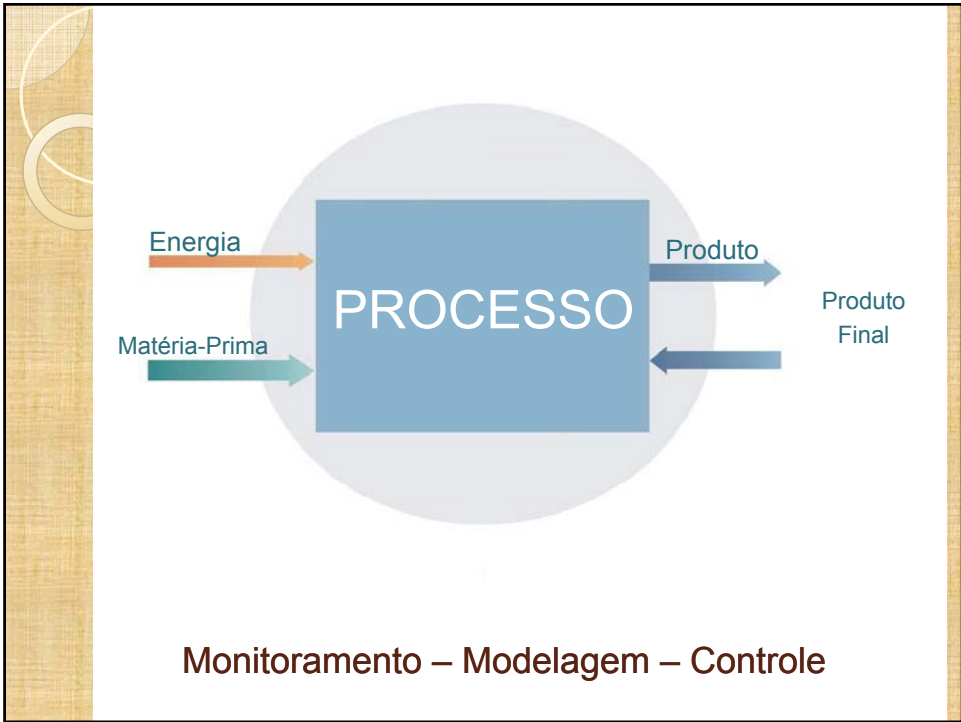
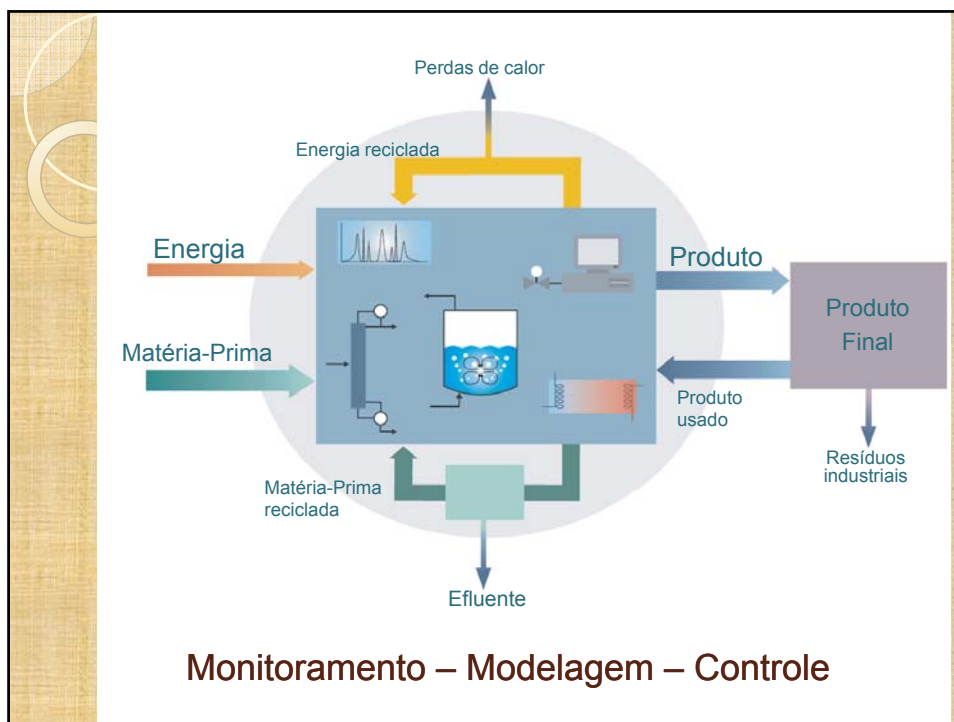


DINÂMICA E MODELAGEM DE PROCESSOS

Prof^ª. Ninoska Bojorge

EQE-598 Ladeq I Profa. Ninoska Bojorge





Dinâmica de Processos

Ao analisar a dinâmica de um processo e do sistema de controle é importante saber como o processo responde às mudanças na entrada do processo.

