



## PME3403 LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E CONTROLE

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PME

# PME3403

## Laboratório de Vibrações e Controle

2º Semestre de 2019

Prof. Francisco E. B. Nigro

Prof. Roberto Spinola Barbosa

Prof. Walter Ponge-Ferreira

### Objetivo

Exercitar a solução de problemas práticos de vibração e controle.

### Programa

Exercitar a solução de problemas práticos de vibração e controle através de bancadas didáticas e aplicações práticas. São apresentados experimentos e aplicações sobre os seguintes temas: processamento de sinais mecânicos, análise de Fourier e diagnóstico de falhas em máquinas; balanceamento de rotores rígidos e flexíveis; análise da resposta ao desbalanceamento de rotores flexíveis; controle de sistemas dinâmicos de um e vários graus de liberdade; controle clássico e moderno; modelagem, simulação e identificação de sistemas dinâmicos; análise modal; análise e controle de sistemas mecânicos, elétricos, térmicos e fluidos.

### Atividades

1. Balanceamento de rotor rígido em balanceadora industrial  
Balanceamento em dois planos em balanceadora de mancais flexíveis  
Local: Oficina
2. Estimação de velocidade de ressonância à flexão e balanceamento de rotor flexível  
Estimação de velocidade de ressonância à flexão de um rotor flexível De Laval, avaliação da qualidade de funcionamento e balanceamento do rotor flexível em um plano de correção com medição de fase  
Local: Bancada 4
3. Análise Espectral de Sinais  
Análise Numérica de sinais periódicos aplicando-se a Série de Fourier Discreta e a Transformada Rápida de Fourier - FFT  
Local: Análise numérica em computador
4. Análise Modal de Sistemas Discretos  
Modelagem e Identificação de um Sistema Discreto de dois Graus de Liberdade (Predinho) e Sintonização de uma Absorvedor Dinâmico  
Local: Bancada 5
5. Análise Modal Experimental de Placa Retangular  
Solução analítica da viga uniforme e identificação experimental de uma placa retangular uniforme  
Local: Bancada 6



## PME3403 LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E CONTROLE

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PME

6. Controle de Tensão em Circuito Elétrico  
Modelagem e controle de tensão em circuito elétrico  
Local: Bancada 1
7. Controle de Nível de Reservatório  
Modelagem de um sistema de reservatório hidráulico, identificação de parâmetros e controle de nível de reservatório  
Local: Laboratório Naval

### Tabela de Alocação de Atividades:

Sequência de atividades a serem realizadas pelos grupos em cada turma:

Tabela 1 – Alocação de Atividades por Grupo

Grupo	Aula						
	Extra <sup>1</sup>	2	3	4	5	6	7
1	1	2	3	4	5	6	7
2	1	3	4	5	6	7	2
3	1	4	5	6	7	2	3
4	1	5	6	7	2	3	4
5	1	6	7	2	3	4	5
6	1	7	2	3	4	5	6

<sup>1</sup> atividade extra aula – a ser desenvolvida fora de aula ao longo do semestre

### Calendário das Aulas

Tabela 2 – Calendário das Aulas de Laboratório

PME3403	Segundas-feiras		Quintas-feiras	
2018	13 h 10 min – 16 h 40 min		13 h 10 min – 16 h 40 min	
Aula	Turma 22A	Turma 22B	Turma 52A	Turma 52B
1	5/8	12/8	15/8	8/8
2	19/8	26/8	29/8	22/8
3	9/9	16/9	19/9	12/9
4	23/9	30/09	3/10	26/9
5	7/10	14/10	17/10	10/10
6	21/10	4/11	31/10	24/10
7	11/11	18/11	14/11	7/11
Prova	25/11		28/11	
Substitutiva	2/12			



## PME3403 LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E CONTROLE

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PME

### Critério de Avaliação:

Média da disciplina:

$$M = 0,6 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (T_i \cdot R_i)}{10 \cdot n} + 0,4 \cdot P$$

Onde:

$T_i$  – notas dos testes (individual);

$R_i$  – notas dos relatórios técnicos (em grupo);

$P$  – nota de prova (individual);

$n$  – número de relatórios propostos.

