Controle de Processos: *Definições e terminologias (1/2)*

Prof. Eduardo Stockler Tognetti
& David Fiorillo

Laboratório de Automação e Robótica (LARA)
Dept. Engenharia Elétrica - UnB

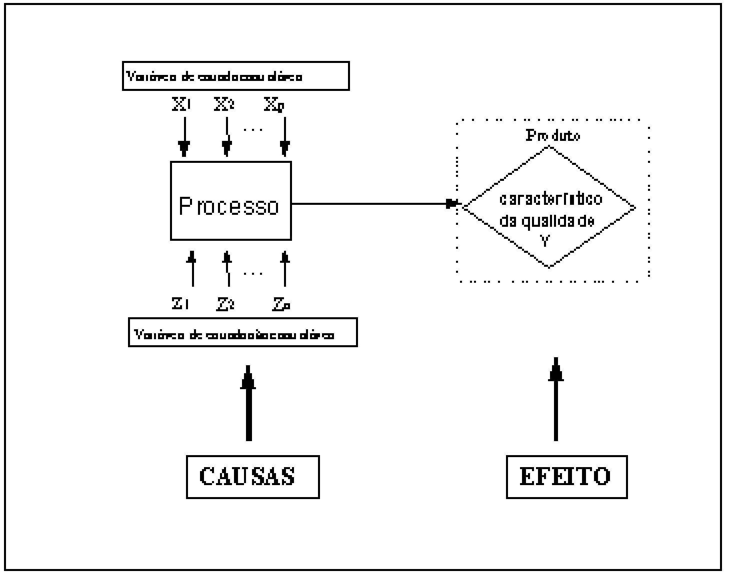
Conteúdo

Processo

- Apesar dos diversos tipos existentes, o conceito de processo pode ser considerado universal. Assim, seja para uma partida de futebol, um almoço com os amigos e até mesmo um processo de manufatura, o conceito pode ser estendido. O conceito clássico pode ser definido como um conjunto de causas que tem por objetivo produzir um ou mais efeitos específicos.

Processo industrial

- Pode ser qualquer operação ou série de operações que produza o resultado final desejado. O processo consiste na modificação das matérias primas, colocadas na sua entrada, nos produtos finais, obtidos em sua saída, através do suprimento de energia, durante um determinado período de tempo.

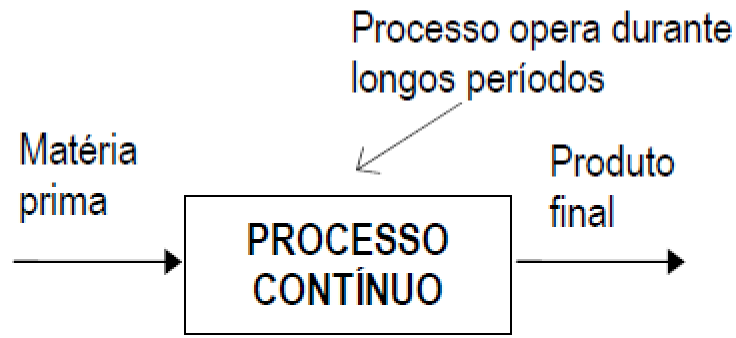


Processo industrial

- Sob o ponto de vista do tempo e do tipo de operação envolvido, o processo pode ser classificado em contínuo, batelada, discreto e fabricação de itens.

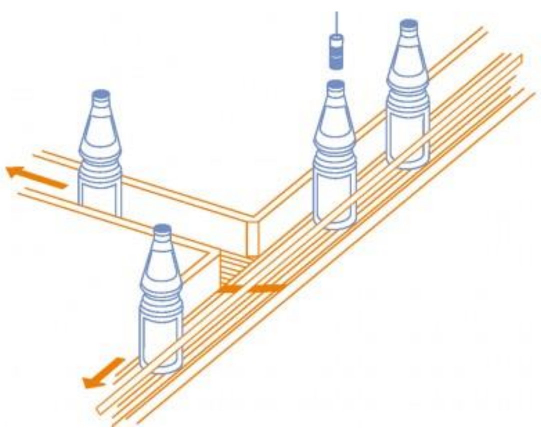
Tipos de processos industriais
Contínuo

- O processo é contínuo quando a matéria prima entra num lado do sistema e o produto final sai do outro lado continuamente.
- O termo contínuo significa um período de tempo relativamente longo (h, dias).
- Exemplos: Mineração, siderurgia, petroquímia, sucro-alcooeira, etc.