Há um certo número de tipos de entradas padrões são amplamente utilizados por duas razões:

- 1) São representativos dos tipos de mudanças que ocorrem nas plantas industriais.
- 2) São fáceis de analisar matematicamente

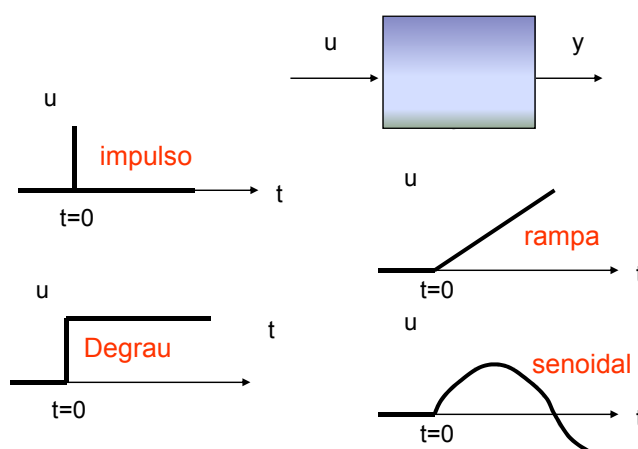
- Na análise e projeto de sistemas de controle deve-se adotar uma **base de comparação entre os sistemas** avaliados.
- Esta base pode ser obtida especificando-se os **sinais de entrada e comparando-se as** respostas dos sistemas.
- Os sinais de teste de entrada comumente utilizados são: **degrau, rampa, impulso, senoidal, etc.**

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

5

Tipos de Entradas

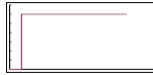


EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

6

1. Degrau (Step Input)



- Uma mudança súbita de uma variável do processo pode ser aproximada por uma mudança tipo degrau de magnitude, M:

$$U_s = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ M & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

$$U_s(s) = M / s \quad (1.2)$$

```
>> num=[a b c]
>> den=[d e f g]
>> step(num,den)
```

Esta mudança degrau ocorre em um tempo arbitrário denotado como $t = 0$.

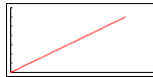
- **Caso especial:** Se $M = 1$, "degrau unitário". Denota se com o símbolo, $S(t)$.
- **Exemplo:** A matéria-prima num reator muda de repente entre um fornecimento para outro, causando mudanças bruscas na alimentação, concentração, vazão, etc.

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

7

2. Rampa



- Processos industriais freqüentemente experimentam "perturbações rampa", isto é, mudanças relativamente lentas para cima ou para baixo por um período de tempo.
- A taxa da variação é de aproximadamente constante.

A perturbação tipo *rampa* se representa como:

$$U_R(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ at & t \geq 0 \end{cases}$$

$$U_R(s) = a / s^2$$

```
>> num=[a];
>> den=conv([b c],[d e]);
>> t=0:50;
>> u=t;
>> lsim(num,den,u,t);
```

Exemplos:

- Rampa no *setpoint* configurado para um novo valor.
- Composição na alimentação, incrustações no trocador de calor, atividade do catalisador, a temperatura ambiente.

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

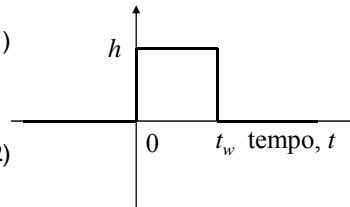
8

3. Pulso Rectangular

- Representa uma breve e súbita mudança de uma variável de processo :

$$U_{RP}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ h & \text{for } 0 \leq t < t_w \\ 0 & \text{for } t \geq t_w \end{cases} \quad (3.1)$$

$$U_{RP}(s) = \frac{h}{s} [1 - e^{-t_w s}] \quad (3.2)$$



Exemplos:

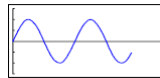
- Alimentação no reator estiver desligada durante uma hora.
- O fornecimento de gás combustível para um forno interrompido brevemente.

