

Planejamento da Disciplina Sistemas Lineares

Professor José Paulo Vilela Soares da Cunha

4 de abril de 2025

Identificação

UERJ

Faculdade de Engenharia

Departamento de Eletrônica e Telecomunicações

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica

Assunto: Planejamento para a disciplina no primeiro semestre de 2025.

Nota: Esta versão utiliza o livro (Chen 2013).

Turma: 01

E-mails: jpaulo@uerj.br e jpaulo@ieee.org

Homepage: <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/sistemas-lineares.html>

1 Tópicos desta Disciplina

Nesta disciplina aborda-se a análise e o controle de sistemas lineares e invariantes no tempo (*linear time-invariant* — LTI) (Chen 2013, Seção 2.3), enfatizando-se técnicas baseadas no espaço de estado. Os sistemas considerados são determinísticos, com parâmetros concentrados e o tempo é contínuo.

Os principais tópicos são:

1. Introdução.
2. Introdução aos sistemas dinâmicos:
 - (a) Sistemas dinâmicos e sua modelagem;
 - (b) Equação de estado;
 - (c) Resposta impulsiva e função de transferência;
 - (d) Linearização.
3. Revisão de álgebra linear.
4. Solução da equação de estado.
5. Realizações de funções de transferência.
6. Estabilidade.
7. Controlabilidade e observabilidade.
8. Realimentação de estado.
9. Observadores de estado.
10. Realizações de ordem mínima.

2 Referências Bibliográficas

O *livro-texto* recomendado para esta disciplina é (Chen 2013, 4^a Edição), que é utilizado neste planejamento. Alternativamente os alunos poderão utilizar (Chen 1999, 3^a Edição). Outra referência clássica para sistemas lineares é o livro (Kailath 1980), que poderá ser adotado pelo aluno como alternativa ou em complemento ao livro (Chen 1999, Chen 2013).

É recomendável que os alunos revisem voluntariamente tópicos de controle convencional usualmente apresentados em cursos de graduação em engenharia, tais como a disciplina *Controle*

e *Servomecanismos I*. Para isto recomenda-se os livros (Castrucci, Bittar & Sales 2018, Ogata 2010, Ogata 2003, Ogata 1998, D’Azzo & Houpis 1984). Qualquer uma destas referências é adequada a esta revisão, bem como outros livros básicos de controle linear.

Também é recomendável que o aluno estude álgebra linear, fundamental neste curso. Para isto, sugere-se que curse a disciplina *Métodos Matemáticos para Controle*. Além disso, recomenda-se os livros (Strang 2003), (Strang 2010) ou (Noble & Daniel 1986) que abordam mais profundamente a álgebra linear, embora a revisão desse tema apresentada por Chen (2013, Capítulo 3) também seja adequada.

3 Orientação para o Estudo dos Tópicos

Nesta seção é apresentada uma orientação para o aluno estudar cada um dos tópicos abordados. Apresenta-se uma relação de seções de livros que devem ser estudadas e de exercícios propostos. Naturalmente o aluno não deve restringir seus estudos a estas seções e exercícios, pois trata-se de uma relação reduzida.

Recomenda-se que o aluno primeiramente resolva os problemas numéricos manualmente e, posteriormente, utilize o *software livre Scilab* para verificar os resultados, seguindo-se a sugestão de Chen (2013, p. 96).

3.1 Introdução

Os capítulos introdutórios de (Castrucci et al. 2018, Capítulo 1) e (Ogata 2003, Capítulo 1) apresentam alguns exemplos da aplicação de controladores. Chen (2013, Capítulo 1) apresenta de forma bastante direta o que será abordado nesta disciplina.

3.2 Introdução aos sistemas dinâmicos, sua modelagem, equação de estado, linearização, resposta impulsiva e função de transferência

Para o aluno que deseja iniciar por uma revisão mais básica, recomenda-se o estudo das Seções 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.7, 3.8, 3.10 e do Exemplo A.3.23 de (Ogata 2003), bem como a Seção 2.7 de (Castrucci et al. 2018).

Então, o aluno que já realizou essa revisão ou já está familiarizado com esses tópicos poderá estudá-los de uma forma concisa e adequada a esta disciplina nas Seções 2.1 a 2.7 e 2.9 do livro-texto (Chen 2013).

São recomendados os exercícios 2.1 a 2.15, 2.18, 2.19, 2.23 a 2.28 (Chen 2013).

Recomenda-se (Ogata 2003, Capítulo 4) para o aluno interessado em sistemas pneumáticos, hidráulicos ou térmicos.

3.3 Revisão de álgebra linear

A *álgebra linear é fundamental* para a análise de sistemas lineares, não-lineares e tantas outras áreas de engenharia, matemática e física. Esta revisão utilizará as Seções 3.1 a 3.6, 3.8 e 3.11 do livro-texto (Chen 2013), que apresentam tópicos fundamentais para a análise e o projeto de sistemas lineares de forma bastante concisa.

São recomendados os exercícios 3.1 a 3.19 e 3.21 a 3.35 (Chen 2013).

Recomenda-se que o aluno utilize algum livro especializado em álgebra linear e suas aplicações para complementar este curso, sugerindo-se os livros (Strang 2003), (Strang 2010) ou (Noble & Daniel 1986).

