

Controle de Processos

Aula 02 - Análise do comportamento dos sistemas dinâmicos

Apresentação

Na aula anterior, tivemos uma visão geral sobre sistemas de controle. Vimos que o objetivo principal dessa área de estudo é controlar sistemas dinâmicos. Nesta aula, teremos uma visão do que são esses sistemas e de como analisá-los. Examinaremos alguns tipos de resposta (comportamento) que um sistema dinâmico pode apresentar. Veremos que através da excitação e resposta de um sistema, é possível fazer a sua análise. Bons Estudos!



Vídeo 01 - Apresentação

Objetivos

- Conhecer os tipos de sinais utilizados para a identificação de processos;
- Definir o que são sistemas lineares e não lineares;
- Diferenciar um sistema dinâmico de um sistema estático;
- Identificar sistemas de 1ª e 2ª ordem e sistemas com atraso;
- Calcular os parâmetros de um sistema de primeira ordem com atraso.



Vídeo 02 - Especificações para Análise e Projeto

Dinâmica de Processos

Quando solicitado por uma dada **excitação** (entrada), o processo exibe um certo comportamento, chamado de **resposta** (saída). O passo mais importante para o projeto de um sistema de controle é a obtenção da dinâmica do processo. Isto é, ao se atuar em uma variável da planta em quanto tempo a variável controlada, ou a variável que se quer controlar, irá agir? A dinâmica do processo influencia muito a sintonia de controladores, como será visto na aula 03. Alguns métodos de sintonia de controladores necessitam de um modelo explícito do processo, sendo que existem duas maneiras de se obter esse modelo:

- Modelagem do processo em termos de leis físico-químicas e correlações.
- Identificação do sistema, que é o ajuste estatístico de um modelo do processo a partir de dados experimentais.

A vantagem dos modelos físicos é que permitem obter um conhecimento mais global das relações entre as diversas variáveis, incorporando as possíveis não linearidades. A desvantagem é que pode ser difícil construir modelos físico-químicos dinâmicos de processos complexos.

A identificação de sistemas tem por objetivo construir modelos de processos dinâmicos a partir de dados experimentais observados na planta. Esses modelos são do tipo “caixa-preta”, pois só se está interessado nas relações entre as entradas e saídas do processo, e não nos mecanismos internos dele (CAMPOS; TEIXEIRA, 2010).

A vantagem desses modelos em sistemas complexos é que pode ser o método mais rápido e prático de se obter um modelo da dinâmica do processo. Esse método permite esboçar uma curva em função do tempo da evolução da variável que se quer controlar, e a partir dessa curva é possível identificar as principais características da resposta, como será visto no decorrer desta aula, e com essas características projetar um controlador adequado. A desvantagem é que esse modelo tem uma validade apenas local, isto é, em torno do ponto de operação, não permitindo grandes extrapolações.

A dinâmica do processo depende da relação entre a variável manipulada e a variável do processo. Vimos que através de diagrama de blocos podemos ter uma representação gráfica dessa relação (entrada - saída), conforme ilustra a Figura 1.

Figura 01 - Diagrama de blocos que demonstra a relação entre a entrada e a saída do processo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Veja, a partir da Figura 1, que para conhecer a dinâmica de um processo é necessário aplicar um sinal na entrada (excitação) e analisar o comportamento na saída (reposta), ou seja, o nosso interesse neste caso é conhecer a evolução (ou comportamento) da saída por meio da aplicação de uma excitação específica, o que caracteriza a modelagem “caixa-preta”. O processo pode ser (entre outros):

- **Uma usina** - onde a entrada é o combustível e a saída é a eletricidade.
- **Um motor elétrico** - cuja entrada é a potência elétrica e cuja saída, a rotação mecânica.
- **Um sistema de nível** - sendo a entrada a vazão de líquido e a saída uma altura ou o volume do fluido.

Perceba que a relação entre a entrada e a saída pode apresentar um comportamento equivalente para processos diferentes. Em alguns casos, independentemente do conhecimento de qual processo se quer controlar, a partir da curva de reação (resposta) é possível projetar um controlador para a planta.

Nesta disciplina iremos tratar apenas da identificação do processo, ou seja, conforme a Figura 1 não se conhece os mecanismos internos do mesmo, o que implica na impossibilidade da modelagem matemática. Dispondo apenas da relação entre a entrada e a saída do sistema, obtemos uma aproximação da dinâmica da planta industrial, o que é satisfatória para se ajustar e definir muitos controles na prática.

Nos sistemas apresentados na aula 01, as variáveis PV, SP e MV também podem ser denominadas de sinais. Esses sinais têm, usualmente, formas definidas em relação ao tempo. Usualmente os sistemas dinâmicos, tanto em malha aberta como em malha fechada, são manipulados por sinais típicos (excitação específica) que serão estudados nesta aula.

Sinais típicos em sistemas dinâmicos

Sinais de entrada de teste são utilizados, tanto analiticamente quanto durante os testes, para verificar o comportamento dinâmico do sistema em malha aberta ou do projeto quando em malha fechada. Não é nem necessariamente prático, nem esclarecedor, escolher sinais de entrada complexos para analisar o desempenho de um sistema. Assim, usualmente se escolhem entradas de testes padronizadas. Essas entradas são impulsos, degraus, rampas, parábolas e senoides. Estudemos os sinais degrau e rampa.