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

9

4. Senoidal



- Os processos também estão sujeitos à distúrbios periódicos ou cíclicos. Os quais podem ser aproximado por uma perturbação tipo senoidal:

$$U_{\sin}(t) = \begin{cases} 0 & \text{for } t < 0 \\ A \sin(\omega t) & \text{for } t \geq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

onde: A = amplitude, ω = frequência angular

Exemplos:

- 24 horas variações na temperatura da água de esfriamento.
- Ruído elétrico 60-Hz (p. ex. no LADEQ)

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

10

5. Impulso



- Aqui, $U_I(t) = \delta(t)$.
- A qual representa uma pequena perturbação transiente

Exemplos:

- Ruído elétrico na leitura de uma termopar.
- Injeção de um traçador (corante).

```
>> num=[a];
>> den=conv([b c],[d e]);
>> t=0:50;
>> impulse(num,den,t),grid;
```

- Muito úteis para análise, uma vez que a resposta a uma entrada é a inversa da FT. Assim,

$$\begin{array}{ccc} u(t) & \rightarrow & y(t) \\ U(s) & \rightarrow & Y(s) \end{array} \quad \boxed{G(s)}$$

assim,

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (1)$$

a expressão correspondente no domínio tempo é:

$$y(t) = \int_0^t g(t-\tau)u(\tau)d\tau \quad (2)$$

onde:

$$g(t) = \mathcal{L}^{-1}[G(s)] \quad (3)$$

Sistema de Primeira Ordem

A forma geral de FT de primeira ordem é:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (4)$$

onde:

$$K = \text{Ganho estático} \left(\frac{\text{unidades de } y}{\text{unidades de } M} \right)$$

τ = constante de tempo

Considere o a resposta deste sistema para um degrau de magnitude, M :

$$U(t) = M \text{ for } t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad U(s) = \frac{M}{s}$$

Substituindo em (4) e reordenando,

$$Y(s) = \frac{KM}{s(\tau s + 1)} \quad (5)$$

EQE-598 Ladeq I

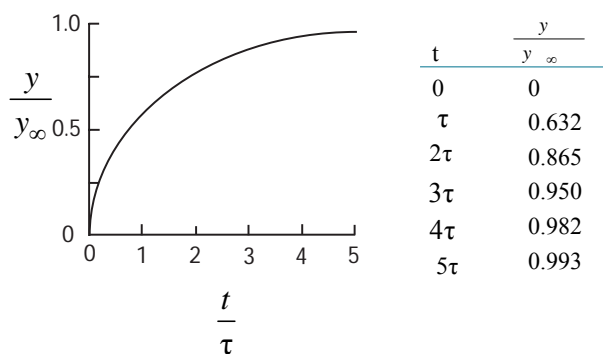
Profa. Ninoska Bojorge

13

Aplicando L^{-1} (veja Tabela 3.1, Seborg),

$$y(t) = KM \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (6)$$

Seja y_∞ = valor em estado equilibrio de $y(t)$. De (7), $y_\infty = KM$.



Nota: τ grande significa uma resposta lenta.

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

14

Sistema de Segunda-Ordem

- forma geral:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (7)$$

A qual tem três parâmetros no modelo:

K = steady-state gain

τ = "time constant" [=] time

ζ = damping coefficient (dimensionless)

- forma equivalente: $\left(\omega_n = \text{natural frequency} = \frac{1}{\tau} \right)$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2}$$

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

15

- O tipo de comportamento que ocorre depende do valor numérico do coeficiente de amortecimento: ζ

É conveniente a considerar três tipos de comportamento:

Coeficiente amortecimento	Tipo de Resposta	Raízes da Eq. Característica.
$\zeta > 1$	(Sobreamortecido) <i>Overdamped</i>	Real e \neq
$\zeta = 1$	Criticamente amortecida <i>Critically damped</i>	Real e =
$0 \leq \zeta < 1$	Sub-amortecida <i>Underdamped</i>	Conjugadas Complexas

- Nota: O polinômio característico é o denominador da função transferência:

$$\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1$$

Que acontece quando $\zeta < 0$? É o resultado de um sistema instável

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

16

Várias observações gerais podem ser feitas referentes as respostas apresentadas nas Fig. 5.8 e 5.9:

1. Respostas exibindo oscilações e picos ($y/KM > 1$), são obtidas apenas para valores de ζ inferiores a um.
2. Grandes valores ζ resulta numa resposta demorada (lenta).
3. A resposta mais rápida, sem overshoot é obtida para o caso criticamente amortecida ($\zeta = 1$).

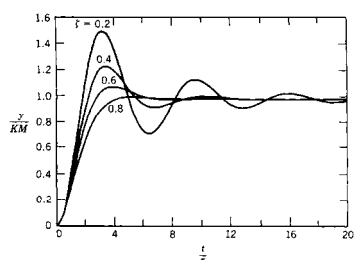


Figure 5.8. Step response of underdamped second-order processes.

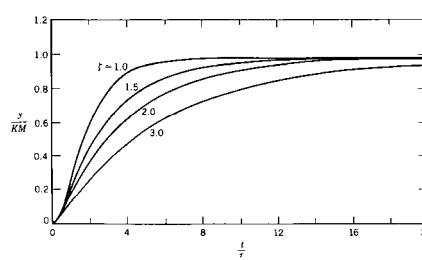


Figure 5.9. Step response of critically-damped and overdamped second-order processes.