Tipos de processos industriais Discretos

- O processo discreto envolve muitas operações de liga-desliga. O seu controle se baseia no mundo binário (digital), onde os estados de um equipamento ou instrumento só podem assumir as condições de ligado ou desligado, energizado ou desenergizado, aceso ou apagado, alto ou baixo, 1 ou 0. O processo discreto requer controle lógico e pode ser dimensionado a partir dos SEDs (sistemas de eventos discretos)



Controle de processos

- Controlar um processo é acima de tudo controlar a qualidade deste, sendo possível pelas seguintes etapas:
  - Avaliação do desempenho real;
  - Comparação do desempenho real com as suas metas;
  - Atuação nas diferenças entre desempenho real e metas.
- O conceito de controle é de manter o status quo, isto é, de manter o processo em seu estado planejado de modo que ele continue capaz de atingir as suas metas planejadas.

Por que controlar um processo

- Um processo necessita ser controlado devido à três motivos básicos:
  - Variabilidade: atributos de qualidade (dimensões, temperatura, pressão, etc) saem de especificações;
  - Entropia: está relacionada a tendência de desordem natural das coisas. Mesmo um processo que apresenta estas condições necessita ser controlado, nem que a frequência de controle seja muito reduzida. O principal motivo é que estas condições não são permanentes, ambas estão sujeitas a se deteriorarem com o tempo devido ao efeito da entropia. Ex: proteção catódica em gasodutos.
  - Custo: Um processo pode operar em estado fora de controle e produzir uma parcela de produtos não conformes, mas isto pode representar um elevado custo. Ou, operar em conformidade com a qualidade e poder ser otimizado para reduzir os custos.

Modelos

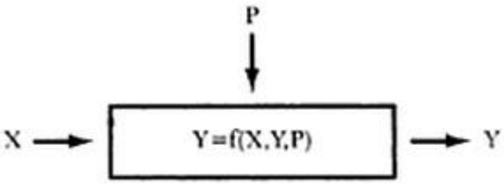
- Os modelos podem ser físicos (protótipo, plantas-piloto) ou matemáticos (representações da realidade por equações)
- Desta forma, o modelo não pode incorporar todas as características, tanto macro como microscópicas, do processo real. Deve-se buscar um compromisso entre o custo de se ter um modelo (esforço requerido para obtê-lo, verificá-lo e o nível de detalhes para a aplicação)

Simulação

- É a obtenção da resposta temporal das variáveis de interesse (variáveis dependentes) de um modelo, quando se excita suas variáveis de entrada com sinais desejados e se definem os valores das condições iniciais das variáveis dependentes.
- Para engenharia de controle de processos muitas vezes não interessante obter modelos estáticos (que não retratam a dinâmica). Contudo, há casos em que só as relações estáticas são conhecidas. Um exemplo disso é a modelagem de sistemas termodinâmicos.

Aplicações da simulação dinâmica

- A simulação é usada desde o projeto até a operação, incluindo estudos de viabilidade econômica de processos, e pode ser usada em:
  - Projeto de equipamentos, processos e plantas: Os dados X, Y para avaliar P pode ser usados para interações de várias parte do processo, estratégia de controle, seleção de variáveis controladas e manipuladas e dimensionameno/arranjo físico.
  - Pré-operação e operação de plantas: Dados Y ou X, dados X e P ou Y e P para melhorar entendimento do processo e avaliar riscos, start-ups, treinamentos, etc.
  - Sistemas de controle de processos: ajuste de controladores, novas leis e estratégias de de controle baseado em simulação.
  - Otimização das condições operacionais de plantas: Procura-se determinar X e Y para maximizar (ou minimizar) uma função-objetivo.



onde:
X = conjunto de variáveis de entrada
Y = conjunto de variáveis de saída
P = parâmetros do sistema incluindo condições de contorno

