

Processamento de Sinais (PS)

Professor: Adriano Todorovic Fabro (UnB).

Forma de apresentação: Expositiva

Objetivos gerais:

Tem como objetivo desenvolver competências para o domínio das principais ferramentas para aquisição, análise e interpretação de sinais com aplicações numéricas e experimentais em sistemas mecânicos e identificação de parâmetros modais. O minicurso fornece embasamento teórico e apresenta metodologias analíticas e numéricas através de diferentes princípios para análise de sinais e de qual maneira eles são afetados por sistemas mecânicos. Ao final da disciplina espera-se que o aluno tenha um conhecimento profundo em aquisição, análise e interpretação de séries temporais; seja capaz de demonstrar conceitos matemáticos fundamentais em processamento de sinais; abordar problemas de análise de dados de maneira sistemática e aplicar métodos analíticos e numéricos de maneira crítica

Tópicos:

- Introdução

Sinais Determinísticos, Série e Transformada de Fourier, Amostragem e Transformada Discreta de Fourier.

- Processos Estocásticos

Distribuição de probabilidade e momentos estatísticos, Estacionariedade e ergodicidade, Função de autocorrelação e densidade espectral de potência (PSD), Funções de correlação e densidade espectral cruzada

- Métodos de estimação de FRF

Identificação de sistemas SISO (LTI), Relações entrada e saída com ruído aditivo, Função coerência ordinária, Identificação de sistemas lineares

- Estimadores e Considerações Estatísticas

Medidas de erro e precisão (viés e variância, mse), Estimadores de média, média quadrática e autocorrelação, Estimadores não paramétricos de PSD, Função de coerência e FRF

Referências:

- **K. Shin, J. K. Hammond, Fundamental of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers, Wiley, 2008, ISBN: 0470511885**
- F Fahy e D. Thompson, Fundamentals of Sound and Vibration, CRC Press, 2019
- J. S. Bendat; A. G. Piersol, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley, 2010, ISBN: 978-0-470-24877-5

- D. E. Newland, An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis: Third Edition, Dover, 2005. ISBN: 0486442748
- D. J. Inman, Engineering Vibration - 2e, Prentice-Hall, 2001
- Roberto A. Tenenbaum. Processamento de Sinais em Acústica e Vibrações. Blucher 2024, ISBN: 978-8521220459
-

Vibrações e Análise Modal Experimental (AME)

Professor: Paulo Sergio Varoto (EESC).

Forma de apresentação: Expositiva

Objetivos gerais:

Este módulo tem como objetivo principal discutir os principais métodos de análise modal, tanto teóricos quanto experimentais. O conteúdo inclui uma discussão preliminar revisional sobre a resposta livre e forçada harmônica de sistemas dinâmicos lineares discretos com múltiplos graus de liberdade. Em seguida, são apresentados os principais métodos experimentais utilizados na medição resposta dinâmica da estrutura em estudo. Na sequência, discutem-se as principais técnicas de extração de parâmetros modais (single-mode e multi-mode), com ênfase nas abordagens no domínio da frequência. Por fim, aborda-se, ainda que brevemente e de maneira introdutória, conceitos relacionados à verificação e validação (V&V) de modelos estruturais. Ao longo da carga horária, serão realizados experimentos modulares para ilustrar os principais conceitos teóricos apresentados. Ao final do módulo, as pessoas participantes reunirão competências para compreender os conceitos fundamentais da análise modal teórica e experimental. A visualização dos experimentos permitirá a fixação dos conceitos, principalmente através da manipulação de dados experimentais em mini-projetos elaborados para esse fim.

Tópicos:

- Introdução e Revisão

A filosofia da análise modal teórica e experimental. Revisão de conceitos da dinâmica de sistemas discretos possuindo múltiplos graus de liberdade

- Técnicas em Análise Modal Experimental

Fixação da estrutura sob estudo, técnicas de excitação (shaker e martelo impulsivo), sensores piezelétricos, principais estimadores da função de resposta em frequência.

