

# SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	15
PREFÁCIO .....	17
1 INTRODUÇÃO E DEFINIÇÕES GERAIS .....	21
1.1 Modelos Matemáticos .....	22
1.2 Motivação para Gerar Modelos Matemáticos de Sistemas Dinâmicos .....	22
1.3 Formas de Obtenção de Modelos Matemáticos .....	22
1.4 Comparação das Características de Modelos Obtidos Teórica e Empiricamente .....	24
1.5 Tipos de Modelos para Sistemas Dinâmicos e Suas Aplicações .....	25
1.6 Aplicações da Simulação Dinâmica.....	26
1.7 Classificação de Modelos Matemáticos.....	27
Referências Bibliográficas.....	31
2 FORMA TEÓRICA DE OBTENÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS .....	33
2.1 Etapas no Estudo da Dinâmica de Sistemas .....	33
2.2 Método Teórico de Obter Modelos Matemáticos de Sistemas .....	34
2.2.1 Estágio A: Modelagem Física – Do Sistema Real ao Modelo Físico .....	35
2.2.2 Exemplos de Obtenção de Modelos Físicos .....	36
2.2.3 Estágio B: Equações de Movimento – Do Modelo Físico ao Modelo Matemático .....	37
2.2.4 Exemplos de Obtenção de Equações de Movimento .....	39
2.2.5 Estágio C: Comportamento Dinâmico – Simulação do Modelo Matemático .....	42
2.2.6 Exemplos de Simulação de Sistemas.....	43
2.3 Exemplo da Multiplicidade de Modelos para Representar um Sistema.....	46
Referências Bibliográficas.....	48

3	REPRESENTAÇÃO DE MODELOS ATRAVÉS DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E DE EQUAÇÕES EM ESPAÇO DE ESTADOS .....	49
3.1	Linearização de Equações .....	49
3.1.1	Variáveis de Perturbação, de Desvio ou Incrementais.....	50
3.1.2	Exemplo de Aplicação de Variáveis Incrementais .....	51
3.1.3	Linearização por Expansão em Série de Taylor .....	52
3.1.4	Exemplos de Aplicação de Linearização em Modelos de Processos.....	53
3.2	Formas Usuais de Representação de Modelos Matemáticos .....	54
3.3	Conceitos Básicos sobre Funções de Transferência .....	54
3.3.1	Exemplos de Aplicação de Função de Transferência para Representar Modelos.....	55
3.3.2	Sistemas Bicapacitivos e Multicapacitivos.....	61
3.3.3	Sistemas Bicapacitivos sem Interação .....	61
3.3.4	Sistemas Bicapacitivos com Interação.....	65
3.3.5	Sistemas de Ordem Elevada ou Multicapacitivos.....	69
3.4	Conceitos Básicos sobre Equações em Espaço de Estados .....	72
3.4.1	Exemplos de Aplicação de Equações de Estado para Representar Modelos Lineares .....	74
3.4.2	Exemplo de Aplicação de Equações de Estado para Representar Modelo Não Linear .....	75
3.5	Relação entre Equações de Movimento com Funções de Transferência e com Equações em Espaço de Estados .....	76
3.5.1	Exemplo 1 de Relação entre Equações de Movimento com Funções de Transferência e com Equações em Espaço de Estados .....	76
3.5.2	Exemplo 2 de Relação entre Equações de Movimento com Funções de Transferência e com Equações em Espaço de Estados .....	81
	Referências Bibliográficas.....	85
4	SOLUÇÃO ANALÍTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS LINEARES.....	87
4.1	Formas de Solução de Equações Diferenciais Ordinárias .....	87
4.2	Características Básicas dos Sistemas Lineares de 1ª e 2ª Ordem.....	88
4.3	Características da Resposta Temporal de Sistemas Lineares.....	89
4.3.1	Funções de Excitação Usualmente Empregadas .....	90
4.4	Resposta Total (Natural+Forçada) de Sistemas de 1ª e 2ª Ordem .....	90
4.4.1	Resposta (Movimento) Natural de Sistemas de 1ª Ordem.....	90
4.4.2	Resposta (Movimento) Total de Sistemas de 1ª Ordem .....	91
4.4.3	Exemplos de Resposta Temporal de Sistemas de 1ª Ordem .....	95
4.4.4	Resposta (Movimento) Natural de Sistemas de 2ª Ordem .....	100
4.4.5	Resposta (Movimento) Forçado de Sistemas de 2ª Ordem.....	103
4.4.6	Resposta Total de Sistemas de 2ª Ordem.....	104
4.4.7	Exemplos de Resposta Temporal de Sistemas de 2ª Ordem.....	106
	Referências Bibliográficas.....	121