Tipos de modelos para sistemas dinâmicos

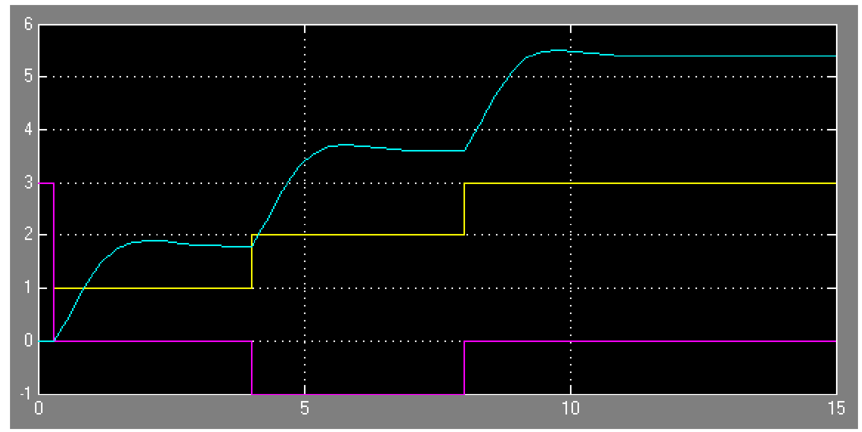
- Para certos sistemas é apropriado descrever suas propriedades usando tabelas e/ou gráficos, chamados modelos gráficos.
- Modelos lineares podem ser descritos de forma única por sua resposta ao degrau ou ao impulso, ou pela sua resposta em frequencia através dos diagramas de Bode e Nyquist.
- Modelos não-lineares podem também serem descritas através de um modelo gráfico.
- Aplicações mais avançadas requerem mais detalhes como expressões matemáticas como equações diferenciais ou de diferenças
- Por fim, sistemas complexos, utiliza-se modelo codificado (programa computacional) para realizar um simulações numérica. Tais modelos computacionais calculam numericamente diversas equações a cada iteração para descrever a evolução (dinâmica) do problema

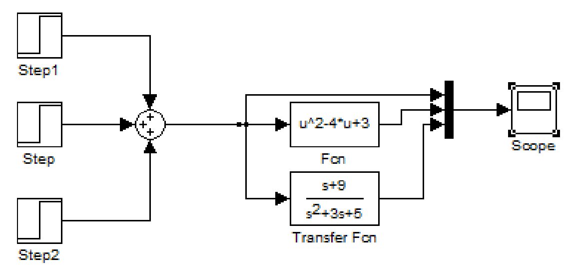
Modelos matemáticos

- Os modelos são classificados de acordo com o tipo de equação:
  - Estático x dinâmico
  - Linear x não-linear
  - SISO x MISO x MIMO
  - Paramétricos x não-paramétricos
  - Invariantes x variantes no tempo
  - Domínio do tempo x frequencia
  - Tempo contínuo x discreto
  - Amplitude contínua x discreta
  - Parâmetros concentrados x distribuídos
  - Determinísticos x estocásticos

Estático x dinâmico

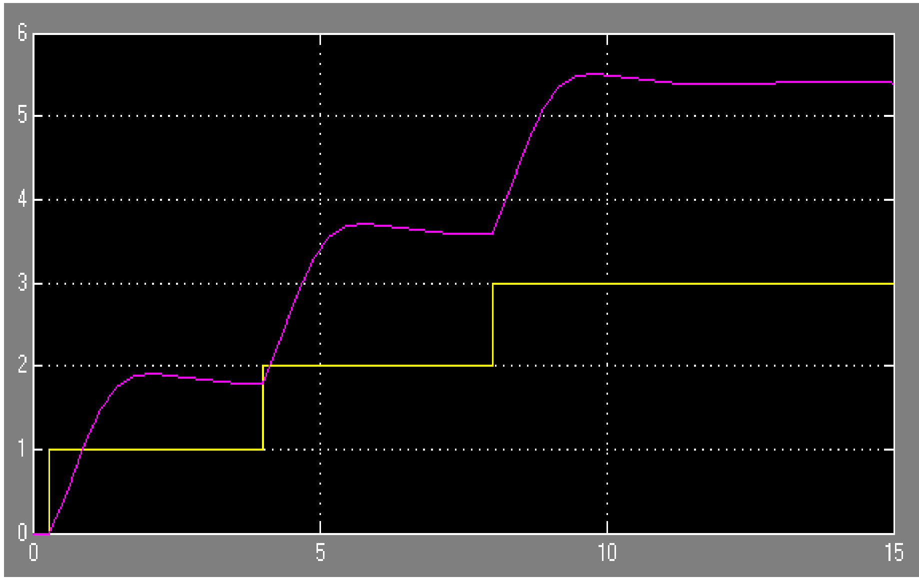
- Estático (estacionário): processo cujo valor das variáveis permanece constante no tempo (se as entradas permanecem as mesmas, as saídas ficam inalteradas). Esse modelo não possui “memória”, daí o efeito de uma variável de entrada será instantâneo (equações algébricas).
- Dinâmico (transiente ou transitório): as variáveis variam no tempo, que é a variável independente. O efeito de um sinal de entrada irá influenciar o comportamento do sistema nos instantes posteriores (equações diferenciais ou a diferenças).

