

Planejamento da Disciplina Controle e Servomecanismos I

Professor José Paulo Vilela Soares da Cunha

26 de fevereiro de 2024

Identificação

UERJ

Faculdade de Engenharia

Departamento de Eletrônica e Telecomunicações

Planejamento para a disciplina no primeiro semestre letivo de 2024.

Nota: Esta versão utiliza o livro ([Castrucci, Bittar & Sales 2018](#)).

Turma: 01

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

Homepage: <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/contri.html>

1 Tópicos desta Disciplina

Nesta disciplina aborda-se o controle de sistemas lineares no tempo contínuo. Os principais tópicos são:

1. Introdução ao controle.
2. Revisão¹:
 - (a) Sistemas dinâmicos e sua modelagem;
 - (b) Equação de estado;
 - (c) Transformada de Laplace;
 - (d) Função de transferência e resposta em frequência;
 - (e) Diagramas de blocos.
3. Sistemas de controle em malha fechada.
4. Resposta transitória, erro estacionário, critérios e restrições sobre o desempenho de sistemas de controle.
5. Estabilidade de sistemas dinâmicos. Teste de estabilidade de Routh-Hurwitz.
6. Diagrama do lugar das raízes.
7. Métodos de resposta em frequência para a análise e o projeto de sistemas de controle (e.g., diagramas de Nyquist e Bode). Condição de estabilidade de Nyquist.
8. Projeto de compensadores/controladores: *lead*, *lag*, PID, etc..

2 Orientação Geral para o Estudo desta Disciplina

Para esta disciplina são recomendadas as referências (Castrucci et al. 2018, Castrucci, Bittar & Sales 2011, Ogata 2010, Ogata 2003, Ogata 1998). Qualquer uma destas referências é adequada ao curso, bem como outros livros texto básicos de controle linear que abordem os tópicos relacionados na Seção 1. Este planejamento utiliza a segunda edição do livro *Controle Automático*

¹**Nota:** Os alunos deverão revisar estes tópicos no início da disciplina por meio das referências e exercícios recomendados nas Seções 3.2 a 3.6. Também está disponível material para atividades assíncronas de revisão no [Google Drive](#) e na [página da disciplina](#). Alguns destes tópicos serão revisados brevemente durante as aulas.

(Castrucci et al. 2018), do qual serão extraídos muitos dos exercícios. Alternativamente, o aluno poderá adotar a sua primeira edição (Castrucci et al. 2011).

A modelagem de sistemas dinâmicos é apresentada mais detalhadamente nos livros (Ogata 2010, Ogata 2003, Ogata 1998) do que no livro (Castrucci et al. 2018). Assim, um dos livros (Ogata 2010, Ogata 2003, Ogata 1998) deve ser adotado como complemento ao livro (Castrucci et al. 2018).

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). O aluno deverá notar que alguns exercícios no livro (Castrucci et al. 2018) foram elaborados para serem resolvidos com o auxílio de algum *software* para análise e projeto de sistemas de controle.

3.1 Introdução ao controle

A introdução no Capítulo 1 da referência (Castrucci et al. 2018) apresenta alguns exemplos de aplicações de controladores e alguns conceitos fundamentais da área de sistemas de controle.

3.2 Revisão de sistemas dinâmicos e sua modelagem

Vide Nota 1. Recomenda-se o estudo das Seções 2.1, 2.2, 2.2.1, 2.2.2, 2.7 e 2.7.1 na referência (Castrucci et al. 2018).

São recomendados os exercícios (Castrucci et al. 2018) 2.1, 2.6, 2.9, 2.10 e 2.13. Também são recomendados os exercícios da segunda edição do livro (Ogata 1993): B.2.1 a B.2.4, B.2.6, B.2.9 a B.2.11, B.2.14 e B.2.15.

Recomenda-se o Capítulo 4 (Ogata 2010) para o aluno interessado em sistemas pneumáticos, hidráulicos ou térmicos. A Seção 2.2.3 do livro (Castrucci et al. 2018) apresenta alguns desses tópicos mais brevemente.

3.3 Revisão de equação de estado

Vide Nota 1. Recomenda-se o estudo das Seções 13.1, 13.2 e 13.3 na referência (Castrucci et al. 2018).

Exercícios recomendados (Castrucci et al. 2018): 13.1, 13.3, 13.17, 13.18 e 13.19.

3.4 Revisão de transformada de Laplace

Vide Nota 1. Recomenda-se a revisão de transformada de Laplace e a sua aplicação nas Seções 2.3 e 2.5 do livro (Castrucci et al. 2018).

São recomendados os exercícios (Castrucci et al. 2018) 2.3, 2.11, 2.12 e 2.14.

3.5 Revisão de função de transferência e resposta em frequência

Vide Nota 1. Recomenda-se o estudo da Seção 2.4 da referência (Castrucci et al. 2018). Para o traçado de diagramas de Bode, recomenda-se as Seções 5.1, 5.2, 5.4 e 5.5 do livro (Castrucci et al. 2018). A Seção 5.3 aborda alguns aspectos sobre a determinação experimental de funções de transferência.

Um alternativa é estudar os diagramas de Bode em algum livro sobre a análise de circuitos elétricos ou filtros.

