

# Prefácio

O meio acadêmico é prolífero em buscar alternativas próprias para embasar o conteúdo das disciplinas ministradas nos seus mais variados cursos. Livros e materiais didáticos de alta qualidade permeiam as bibliotecas das grandes instituições de ensino que prezam pela valorização, pela autenticidade, pela qualidade e pelo aprimoramento de uma base sólida que guiará o discente para além das fronteiras do *campus* universitário. No entanto, poucos têm o privilégio, ou mesmo o desprendimento necessário, pois uma obra não sai da mera pretensão de articulá-la. Surge do cotidiano, da experiência e, sem dúvida alguma, da persistência dos autores.

Notadamente em cursos de Engenharia, há um ambiente propício e fértil para se emergir a vontade de compartilhar um trabalho de equipe. No início dos cursos os alunos percebem a necessidade do trabalho em grupo, das trocas de informações referentes às listas de exercícios, das anotações adicionais que muitas vezes passam despercebidas, da aula que deixou dúvidas, mas que o colega mais atento conseguiu absorver e compreender, e, assim, dividir o seu entendimento com o grupo. Neste ambiente de aprendizagem, por vezes penoso, repleto de percalços, porém, gratificante e, sem dúvida, incomparável e instigante.

Apresentar uma obra que emprega em seus capítulos e seções uma preocupação com a qualidade, aliada à didática e à forma de abordagem, merece um elogio entusiástico. Abordar os Sistemas de Controle de uma maneira clara, objetiva, de fácil compreensão e numa sequência lógica atraente agrega estímulo e prazer aos leitores. Construir uma sucessão de capítulos que se entrelaçam e se completam e, pouco a pouco, capturam a atenção, sem perder o sentido do todo, capaz de mesclar o amplo espectro intrínseco aos Sistemas de Controle, mostra a preocupação dos autores na elaboração deste livro sobre o assunto.

Num universo de obras nacionais e internacionais de altíssima qualidade, temos que parabenizar os autores por proporcionar um belo e amplo material, com conteúdo consistente, de leitura fácil e extremamente empolgante aos leitores. É, sem dúvida, uma obra que incentiva a todos, especialmente àqueles que se iniciam nos cursos de Engenharia.

Professor Angelo José Junqueira Rezek  
Universidade Federal de Itajubá

# Sumário

Apresentação.....	V
Prefácio .....	VII

## CAPÍTULO 1

---

Introdução Geral. . . . .	1
1.1 FUNDAMENTOS HISTÓRICOS .....	3
1.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS .....	6
1.3 REFERÊNCIAS.....	10

## CAPÍTULO 2

---

Revisões de Conceitos . . . . .	11
2.1 NÚMEROS E VARIÁVEIS COMPLEXAS .....	13
2.2 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS.....	14
2.3 VARIÁVEIS E EQUAÇÕES DE ESTADO .....	15
2.4 ÁLGEBRA LINEAR – MATRIZES .....	16
2.4.1 Autovalores e Autovetores.....	17
2.4.2 Determinante de uma Matriz .....	19
2.4.3 Obtenção de Autovalores por Meio de Pacotes Computacionais ..	21
2.5 TRANSFORMADA DE LAPLACE .....	22
2.6 RESPOSTAS TÍPICAS DE MODELOS DE SISTEMAS .....	29
2.7 MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS .....	34
2.8 EXERCÍCIOS .....	39
2.9 REFERÊNCIAS.....	41

## CAPÍTULO 3

### Funções Típicas de Controladores e suas Ações em Malhas de Controle . . . . . 43

3.1	ESTRUTURAS E FUNÇÕES TÍPICAS DE CONTROLADORES/COMPENSADORES BÁSICOS . . . . .	47
3.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE FUNÇÕES DE ATUADORES E TRANSDUTORES . . . . .	56
3.3	AÇÕES DAS FUNÇÕES TÍPICAS DE CONTROLADORES EM MALHAS DE CONTROLE . . . . .	57
3.4	APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE ROUTH-HURWITZ PARA A ANÁLISE DE ESTABILIDADE . . . . .	61
3.5	TÉCNICA EMPÍRICA DE ZIEGLER-NICHOLS PARA A SINTONIA DE MALHAS DE CONTROLE . . . . .	68
3.6	PROPOSIÇÕES PARA AULAS PRÁTICAS . . . . .	70
3.7	EXERCÍCIOS . . . . .	75
3.8	REFERÊNCIAS . . . . .	76