Sinal degrau

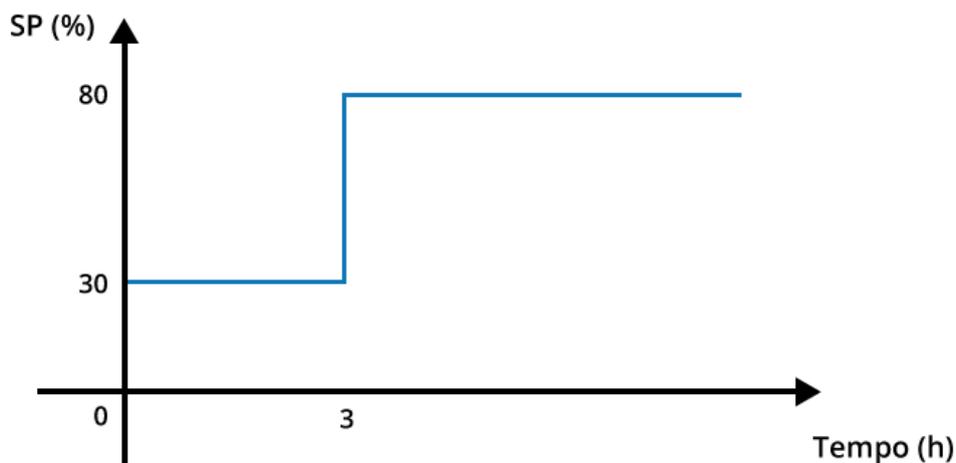
Uma entrada em *degrau* representa um comando constante, como posição, velocidade ou aceleração, no controle de servomecanismos e no controle de processos temperatura, vazão, pressão e nível. Tipicamente, o comando de entrada em degrau possui a mesma forma que a saída. Por exemplo, se a saída do sistema é uma temperatura, a entrada em degrau representa uma temperatura desejada, e a saída representa a temperatura real.

Em um sistema de ar condicionado a temperatura de entrada (desejada) é aquela definida pelo usuário a partir do controle remoto do aparelho condicionador, o controlador do ar condicionado vai tentar manter a temperatura real (temperatura do ambiente) mais próxima possível da desejada. Se a temperatura desejada estiver em 22°C e se houver um comando no controle remoto para 28°C, então houve um degrau na entrada de 22°C para 28°C, ou seja, um *degrau positivo* de 6°C. Caso a temperatura desejada estivesse em 26°C e houvesse uma solicitação para 23°C, então haveria um *degrau negativo* de 3°C.

Caso a saída do sistema seja uma velocidade, como a velocidade de rotação para um leitor de discos de vídeo, a entrada em degrau representa uma velocidade constante desejada, e a saída representa a velocidade real. Utilizam-se entradas em degrau porque ambas as respostas, transitória e em regime permanente, são claramente visíveis e podem ser avaliadas.

O sinal do tipo degrau é um dos sinais mais comuns empregados na análise e controle de processos. A Figura 2 ilustra o sinal do tipo degrau para a variável SP de um processo.

Figura 02 - Exemplo de sinais do tipo degrau.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2015).

Na Figura 2, observamos que no $h\text{tempo} = 0h$, houve uma variação do SP de 0% para 30%. A esse sinal, denominamos degrau. No $h\text{tempo} = 3h$, o SP variou de 30% para 80%. Esse sinal também é denominado degrau (degrau positivo de 50%). O sinal degrau é um dos mais comuns empregados na indústria. Nesta disciplina, esse tipo de sinal será diversas vezes mencionado em diversos contextos.

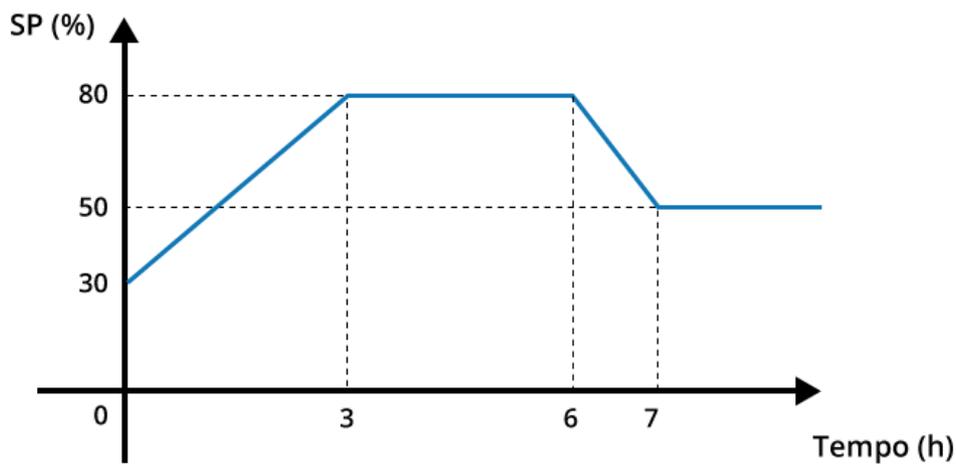
Sinal rampa

A entrada em *rampa* representa um *comando linearmente crescente*. Por exemplo, se a saída do sistema é uma posição, a entrada em rampa representa uma posição linearmente crescente, como a encontrada quando se rastreia um satélite que se move através do céu a uma velocidade constante. Caso a saída do sistema

seja uma velocidade, a entrada em rampa representa uma velocidade linearmente crescente. A resposta a um sinal de teste de entrada em rampa fornece informações adicionais sobre o erro em regime permanente.

O sinal tipo rampa não é tão comum, em ambientes industriais, quanto o sinal degrau, porém em alguns contextos seu uso pode ser comum. A Figura 3 ilustra um sinal do tipo rampa para a variável SP de um processo.

Figura 03 - Exemplo de sinais do tipo rampa.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Na Figura 3, observamos que no $tempo = 0h$, a variável SP encontra-se em 30% e cresce como uma rampa (continuamente), até que no $tempo = 3h$ permanece constante em 80% até o $tempo = 6h$. Quando o $tempo = 6h$, a variável SP começa a decrescer como uma rampa até que o valor do SP permaneça constante no $tempo = 7h$. Observe que as duas rampas mostradas na Figura 3 têm inclinações diferentes. A inclinação de uma rampa indica se o sinal está crescendo (inclinação positiva) ou decrescendo (inclinação negativa) mais rápido ou mais lento.

Atividade 01

1. Considerando as rampas mostradas na Figura 3, faça uma pesquisa sobre como calcular a inclinação de cada uma delas. Qual das duas (em módulo) é mais inclinada?

