

# Planejamento da Disciplina Controle por Computador

Professor José Paulo Vilela Soares da Cunha

24 de agosto de 2024

## **Identificação**

**UERJ**

**Faculdade de Engenharia**

**Departamento de Eletrônica e Telecomunicações**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica**

**Assunto:** Planejamento para a disciplina no segundo semestre de 2024.

**Turma:** 01

**E-mails:** [jpaulo@uerj.br](mailto:jpaulo@uerj.br) e [jpaulo@ieee.org](mailto:jpaulo@ieee.org)

**Homepage:** <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/controle-computador.html>

## 1 Tópicos desta Disciplina

Nesta disciplina aborda-se o controle de sistemas lineares em tempo discreto, tendo-se em vista o controle de processos por computador digital. Os principais tópicos são:

1. Introdução ao controle por computador.
2. Sinais e sistemas em tempo discreto.
3. Equações a diferenças.
4. Transformada  $z$  e suas propriedades.
5. Resposta dinâmica e análise de sinais do tempo discreto.
6. Função de transferência de sistemas em tempo discreto.
7. Amostragem de sinais do tempo contínuo:
  - (a) circuitos amostradores (*sample & hold*),
  - (b) espectro dos sinais amostrados,
  - (c) reconstrução do sinal a partir de suas amostras,
  - (d) o fenômeno de *aliasing*,
  - (e) seleção da frequência de amostragem no contexto de processamento de sinais,
  - (f) filtro *reconstrutor* e filtro *antialiasing*.
8. Sistemas com sinais amostrados:
  - (a) *zero-order-hold* (ZOH) e amostrador,
  - (b) sistemas do tempo contínuo no espaço de estado com sinais amostrados,
  - (c) sistemas com atrasos,
  - (d) equação de estado de sistemas em tempo discreto e sua solução,
  - (e) mudança de coordenadas no espaço de estado,
  - (f) modelos entrada/saída,
  - (g) operador de deslocamento e
  - (h) seleção da frequência de amostragem no contexto de sistemas de controle.
9. Análise de sistemas em tempo discreto:
  - (a) estabilidade,
  - (b) controlabilidade,

- (c) alcançabilidade,
  - (d) estabilizabilidade,
  - (e) observabilidade,
  - (f) detectabilidade,
  - (g) decomposição de Kalman,
  - (h) oscilações escondidas,
  - (i) resposta do tipo *deadbeat* e
  - (j) sistemas em malha fechada.
10. Projeto de sistemas de controle no espaço de estado:
- (a) realimentação de estado,
  - (b) controle *deadbeat*,
  - (c) controle com entrada de referência,
  - (d) observadores de estado,
  - (e) realimentação do estado estimado e
  - (f) estimação e compensação de perturbações.
11. Técnicas de conversão do projeto de controladores do tempo contínuo para o tempo discreto.
12. Controladores PID digitais.
13. Abordagem polinomial para o projeto de controladores.
14. Análise e projeto de controladores pelo diagrama do lugar das raízes no plano  $z$ .
15. Aspectos de implementação de controladores digitais:
- (a) conversores A/D e conversores D/A,
  - (b) efeitos da quantização e da amostragem dos sinais,
  - (c) codificação de algoritmos de controle,
  - (d) etc.

## 2 Referências Bibliográficas

Assume-se que o aluno esteja familiarizado com sistemas lineares em tempo contínuo. Por isto, pode ser recomendável revisá-los utilizando-se uma das referências (Chen 2013, Chen 1999, Ogata 2003).

Para a introdução aos sinais no tempo discreto, à transformada  $z$  e aos filtros digitais recomenda-se o livro de processamento de sinais no tempo discreto (Oppenheim, Schaffer & Buck 1999, Oppenheim & Schaffer 2013), uma vez que esses temas são usualmente tratados superficialmente nos livros de controle digital.

Para os tópicos específicos de controle digital, recomenda-se a adoção dos livros (Franklin, Powell & Workman 1990) e (Åström & Wittenmark 1997, Åström & Wittenmark 2011). Grande parte desta disciplina está baseada no livro (Åström & Wittenmark 1997, Åström & Wittenmark 2011). De fato, o livro (Åström & Wittenmark 2011) é uma republicação corrigida de (Åström & Wittenmark 1997) que conserva a formatação e a paginação originais.

Diversos aspectos de implementação de controladores digitais são apresentados no Capítulo 9 do livro (Åström & Wittenmark 1997, Åström & Wittenmark 2011) e nos livros (Franklin et al. 1990) e (Garrett 1994).

### 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 lista de seções de livros que devem ser estudadas e alguns exercícios propostos. Ao longo do curso serão propostas mais listas de exercícios, que serão distribuídas pela [homepage](#) da disciplina e *Google Classroom*. Naturalmente o aluno não deve restringir seus estudos a essas seções nem aos exercícios propostos nas listas, pois são listas reduzidas.

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 ao controle por computador

Uma boa introdução ao controle por computador é apresentada no Capítulo 1 do livro (Åström & Wittenmark 1997). Naturalmente outros livros de controle digital também apresentam capítulos introdutórios que podem contribuir para orientar o aluno nesta área.

#### 3.2 Sinais e sistemas em tempo discreto

Recomenda-se o Capítulo 1 e as Seções 2.0 a 2.4 do livro (Oppenheim et al. 1999).

