ÍNDICE

PRÓLOGO **xv**

1 MODELOS E SIMULAÇÃO **1**

1.1 Introdução 3
1.1.1 Engenharia de sistemas 3
1.1.2 Modelos e Simulação 5
1.1.3 Modelos físicos analógicos 5
1.1.4 Modelos matemáticos em computador 7
1.1.5 Exemplos de aplicação 9
1.2 Um modelo da economia 11
1.2.1 Modelo em tempo discreto 11
1.2.2 Hipóteses para a modelação 12
1.2.3 Modelo de estado 13
1.2.4 Ponto de equilíbrio 16
1.2.5 Modelo entrada/saída 17
1.3 Modelo de um tanque 19
1.3.1 O modelo a partir de leis de conservação 19
1.3.2 Exploração qualitativa 24
1.3.3 Integração numérica 27
1.3.4 Diagramas de blocos e simulação 28
1.3.5 Sistemas híbridos 29
1.4 Pontos principais do capítulo 31
1.5 Questões 31
1.6 Problemas 32

2 MODELO DE ESTADO **41**

2.1 Sistemas, sinais e diagramas de blocos 43
2.2 Modelos entrada/saída 50
2.3 Modelo de estado 55

2.4 Conversão entre modelos 58
2.4.1 Obtenção da função de transferência a partir do modelo de estado 58
2.4.2 Obtenção de um modelo de estado a partir da função de transferência 61
2.4.3 Transformação de coordenadas 63
2.5 Sistemas em tempo discreto 64
2.6 Pontos principais do capítulo 68
2.7 Questões 69
2.8 Problemas 70

3 ANÁLISE DO MODELO 83

3.1 Polos e zeros 85
3.2 Teoremas do valor inicial e final 88
3.3 Equação de estado homogénea 97
3.3.1 Retrato de fase 97
3.3.2 Campo de vetores 100
3.4 Decomposição modal 102
3.5 Equilíbrio e linearização 115
3.6 Redes locais de modelos 118
3.7 Estabilidade 120
3.7.1 Estabilidade de sistemas lineares 122
3.7.2 O método indireto 123
3.7.3 Método direto 126
3.8 Oscilações 135
3.9 Traçado qualitativo das soluções 144
3.9.1 Unicidade da solução 144
3.9.2 Linearização 145
3.10 Caos e complexidade 160
3.11 Pontos principais do capítulo 168
3.12 Questões 169
3.13 Problemas 170

4 MODELOS DE BASE FÍSICA 189

4.1 Mecânica de Newton 191
4.1.1 Sistemas mecânicos de translação 192
4.1.2 Sistemas mecânicos de rotação 201
4.1.3 Movimentos de translação e rotação combinados 205
4.1.4 Energia em sistemas mecânicos 212
4.2 Circuitos elétricos 223
4.2.1 Componentes dos circuitos elétricos 225
4.2.2 As leis de Kirchhoff 226

4.2.3 Escrita das equações dos circuitos elétricos 227
4.2.4 Energia em circuitos elétricos 232
4.3 Sistemas eletromecânicos 234
4.3.1 Modelo do motor de corrente contínua 235
4.4 Métodos variacionais 240
4.4.1 O Princípio de Hamilton 243
4.4.2 A equação de Euler-Lagrange 245
4.4.3 Demonstração da equação de Euler-Lagrange 248
4.4.4 Generalização da equação de Euler-Lagrange 254
4.4.5 Modelos variacionais de sistemas eletromecânicos 263
4.4.6 A definição de ação 271
4.4.7 A formulação de Hamilton 272
4.5 Sistemas térmicos 279
4.6 Sistemas químicos, biológicos e biomédicos 287
4.6.1 Sistemas biomédicos 294
4.7 Pontos principais do capítulo 299
4.8 Questões 300
4.9 Problemas 301

5 MODELOS BASEADOS EM DADOS 329

5.1 Identificação de sistemas 332
5.1.1 Métodos não paramétricos 332
5.1.2 Métodos paramétricos 334
5.1.3 Componentes da estimação de parâmetros. 341
5.2 Estimação de mínimos quadrados 350
5.2.1 Ajuste de uma reta a dados experimentais. 350
5.2.2 Identificação de uma equação de diferenças linear 354
5.2.3 Mínimos quadrados não recursivos 355
5.2.4 Identificação do modelo estático de uma bomba 358
5.2.5 Matriz de covariância do erro e matriz de informação 359
5.3 Efeito do ruído colorido 362
5.4 Estimação com métodos de erro de predição 363
5.4.1 Estimação de máxima verosimilhança 363
5.4.2 Minimização do erro de predição 369
5.5 Prática da identificação 376
5.5.1 O processo a identificar 377
5.5.2 Análise preliminar dos dados recolhidos 380
5.5.3 Estimação com mínimos quadrados 383
5.5.4 Estimação com PEM 386
5.5.5 Existência de efeito integral 387

5.6 Sensibilidade 389
5.6.1 Sensibilidade do estado 389
5.6.2 Exemplo — equação logística 390
5.6.3 Sensibilidade da saída 392
5.7 Estimação de modelos esparsos 393
5.7.1 Ordem dos modelos e explicação dos dados 393
5.7.2 Exemplo — ajuste de um polinómio 395
5.7.3 Abordagem probabilística 396
5.7.4 O algoritmo LASSO 397
5.8 Procedimento prático de identificação 400
5.9 Pontos principais do capítulo 402
5.10 Questões 402
5.11 Problemas 403

6 MODELOS DE ACONTECIMENTOS DISCRETOS, HÍBRIDOS E AGENTES 409

6.1 Modelos de acontecimentos discretos 412
6.1.1 Exemplo 1-1 — máquina de fabrico 413
6.1.2 Modelos de sistemas de acontecimentos discretos 415
6.1.3 Exemplo 1-2 — Armazenagem 418
6.2 Modelos de sistemas híbridos 421
6.2.1 Autómatos híbridos 422
6.2.2 O efeito de Zenão 430
6.2.3 Estabilidade de sistemas híbridos 435
6.3 Método de Monte Carlo 438
6.4 Simulação baseada em agentes 454
6.5 Pontos principais do capítulo 469
6.6 Questões 470
6.7 Problemas 470

7 MODELOS DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS 481

7.1 Transporte e propagação 483
7.1.1 Campo de coletores solares distribuídos 483
7.1.2 Incêndios florestais 493
7.1.3 As equações de Navier-Stokes 498
7.2 Difusão 502
7.2.1 Equação do calor 503
7.2.2 Equação de Fokker-Planck 504
7.2.3 Equação de Black-Scholes 510
7.3 Métodos numéricos 512

7.3.1 Equações diferenciais ordinárias 512
7.3.2 Equações às derivadas parciais 523
7.4 O que ficou de fora nos sistemas distribuídos? 525
7.5 Pontos principais do capítulo 526
7.6 Questões 527
7.7 Problemas 527

8 CONCLUSÃO 541

8.1 Modelos e métodos 543
8.2 Um mapa para a modelação 547
8.3 Um procedimento para a modelação 551

BIBLIOGRAFIA 553