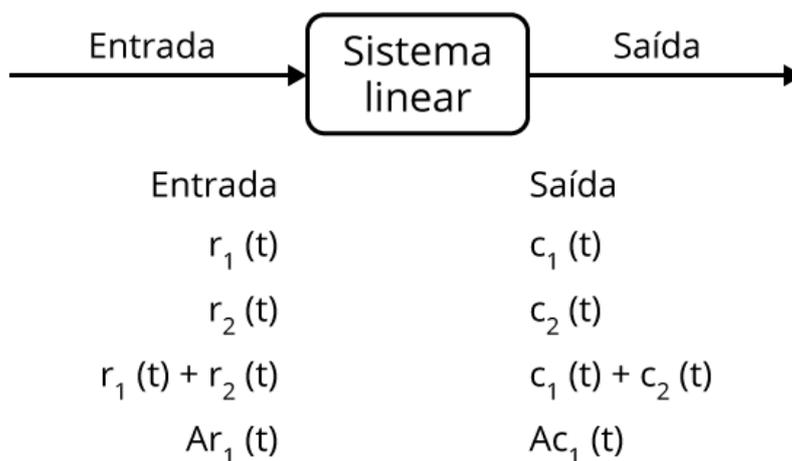
Sistemas Lineares X Sistemas Não Lineares

Nesta seção, definiremos formalmente os termos *linear* e *não linear*, e mostramos como fazer a distinção entre eles.

Sistema Linear

Um sistema linear possui duas propriedades: superposição e homogeneidade. A propriedade de superposição significa que a resposta de saída de um sistema à soma de entradas é a soma das respostas às entradas individuais. Assim, se uma entrada $r_1(t)$ produz uma saída $c_1(t)$, e uma entrada $r_2(t)$ produz uma saída $c_2(t)$, então, uma entrada $r_1(t) + r_2(t)$ produz uma saída $c_1(t) + c_2(t)$. A propriedade de homogeneidade descreve a resposta do sistema para uma multiplicação da entrada por um escalar (um número). Especificamente, em um sistema linear, a propriedade de homogeneidade é demonstrada se, para uma entrada $r_1(t)$ que produz uma saída $c_1(t)$, uma entrada $Ar_1(t)$ produz uma saída $Ac_1(t)$; isto é, a multiplicação de uma entrada por um escalar produz uma resposta que é multiplicada pelo mesmo escalar. A Figura 4 apresenta em diagrama de blocos essas propriedades.

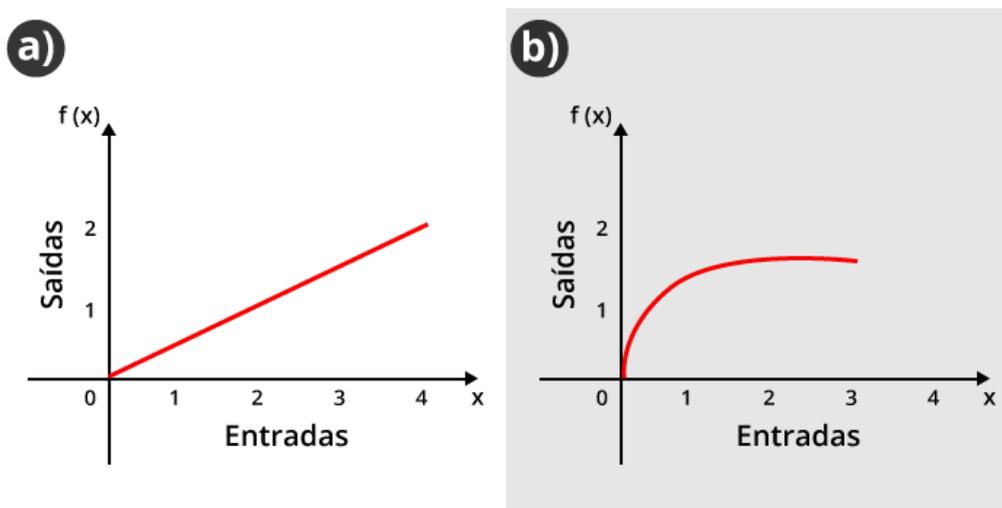
Figura 04 - Princípio da superposição e homogeneidade.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Podemos visualizar a linearidade, como mostrado na Figura 5. A Figura 5(a) é um sistema linear cuja saída é sempre $\frac{1}{2}$ (metade) da entrada, ou $f(x) = 0,5x$, independentemente do valor de x . Assim, cada uma das duas propriedades dos sistemas lineares se aplica. Por exemplo, uma entrada de valor 1 produz uma saída de $\frac{1}{2}$, e uma entrada de 2 produz uma saída de 1. Utilizando a superposição, uma entrada que é a soma das duas entradas originais, isto é 3, deve produzir uma saída que é a soma das saídas individuais, isto é, 1,5. Pela Figura 5(a) uma entrada de 3 realmente produz uma saída de 1,5.

Figura 05 - a. Sistema linear; **b.** Sistema não linear.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Para testar a propriedade de homogeneidade, admita uma entrada de 2, a qual produz uma saída de 1. A multiplicação dessa entrada por 2 deveria produzir uma saída duas vezes maior, isto é 2. Pela Figura 5(a) uma entrada de 4 produz realmente uma saída de 2. As propriedades da linearidade certamente não se aplicam à relação mostrada na Figura 5(b).

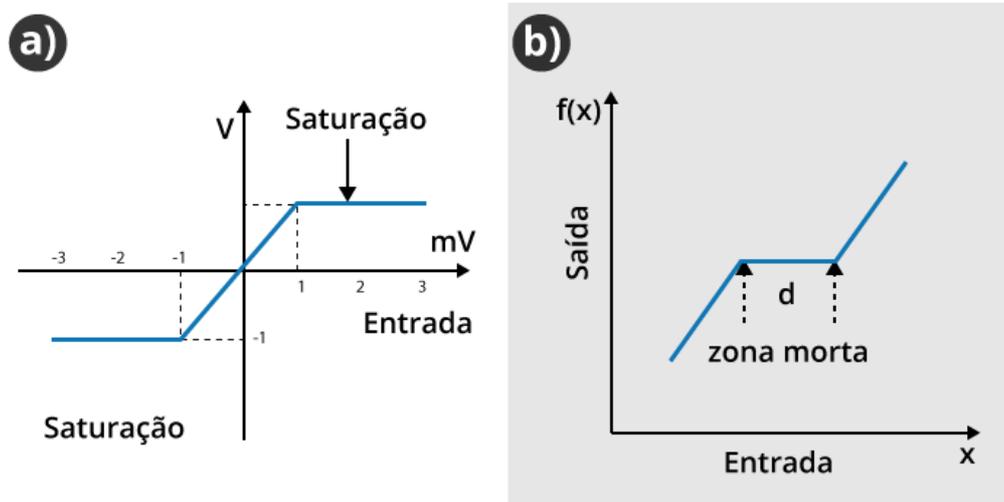
Sistema Não Linear

Um sistema não linear é aquele que não atende ao princípio da sobreposição (superposição e homogeneidade) de efeitos.