Exercícios recomendados: 2.1, 2.2, 2.3, 2.10, 2.14, 2.15, 2.18 a 2.25, 2.27 a 2.30 e 2.34 do livro (Oppenheim et al. 1999).

### 3.3 Equações a diferenças

Recomenda-se a Seção 2.5 de (Oppenheim et al. 1999) e as Seções 2.1 e 2.2 de (Franklin et al. 1990).

Exercícios recomendados: 2.1, 2.2.a, 2.4 e 2.5 do livro (Franklin et al. 1990) e 2.4, 2.5, 2.12 e 2.31 do livro (Oppenheim et al. 1999).

### 3.4 Transformada $z$ e suas propriedades

Inicialmente deve-se estudar a transformada de Fourier de sinais no tempo discreto nas Seções 2.6 e 2.7 do livro (Oppenheim et al. 1999). Então passa-se à transformada  $z$  e suas propriedades, que são bem apresentadas nas Seções 3.0, 3.1, 3.3, 3.4 e 3.5 (Oppenheim et al. 1999).

Exercícios recomendados: 2.6, 2.13, 2.20, 2.21, 2.22 e 2.23 do livro (Franklin et al. 1990) e 3.1 a 3.4, 3.6 e 3.54 do livro (Oppenheim et al. 1999).

### 3.5 Resposta dinâmica a análise de sinais do tempo discreto

Recomenda-se a Seção 2.5 do livro (Franklin et al. 1990).

### 3.6 Função de transferência de sistemas em tempo discreto

Recomenda-se as Seções 2.3 a 2.3.4 do livro (Franklin et al. 1990).

Exercícios recomendados: 2.2.b, 2.3, 2.15 e 2.16 do livro (Franklin et al. 1990).

### 3.7 Amostragem de sinais do tempo contínuo

Recomenda-se as Seções 4.0 a 4.3 do livro (Oppenheim et al. 1999) e a Seção 7.3 do livro (Åström & Wittenmark 1997). O fenômeno de *aliasing* e os filtros *antialiasing* são bem descritos na Seção 7.4 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

São recomendados os exercícios 7.1 a 7.9 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

### 3.8 Sistemas com sinais amostrados

Recomenda-se o Capítulo 2 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

São recomendados os exercícios 2.1 a 2.16, 2.18 a 2.25 e 2.29 a 2.32 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.9 Análise de sistemas em tempo discreto**

Recomenda-se as Seções 3.1, 3.2, 3.4 e 3.5 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

São recomendados todos os exercícios do Capítulo 3 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.10 Projeto de sistemas de controle no espaço de estado**

Recomenda-se o Capítulo 4 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

São recomendados todos os exercícios do Capítulo 4 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.11 Técnicas de conversão do projeto de controladores do tempo contínuo para o tempo discreto**

Recomenda-se as Seções 4.1 a 4.4.1 e 4.5 do livro (Franklin et al. 1990) e as Seções 8.1, 8.2 e 8.6 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

São recomendados os exercícios 4.1 a 4.4 de (Franklin et al. 1990) e 8.1 a 8.7 de (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.12 Controladores PID digitais**

A Seção 8.5 do livro (Åström & Wittenmark 1997) descreve diversos aspectos de grande interesse para a implementação de controladores PID digitais.

### **3.13 Abordagem polinomial para o projeto de controladores**

Recomenda-se as Seções 5.1 a 5.4 e 5.6 do livro (Åström & Wittenmark 1997). O preditor de Smith é apresentado nas páginas 215 a 217. Sugere-se o estudo dos exemplos de projeto apresentados nas Seções 5.7 a 5.9.

São recomendados os exercícios 5.1 a 5.5 e 5.11 a 5.17 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.14 Análise e projeto de controladores pelo diagrama do lugar das raízes no plano z**

Recomenda-se as Seções 5.1 a 5.4 do livro (Franklin et al. 1990).

### 3.15 Aspectos de implementação de controladores digitais

Diversos aspectos de implementação de controladores digitais são abordados no Capítulo 9 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

## 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](mailto:jpaulo@uerj.br) e [jpaulo@ieee.org](mailto: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/controle-computador.html>

## Referências

- Åström, K. J. & Wittenmark, B. (1997). *Computer–Controlled Systems: Theory and Design*, 3<sup>rd</sup> edn, Prentice–Hall.
- Åström, K. J. & Wittenmark, B. (2011). *Computer–Controlled Systems: Theory and Design*, 3<sup>rd</sup> edn, Dover Publications.
- Chen, C.-T. (1999). *Linear System Theory and Design*, 3<sup>rd</sup> edn, Oxford University Press.
- Chen, C.-T. (2013). *Linear System Theory and Design*, International 4<sup>th</sup> edn, Oxford University Press.
- Franklin, G. F., Powell, J. D. & Workman, M. L. (1990). *Digital Control of Dynamic Systems*, 2<sup>nd</sup> edn, Addison-Wesley.
- Garrett, P. H. (1994). *Advanced Instrumentation and Computer I/O Design: Real-Time System Computer Interface Engineering*, IEEE Press.

Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle Moderno*, 4<sup>a</sup> edn, Pearson Brasil.

Oppenheim, A. V. & Schafer, R. W. (2013). *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*, 3<sup>a</sup> edn, Pearson Brasil.

Oppenheim, A. V., Schafer, R. W. & Buck, J. R. (1999). *Discrete-Time Signal Processing*, 2<sup>nd</sup> edn, Prentice-Hall.