5	INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS E LINGUAGENS DE SIMULAÇÃO .....	123
5.1	Solução de Equações Diferenciais Ordinárias por Métodos Numéricos.....	123
5.1.1	Tipos de Métodos Numéricos para Resolver Equações Diferenciais Ordinárias .....	124
5.1.2	Métodos Numéricos de Integração de Passo Simples para Resolver Problemas de Valor Inicial .....	124
5.1.3	Método de Euler .....	125
5.1.4	Método de Runge-Kutta .....	127
5.1.5	Exemplo de Aplicação do Método de Runge-Kutta de 2ª Ordem .....	129
5.1.6	Sistemas de Equações.....	130
5.1.7	Exemplos de Aplicação do Método de Runge-Kutta para Sistema de Equações.....	130
5.1.8	Equações Diferenciais de Ordem Superior a 1 .....	132
5.1.9	Exemplos de Aplicação do Método de Runge-Kutta para Equações de Ordem Superior a 1 .....	132
5.1.10	Exemplos de Preparação de Problemas para Integração Numérica .....	134
5.2	Utilização de Pacotes de Simulação .....	138
5.2.1	Linguagens de Simulação Orientadas a Equações .....	139
5.2.2	Pacotes de Simulação Orientados a Módulos .....	140
5.3	Seleção da Ferramenta de Simulação Utilizada neste Livro .....	140
5.3.1	Formas Possíveis de Representação de Modelos no Simulink/Matlab® .....	140
5.3.2	Representação de Modelos através de Função de Transferência no Simulink/Matlab® .....	141
5.3.3	Representação de Modelo Linear em Espaço de Estados no Simulink/Matlab® .....	142
5.3.4	Representação de Modelos Não Lineares em Espaço de Estados no Simulink/Matlab® .....	142
	Referências Bibliográficas.....	143
6	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS MECÂNICOS .....	145
6.1	Sistemas Mecânicos Translacionais.....	145
6.1.1	Movimento e Força.....	145
6.1.2	Potência, Trabalho e Energia.....	146
6.1.3	Elementos Ideais de Sistemas Mecânicos.....	147
6.1.4	Equações de Lagrange .....	149
6.1.5	Exemplos de Modelagem de Sistemas Mecânicos Translacionais .....	150
6.2	Sistemas Mecânicos Rotacionais .....	157
6.2.1	Movimento Angular e Torque .....	157
6.2.2	Potência, Trabalho e Energia.....	158
6.2.3	Elementos Mecânicos Rotacionais Ideais.....	158
6.2.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Mecânicos Rotacionais.....	159
6.3	Transformadores Mecânicos Ideais .....	165
6.3.1	Alavanca Ideal .....	166