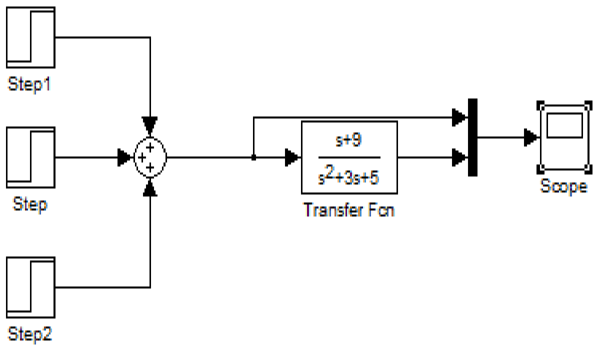




Linear x não-linear

- Linear: as saídas dependem linearmente das entradas e possíveis perturbações, caso contrário o sistema é não-linear. A linearidade implica no princípio da Superposição, o que significa que se pode calcular a saída de sistema excitado por qualquer tipo de entrada dividindo-se a entrada em componentes simples e adicionando-se as respostas de cada componente.
- Não-linear: a resposta a qualquer variável de entrada seja afetada pelo comportamento das outras entradas, de forma que é necessário identificar as relações entre todas as entradas e saídas simultaneamente.

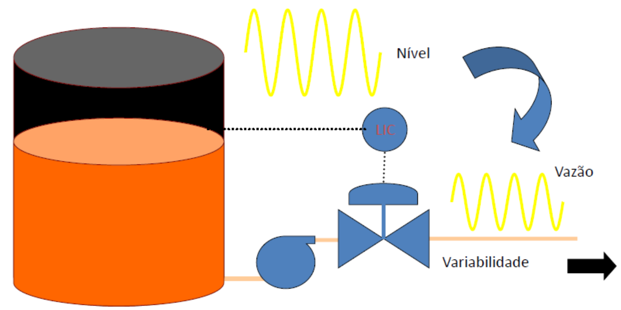


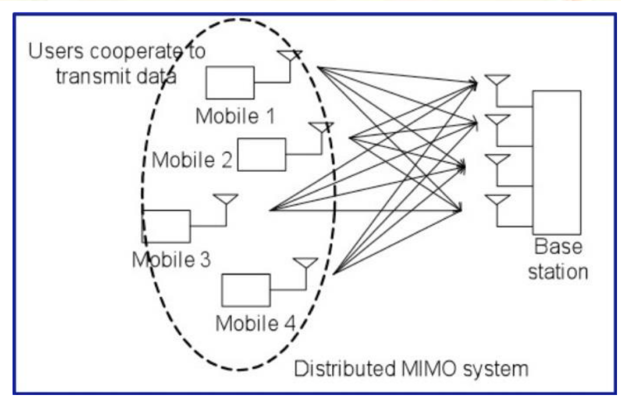


$$f(x1+x2) = f(x1) + f(x2);\ f(K*x1) = K*f(x1)$$

SISO x MISO x MIMO

- SISO: Single input, single output – única entrada e única saída.
- MISO: Múltiplas entradas e única saída.
- MIMO: Múltiplas entradas e múltiplas saídas





