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 16
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

16

Malha aberta e fechada

- ❑ Malha fechada, exemplo: forno de uma padaria

```
graph LR; A(temperatura desejada) -- "+" --> B(erro); B -- "+" --> C(energia elétrica); B -- "-" --> D(temperatura); C -- "+" --> D;
```

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 17
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

17

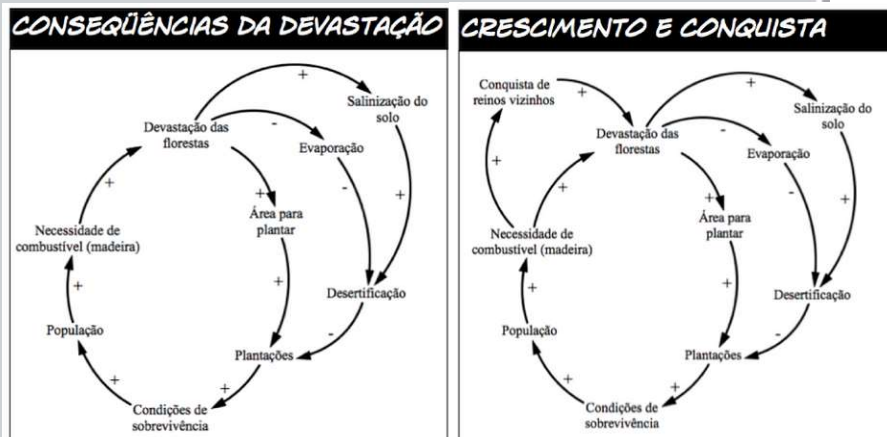
Exercício:

- ❑ Observar o diagrama causal e explicar o fenômeno
- ❑ Tempo: 5 minutos

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 18
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

18

Exercício: ler diagramas causais (Prof. João Arantes)



02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa - EPUSP-PRO

19

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Produção

19

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”.

- O sistema descrito acima é de malha aberta ou fechada?
- 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.

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa - EPUSP-PRO




20

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

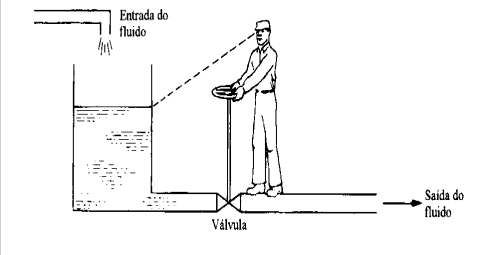
Departamento de Engenharia de Produção

20

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.






02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
21

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

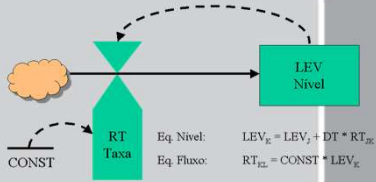
21

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






02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
22

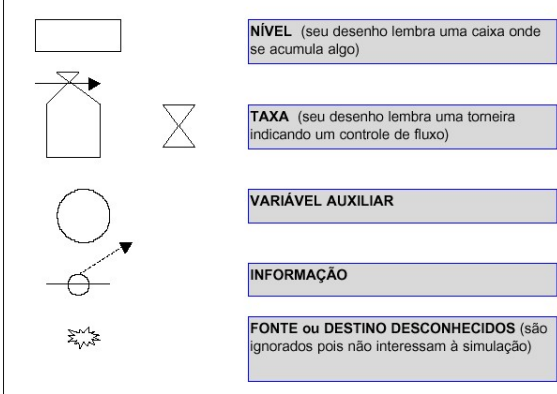
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

22

Diagramas e equações de Forrester

☐ Símbolos



NÍVEL (seu desenho lembra uma caixa onde se acumula algo)

TAXA (seu desenho lembra uma torneira indicando um controle de fluxo)

VARIÁVEL AUXILIAR

INFORMAÇÃO

FONTE ou DESTINO DESCONHECIDOS (são ignorados pois não interessam à simulação)




Figura 4 – Símbolos utilizados nos Diagramas de Forrester.

02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
23

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

23

Diagramas e equações de Forrester

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

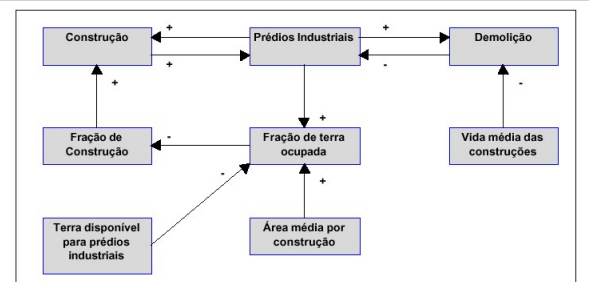


Figura 5 – Diagrama Causal representando o crescimento de uma cidade e seus efeitos na construção civil.