A Figura 6 mostra alguns exemplos de não linearidades físicas. Um amplificador eletrônico é linear sobre uma faixa específica de valores, porém apresenta a não linearidade denominada *saturação* para tensões de entrada elevadas (só amplifica um sinal até determinado ponto). Um motor que não responde a tensões de

entrada muito baixas, devido às forças de atrito ou que dentro das tensões de entrada há uma região para a qual o motor não responde, apresenta uma não linearidade denominada zona morta (faixa pré-determinada da entrada na qual a saída permanece inalterada).

Figura 06 - Algumas não linearidades físicas: **a.** Saturação de amplificador; **b.** Zona morta de motor.

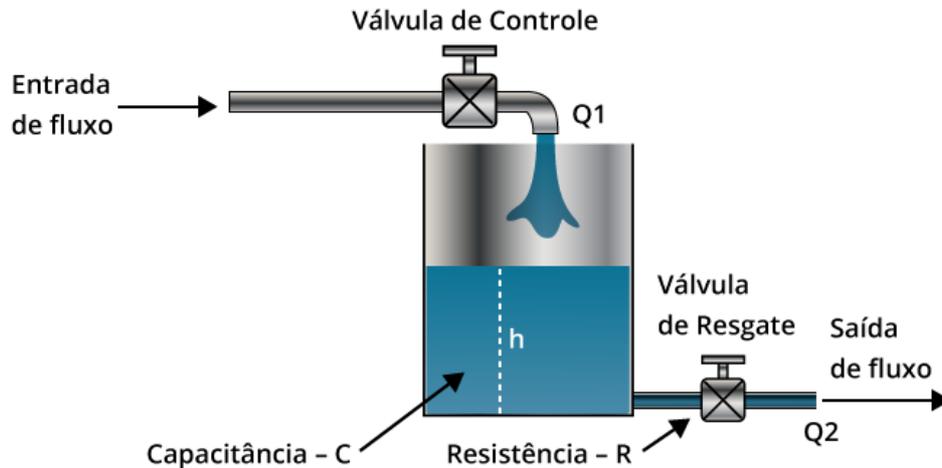


Fonte: Adaptado de <http://www.sabereletronica.com.br/artigos/2773-amplificadores-operacionais-novos-e-velhos-conceitos> Acesso em: 29 dez. 2015.

Comportamento dos sistemas dinâmicos

Para o estudo da automação de um processo interessa conhecer as relações existentes entre as variáveis de entrada e de saída (variáveis manipulada e controlada) quando não há variações no tempo, isto é, em condições de equilíbrio. As relações entre as variáveis, nas condições de equilíbrio, são as *características estáticas*. Assim, no processo representado na Figura 7, a cada vazão de entrada Q_1 , vai corresponder, depois de atingido o equilíbrio, um certo nível h (admitindo que não se atua na restrição R).

Figura 07 - Sistema de nível.



Fonte: Adaptado de <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1526-identificao-de-sistemas-e-sintonia-de-malhas-de-controle> Acesso em: 28 dez. 2015.

A relação representada por $h = f(Q1)$ (o nível depende apenas da entrada de fluxo) exprime uma das características estáticas do processo.

Nas relações que exprimem as características estáticas não entra a variável tempo.

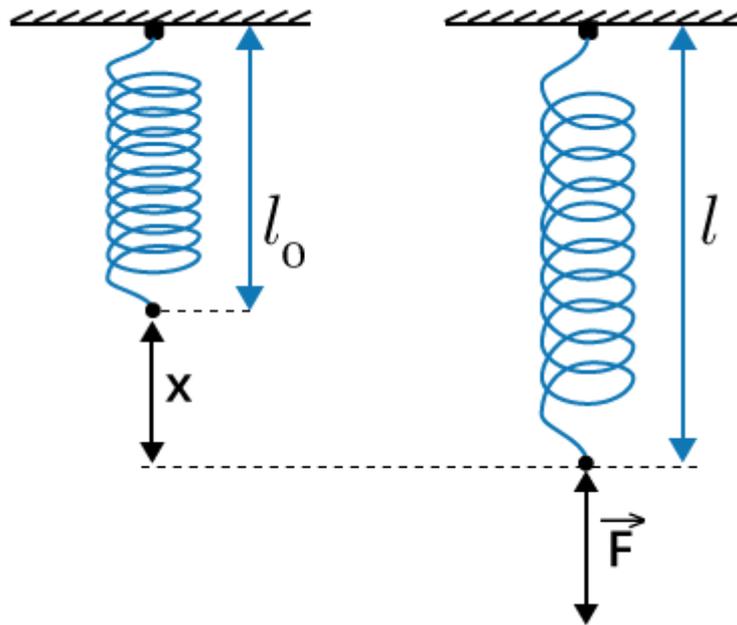
Mas a cadeia de controle automático foi concebida para atuar quando as condições se desviam do equilíbrio. Interessa então, especialmente, conhecer a maneira como a variável controlada evolui ao longo do tempo quando há perturbações do equilíbrio do processo. Esses desvios do equilíbrio são devidos a alterações nos valores de uma ou mais variáveis de carga (Perturbação no processo que ocorre devido à variação em uma variável secundária que altera a variável de processo. Por exemplo, em um controle de vazão, se for alterada a pressão de fluido, a vazão do processo é afetada indiretamente.) ou da própria variável manipulada. No caso do nosso exemplo, se a vazão $Q1$ passar bruscamente para um novo valor (é o que se chama *perturbação em degrau*) como é que a variável h vai variar ao longo do tempo até atingir um novo equilíbrio? Isto é, qual a forma da função: $h = f(Q1, t)$? (Equação que representa o nível h como uma função que depende da vazão de entrada $Q1$ e do tempo t .)