- Identificação Modal

Métodos single-mode, multi-mode, principais técnicas de identificação modal no domínio do tempo e da frequência.

- Introdução à Técnicas V&V (Verificação e Validação) de Modelos Dinâmicos

Espaço de projeto e extração de características, verificação de modelos, correlação teste-análise, breve introdução ao projeto com incertezas.

Referências:

- Clough, R, and Penzien, J., Dynamics of Structures, 2nd Ed., McGraw Hill, 1993.
- Craig Jr., R., and Kurdila, A. J., Fundamentals of Structural Dynamics, 2nd Ed., Wiley, 2006.
- Ewins, D. J., Modal Testing: Theory, Practice and Applications, 2nd Ed., RSP, 2000.
- Maia, N. M. M., and Silva, J. M. M. (Editors), Theoretical and Experimental Modal Analysis, RSP, 1997.
- McConnell, K. G., and Varoto, P. S., Vibration Testing: Theory and Practice, Wiley, 2008.
- Teloli, R.d.O., Hemez, F., Cogan, S. An Elephant in the Room: Forecasting Using Validated Physics-Based Simulations. In: Platz, R., Flynn, G., Neal, K., Ouellette, S. (eds) Model Validation and Uncertainty Quantification, Vol. 3. IMAC 2024. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68893-5_18, 2025.
- Bi, S., Beer, M., Cogan, S., and Mottershead, J., Stochastic model updating with uncertainty quantification: an overview and tutorial, Mechanical Systems and Signal Processing, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110784>, 2025

Dinâmica Não-Linear (DNL)

Professora: Aline Souza de Paula (UnB).

Forma de apresentação: expositiva

Objetivos gerais:

A natureza está repleta de não-linearidades que são responsáveis pela diversidade de comportamentos dos sistemas naturais. O comportamento caótico possui uma sensibilidade às condições iniciais, o que implica que a evolução do sistema pode ser alterada por pequenas perturbações. Além disso, a estrutura de uma resposta caótica é muito rica, estando associada a uma infinidade de órbitas periódicas instáveis. Essas propriedades fazem com que o comportamento caótico possua uma grande flexibilidade, sendo interessante para sistemas que necessitam apresentar uma reação rápida a determinadas perturbações. Este minicurso tem como objetivo fazer uma introdução as sistemas dinâmicos não-lineares, dando uma atenção especial ao comportamento caótico

Tópicos:

- Introdução

Revisão histórica; Sistemas físicos não-lineares.

- Fundamentação Teórica

Sistemas dinâmicos; Espaço de fase; Mapa de Poincaré; Equivalência topológica; Estabilidade; Linearização; Pontos de equilíbrio; Variedades; Comportamento assintótico.

- Teoria do Caos

Transformação da ferradura; Conjunto de Cantor; Dimensão fractal; Atratores estranhos e caóticos; Invariantes geométricos; Bifurcações.

- Análise de Séries Temporais

Reconstrução do espaço de estado; Predição; Controle de caos.

Referência:

- **Livro Texto:** [Savi, M.A., "Dinâmica Não-linear e Caos", Editora E-papers, 2017.](#)
- **Bibliografia Complementar**
 - El Nachie, M.S., “*Stress, Stability & Chaos in Structural Engineering*”, McGraw Hill, 1992.
 - Gleick, J., “*Caos*”, Campus, Rio de Janeiro, 1987.