02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
24

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

24

Diagramas e equações de Forrester

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

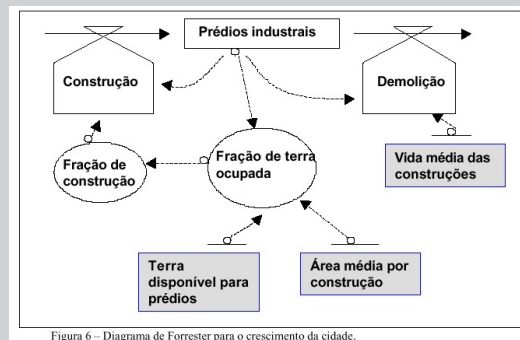


Figura 6 – Diagrama de Forrester para o crescimento da cidade.

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO

25

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

25

Forno de Padaria

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

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO




26

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

26

Forno de padaria

□ Diagrama causal






 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

 EPUSP

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 27
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Produção

27

Forno de padaria

□ Diagrama de Forrester






 UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

 EPUSP

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 28
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Produção

28

Exercício

- ❑ Usando a notação, fazer o diagrama de Forrester do crescimento populacional
- ❑ Tempo: 5 minutos

02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
29

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Produção

29

Diagramas e equações de Forrester




- ❑ Equações do modelo

$$dN(t) / dt = FE(t) - FS(t)$$

N(t): variável de nível
FE(t) e FS(t): variáveis de fluxo

$$N(t + Dt) = N(t) + Dt * [FE(t) - FS(t)]$$

(integração numérica)

02/09/2020
Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO
30

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Produção

30

Diagramas e equações de Forrester

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 31
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Produção

31




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)

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 32
 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Produção

32

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**
 - $ERRO.K = SP - TEMP.K$

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 33

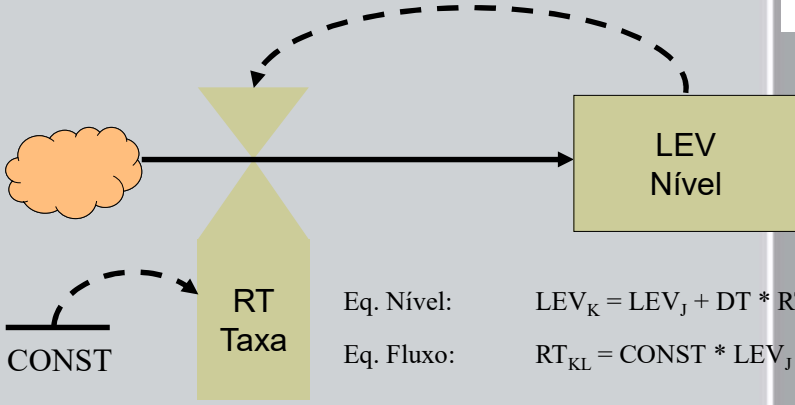
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

33

Diagramas e equações de Forrester

□ **Exemplo: Realimentação positiva**



Eq. Nível:

Eq. Fluxo:

$LEV_K = LEV_J + DT * RT_{JK}$

$RT_{KL} = CONST * LEV_J$


02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 34

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

34

Simulação

❑ Exemplo: Realimentação positiva

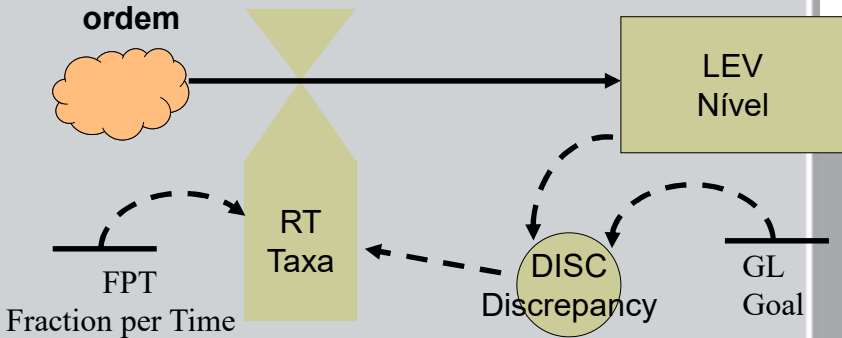


02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 35
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção


35

Diagramas e equações de Forrester

❑ Exemplo: Realimentação negativa de primeira ordem



Eq. Nível: $LEV_K = LEV_J + DT * RT_{JK}$
 Eq. Fluxo: $RT_{JK} = FPT * DISC_J$
 $DISC_J = GL - LEV_J$




02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 36
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