As equações e curvas que exprimem a evolução da variável controlada após uma perturbação são as características dinâmicas. O conhecimento do comportamento dinâmico, dos processos e dos restantes elementos da cadeia de

controle é o problema fundamental do controle automático de processos.

Vamos imaginar outro exemplo, como mostrado a seguir na Figura 8:

Figura 08 - Mola sendo distendida por uma Força F.



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAwnsAE/lei-hooke> Acesso em: 30 dez. 2015.

Consideremos uma mola vertical presa em sua extremidade superior, conforme mostra a Figura 8. Ao aplicarmos uma força de intensidade F em sua extremidade livre, essa mola sofrerá uma deformação x , que representa a variação ocorrida em seu comprimento ($x = l - l_0$).

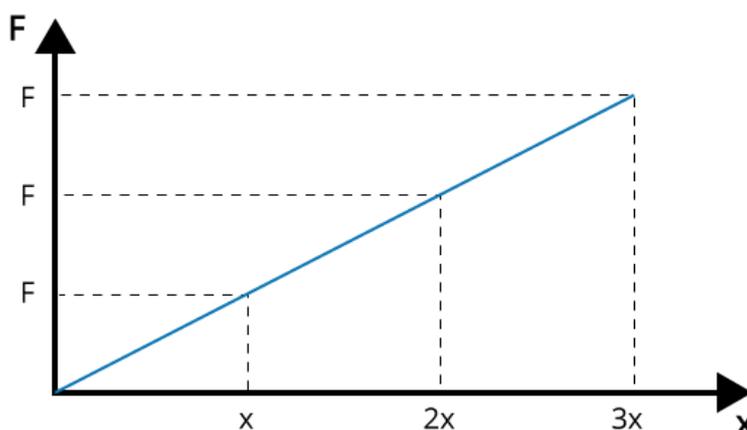
Essa deformação é denominada elástica quando, retirada a força, a mola retorna ao seu comprimento original (l_0). Robert Hooke, cientista inglês, verificou experimentalmente que, em regime de deformações elásticas, a intensidade da força aplicada à mola é diretamente proporcional à deformação produzida. Isto é, se duplicarmos a intensidade da força aplicada à mola, sua deformação dobrará, e assim por diante enquanto a deformação for elástica.

Podemos sintetizar a *lei de Hooke* pela seguinte expressão:

$$F = K \times x$$

onde K é uma constante de proporcionalidade característica da mola, chamada constante elástica da mola. Sua unidade no SI (*Sistema Internacional de Unidades*) é Newton por metro (N/m). A força F é dada em Newton e a deformação da mola é dada em metros. Para ilustrar melhor, observemos um gráfico que relaciona a Força com a deformação da mola na Figura 9.

Figura 09 - Força versus deformação em uma mola.



Fonte: <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/representacao-grafica-lei-hooke.html> Acesso em: 31 dez. 2015.

O sistema descrito é chamado de *sistema estático* (não depende do tempo). Em um sistema estático, o valor da sua saída depende apenas do valor da sua entrada no instante atual. Consideraremos a entrada do sistema como sendo a força com que a mola é puxada e a saída a sua deformação. A deformação da mola em um instante qualquer independe da sua deformação em instantes passados. A definição analítica de sistemas dinâmicos é algo, no nosso contexto, um pouco difícil, pois alguns conceitos matemáticos necessários não são trabalhados no ensino médio. O conceito de *derivada* (ferramenta matemática utilizada no estudo das variações das funções) ajuda a definir melhor os sistemas dinâmicos.

Em linhas gerais, um sistema dinâmico é aquele em que, o valor da sua saída no instante atual depende dos valores passados das suas entradas e saídas. Se desenhássemos o gráfico da deformação da mola (sistema estático) em relação ao tempo, considerando uma força constante de entrada, teríamos um gráfico como apresentado a seguir:

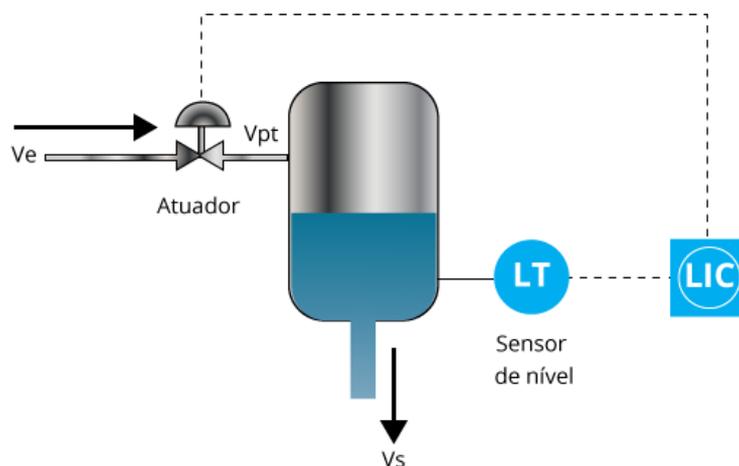
Figura 10 - Deformação da Mola em Relação ao Tempo.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Todo e qualquer sistema em que sua saída no instante atual dependa de entradas e saídas passadas, é considerado um sistema dinâmico. Vamos imaginar o seguinte sistema de nível mostrado na aula anterior (Figura 11):

Figura 11 - Sistema de Nível.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2015)

Imaginemos duas situações possíveis:

Situação 1: Considere que a vazão de entrada V_e é fixa. V_{pt} é a vazão para o tanque controlada pela válvula de controle (atuador) de acordo com sua abertura ou fechamento, cujo comando é advindo de um controlador (LIC). Imagine que o tanque está com 50% da sua capacidade de nível e com as vazões de entrada V_{pt} e saída V_s constantes para uma abertura da válvula de 30%. Se aumentarmos um

pouco a abertura da válvula, digamos para 40%, isso implica em aumentar a vazão para o tanque e o nível aumentará um pouco até alcançar um novo estado de equilíbrio. A válvula na tubulação funciona como uma resistência à passagem do fluido.