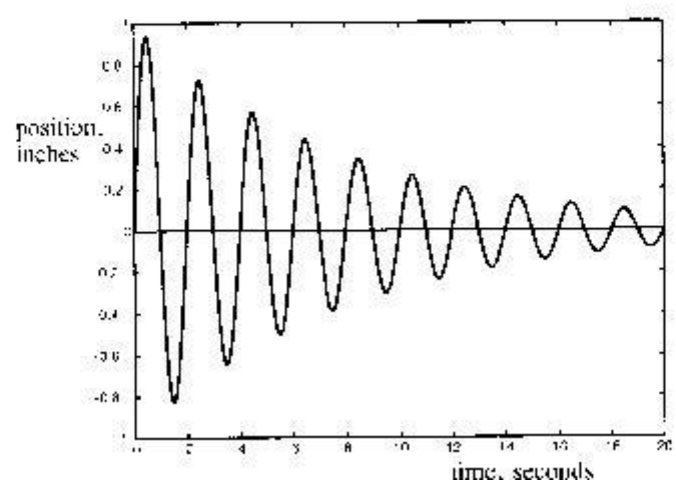
Paramétricos x não-paramétricos

- Paramétricos: utiliza em sua estrutura um conjunto de parâmetros. Portanto, possui uma estrutura, ordem e parâmetros a determinar.
- Não-paramétricos: gráficos ou tabela de resposta, no tempo ou frequencia, de entradas impulso ou degrau caracterizam modelos não-paramétricos

$$H(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{0.2s + 0.2}{s^2 + 1.2s + 0.4} \\ \dfrac{0.4s + 0.2}{s^2 + 1.2s + 0.4} \end{bmatrix} = \frac{0.2s + 0.2}{s^2 + 1.2s + 0.4} \triangleq \frac{N(s)}{D(s)}$$

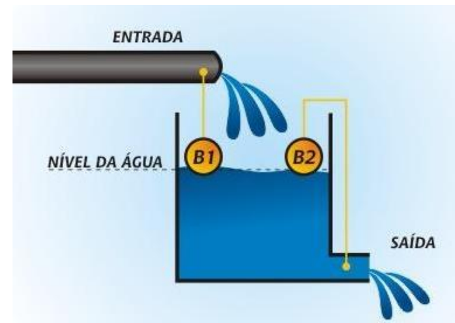
$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} u(t)$$



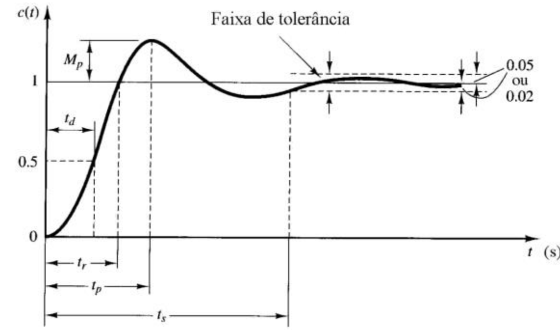
Invariantes x variantes no tempo

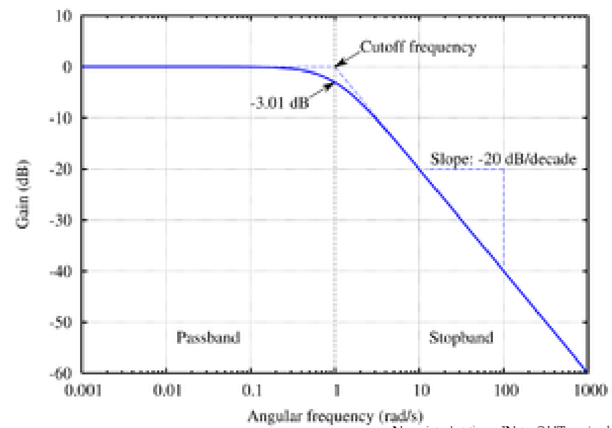
- Invariantes: seus parâmetros não variam ao longo do tempo. Modelos invariantes (ou variação insignificante) são comuns.
- Variantes: seus parâmetros variam no tempo (significativamente). Um clássico exemplo é o coeficiente de transferência térmica de trocadores de calor do tipo casco-tubos.

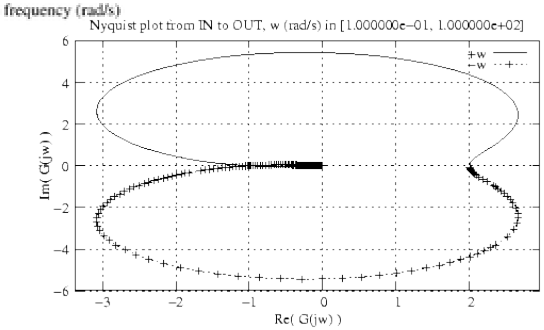


No domínio do tempo x frequência

- Tempo: exemplos de modelos neste domínio são aqueles em que possuem o tempo como variável (implícita ou explícita). Equações diferenciais e a diferenças são exemplos.
- Frequência: Diagramas de Bode, Nyquist e densidade espectral são exemplos de modelos no domínio da frequência.