3.4 Solução da equação de estado

A resposta de sistemas LTI em tempo contínuo e a solução da equação de estado são apresentadas nas Seções 4.1 e 4.2 do livro-texto (Chen 2013), excluindo-se as Seções 4.2.1 e 4.2.2.

São recomendados os exercícios 4.1, 4.2, 4.3.1, 4.3.2, 4.6.2, 4.6.3 e 4.8.1 (Chen 2013).

3.5 Realizações de funções de transferência

Recomenda-se as Seções 4.4, 4.4.1, 4.5 e 4.5.1 do livro-texto (Chen 2013). Além disso, recomenda-se a excelente apresentação de *realizações canônicas* para funções de transferência de sistemas LTI com uma entrada e uma saída (*single-input-single-output* — SISO) desenvolvida nas Seções 2.1 a 2.2.1 de (Kailath 1980), que podem ser parcialmente substituídas pela Seção 11.2 e pelos exemplos A.11.1 a A.11.5 do livro (Ogata 2003).

São recomendados os exercícios 4.5, 4.6.1, 4.8.2, 4.8.3, 4.10 a 4.19, 4.21 e 4.22 (Chen 2013).

3.6 Estabilidade

Recomenda-se as Seções 5.1, 5.2 e 5.4 do livro-texto (Chen 2013), excluindo-se a Seção 5.4.1.

São recomendados os exercícios 5.1 a 5.9, 5.11 a 5.15 e 5.17 (Chen 2013).

Recomenda-se, também, que o aluno estude as condições de estabilidade de Routh-Hurwitz na Seção 5.7 e nos exemplos A.5.19 a A.5.21 do livro (Ogata 2003). As condições de estabilidade

de Nyquist são apresentadas nas Seções 8.7 a 8.9 do livro (Ogata 2003) ou nas Seções 5.6 a 5.8 do livro (Castrucci et al. 2018).

3.7 Controlabilidade e observabilidade

Recomenda-se as Seções 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 do livro-texto (Chen 2013), excluindo-se as Seções 6.2.1 e 6.3.1.

São recomendados os exercícios 6.1 a 6.5, 6.8 a 6.21, 6.23 e 6.24 (Chen 2013).

3.8 Realimentação de estado

Recomenda-se as Seções 8.1, 8.2, 8.3, 8.6 do livro-texto (Chen 2013), excluindo-se as Seções 8.2.1, 8.6.2 e 8.6.4.

São recomendados os exercícios 8.1, 8.2, 8.4 a 8.8, 8.11, 8.14, 8.15 e 8.17 (Chen 2013).

3.9 Observadores de estado

Recomenda-se as Seções 8.4, 8.5, 8.7 e 8.8 do livro-texto (Chen 2013). Sugere-se estudar os *observadores de ordem reduzida* pela abordagem de Friedland (1996, Seção 37.3), em vez daquela apresentada na Seção 8.4.1 do livro (Chen 2013).

São recomendados os exercícios 8.12, 8.13, 8.16, 8.18 e 8.19 (Chen 2013).

3.10 Realizações de ordem mínima

Recomenda-se as Seções 7.1 a 7.2.2 do livro-texto (Chen 2013).

São recomendados os exercícios 7.1 a 7.6 e 7.15 (Chen 2013).

4 Consultas ao Professor

As consultas ao professor podem ser feitas em [horários](#) a serem divulgados na *homepage* da disciplina, quando o professor estará em sua sala 5019E, ou pelos *e-mails*:

jpaulo@uerj.br e jpaulo@ieee.org

4.1 Mais informações

Para obter mais informações (datas das provas, trabalhos, listas de exercícios, etc.), o aluno deverá consultar regularmente o *Google Classroom* e a *homepage* da disciplina:

<http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/sistemas-lineares.html>

Referências

- Castrucci, P. B. L., Bittar, A. & Sales, R. M. (2018). *Controle Automático*, 2^a edn, LTC.
- Chen, C.-T. (1999). *Linear System Theory and Design*, 3rd edn, Oxford University Press.
- Chen, C.-T. (2013). *Linear System Theory and Design*, International 4th edn, Oxford University Press.
- D’Azzo, J. J. & Houpis, C. H. (1984). *Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares*, 2^a edn, Guanabara Dois.
- Friedland, B. (1996). Observers, in W. S. Levine (ed.), *The Control Handbook*, CRC Press, chapter 37, pp. 607–618.
- Kailath, T. (1980). *Linear Systems*, Prentice Hall.
- Noble, B. & Daniel, J. W. (1986). *Álgebra Linear Aplicada*, 2^a edn, Prentice-Hall do Brasil.
- Ogata, K. (1998). *Engenharia de Controle Moderno*, 3^a edn, Livros Técnicos e Científicos S.A.
- Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle Moderno*, 4^a edn, Pearson Brasil.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*, 5^a edn, Pearson Brasil.
- Strang, G. (2003). *Introduction to Linear Algebra*, 3rd edn, Wellesley Cambridge Press.
- Strang, G. (2010). *Álgebra Linear e suas Aplicações*, Cengage.