Situação 2: Suponha que o tanque está totalmente vazio e, abruptamente, sua vazão de entrada **V_{pt}** aumente para um determinado valor. Isso equivale a dar um comando em degrau na abertura da válvula (entre 0-100%) que estava totalmente fechada. Com o passar do tempo (regime permanente) considere que para este processo, a vazão de entrada **V_{pt}** será igual à vazão de saída **V_s**, e o nível do tanque se manterá em equilíbrio (o nível será constante).

Agora, se fizermos a seguinte pergunta: o comportamento da saída do tanque será igual nas duas situações? A resposta é **não**. Isso se deve ao fato de que o sistema é dinâmico, ou seja, ele depende dos seus estados atuais/anteriores.

Atividade 02

Faça uma pesquisa sobre outro sistema dinâmico. Apresente as razões pelas quais o sistema é classificado como dinâmico.

Regime Transitório e Regime Permanente

Classificaremos os sistemas de acordo com a sua resposta no tempo. A resposta de um sistema é o comportamento da sua saída para uma determinada entrada. Para se estudar os sistemas dinâmicos, divide-se sua resposta temporal em duas partes (já vistos na aula anterior): regime transitório e regime permanente.

O regime transitório é analisado a partir do instante em que se aplica uma variação em sua entrada até o instante em que o sistema não varia mais (ou varia pouco). Ou seja, é o período no qual, a partir de uma variação inicial, a variável controlada apresenta alterações. Terminado o transitório, dizemos que o sistema encontra-se em regime permanente.

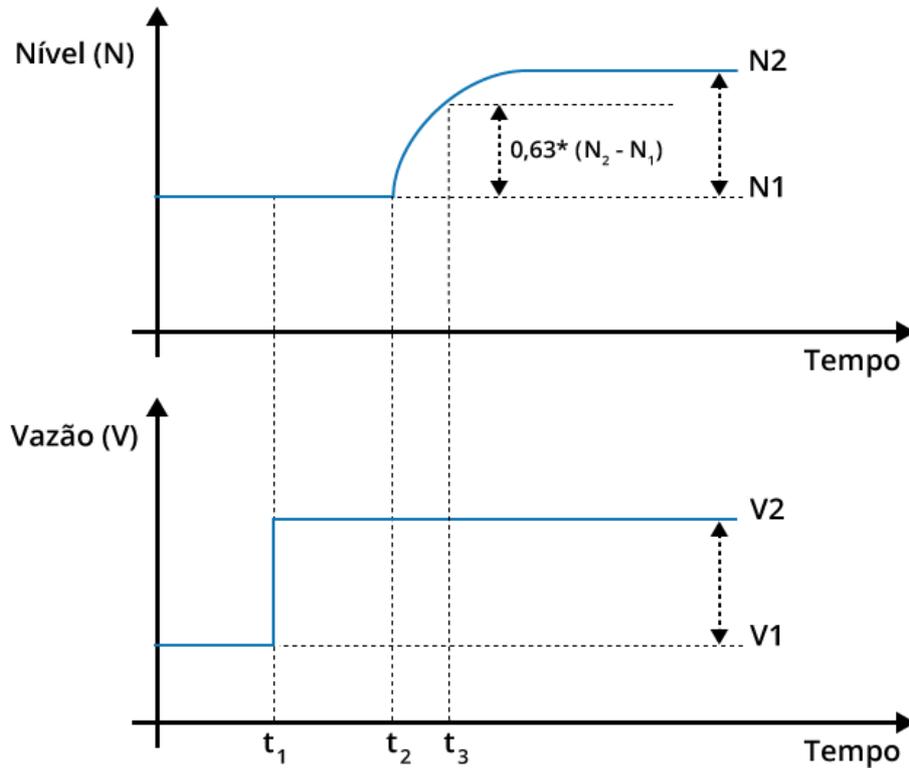
O regime permanente é analisado a partir do instante que sua saída não varia mais (ou varia pouco). Ou seja, é o período a partir do qual a variável controlada converge para um valor ou comportamento aproximadamente constante. Dependendo do comportamento do sistema, este será classificado como de primeira ordem ou de segunda ordem, como será visto nas seções seguintes

Sistemas de Primeira Ordem

Se tomarmos como exemplo novamente o tanque que armazena um volume de líquido, quando submetido a uma variação brusca na vazão de entrada (como já vimos, normalmente chamada de variação em degrau), teremos como resposta uma variação diferente de um degrau (chamada de variação exponencial), devido à resistência e à capacitância (São as partes do processo que têm a capacidade de armazenar energia ou material.) do sistema. Um exemplo de uma resposta pode ser vista na Figura 12.

Os sistemas de primeira ordem são caracterizados por serem sistemas que não oscilam durante o regime transitório. É comum na indústria de processos as entradas e saídas dos sistemas estarem normalizadas na faixa de 0-100%. Desta forma, é possível “conversar” igualmente com grandezas físicas diferentes. Por exemplo, uma variação na vazão de entrada de 30% acarretou em uma variação no nível de 15%, e assim por diante. Isso torna mais fácil o entendimento e a relação entre as variáveis de um processo.

Figura 12 - Resposta temporal de um processo de primeira ordem a uma entrada em degrau.



Fonte: Campos e Teixeira (2010).

Observamos, pelo gráfico da saída (N), que o sistema leva um tempo para começar a responder ao degrau aplicado em $t = t_1$. Essa demora na resposta é denominada de **atraso de transporte, tempo de transporte, tempo morto** ou simplesmente **atraso**. O tempo morto é o tempo transcorrido entre o aparecimento do distúrbio e o início da resposta do sistema de controle. O tempo morto, pela Figura 12, é dado por $((\Theta - \text{Teta}))$:

$$\Theta = t_2 - t_1$$

O tempo morto invariavelmente ocorre quando se tem o transporte ou a transferência de massa, de energia ou de informação entre dois pontos do sistema.