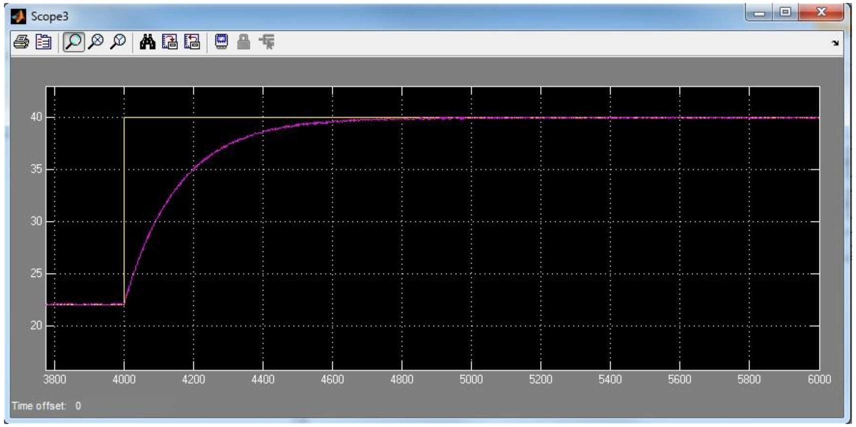


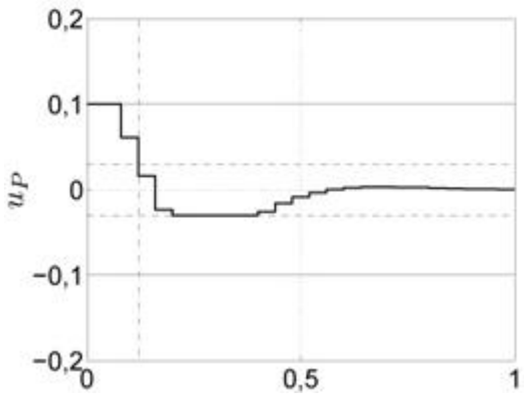




No tempo contínuo x discreto

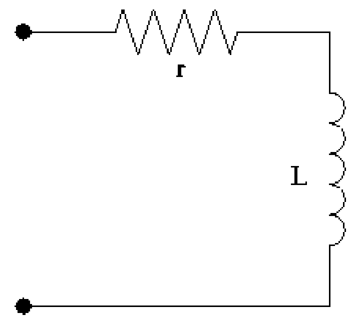
- Contínuo: são descritos por equações diferenciais. Suas variáveis mudam continuamente no tempo (taxa de amostragem infinita)
- Discreto: as relações entre entrada e saída são geralmente representadas por equações a diferenças e o passo entre pontos consecutivos de tempo são conhecidos (fazendo sentido o parâmetro de taxa de amostragem).

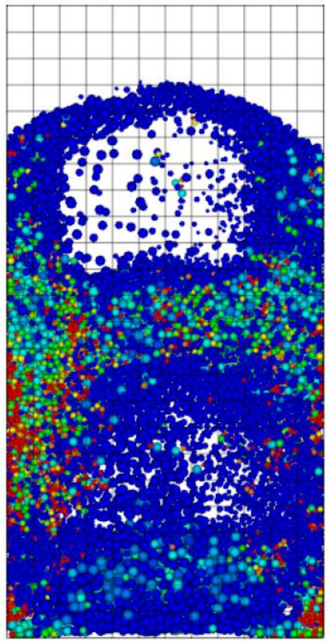




De parâmetros concentradas x distribuídos

- Concentrados (lumped): propriedades/estados do sistema são considerados homogêneos em todo volume de controle. As variações espaciais são desprezadas e são descritos por um número finito de equações diferenciais ou a diferenças ordinárias.
- Distribuídos: são descritos por um número infinito de equações ordinárias ou por equações diferenciais parciais. Todo sistema real é distribuído.