## CAPÍTULO 4

### Resposta em Frequência . . . . . 77

4.1	DIAGRAMAS DE BODE DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA BÁSICAS . . . . .	83
4.1.1	Ganho $k$ . . . . .	85
4.1.2	Zero e Polo na Origem $(j\omega)^{\pm 1}$ . . . . .	86
4.1.3	Zero e Polo Fora da Origem $(j\omega\tau + 1)^{\pm 1}$ . . . . .	87
4.1.4	Funções de Segunda Ordem $((j\omega/w_n)^2 + j2\omega/w_n + 1)^{\pm 1}$ . . . . .	88
4.2	CONSTRUÇÃO DE DIAGRAMA DE BODE A PARTIR DE UMA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA . . . . .	90
4.3	OBTENÇÕES DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA VIA RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA . . . . .	95
4.4	ANÁLISE DE ESTABILIDADE POR DIAGRAMA DE BODE . . . . .	98
4.5	CRITÉRIO DE ESTABILIDADE DE NYQUIST . . . . .	103

---

4.6	MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO POR RESPOSTA EM FREQUÊNCIA .....	109
4.7	PROPOSIÇÕES PARA AULAS PRÁTICAS.....	125
4.8	EXERCÍCIOS .....	134
4.9	REFERÊNCIAS.....	136

## CAPÍTULO 5

---

### Método do Lugar das Raízes . . . . . 139

5.1	DEFINIÇÃO .....	141
5.2	ALGUNS DETALHES CONSTRUTIVOS SOBRE O LUGAR DAS RAÍZES .....	143
5.3	CONDIÇÕES PARA QUE UM PONTO PERTENÇA AO LUGAR DAS RAÍZES.....	145
5.4	COMPENSAÇÃO POR TÉCNICAS DO LUGAR DAS RAÍZES .....	151
5.5	PROJETO ANALÍTICO DE REGULADORES DE AVANÇO/ ATRASO DE FASE.....	153
5.6	PROJETO ANALÍTICO DE REGULADORES PID .....	158
5.7	PROPOSIÇÕES PARA AULAS PRÁTICAS.....	162
5.8	EXERCÍCIOS .....	164
5.9	REFERÊNCIAS .....	166

## CAPÍTULO 6

---

### Sistemas de Controle por Retroação de Estados. . . . . 167

6.1	INTRODUÇÃO .....	169
6.2	REPRESENTAÇÃO DE SISTEMAS POR ESPAÇO DE ESTADO .....	169
6.3	CONTROLABILIDADE .....	171
6.4	OBSERVABILIDADE.....	175
6.5	CONCEITUAÇÃO DE RETROAÇÃO DE ESTADOS.....	178
6.6	ALOCAÇÃO DE POLOS .....	181

6.7	OBSERVADORES DE ESTADO .....	193
6.8	INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE CONTROLE ÓTIMO .....	198
6.9	PROPOSIÇÕES PARA AULAS PRÁTICAS.....	205
6.10	EXERCÍCIOS .....	212
6.11	REFERÊNCIAS.....	214

## CAPÍTULO 7

---

### Compensação *Feedforward*. Malhas em Cascata. Técnica SVD. LMI . . . . . 215

7.1	COMPENSAÇÃO <i>FEEDFORWARD</i> .....	217
7.2	MALHAS DE CONTROLE EM CASCATA.....	220
7.3	TÉCNICA DE COMPENSAÇÃO VIA SVD .....	224
7.4	CÁLCULO DE GANHOS DE RETROAÇÃO DE ESTADOS COM TÉCNICAS DE LMI .....	229
7.5	OUTRAS TÉCNICAS DE CONTROLE.....	232
7.6	PROPOSIÇÕES PARA AULAS PRÁTICAS .....	233
7.7	EXERCÍCIOS .....	234
7.8	REFERÊNCIAS.....	234

### Índice Alfabético-Remissivo . . . . . 237