

**Trabalho da Disciplina Sistemas Lineares:  
Controle de um Servomecanismo pela  
Realimentação do Estado  
Estimado por um Observador**

Professor José Paulo Vilela Soares da Cunha

22 de maio de 2025

**Identificação**

**UERJ**

**Faculdade de Engenharia**

**Departamento de Eletrônica e Telecomunicações**

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

**Assunto:** Trabalho obrigatório para a disciplina no primeiro semestre de 2025.

**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/sistemas-lineares.html>

### Resumo

Este texto estabelece as diretrizes para a execução de um trabalho final para a disciplina Sistemas Lineares em que os alunos devem projetar um controlador para um dos servomecanismos disponíveis no Laboratório de Controle e Automação da UERJ. O controlador deve ser baseado na realimentação do estado estimado por um observador. O trabalho será desenvolvido ao longo dos últimos meses do semestre. O Relatório Final sobre o trabalho deverá apresentar uma introdução teórica, descrever aspectos práticos e avaliar resultados analíticos, de simulação e experimentais.

## 1 Introdução

O objetivo deste trabalho é estimular os alunos na aplicação de técnicas de controle a sistemas reais. Numa primeira fase, cada grupo de alunos escolherá o servomecanismo que utilizará no trabalho. Os servomecanismos serão escolhidos dentre os seguintes disponíveis no Laboratório de Controle e Automação da UERJ:

1. Pêndulo Invertido (vide [seções 3.1, 3.3, 5.2.1, 5.2.3, 5.3 e QC-7](#) do manual (Apkarian 1995)).
2. Gangorra (vide [seções 3.1, 3.4, 5.2.1, 5.2.4, 5.3 e QC-7](#) do manual (Apkarian 1995)).

## 2 Etapas do Trabalho

As principais etapas deste trabalho, que deverão ser documentadas no Relatório Final, são relacionadas a seguir:

1. Modelar a dinâmica do servomecanismo selecionado pelo grupo.
2. Linearizar a dinâmica a fim de facilitar o projeto do controlador (vide Seção 3.10 do livro (Ogata 2003) ou Seção 2.7 do livro (Ogata 2010)).
3. Escrever as equações de estado da dinâmica linearizada na forma matricial.
4. Simular a resposta transitória do servomecanismo em malha aberta e compará-la ao comportamento do sistema real para validar a modelagem desenvolvida.
5. Estabelecer os objetivos de controle a serem atingidos em malha fechada.
6. Estabelecer e quantificar critérios de desempenho para o controlador em malha fechada.

7. Projetar um controlador para o servomecanismo tendo em vista atingir os objetivos de controle definidos no item 5 e os critérios estabelecidos no item 6. Neste projeto deve ser usado o modelo linearizado do servomecanismo. O controlador deve ser baseado na realimentação do estado estimado por um observador (Chen 2013, Cap. 8).
8. Simular o sistema de controle em malha fechada. Recomenda-se empregar nas simulações tanto o modelo linearizado (item 3), adequado ao projeto do controle, quanto o modelo não-linear (item 1), por ser mais realista.
9. Implementar este controlador no sistema de aquisição de dados e controle da Quanser (WinCon).
10. Testar experimentalmente o sistema de controle.
11. Ao final do trabalho, fazer uma avaliação comparativa dos resultados teóricos, de simulação e experimentais.

### 3 Instruções e Recomendações Gerais sobre o Trabalho

As observações gerais sobre este trabalho são as seguintes (**leia com atenção**):

1. Este trabalho é obrigatório para todos os alunos da turma 01 de Sistemas Lineares.
2. O trabalho poderá ser feito em grupo de no máximo três alunos.
3. Cada servomecanismo poderá ser escolhido por apenas um grupo.
4. O grau do trabalho será atribuído conforme a avaliação feita pelo professor.
5. Na avaliação do trabalho será considerado o seu conteúdo, os resultados analíticos, os resultados de simulação, os resultados experimentais, o desempenho do controlador desenvolvido, a criatividade dos alunos, a clareza da apresentação, etc. O Professor poderá fazer uma arguição a cada aluno integrante de um mesmo grupo, resultando em graus diferentes para cada um dos alunos.
6. Para a elaboração do Relatório Final deverão ser seguidas as orientações contidas neste roteiro e na referência (Cunha 1997).
7. O Relatório Final poderá ser manuscrito ou datilografado. A qualidade da apresentação será avaliada.

8. O Relatório Final deverá documentar todo o projeto e será o principal meio de avaliação dos resultados alcançados.
9. Os alunos devem usar os equipamentos do Laboratório de Engenharia Elétrica com zêlo.

## 4 Sugestões Adicionais

1. Este trabalho possui uma parte experimental bastante significativa. Para possibilitar que as dificuldades experimentais sejam contornadas a tempo, deve-se evitar que toda a parte experimental seja executada no final do prazo. É conveniente que os alunos tenham contato com os servomecanismos reais ainda no início do trabalho.
2. Sugere-se simular o efeito de aproximações e simplificações importantes a fim de corrigir o projeto do controlador antes de aplicá-lo ao servomecanismo real. Os principais fenômenos a serem avaliados são:
  - (a) Atritos desprezados;
  - (b) Saturação da tensão na armadura do motor que é causada pela limitação da tensão de saída do conversor D/A em  $\pm 5V$ .
3. Alguns atritos podem ser reduzidos pela lubrificação adequada dos mecanismos.
4. Percebe-se que é importante lembrar aos alunos que o motor elétrico está acoplado a uma caixa de redução de velocidade, que também serve para ampliar o torque aplicado ao servomecanismo. Esta caixa de redução exerce uma influência significativa nos parâmetros do modelo dinâmico e, conseqüentemente, nos parâmetros do controlador.
5. O desempenho do sistema de controle depende das especificações estabelecidas no projeto. Sugere-se tentar várias especificações para compará-las e, então, selecionar as mais convenientes.
6. O sistema de aquisição de dados disponível baseado no [WinCon](#), disponível no Laboratório de Controle e Automação, possibilita utilizar períodos de amostragem entre  $1\text{ ms}$  e  $32\text{ ms}$ , aproximadamente.
7. Durante todo o desenvolvimento os alunos devem consultar seu professor e/ou outros professores para orientar o trabalho.

## 5 Conclusão

Descreveu-se sucintamente um trabalho de execução obrigatória para a avaliação desta turma. A orientação aqui apresentada é fundamental para o bom desenvolvimento do trabalho.

A criatividade será um aspecto bastante valorizado na avaliação deste trabalho.

## Referências

- Apkarian, J. (1995). *A Comprehensive and Modular Laboratory for Control Systems Design and Implementation*, Quanser Consulting.
- Chen, C.-T. (2013). *Linear System Theory and Design*, International 4<sup>th</sup> edn, Oxford University Press.
- Cunha, J. P. V. S. (1997). Orientação para melhorar a elaboração de relatórios técnicos no ensino de engenharia, *Anais do III Encontro de Professores de Engenharia da UERJ*, Rio de Janeiro, pp. 110–114.
- 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.