1. **Tempo de subida t_r** : é o intervalo de tempo que o sistema leva para ir de zero a 100% do valor final para sistemas sub-amortecidos. Para sistemas sobre-amortecidos utiliza-se o intervalo de 10 a 90%. (i.e, tempo que a saída do processo leva para atingir o novo valor de estado de equilíbrio).

2. **Tempo do pico t_p** : é o tempo necessário para a saída alcançar o seu primeiro pico de overshoot.

3. **Tempo de estabilização t_s** : é tempo que o sistema leva para entrar e permanecer na faixa $\pm 2\%$

4. **Overshoot**: $OS = a/b$ (% overshoot é $100 * a/b$).

5. **Decay Ratio**: $DR = c/a$ (onde c é a altura do segundo picos).

6. **Período de Oscilação**: P é o tempo entre Sucessivos picos ou dois vales sucessivos da resposta.

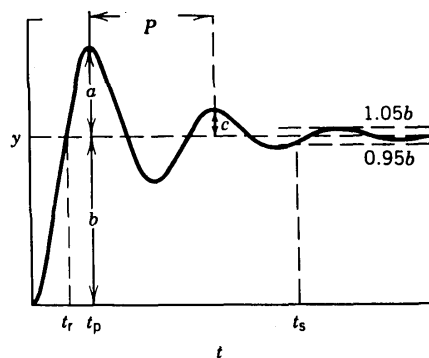
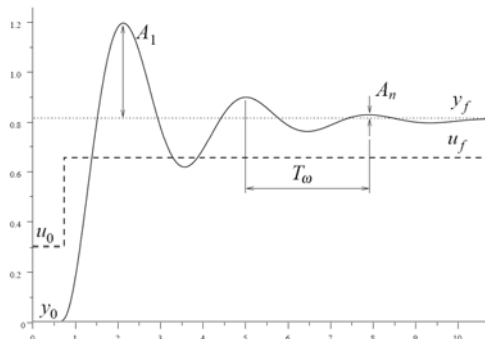


Figure 5.10. Performance characteristics for the step response of an underdamped process.

Segunda ordem subamortecido



Medir:

- u_0 nível inicial de entrada.
- u_f nível final de entrada.
- y_0 nível inicial de saída.
- y_f nível final de saída.
- A_1 amplitude de um pico arbitrário.
- A_n amplitude do pico N°. n contando desde o pico 1.
- T_w tempo entre dois picos sucessivos.

Calcular:

$$\hat{\zeta} = \frac{\frac{1}{n-1} \log(A_1/A_n)}{\sqrt{4\pi^2 + \left[\frac{1}{n-1} \log(A_1/A_n)\right]^2}}$$

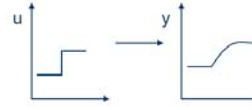
$$\hat{T}_n = \frac{T_w}{2\pi} \sqrt{1 - \hat{\zeta}^2}; \quad \hat{K} = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0}$$

Transferência estimada:

$$\hat{G}(s) = \frac{\hat{K}}{\hat{T}_n^2 s^2 + 2\hat{\zeta}\hat{T}_n s + 1}$$

Identificação do Processo

Identificação do Processo



- Muitos sistemas na prática podem descrever-se aproximadamente com um modelo muito simples, de primeira ou segunda ordem. Com frequência estes modelos simples são suficientes para realizar um primeiro projeto de controle.
- Estes modelos simples podem obter-se mediante ensaios experimentais sobre o sistema. A idéia é propor a estrutura, por exemplo um primeira ordem com retardo

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

- e logo inferir os valores dos parâmetros \$K, \tau, \theta\$ da resposta do sistema em malha aberta do sistema.
- é comum empregar a resposta ao degrau

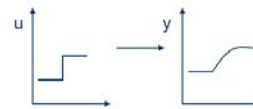
EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

21

Identificação de sistemas de primeira e de segunda ordem usando uma entrada degrau

- 1) **Ajustar o regulador para o modo manual.**
- 2) **Modificar a magnitude da variável de controle** (acrécimo ou decréscimo).
- 3) **Registrar (plotar) a variável de saída do processo.**
O gráfico da resposta de saída do processo para uma variação na entrada é muitas vezes referido como *curva reação do processo*.



EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

22

Identificação de sistemas de primeira e de segunda ordem usando uma entrada degrau

- Se o processo de interesse pode ser aproximado a um modelo linear de primeira ou de segunda ordem, os parâmetros do modelo podem ser obtidos por inspeção da curva reação do processo.
- a resposta de um modelo de primeira ordem, $Y(s)/U(s)=K/(ts+1)$, para uma variação degrau de magnitude M é:

$$y(t) = KM(1 - e^{-t/\tau})$$

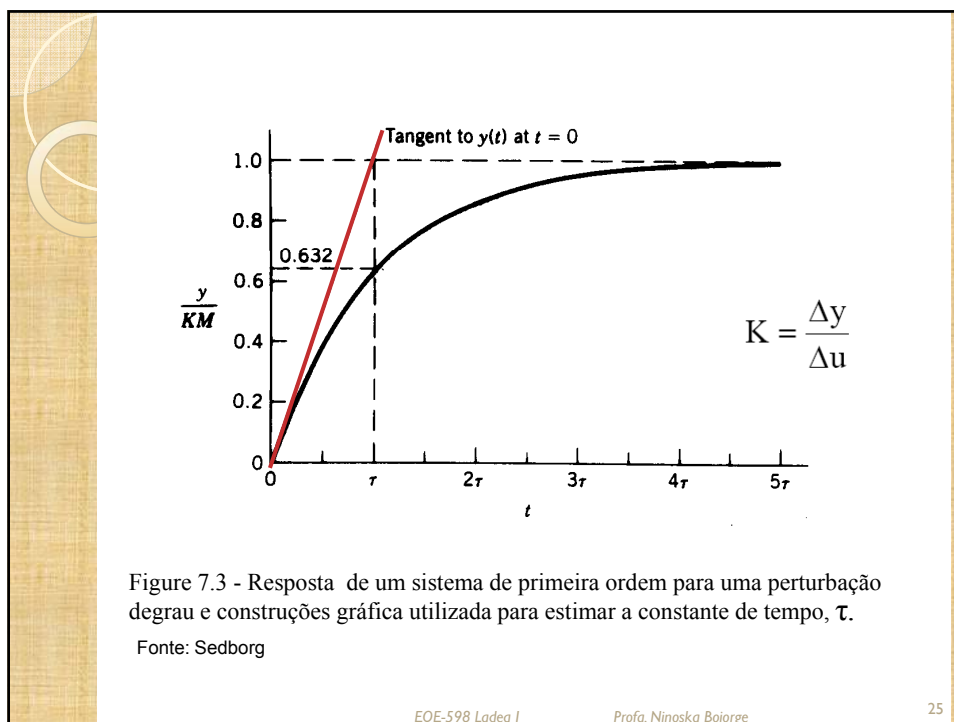
- A tangente inicial esta dada por:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{y}{KM} \right)_{t=0} = \frac{1}{\tau}$$

- O ganho pode ser calculado a partir das mudanças no estado de equilíbrio em u e y :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{\Delta y}{M}$$

onde Δy é a variação no estado de equilíbrio em y



EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

25

Modelo de primeira ordem mais tempo morto

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta}s}{\tau s + 1}$$

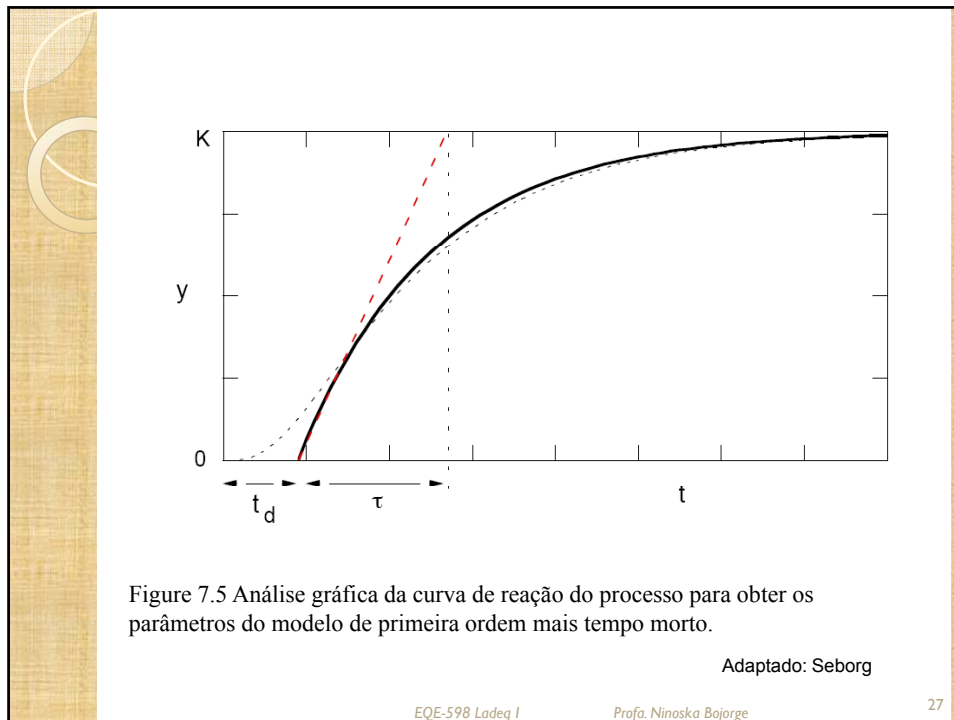
Para este modelo POTM, observa-se as seguintes características da sua resposta a uma perturbação degrau :

1. A resposta atinge 63,2% da sua última resposta no tempo, $t = \tau + \theta$.
2. A linha traçada tangente à resposta ($t = \theta$) na máxima tangente (intersecta a $y/KM=1$ na linha ($t = \tau + \theta$)).
3. A resposta degrau é essencialmente completa em $t=5\tau$.
Noutra palavra, o tempo de equilíbrio é $t_s=5\tau$.