36

Simulação

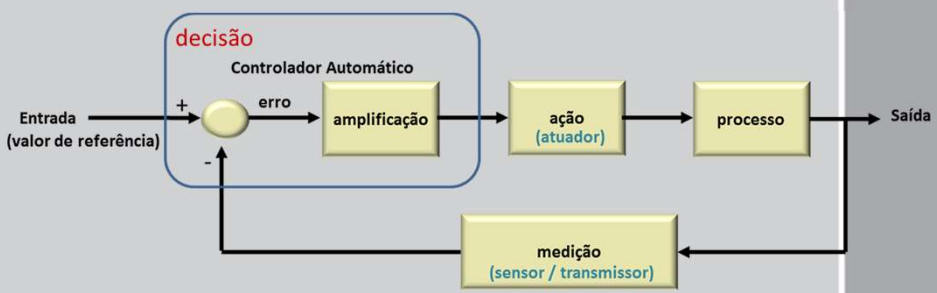
- Exemplo: Realimentação negativa de primeira ordem



02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 37
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

37

Controladores industriais



02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 38
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

38

Controladores industriais

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 39

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

39

Controladores industriais

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

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 40

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

40

Controladores de duas posições on-off

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

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

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO

41

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Produção

41

Controladores proporcionais

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

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

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO


42

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Produção

42

Controladores proporcionais

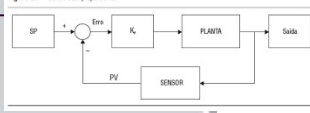


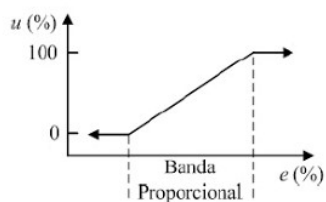
EPUSP


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

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

Figura 2.1 Controlador proporcional







02/09/2020


Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO

43

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

43

Controladores integrativos

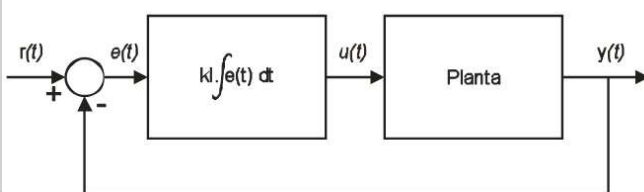


USP
UNIVERSIDADE DE
SÃO PAULO
EPUSP

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

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

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



02/09/2020

Escola Politécnica da Universida

44

Controladores proporcional-integrativos



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

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

T_i - tempo integrativo

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa - EPUSP-PRO

45

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

45

Controladores proporcional-derivativos



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

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

T_d - tempo derivativo

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa - EPUSP-PRO

46

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção

46

Controladores proporcional-integrativo-derivativos

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

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

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

T_i - tempo integrativo
 T_d - tempo derivativo

02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa - EPUSP-PRO

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

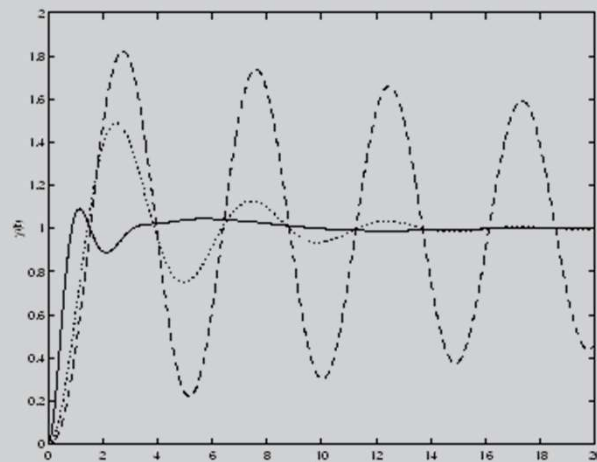
Departamento de Engenharia de Produção

47



47

Controladores proporcional-integrativo-derivativos



02/09/2020

Mauro Spinola - Marcelo Pessôa - EPUSP-PRO

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Produção

48



48


Exercício de Simulação Dinâmica

Instruções:

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

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 49

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção




49

Próximas aulas

- Modelagem de sistemas dinâmicos usando Transformadas de Laplace

02/09/2020 Mauro Spinola - Marcelo Pessôa- EPUSP-PRO 50

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção




50

[3] – Dinâmica de sistemas

PRO3252
Automação e Controle

Mauro de Mesquita Spinola
Marcelo Schneck de Paula Pessoa
EPUSP-PRO

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo | Departamento de Engenharia de Produção



51