

# Planejamento da Disciplina Controle e Servomecanismos II

Professor José Paulo Vilela Soares da Cunha

30 de setembro de 2014

## Identificação

**UERJ**

**Faculdade de Engenharia**

**Departamento de Eletrônica e Telecomunicações**

**Assunto:** Planejamento para a disciplina no segundo semestre de 2014.

**Nota:** Esta versão utiliza a 5<sup>a</sup> edição do livro (Ogata 2010).

**Turmas:** 01 e 02

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

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

## 1 Tópicos desta Disciplina

Na primeira parte desta disciplina, aborda-se o controle no espaço de estado de sistemas lineares em tempo contínuo:

1. Revisão de equação de estado.
2. Conceitos sobre sistemas em tempo contínuo no espaço de estado: autovalores, estabilidade, controlabilidade e observabilidade.
3. Realimentação de estado para sistemas em tempo contínuo.
4. Observadores de estado para sistemas em tempo contínuo.

Na segunda parte, aborda-se o controle de sistemas lineares em tempo discreto, tendo em vista o controle de servomecanismos e processos por computador digital. Os principais tópicos são:

1. Introdução ao controle digital.
2. Sinais e sistemas em tempo discreto.
3. Equações a diferenças.
4. Transformada  $z$  e suas propriedades.
5. Amostragem de sinais do tempo contínuo. O espectro dos sinais amostrados periodicamente e o fenômeno de *aliasing*.
6. Função de transferência de sistemas em tempo discreto.
7. Critério de estabilidade de Jury.
8. Sistemas do tempo contínuo com sinais amostrados. Uso do *sample & hold*. Função de transferência.
9. Resposta dinâmica e análise de sinais do tempo discreto.
10. Noções básicas sobre filtros digitais.
11. Técnicas de conversão do projeto de controladores do tempo contínuo para o tempo discreto.
12. Controladores PID digitais.
13. Análise e projeto de controladores através do lugar das raízes no *plano*  $z$ .

14. Aspectos de implementação de controladores digitais:

- (a) Conversores A/D e conversores D/A.
- (b) Efeitos da quantização e da amostragem dos sinais.
- (c) Implementação de algoritmos em tempo real.

## 2 Orientação Geral para o Estudo desta Disciplina

O aluno poderá iniciar pela revisão de sistemas de controle lineares em tempo contínuo. Para isto recomenda-se qualquer uma das referências (Ogata 2010, Ogata 2003, Ogata 1998) ou (D’Azzo & Houpis 1984).

Para o estudo de controle no espaço de estado (controlabilidade, observabilidade, realimentação de estado e observadores) recomenda-se uma das edições do livro (Ogata 2010), (Ogata 2003) ou (Ogata 1998). Este planejamento utiliza a 5ª edição do livro (Ogata 2010).

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), uma vez que estes 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) nos quais esta disciplina está baseada. De fato, o livro (Åström & Wittenmark 2011) é uma republicação corrigida de (Åström & Wittenmark 1997) que conserva a formatação e a paginação originais. Opcionalmente, os alunos podem utilizar as referências (Castrucci, Bittar & Sales 2011, Capítulos 10 a 12), (Phillips & Nagle 1995), (Ogata 1995), (Kuo 1992), (Jacquot 1981), (Barczak 1995), (Hemerly 1996), (Santina, Stubberud & Hostetter 1994) ou outro livro de controle digital.

Os livros (Ogata 2010, Ogata 2003, Ogata 1998) e (Phillips & Nagle 1995) apresentam diversos exemplos de análise e projeto de sistemas de controle empregando o *software* **MatLab**, que atualmente é uma ferramenta importante na área de controle. Por isso esses livros também poderão ser utilizados como complementos nesta disciplina.

Aspectos de implementação de controladores digitais são apresentados em (Franklin et al. 1990) e (Garrett 1994).

Para realizar atividades de laboratório de controle digital com o Arduino, recomenda-se consultar a *homepage* <http://www.arduino.cc> e o livro introdutório (Banzi 2011).

### 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 através da [homepage da disciplina](#). 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 algum *software* como o MatLab ou os *softwares livres* [Scilab](#) e [Octave](#) para verificar os resultados, seguindo-se a sugestão de Chen (1999, p. 78).

#### 3.1 Revisão de equação de estado

A abordagem por equação de estado é utilizada em várias Seções dos Capítulos 2 e 3 do livro (Ogata 2010). Recomenda-se, especialmente, as Seções 2.4 a 2.6.

Exercícios recomendados: B.2.9 a B.2.12.

#### 3.2 Autovalores, estabilidade, controlabilidade e observabilidade de sistemas em tempo contínuo

Para o estudo introdutório desses conceitos referentes a sistemas em tempo contínuo recomenda-se a leitura parcial das seguintes Seções do livro (Ogata 2010): 9.1, 9.2, 9.4, 9.6 e 9.7.

Exercícios recomendados: B.9.1, B.9.2, B.9.4, B.9.10 a B.9.17.

#### 3.3 Realimentação de estado

A realimentação de estado de sistemas em tempo contínuo é apresentada nas Seções 10.1 a 10.4 do livro (Ogata 2010).

Exercícios recomendados: B.10.3 a B.10.9.