Os alunos deverão organizar-se em grupos de 3 ou 4 alunos para realização das atividades práticas em aula e para elaboração dos relatórios técnicos. Os grupos deverão permanecer inalterados ao longo do semestre.

Para que haja bom aproveitamento do laboratório, os alunos deverão preparar-se previamente para realização das atividades de laboratório. Material de apoio e textos sugeridos são indicados no Moodle da disciplina, além do conteúdo aprendido nas disciplinas de vibrações mecânicas, modelagem e controle de sistemas dinâmicos. Antes da aula de cada experimento todos os alunos deverão realizar individualmente os testes, também disponíveis no Moodle. As notas dos relatórios serão ponderadas pelas notas que cada aluno obteve nos testes correspondentes.

A presença nas aulas de laboratório é obrigatória. Alunos que não participarem das aulas de laboratório ficarão sem nota nos respectivos relatórios.

Todos os alunos deverão realizar a prova final na data prevista. Caso algum aluno não possa realizar a prova na data regular para sua turma, haverá uma prova substitutiva. Os alunos que precisarem realizar a prova substitutiva deverão fazer uma solicitação prévia por escrito e justificar a ausência na prova regular.

### Sistema Moodle do Stoa da USP

A distribuição de material didático será realizada pelo sistema Moodle do Stoa da USP. A elaboração dos testes e a entrega dos relatórios também será feita exclusivamente pelo Moodle. Nos trabalhos em grupo, basta que um aluno faça a entrega. Nas atividades individuais todos os alunos deverão fazer a entrega.

Os relatórios técnicos deverão ser entregues em um único arquivo em formato PDF na data prevista no sistema. Entregas em outros formatos e fora do prazo não serão aceitas.

Haverá atividades de preparação para as atividades de laboratório. Os alunos deverão estudar o material disponibilizado e preparar-se para realizar as atividades práticas. Antes das aulas os alunos deverão acessar o Moodle e realizar individualmente as atividades propostas.



## PME3403 LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E CONTROLE

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PME

### Corpo Docente

Prof. Francisco Emilio Baccaro **Nigro**

E-mail: [fnigro@sp.gov.br](mailto:fnigro@sp.gov.br)

Sala: 1A1

Atendimento: Quinta-feira, 11 h 30 min – 12 h 30 min

Prof. Roberto **Spinola** Barbosa

E-mail: [spinola@usp.br](mailto:spinola@usp.br)

Tel.: (11) 3091-9645

Sala: ES-11

Atendimento: Terça-feira, 11 h – 12 h

Prof. Walter **Ponge-Ferreira**

E-mail: [ponge@usp.br](mailto:ponge@usp.br)

Cel.: (11) 97244-0900

Sala: ES-36

Atendimento: Quinta-feira, 11 h 30 min – 12 h 30 min

### Bibliografia

#### Livros e Apostilas

Fleury, A.G. **Introdução à Teoria de Controle**. EPUSP, apostila.

Nigro, F. E. B. **Balanceamento de Rotores**. EPUSP, apostila.

Vierck, R. K. **Vibration Analysis**. Intex Educational Pub, 2e., 1974.

Blevins, R. D. **Formulas for Natural Frequency and Mode Shapes**. Krieger Pub Co., 2001.

Brigham, E. O. **The Fast Fourier Transform**. Prentice Hall, 1973.

Den Hartog, J. P. **Mechanical Vibrations**. Dover Publ., 1985.

Brandt, A. **Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures**, Wiley, 2011.

Randall, R. B. **Frequency Analysis**. Bruel & Kjaer, 3ed., 1987.7

Kurka, P. R. G. **Vibrações de Sistemas Dinâmicos: Análise e Síntese**. Campus, Elsevier, 2015.