Observamos também que para uma variação aplicada na entrada do sistema $\Delta V = V_2 - V_1$, obtemos uma variação na saída $\Delta N = N_2 - N_1$. A relação entre essas variações é chamada de **ganho do sistema** ou **ganho estático**, denominado pela letra K, ou seja:

$$K = \frac{\Delta N}{\Delta V} = \frac{N_2 - N_1}{V_2 - V_1}$$

Em outras palavras, o *ganho estático* de um processo é obtido quando o mesmo se encontra em equilíbrio, no regime permanente.

Observamos também que o sistema leva um determinado tempo até se estabilizar. Para o projeto de controladores (sistemas de primeira ordem) não levaremos esse tempo em conta. O tempo que consideraremos é o tempo necessário para a saída do sistema atingir 63% do seu valor final. Em outras palavras, devemos considerar o tempo para o sistema atingir $0,63 * \Delta N = 0,63 * (N_2 - N_1)$. Esse tempo é denominado de **constante de tempo** e é dado por ($\tau - Tau$):

$$\tau = t_3 - t_2$$

Depois de decorrido um tempo equivalente a cinco constantes de tempo, pode-se dizer que a variável de saída atingiu o novo valor de regime permanente. Algumas vezes, considera-se a estabilização em quatro constantes de tempo.

Os três parâmetros mencionados caracterizam um *sistema de primeira ordem com atraso*. O regime transitório desse tipo de sistema é determinado pela constante de tempo τ . Quanto maior a constante de tempo, mais lentamente o sistema atingirá a estabilização, sistema é dito lento. Quanto menor τ mais rápido será a sua resposta, sistema é dito rápido. Na análise em regime permanente, verificamos se o sistema possui erro estacionário, ou seja, se existe diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída após o sistema estabilizar.



Vídeo 03 - Sistema de Primeira Ordem

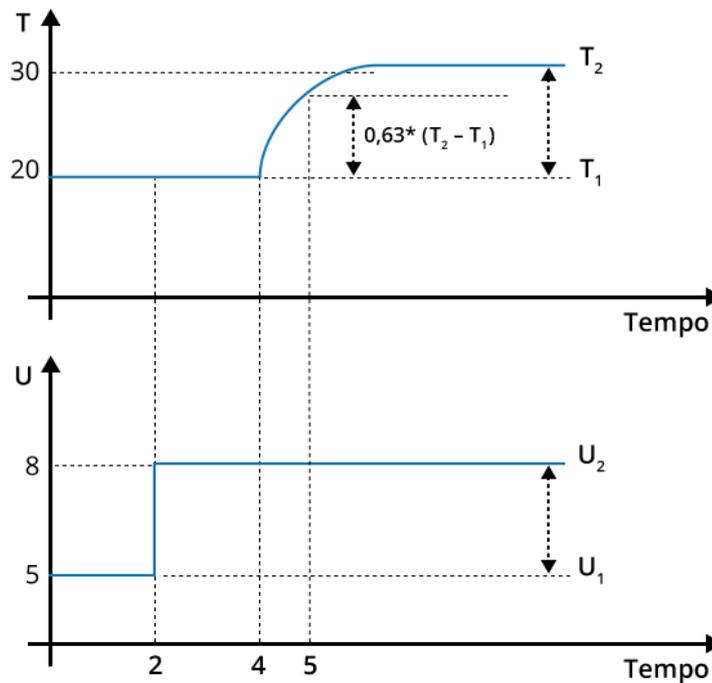
Atividade 03

1. Pesquise qual o significado físico do ganho estático K . Como será o comportamento da saída de um processo para uma determinada entrada em degrau, quando o ganho estático do processo é 1 e para ganhos estáticos diferentes de 1?

Atividade 04

1. Considere a resposta ao degrau de um sistema mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Resposta temporal de um processo de primeira ordem a uma entrada em degrau.



Fonte: Adaptado de Campos e Teixeira (2010).

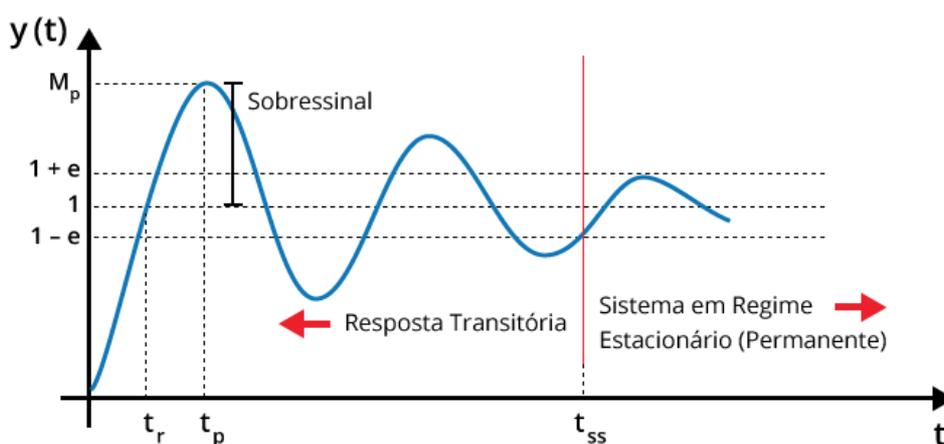
Raciocinando:

- Calcule o tempo morto do sistema.
- Calcule o ganho do sistema.
- Calcule a constante de tempo do sistema.
- Calcule o valor da saída correspondente à constante de tempo.
- O sistema possui erro estacionário? Explique.

Sistemas de Segunda Ordem

Os sistemas de segunda ordem são sistemas que **podem** oscilar, geralmente em torno do seu valor final. Vamos tomar como exemplo a resposta ao degrau do sistema ilustrado na Figura 14. Esse é um sistema de segunda ordem classificado como *subamortecido*, o que caracteriza sua oscilação. A resposta mostrada na Figura 14 é de um sistema com ganho 1, tendo sido aplicado na sua entrada um degrau de amplitude 1.

Figura 14 - Resposta temporal de um processo de segunda ordem a uma entrada em degrau.



Fonte: Adaptado de Dantas (2003).