#### 3.4 Observadores de estado

Para o estudo de observadores de estado de sistemas em tempo contínuo recomenda-se parte da Seção 10.5 do livro (Ogata 2010).

Exercícios recomendados: B.10.10 a B.10.14.

### **3.5 Introdução ao controle digital**

Recomenda-se as Seções 1.1 a 1.5 do livro (Franklin et al. 1990). Naturalmente outros livros de Controle Digital também apresentam capítulos introdutórios que podem contribuir para orientar o aluno no estudo desta disciplina.

### **3.6 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).

### **3.7 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).

### **3.8 Transformada z**

Inicialmente deve-se estudar a transformada de Fourier de sinais discretos 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).

### **3.9 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).

Exercícios recomendados (Åström & Wittenmark 1997): 7.1, 7.2, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 e 7.9.

### **3.10 Função de transferência de sistemas em tempo discreto**

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

### **3.11 Critério de estabilidade de Jury**

Recomenda-se a Seção 2.3.5 do livro (Franklin et al. 1990). Outra alternativa é (Åström & Wittenmark 1997, pp. 79–82).

Exercícios recomendados: 2.8 de (Franklin et al. 1990), 3.1, 3.2, 3.16, 3.20 e 3.21 de (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.12 Sistemas do tempo contínuo com sinais amostrados**

Recomenda-se as Seções 2.4 a 2.4.2 do livro (Franklin et al. 1990).

Exercício recomendado: 2.9 de (Franklin et al. 1990).

### **3.13 Resposta dinâmica e análise de sinais do tempo discreto**

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

Recomenda-se o exercício 2.19 de (Franklin et al. 1990).

### **3.14 Noções básicas sobre filtros digitais**

O estudo de filtragem digital de sinais não está no escopo desta disciplina. No entanto, alguns aspectos sobre filtros digitais são abordados em tópicos precedentes. Recomenda-se que o aluno interessado nessa área utilize o livro (Oppenheim et al. 1999).

### **3.15 Conversão 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 e 8.2 do livro (Åström & Wittenmark 1997).

Exercícios recomendados: 4.1 a 4.4 de (Franklin et al. 1990) e 8.1 a 8.7 de (Åström & Wittenmark 1997).

### **3.16 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. Uma apresentação mais breve é feita na Seção 5.8 do livro (Franklin et al. 1990).

### 3.17 Análise e projeto de controladores através do lugar das raízes no plano $z$

Para iniciar o estudo deste tópico, recomenda-se que seja revisado o diagrama do lugar das raízes no plano  $s$  seguindo-se o Capítulo 6 do livro (Ogata 2010). Para a análise e o projeto de controladores através do lugar das raízes no plano  $z$  recomenda-se as Seções 5.1 a 5.4 do livro (Franklin et al. 1990).

Exercícios recomendados: 5.1 a 5.9, 5.12 e 5.17 de (Franklin et al. 1990).

### 3.18 Aspectos de implementação de controladores digitais

Ao longo do curso serão discutidos tópicos selecionados dos Capítulos 7 e 10 do livro (Franklin et al. 1990) e de diversos Capítulos do livro (Garrett 1994).

## 4 Consultas ao Professor

O professor poderá ser consultado em horários e locais divulgados na *homepage* da disciplina. Os alunos também podem consultar o professor através dos *e-mails*:

[jpaulo@uerj.br](mailto:jpaulo@uerj.br) e [jpaulo@lee.eng.uerj.br](mailto:jpaulo@lee.eng.uerj.br)

### 4.1 Mais informações

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

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

Banzi, M. (2011). *Primeiros Passos com o Arduino*, 1<sup>a</sup> edn, Novatec Editora Ltda.

- Barczak, C. L. (1995). *Controle Digital de Sistemas Dinâmicos: Projeto e Análise*, Editora Edgard Blücher Ltda.
- Castrucci, P. B. L., Bittar, A. & Sales, R. M. (2011). *Controle Automático*, LTC.
- Chen, C.-T. (1999). *Linear System Theory and Design*, 3<sup>rd</sup> edn, Oxford University Press.
- D’Azzo, J. J. & Houpis, C. H. (1984). *Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares*, 2<sup>a</sup> edn, Guanabara Dois.
- 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.
- Hemerly, E. M. (1996). *Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos*, Editora Edgard Blücher Ltda.
- Jacquot, R. G. (1981). *Modern Digital Control Systems*, Marcel Dekker, Inc.
- Kuo, B. C. (1992). *Digital Control Systems*, 2<sup>nd</sup> edn, Saunders College Publishing.
- Ogata, K. (1995). *Discrete-Time Control Systems*, 2<sup>nd</sup> edn, Prentice-Hall.
- Ogata, K. (1998). *Engenharia de Controle Moderno*, 3<sup>a</sup> edn, Livros Técnicos e Científicos S.A.
- Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle Moderno*, 4<sup>a</sup> edn, Pearson Brasil.
- Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*, 5<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.
- Phillips, C. L. & Nagle, H. T. (1995). *Digital Control System Analysis and Design*, 3<sup>rd</sup> edn, Prentice-Hall.
- Santina, M. S., Stupperud, A. R. & Hostetter, G. H. (1994). *Digital Control System Design*, 2<sup>nd</sup> edn, Saunders College Publishing.