6.3.2	Jogo Ideal de Engrenagens .....	166
6.3.3	Exemplos de Modelagem de Sistemas com Transformadores Mecânicos Ideais .....	167
	Referências Bibliográficas.....	171
7	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS .....	173
7.1	Sistemas Elétricos.....	173
7.1.1	Tensão e Corrente.....	173
7.1.2	Trabalho, Potência e Energia.....	173
7.1.3	Elementos Elétricos Ideais.....	174
7.1.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Elétricos.....	175
7.2	Analogias entre Sistemas Mecânicos e Elétricos .....	177
7.2.1	Procedimento para Geração de Análogo Elétrico de Sistema Mecânico .....	178
7.2.2	Exemplos de Analogia entre Sistemas Mecânicos e Elétricos .....	179
7.3	Transformadores Elétricos Ideais .....	183
7.3.1	Introdução a Circuitos Magnéticos .....	183
7.3.2	Equações Descritoras de um Transformador Elétrico Ideal.....	184
7.3.3	Impedâncias Referidas ao Primário ou Secundário do Transformador.....	186
7.3.4	Exemplo de Modelagem de Sistema com Transformador Elétrico Ideal.....	187
	Referências Bibliográficas.....	189
8	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS ELETROMECAÑICOS .....	191
8.1	Princípio de Funcionamento dos Sistemas Eletromecânicos Acoplados por Campo Magnético .....	191
8.2	Máquinas Elétricas Rotativas .....	193
8.3	Equações Descritoras de um Sistema Eletromecânico Ideal.....	193
8.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Eletromecânicos .....	194
	Referências Bibliográficas.....	217
9	MODELAGEM ANALÍTICA DE NÃO-LINEARIDADES EM SISTEMAS MECÂNICOS, ELÉTRICOS E ELETROMECAÑICOS .....	219
9.1	Saturação .....	221
9.2	Zona Morta ou Zona de Insensibilidade .....	222
9.3	Atrito de Coulomb e Atrito Seco ou <i>Stiction</i> .....	222
9.4	Folga em Engrenagens ( <i>Backlash</i> ) .....	224
9.5	Histerese .....	224
9.6	Relés .....	225
9.7	Exemplos da Aplicação de Elementos Não Lineares.....	227
	Referências Bibliográficas.....	241
10	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS FLUÍDICOS.....	243
10.1	Sistemas Fluídicos (Hidráulicos e Pneumáticos) .....	243
10.1.1	Pressão e Vazão (Fluxo).....	243

10.1.2	Potência e Energia .....	244
10.1.3	Elementos Ideais de Sistemas Fluídicos .....	244
10.1.4	Analogias entre Sistemas Elétricos e Sistemas Fluídicos .....	259
10.1.5	Geração das Equações de Movimento para Sistemas Fluídicos .....	259
10.1.6	Exemplos de Modelagem de Sistemas Fluídicos .....	263
10.2	Transformador Fluídico.....	293
10.3	Transdutor Mecânico/Fluídico .....	294
	Referências Bibliográficas.....	295
11	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS TÉRMICOS .....	297
11.1	Sistemas Térmicos.....	297
11.1.1	Temperatura e Fluxo de Calor .....	297
11.1.2	Potência Térmica e Energia.....	297
11.1.3	Elementos Ideais de Sistemas Térmicos .....	298
11.1.4	Geração das Equações de Movimento para Sistemas Térmicos .....	311
11.1.5	Exemplos de Modelagem de Sistemas Térmicos.....	312
11.2	Sistemas com Fontes Internas de Calor .....	331
11.2.1	Placas Planas com Fontes de Calor Distribuídas Uniformemente .....	331
11.2.2	Cilindros Maciços Longos com Fontes de Calor Distribuídas Uniformemente.....	332
11.2.3	Exemplos de Sistemas com Fontes Internas de Calor.....	334
11.3	Transformador Térmico Ideal.....	335
11.4	Transdutor Térmico .....	335
11.5	Resumo das Formas de Obtenção das Equações de Movimento .....	335
11.5.1	Sistemas Mecânicos (Rotacionais e Translacionais) .....	335
11.5.2	Sistemas Elétricos.....	336
11.5.3	Sistemas Eletromecânicos .....	336
11.5.4	Sistemas Fluídicos .....	336
11.5.5	Sistemas Térmicos.....	337
11.5.6	Resumo das Analogias entre Sistemas.....	338
	Referências Bibliográficas.....	338
12	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS TERMO-HIDRÁULICOS .....	339
12.1	Conservação de Energia .....	339
12.1.1	Formas de Energia .....	340
12.1.2	Formas de Trabalho.....	340
12.1.3	Equação para Conservação da Energia.....	341
12.2	Equações de Estado .....	343
12.2.1	Equação de Estado do Gás Ideal .....	343
12.2.2	Equações de Estado para Fluidos Não Ideais .....	345
12.2.3	Equações de Estado Viriais .....	346
12.2.4	Equações de Estado Analíticas (Cúbicas) com Dois Parâmetros.....	347
12.2.5	Estados Correspondentes.....	348