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

26



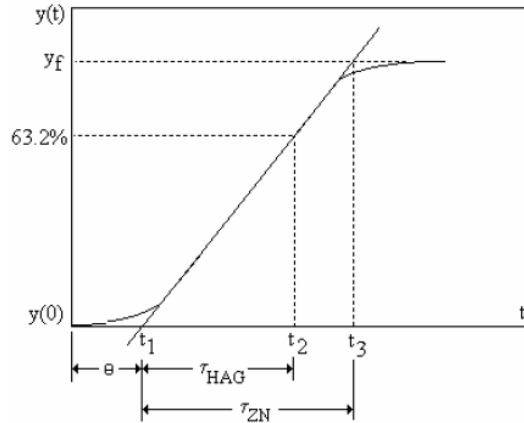
Métodos de Identificação

Na literatura de **controle de processos** existe uma **variedade de métodos baseado na resposta do processo ao degrau** para identificação de K , τ e θ .

Ilustram-se os seguintes métodos:

- **Ziegler/Nichols_1942,**
- **Sundaresan_1977,**
- **Nishikawa_1984**
- **Smith_1985,**
- **Hägglund_1991.**

Método de Ziegler-Nichols e Hägglund



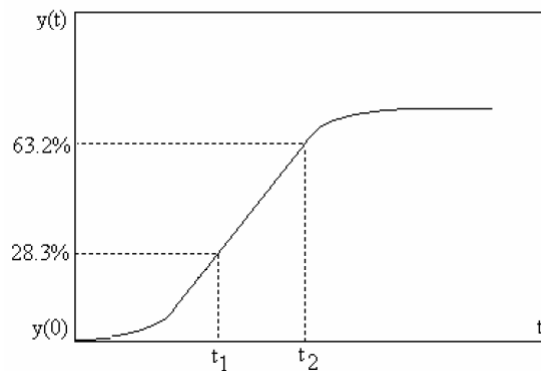
$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

29

Método de Smith



$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1)$$

$$\theta = t_2 - \tau$$

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

30

Existem duas técnicas gráfica geralmente aceitas para determinar os parâmetros do modelo τ , θ , e K .

Metodo 1: Método do *intercepto da pendente*.

Primeiro, uma tangente é tracejada no ponto de inflexão da curva de reação do processo na Fig. 7,5. Então τ e θ são determinados pela inspeção.

Alternativamente, t pode ser encontrados a partir do momento em que a resposta é normalizada 63,2% completo ou da determinação do tempo de equilíbrio, t_s . Em seguida, defina $\tau = t_s/5$.

Metodo 2. *Método de Sundaresan e Krishnaswamy*

Este método evita a utilização do ponto de inflexão para estimar o tempo de e atraso de transporte θ .

Método de Sundaresan e Krishnaswamy

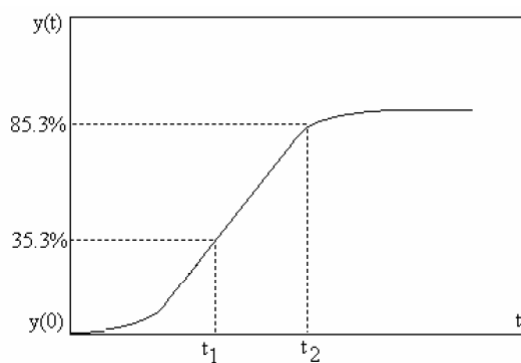
- Eles propuseram que dois tempos, t_1 e t_2 , sejam estimados a partir da curva de resposta a um passo, correspondente à 35,3% e 85,3% resposta vezes, respectivamente.
- O tempo de morto e a constante de tempo, então, são estimados a partir das seguintes equações:

$$\theta = 1.3t_1 - 0.29t_2$$

$$\tau = 0.67(t_2 - t_1)$$

- Estes valores de θ e τ aproximadamente minimizam a diferença entre a resposta medida e do modelo, com base numa correlação do conjunto de dados.