- Guckenheimer, J. & Holmes, P., “*Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*”, Springer-Verlag, New York, 1983.
- Kapitaniak, T., “*Chaotic Oscillations in Mechanical Systems*”, Manchester, 1991.
- Moon, F., “*Chaotic and Fractal Dynamics*”, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- Nayfeh, A.H. & Mook, D.T., “*Nonlinear Oscillations*”, John Wiley & Sons, 1979.
- Ott, E., “*Chaos in Dynamical Systems*”, Cambridge Press, 1993.
- [Savi, M.A., “Ritmos da Natureza”, Editora E-papers, 2014.](#)
- Schuster, H.G., “*Deterministic Chaos*”, VCH, 1989.
- Stewart, I., “*Será que Deus Joga Dados? A Nova Matemática do Caos*”, Jorge Zahar Editor, 1991.
- Strogatz, S.H., “*Nonlinear Dynamics and Chaos*”, Perseus, 1994.
- Thompsom, J.M.T & Stewart, H.B., “*Nonlinear Dynamics and Chaos*”, John Wiley & Sons, Chichester, 1986.
- Wiggins, S., “*Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos*”, Springer-Verlag, New York, 1990.

Sistemas de Controle

Professora: Maíra Martins da Silva (EESC-USP).

Forma de apresentação: expositiva

Objetivos gerais:

O módulo de Sistemas de Controle será ministrado em 4 horas. Sistemas de controle são implementados em processos e produtos mecânicos, com o objetivo de garantir a estabilidade e o desempenho destes. O objetivo desse módulo é apresentar aos alunos de uma visão madura de várias técnicas de projeto de sistemas do clássico ao pós-moderno. Ênfase será dada para as ideias, metodologias e exemplos numéricos no ambiente Google Colaboratory. Neste módulo, recursos audiovisuais serão utilizados nas aulas e exemplos numéricos serão disponibilizados para os alunos fornecendo assim a capacidade destes a implementação dos conceitos aprendidos.

Tópicos:

- Introdução

O programa do módulo se inicia com uma introdução abrangendo conceitos de diagramas de blocos e retroalimentação (20min), e da apresentação de técnicas de avaliação de estabilidade e desempenho no domínio do tempo e da frequência (60min).

- Projeto de Sistemas de Controle

Após a apresentação das ferramentas de análise de estabilidade e desempenho, técnicas de projeto de controle clássico serão abordadas (controladores com ação integral, compensadores por avanço e atraso de fase – 30min). Uma introdução ao controle digital será realizada com o objetivando a implementação prática dos sistemas de controle projetados (20min).

- SISO versus MIMO

As diferenças entre o projeto de controladores para sistemas com uma entrada e uma saída e com múltiplas entradas/saídas serão discutidas em detalhes (30min).

- Projeto de Sistemas de Controle através de otimização

Uma visão de projeto de sistemas de controle através um problema de otimização será abordado a partir da introdução de diversas possibilidades de funções objetivos, variáveis de decisão e restrições (20min). As estratégias de controle ótimo (LQR e LQG), controle preditivo baseado em modelos (MPC) e controle H-infinito serão descritas e exemplificadas (40min).

- Incertezas

Uma introdução a avaliação do impacto das incertezas será abordada no final do curso com o objetivo de definir estabilidade e desempenho robustos (20min).

Referência:

Livro Texto: S. Skogestad and I. Postlethwaite. Multivariable Feedback Control. Analysis and Design. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, Sussex, UK, 2nd edition, 2005.

- **Bibliografia Complementar**

- K. Zhou, J.C. Doyle. Essentials of Robust Control. Prentice Hall, New York, 1998.
- K. Zhou, J.C. Doyle, K. Glover. Robust and Optimal Control. Prentice Hall, Upper Saddle River, 1995.
- J. Doyle, B. Francis, A. Tannenbaum, Feedback Control Theory, Macmillan Publishing, 1990.
- O.H. Bosgra, H. Kwakernaak, G. Meinsma. Design Methods for Control Systems: Notes for a course of the Dutch Institute of Systems and Control, 2007.
- J.M. Maciejowski. Multivariable Feedback Design. Addison-Wesley, 1989.
- H.K. Khalil. Nonlinear Systems (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- K. Ogata, Controle engenharia de controle modern (5th ed.), Pearson, 2011.

Aprendizado de Máquina Aplicado em Dinâmica (AMD)

Professor: Americo Cunha Jr (LNCC e UERJ)

Forma de apresentação: Expositiva e prática, com demonstrações computacionais e exercícios com dados reais e simulados.