Com relação ao regime transitório de um sistema de segunda ordem, alguns critérios de especificações de desempenho são definidos. O primeiro critério de especificação é o tempo de subida t_r , que é o tempo necessário para que o sistema atinja pela primeira vez o seu valor de regime (valor final). Esse tempo nos dá uma ideia da velocidade com que o sinal de saída está aumentando. Outro critério especificado é o tempo de estabilização t_{ss} , que é o tempo necessário para que o sinal de saída fique confinado entre os valores $1+e$ e $1-e$, geralmente igual a 0,05 (5%) ou 0,02 (2%). Ou seja, t_{ss} , algumas vezes chamado também de tempo de acomodação, é o tempo para o qual a saída alcança e permanece dentro da faixa de $\pm 5\%$ ou $\pm 2\%$ em torno do valor em regime permanente.

É importante lembrar que no caso em questão o sistema, por ter ganho 1, tem valor de saída em regime permanente igual a 1. Outro critério de especificação é o sobressinal ou *overshoot*. É o maior pico do sinal de saída, medido a partir do valor de regime ou a maior quantidade que a saída ultrapassa o valor de regime por ocasião da oscilação. Normalmente é expresso em termos percentuais em relação ao valor de regime. Ou seja, o sobressinal indica percentualmente em quanto o maior pico ultrapassou o valor em regime. O último critério de especificação é o instante de pico t_p , que é o instante em que o pico do sobressinal ocorre.

A resposta do sistema da Figura 14 também pode ter um atraso de transporte. Isso corresponderia a um deslocamento na curva para a direita.

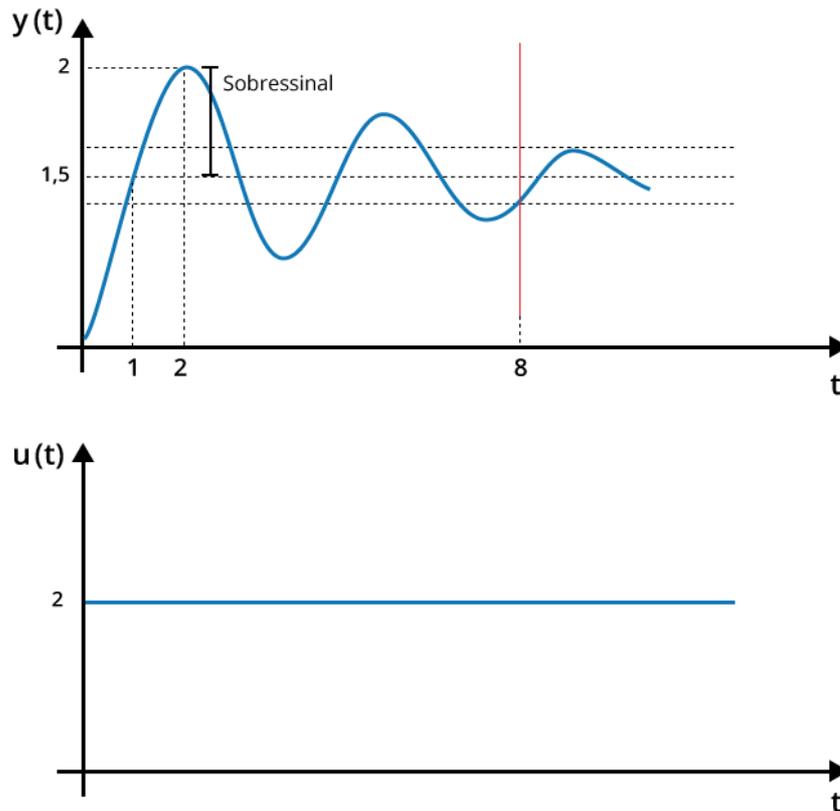


Vídeo 04 - Especificações das Respostas Transitórias

Atividade 05

1. Considere o gráfico de resposta de um sistema de segunda ordem a uma entrada em degrau mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Resposta temporal de um processo de segunda ordem a uma entrada em degrau.



Fonte: Adaptado de Dantas (2003).

Com relação ao sistema mostrado:

- Qual o tempo de subida do sistema?
- Sabendo que o tempo de estabilização do sistema pelo critério de 5% é 8 unidades de tempo, defina a faixa de saída para a qual considera-se que o sistema estabilizou.
- Qual o overshoot percentual do sistema?

$$M_p(\%) = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor final}}{\text{Valor final}} * 100$$

- Qual o instante de pico do sistema?
- O sistema possui erro estacionário? Explique.

Resumo

A dinâmica dos processos procura estudar o seu comportamento durante as variações na alimentação do processo ou na carga. O processo sairá de um regime estacionário para outro. Os processos reais são estruturas complexas e normalmente são aproximados por modelos mais simples. Foram apresentados os principais tipos de sinais utilizados na indústria (degrau e rampa). Estudamos a diferença existente entre sistemas estáticos e sistemas dinâmicos. Aprendemos, também, como é feita a análise dos sistemas dinâmicos tanto em regime transitório como em regime permanente. Vimos que a maioria dos sistemas pode ser classificada como sistemas de primeira ordem e sistemas de segunda ordem. Para cada um desses sistemas, aprendemos como caracterizá-los. Caso sintam necessidade, não hesitem em voltar a ler o material didático de vocês, tudo bem?

Autoavaliação

1. O que são sistemas dinâmicos? Dê exemplos práticos desses sistemas.
2. Um sistema de primeira ordem está estável com valor de saída igual a 10. Aplicando-se uma variação em sua entrada de $\Delta U=2$, sabendo que o sistema tem ganho estático de $K=2,5$, qual o valor da sua saída em regime permanente?
3. O que é o tempo morto em um sistema de primeira ordem? Pesquise exemplos práticos de sistemas que possuem tempo morto.
4. Um sistema de segunda ordem ao ser perturbado com uma entrada em degrau apresentou overshoot de 10%. Sabendo que tanto a entrada quanto a saída estavam inicialmente em 0, considerando que o sistema atingiu seu ponto máximo no valor 15, qual o valor de regime desse sistema?

Referências

ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, controle e automação de processos**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

CAMPOS, Mario Cesar M. Massa de; TEIXEIRA, Herbert C. G. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

DANTAS, A. A. M. **Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos**: material didático. Natal: DCA/UFRN, 2003.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.

SANTOS, José J. Horta. **Automação industrial**: uma introdução. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.