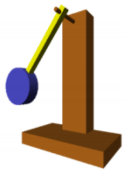


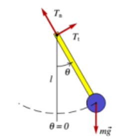


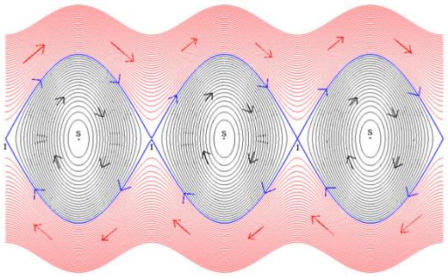
$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \bullet (\varepsilon_g \rho_g \bar{v}_g) = \sum_{n=1}^{N_g} R_{gn}$$

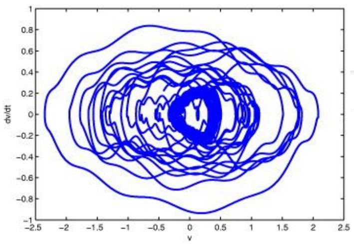
Determinísticos x estocásticos

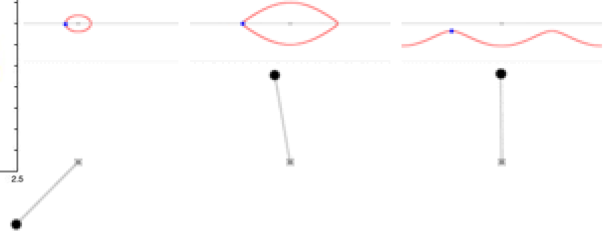
- Determinístico: a saída pode ser calculada de forma exata tão longo se conheça o sinal de entrada e as condições iniciais. Geralmente, usado para modelar o processo
- Estocástico: contém termos aleatórios que tornam impossível um cálculo exato da saída. Geralmente, usado para modelar as perturbações e ruídos.

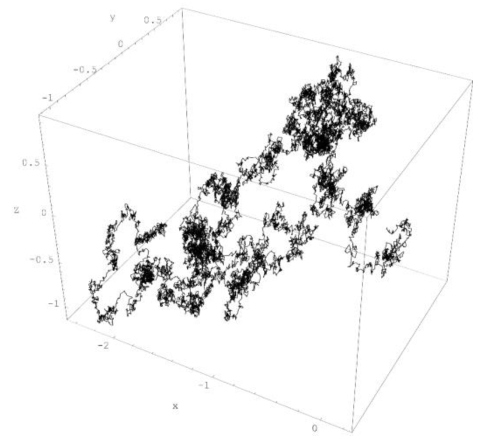


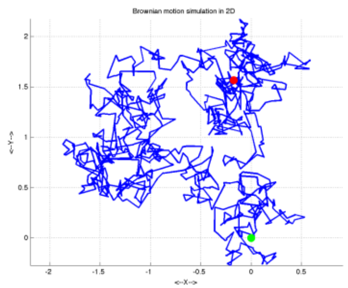












Determinísticos x estocásticos

- Até agora, este tipo de sistema caótico determinístico é muito pouco conhecido na prática de engenharia quotidiana. Como consequência, nem na modelagem plantas pequenas e escalonadas seus fenômenos foram levado em conta até agora. O fato de que um sistema caótico difere marcadamente de um sistema usualmente encontrado, especialmente em relação à sua previsibilidade, pode ser uma das razões pelas quais um projeto adequado de escalonamento ainda é uma tarefa incômoda.
- Os sistemas usualmente encontrados pertencem tanto à classe de sistemas ordenados determinísticos ou para que os sistemas de estocásticos não ordenados. Existem dois tipos de sistemas ordenados determinísticos: os assim chamados sistemas "conservadores", em que o balanço energético é restrito para a conservação da energia cinética e potencial (por exemplo, o conhecido pêndulo ideal, sem atrito), e os sistemas "dissipativos ordenados", em que parte da energia pode dissipar-se e ser transformada em, por exemplo, calor sensível e perda por fricção. Este último tipo de sistema é aquele com o qual o engenheiro químico é particularmente familiarizado. Para tal sistema ordenado determinístico é uma prática comum prever sua evolução no tempo sobre um intervalo [t1, t2], resolvendo os balanços de massa, energia e momento combinada dada a condição inicial do sistema em t = t1. É ainda possível prever o estado do sistema durante qualquer intervalo de tempo até o infinito com base no seu estado inicial do intervalo.
- A segunda classe de sistemas que aprendemos a gerir são os sistemas estocásticos. Um sistema estocástico é completamente imprevisível no intervalo [t1, t2]. Dado o estado do sistema em t1, é impossível predizer a sua evolução ao longo do tempo sobre mesmo, do passo seguinte de tempo. Só se pode calcular um valor esperado, que é um valor médio de todos os estados possíveis, ponderados pela sua distribuição de densidade de probabilidade.