Objetivos gerais:

Este módulo tem como objetivo apresentar os fundamentos do aprendizado de máquina aplicados à modelagem e análise de sistemas dinâmicos. A proposta central é demonstrar como métodos de ciência de dados — especialmente regressão esparsa, decomposição em modos dinâmicos (DMD) e redes de reservatório (RC, do inglês *reservoir computing*) — podem ser utilizados para extrair modelos de equações diferenciais diretamente de dados, identificar estruturas latentes e prever o comportamento de sistemas complexos. A abordagem é inspirada nos métodos discutidos na obra *Data-Driven Science and Engineering*, de autoria de S. L. Brunton e J. N. Kutz, oferecendo uma síntese entre técnicas modernas de aprendizado de máquina e conceitos clássicos de dinâmica.

Ao final do módulo, espera-se que os participantes sejam capazes de:

- Compreender os princípios fundamentais do aprendizado de máquina aplicados a sistemas dinâmicos.
- Aplicar técnicas como DMD e SINDy para obter modelos preditivos baseados em dados, além de prever comportamento dinâmico futuro via RC.
- Integrar métodos computacionais e conhecimentos físicos para inferência e controle de sistemas.

Tópicos:

Bloco 1 (1h): Introdução à Modelagem Data-Driven de Sistemas Dinâmicos

- Modelagem física vs modelagem baseada em dados
- Visão geral de aprendizado de máquina para dinâmica
- Tipos de dados em sistemas dinâmicos (tempo contínuo/discreto)
- Exemplo motivador: dinâmica de Lorenz ou pêndulo não linear

Bloco 2 (1h): Decomposição em Modos Dinâmicos (DMD)

- Fundamentos da DMD: ideia, algoritmos e aplicações
- Construção da matriz de Koopman aproximada
- DMD exata vs HAVOK
- Aplicação prática: redução de ordem e previsão

Bloco 3 (1h): SINDy – Descoberta de Modelos Dinâmicos por Regressão Esparsa

- Construção de dicionário de funções não lineares
- Seleção de termos relevantes com STLS / LASSO / SR3
- Interpretação física e integração numérica do modelo encontrado
- Aplicação prática: identificação de equações diferenciais

Bloco 4 (1h): Redes de Reservatório (Reservoir Computing)

- Conceito de memória e dinâmica rica em redes de reservatório
- Echo State Networks (ESN) para séries temporais
- Treinamento da saída com regressão linear
- Aplicações práticas: previsão de sistemas caóticos

Referências:

1. Brunton, S. L., & Kutz, J. N. (2022). *Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control*. Cambridge University Press.
2. Kutz, J. N., Brunton, S. L., Brunton, B. W., & Proctor, J. L. (2016). *Dynamic Mode Decomposition: Data-Driven Modeling of Complex Systems*. SIAM.
3. Pathak, J., Hunt, B., Girvan, M., Lu, Z., & Ott, E. (2018). Model-Free Prediction of Large Spatiotemporally Chaotic Systems from Data: A Reservoir Computing Approach. *Physical Review Letters*, 120(2), 024102.

Dinâmica Clássica

Professor: Domingos Alves Rade (ITA)

Forma de apresentação: Expositiva

Objetivos gerais:

Este módulo tem como objetivo principal apresentar os fundamentos da dinâmica clássica de Newton-Euler e de Lagrange, sob uma abordagem sistêmica voltada aos interesses da engenharia mecânica no projeto de estruturas, máquinas e equipamentos.

Tópicos:

- Mecânica Newtoniana: Dinâmica da Partícula e do Sistema de Partículas
- Dinâmica do Corpo Rígido em Duas e Três Dimensões
- Dinâmica de Sistemas Híbridos Rígidos/Flexíveis
- Mecânica Analítica: Princípio de Hamilton, Equações de Lagrange.
- *Estudo de Exemplos e Aplicações.*