São recomendados os exercícios (Castrucci et al. 2018) 5.1, 5.3, 5.10 a 5.13.

3.6 Revisão de diagramas de blocos

Vide Nota 1. Recomenda-se o estudo da Seção 2.6 da referência (Castrucci et al. 2018).

3.7 Sistemas de controle em malha fechada

Recomenda-se o estudo das Seções 2.7.2 e 3.10 da referência (Castrucci et al. 2018).

Exercícios recomendados (Castrucci et al. 2018): 2.16 a 2.19.

3.8 Resposta transitória, erro estacionário, critérios e restrições sobre o desempenho de sistemas de controle

Recomenda-se o estudo das seguintes Seções da referência (Castrucci et al. 2018): 3.1, 3.4 a 3.9 e 3.11. Deve ser enfatizada a relação entre a resposta no domínio da frequência e o desempenho

no domínio do tempo.

Exercícios recomendados (Castrucci et al. 2018): 3.7 a 3.12 e 3.15 a 3.22.

3.9 Teste de estabilidade de Routh-Hurwitz

Recomenda-se as Seções 3.2 e 3.3 do livro (Castrucci et al. 2018). Mais detalhes são apresentados na Seção 5.6 do livro (Ogata 2010) ou na Seção 5.7 do livro (Ogata 2003).

Estabilidade é um requisito muito básico em sistemas de controle. Por isto, o desenvolvimento da engenharia de controle está historicamente fundamentado na teoria da estabilidade de sistemas dinâmicos (Michel 1996). A estabilidade de sistemas dinâmicos lineares e invariantes no tempo é associada ao posicionamento das raízes do polinômio característico, que é, por exemplo, o denominador de uma função de transferência. Sugiro a revisão histórica apresentada no artigo (Frasca & Farina 2022) para aqueles que forem curiosos a respeito das raízes de polinômios. O teste de Routh-Hurwitz permite determinar quantas raízes de um polinômio estão no semiplano complexo direito, que é a região instável, sem a necessidade de calculá-las. A realização do teste é bastante simples e útil, embora a sua demonstração matemática seja bastante complexa e dispensável para fins práticos (Ho, Datta & Bhattacharyya 1998).

Exercícios recomendados (Castrucci et al. 2018): 3.1 a 3.6, 3.13 e 3.14.

3.10 Diagrama do lugar das raízes

Recomenda-se o estudo das seguintes seções da referência (Castrucci et al. 2018): 4.1 a 4.3.

Exercícios recomendados: 4.1 a 4.5, 4.7, 4.13, 4.15 e 4.19.

3.11 Métodos de resposta em frequência: diagrama de Nyquist, condição de estabilidade de Nyquist e aplicação dos diagramas de Bode

Após a revisão sugerida na Seção 3.5 deste Planejamento, recomenda-se as seguintes seções da referência (Castrucci et al. 2018) sobre métodos de resposta em frequência: 5.6 a 5.9 (exceto Seção 5.9.1) e 5.10.

A condição de estabilidade de Nyquist (1932), apresentada na Seção 5.7 (Castrucci et al. 2018), é baseada no *princípio do argumento* para funções de variáveis complexas (Ávila 2000, p. 176), (Castrucci et al. 2018, seção 5.7.1).

Exercícios recomendados: 5.2, 5.4 a 5.9, 5.14 a 5.19 e 5.22.

3.12 Projeto de controladores

Recomenda-se o estudo das Seções 4.6 a 4.6.3 e 5.11 a 5.11.3 do livro (Castrucci et al. 2018).

O Capítulo 6 apresenta detalhes sobre controladores com ações proporcional, integral e derivativa (PID). Esse capítulo é especialmente recomendado para aqueles com interesse no controle de processos industriais.

Exercícios recomendados: 4.9, 4.11, 4.14, 4.16 a 4.18, 5.23 a 5.26, 6.1 a 6.4, 6.6 a 6.15.

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, relatórios de laboratório, etc.), o aluno deverá consultar frequentemente o *Google Classroom* e a *homepage* da disciplina:

<http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/contri.html>

Referências

- Ávila, G. (2000). *Variáveis Complexas e Aplicações*, 3^a edn, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Castrucci, P. B. L., Bittar, A. & Sales, R. M. (2011). *Controle Automático*, LTC.
- Castrucci, P. B. L., Bittar, A. & Sales, R. M. (2018). *Controle Automático*, 2^a edn, LTC.
- Chen, C.-T. (2013). *Linear System Theory and Design*, International 4th edn, Oxford University Press.
- Frasca, M. & Farina, A. (2022). Giovanni Ansaldo and algebraic equations in the XIX century, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* **37**(7): 46–47.

Ho, M.-T., Datta, A. & Bhattacharyya, S. P. (1998). An elementary derivation of the Routh-Hurwitz criterion, *IEEE Trans. Aut. Contr.* **43**(3): 405–409.

Michel, A. N. (1996). Stability: the common thread in the evolution of feedback control, *IEEE Contr. Sys. Mag.* **16**(3): 50–60.

Nyquist, H. (1932). Regeneration theory, *Bell System Tech. J.* **11**(1): 126–147.

Ogata, K. (1993). *Engenharia de Controle Moderno*, 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.