Método de Sundaresan e Krishnaswamy

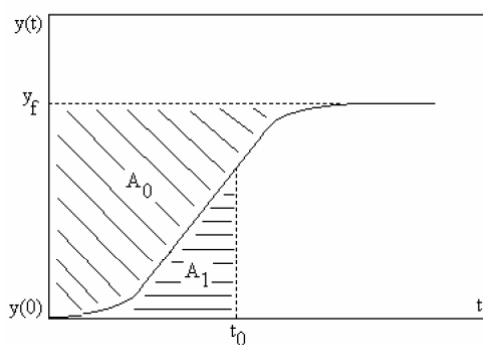


$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = 0.67 (t_2 - t_1)$$

$$\theta = 1.3t_1 - 0.29t_2$$

Método de Nishikawa



$$A_0 = \int_0^{\infty} \{\Delta y(\infty) - \Delta y(t)\} dt$$

$$A_1 = \int_0^{t_0} \Delta y(t) dt \quad ; \quad t_0 = \frac{A_0}{\Delta y(\infty)}$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

$$\tau = \frac{A_1}{0.368 \Delta y(\infty)}$$

$$\theta = t_0 - \tau$$

EQE 598

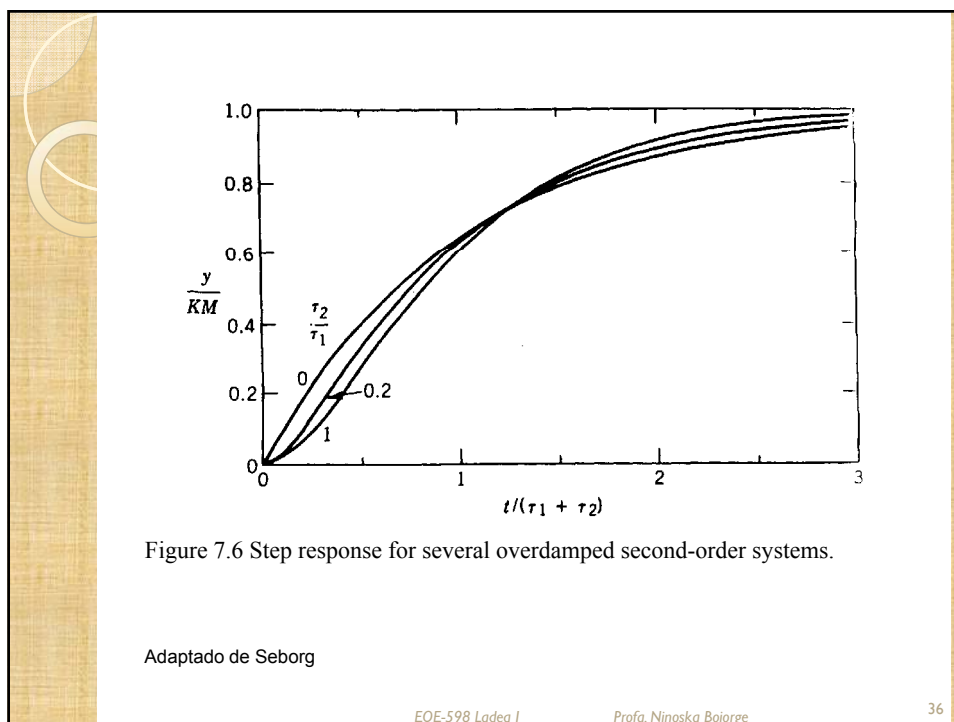
Estimação de parâmetros de modelos de Segunda ordem usando análise gráfico

- Em geral, uma melhor aproximação à resposta de um degrau experimental pode ser obtido pelo ajuste os dados a um modelo de segunda ordem.
- A Figura 7,6 (Seborg) mostra a faixa das formas que pode ocorrer na resposta degrau do modelo,

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

- inclui dois casos:
 - $\tau_2 / \tau_1 = 0$ onde o sistema se torna de primeira ordem, e,
 - $\tau_2 / \tau_1 = 1$ caso do sistema criticamente amortecido.
- O maior das duas constantes de tempos, τ_1 , é a chamada constante tempo dominante.

35



Método de Harriot

(Segunda ordem sobre amortecido)

Medir:

- u_0 nível inicial de entrada.
- u_f nível final de entrada.
- y_0 nível inicial de saída.
- y_f nível final de saída.
- T_0 tempo do degrau de entrada.
- T_{73} tempo no qual a saída atinge 73% de $y_f - y_0$.
- y_0 nível de saída no tempo

$$T' = T_0 + \frac{T_{73} - T_0}{2,6}$$

Calcular

$$\hat{K} = \frac{y_f - y_0}{u_f - u_0}; \quad \hat{\tau}_{tot} = \frac{T_{73} - T_0}{1,3}; \quad y_{fr} = \frac{y' - y_0}{y_f - y_0}$$