Determinísticos x estocásticos

- A previsibilidade de ambos os sistemas ordenado dissipativo e estocástico também segue diretamente da teoria da informação. De acordo com Grassberger, as informações necessárias para prever a evolução temporal de um sistema no intervalo [t1, t2], dada a informação l(t1) em bits (ou seja, dada a sua condição inicial), é

$$I_{[t_1,\, t_2]} = I_{[t_1]} + K(t_2 - t_1) \qquad \text{for } t_2 - t_1 \longrightarrow \infty$$

- A invariante K representa a entropia de Kolmogorov, que é expressa em bits por unidade de tempo. Para um sistema ordenado dissipativo a entropia de Kolmogorov é igual a zero. Da equação segue diretamente que este tipo de sistema é completamente previsível ao longo de qualquer intervalo de tempo, tendo em conta o estado do sistema no início do intervalo. Para um sistema estocástico a entropia de Kolmogorov é igual a infinito. De acordo com a equação uma quantidade infinita de informação é necessária para prever o sistema ao longo de qualquer intervalo de tempo, de modo que a localização do sistema no espaço de fase é uma surpresa completa, mesmo após o intervalo de tempo menor. Para um sistema caótico a entropia de Kolmogorov está entre zero e infinito, então K =! 0, mas é finito. Isto significa que um sistema caótico é só parcialmente previsível ao longo de um intervalo de tempo limitado. Ficará claro que uma característica tão inesperada deve ter suas consequências para a descrição e projeto para este tipo de sistema. Por exemplo, pode-se demonstrar que a representação de muitos sistemas através de modelos deve conter pelo menos uma quantidade mínima de complexidade não linear para ser capaz de permitir o comportamento caótico no todo. Além disso, ele vai-se argumentar que a teoria do caos pode fornecer uma ferramenta útil para avaliar quantitativamente a similaridade dinâmica entre o tamanho final de um sistema completo e uma instalação experimental em escala piloto.

Modos de obtenção de modelos matemáticos

- Teórica ou fenomenológica: desenvolvido aplicando-se princípios básicos da física/química e outras relações bem definidas baseadas em trabalhos experimentais anteriores (relações constitutivas). Pode ser necessário conhecer certos parâmetros (i.e., coeficiente de amortecimento, etc) os quais devem ser avaliados a partir de experimentos. Esse modo de modelagem é mais difícil obter as perturbações (importante consideração na maioria dos casos), sendo possível apenas através de experimentos.
- Empírica ou heurístico: constrói-se relações entrada/saída através da observação direta dos dados operacionais. A identificação é o processo de inferir um modelo baseado na análise de sinais de entrada e saída. Os modelos experimentais são válidos apenas para os casos e condições avaliadas.
- Por analogia: Usa equações que descrevem um sistema análogo, com as variáveis identificadas por analogia em base individual. O exemplo clássico é o sistema elétrico R-L-C ser análogo a um sistema mecânico massa-mola-amortecedor.

Comparação das características de modelos teórico e empírico obtidos

- Faixa de validade limitada (ponto de operação e a determinadas entradas) para os modelos empíricos enquanto para modelos fenomenológicos a faixa é mais ampla e permite inferir valor de variáveis de processo não-medidas. Para modelos não-lineares a faixa de modelos empíricos é ainda mais estreita.
- Modelos empíricos são específicos. Caso seja necessário relacionar outras variáveis de processo deve-se repetir o procedimento experimental. Modelos teóricos costumam relacionar muito mais informação (balanços de massa, força, energia, momento) permitindo a correlação entre diferentes entradas e saídas.
- Os parâmetros de modelos empíricos não possuem significado físico, usados apenas para descrever o comportamento do processo.
- Modelos empíricos são mais fáceis de construir do que modelos teóricos. O desenvolvimento de modelos teóricos pode não ser prático, caso requeira grande número de equações diferenciais com número significativo de parâmetros desconhecidos (propriedades físicas e químicas, coeficientes). São nesses casos em que se usa a identificação.

Referências

- MÁRCIO LUIZ SCHISSATTI - Dissertação de mestrado sobre "Uma metodologia de implantação de cartas de Shewhart para o controle estatístico de processos" - UFSC – 1998.
- Marco Antônio Ribeiro - Controle de processos, 8ª Edição, 2005.
- Claudio Garcia – Modelagem e simulação - 2005 – EDUSP.
- Cor M. van den Bleek and Jaap C. Schouten - Deterministic chaos: a new tool in fluidized bed design and operation - January 4, 1993