Sotelo Jr., J. & França, L. N. F. **Introdução às Vibrações Mecânicas**. Ed. Edgard Bluecher, 2006.



## PME3403 LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E CONTROLE

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PME

- Hagedorn, P. & Hochlenert, D. **Technische Schwingungslehre**. Verlag Harri Deutsch, 2012.
- McConnell, K. G & Varoto, P. S. **Vibration Testing: Theory and Practice**. Willey, 2e, 2008.
- Irrerier, H. **Grundlagen der Schwingungstechnik**. 2.e, Vieweg Verlag. 2001.
- Crocker, M. J. **Handbook of Noise and Vibration Control**. Wiley, 2007.
- Ewins, D. J. **Modal Testing, Theory, Practice, and Application**. 2e., Research Studies Pre, 2e, 2000.
- Gasch, R.; Nordmann, R.; Pfrützner, H. **Rotordynamik**. 2 ed., Springer Verlag, 2007. 705pp.
- Magnus, Kurt; Popp, Karl; Sextro, Walter **Schwingungen - Physikalische Grundlagen und mathematische Behandlung von Schwingungen**. 9 ed., Springer Vieweg Verlag, 2013. 297pp.
- Vance J. M., Zeidan, F. Y, Murphi, B. **Machinery Vibration and Rotordynamics**. Wiley, 2010.
- Friswell, M. I., Penny, J. E. T., Garvey, S. D. **Dynamics of Rotating Machines**. Cambridge Univ. Press, 2010.
- Chen, W. J. & Gunter, E. J. **Introduction to Dynamics of Rotor-Bearing Systems**. Trafford Publ., 2005.
- Norfield, D. **Practical Balancing of Rotating Machinery**. Elsevier Science, 2006.
- Friedland, B. **Control System Design: An Introduction to State-Space Methods**. Dover Publications, 2005.
- Franklin, G.; Powell, J.D.; Naeini, A.E. **Feedback Control of Dynamic Systems**, 7e, Pearson Higher Education, 2015.
- Dazzo J.J. & Houpis, C. H. **Análise de Projeto de Sistemas de Controle Lineares**. 2e., Editora Guanabara, , 1984.
- Nise, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3a Edição, LTC, 2002.
- Dorf, R. C & Bishop, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. Addison Wesley Longman, 8e., 2001.
- Ogata, K. **Modern Control Engineering**. Pearson, 5e., 2009.
- Ogata, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice-Hall, 4e., 2004.
- Kuo, B.C. **Automatic Control Systems**. 7e., Prentice Hall, 1995.

### Normas Técnicas

**ISO 2041:2009** Mechanical vibration, shock and condition monitoring – Vocabulary

**ISO 21940-1:2019** Mechanical vibration — Rotor balancing — *Part 1: Introduction*

**ISO 21940-2:2017** *Mechanical vibration — Rotor balancing —Part 2: Vocabulary*



## **PME3403 LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E CONTROLE**

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

*DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PME*

**ISO 21940-11:2016** Mechanical vibration — Rotor balancing —Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour

**ISO 21940-12:2016** Mechanical vibration -- Rotor balancing -- Part 12: Procedures and tolerances for rotors with flexible behavior

**ISO 10816-1:1995** Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 1: General guidelines

**ISO 18431-1:2005** Mechanical vibration and shock — Signal processing -- Part 1: General introduction

**ISO 18431-2:2004** Mechanical vibration and shock — Signal processing — Part 2: Time domain windows for Fourier Transform analysis

**ISO 7919-1:1996** Mechanical vibration of non-reciprocating machines -- Measurements on rotating shafts and evaluation criteria -- Part 1: General guidelines

**ISO 7626-1:2011** Mechanical vibration and shock -- Experimental determination of mechanical mobility -- Part 1: Basic terms and definitions, and transducer specifications