EQE-598 Ladeq I Profa. Ninoska Bojorge 37

Método de Harriot

Obter τ_{rat} de y_{fr} do gráfico

Calcular

$$\hat{\tau}_1 = \hat{\tau}_{rat} \hat{\tau}_{tot} \quad \text{e} \quad \hat{\tau}_2 = \hat{\tau}_{tot} - \hat{\tau}_1$$

Transferência estimada:

$$\hat{G}(s) = \frac{\hat{K}}{(\hat{\tau}_1 s + 1)(\hat{\tau}_2 s + 1)}$$

Adaptado de Seborg EQE-598 Ladeq I Profa. Ninoska Bojorge 38

Método de Smith

- Assume-se o modelo:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$$

- Procedimento:

1. Determine t_{20} e t_{60} da resposta degrau.
2. Determine ζ e t_{60}/τ da Fig. 7.7.
3. Determine t_{60}/t da Fig. 7.7 e calcule t (dado que t_{60} é conhecido).

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

39

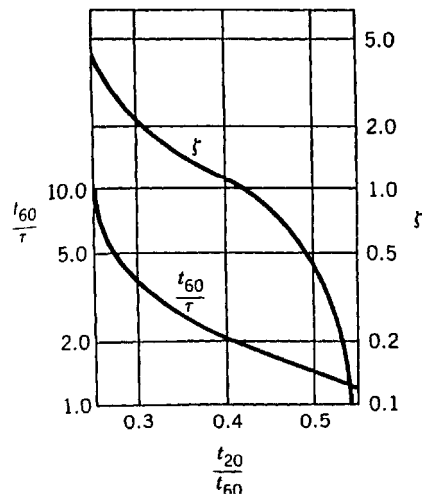


Figure 7.7. Smith's method: relationship of ζ and τ to t_{20} and t_{60} .

Adaptado de Seborg

EQE-598 Ladeq I

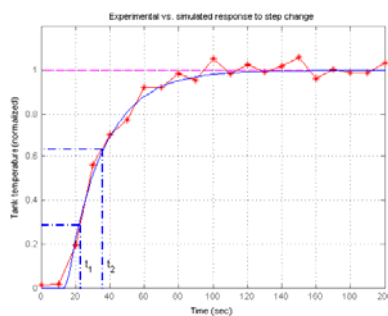
Profa. Ninoska Bojorge

40

Validação do modelo

Após que a modelagem teórica é formulada e os parâmetros desconhecidos são estimados, é importante verificar se o modelo proporciona uma representação adequada do processo.

Nós podemos fazer isso sobrepondo os dados experimentais e os previstos pelo modelo.



EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

41

MATLAB

Funções de Simulação de tempo de resposta

damp	Encontrar o fator de amortecimento e frequências naturais
Impulse()	Resposta ao impulso
lsim ()	Resposta às entradas arbitrárias
step ()	Resposta a entrada degrau
pade ()	aproximação de Padé ao tempo morto
ltiview	Inicia o visualizador gráfico para objetos LTI

EQE-598 Ladeq I

Profa. Ninoska Bojorge

42

```

1 % File Name: identif.m
2 %
3 % clear matlab memory and close all open figures
4 clear all; close all;
5
6 %
7 P1=tf([-td/2 1],[td/2 1]); %First order Padé approximation
8 t=0:0.5:50;
9 tau=10;
10 G1=tf(1,[tau 1]);
11 y1=step(G1*P1,t); %y1 is first order with Padé approximation of dead time
12 y2=step(G1,t);
13 t2=t+td; %Shift the time axis for the actual time delay function
14 plot(t,y1,'--', t2,y2)
15

```

EQE-598 Ladeq I Profa. Ninoska Bojorge 43

Levar pen-driver!

AULA EXPERIMENTAL - DINÂMICA E MODELAGEM DE PROCESSOS: SISTEMA TÉRMICO
EQE-598 Laboratório de Engenharia Química

Objetivos
Identificação de modelos dinâmicos que possam relacionar comportamentos transitentes das temperaturas do fluido nos tanques 1 e 2 (T1, T2) para variações no sistema de aquecimento (W).

Metodologia
Com o processo em regime contínuo de escoamento, realizar uma variação tipo degrau no fluxo de energia fornecido pelo aquecedor instalado no Tanque 1, acionando o contato liga/desliga, e registrar seu efeito nas temperaturas T1 e T2 pelo Sistema Supervisório na estação de operação no microcomputador na Sala de Controle.

Relatório
O relatório da prática deverá conter os seguintes itens:

- Introdução e Objetivos.
- Diagrama P&ID (Processo & Instrumentação) e Lista de equipamentos de instrumentos utilizados.
- Procedimento resumido realizado, em etapas.
- Resultados obtidos.
- Modelo(s) identificado(s), indicando os cálculos para determinação de parâmetros.
- Análise de validação do(s) modelo(s): resultados Experimentais vs. Simulados.
- Conclusões.

44