12.2.6	Equações de Estado Analíticas (Cúbicas) com Três Parâmetros .....	349
12.2.7	Equações de Estado Não Analíticas .....	351
12.2.8	Equações de Estado Aplicadas a Misturas.....	352
12.3	Aproximações Normalmente Usadas para Estimar Variações de Entalpia $\Delta h$ e Entalpia de Vaporização $\Delta h_{vap}$ .....	354
12.3.1	Aproximações Usadas para Estimar Variações de Entalpia $\Delta h$ de Gases Perfeitos, Líquidos e Sólidos.....	354
12.3.2	Exemplo de Cálculo de Variação de Entalpia $\Delta h$ da Água nos Estados Vapor e Líquido .....	356
12.3.3	Aproximações Usadas para Estimar Variações de Entalpia $\Delta h$ em Gases Reais com Base em Equações de Estado .....	358
12.3.4	Exemplo de Cálculo de Variação de Entalpia $\Delta h$ do Propano .....	360
12.3.5	Aproximações Usadas para Estimar a Entalpia de Vaporização $\Delta h_{vap}$ .....	362
12.3.6	Exemplo de Cálculo da Entalpia de Vaporização da Água $\Delta h_{vap}$ .....	364
12.4	Aproximações Normalmente Usadas para Estimar a Massa Específica $\rho$ .....	365
12.4.1	Aproximações Usadas para Estimar a Massa Específica $\rho$ de Líquidos.....	365
12.4.2	Exemplo de Cálculo da Massa Específica $\rho$ da Água no Estado Líquido .....	365
12.4.3	Aproximações Usadas para Estimar a Massa Específica $\rho$ de Gases com Base em Equações de Estado.....	366
12.5	Pressão de Vapor.....	368
12.5.1	Exemplo de Cálculo da Pressão de Vapor da Água.....	369
12.6	Coefficiente Global de Transferência Térmica $U$ .....	370
12.7	Exemplos de Modelagem de Sistemas Termo-hidráulicos .....	374
	Referências Bibliográficas.....	394
13	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS QUÍMICOS.....	397
13.1	Relação de Continuidade dos Componentes de uma Reação Química (Balanço de Componentes).....	397
13.1.1	Exemplos de Balanço de Componentes.....	398
13.2	Cinética (Taxa de Reação) de Reações Químicas.....	401
13.3	Conservação (Balanço) de Energia.....	402
13.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Químicos .....	403
	Referências Bibliográficas.....	414
14	MODELAGEM DINÂMICA DE MEDIDORES E ATUADORES .....	415
14.1	Comportamento de Sensores e Transmissores.....	415
14.1.1	Medição de Vazão .....	418
14.1.2	Medição de Pressão e de Nível.....	418
14.1.3	Medição de Temperatura.....	418
14.1.4	Medição de Composição .....	418
14.1.5	Medição de pH .....	419
14.2	Comportamento de Válvulas e Atuadores Pneumáticos .....	419

14.2.1	Cavitação, <i>Flashing</i> e Vazão Crítica em Válvulas .....	421
14.2.2	Vazão de Líquidos com Escoamento Subcrítico Através de Válvulas .....	424
14.2.3	Efeito de Redutores de Diâmetro de Tubulação .....	427
14.2.4	Efeito da Cavitação ou <i>Flashing</i> .....	428
14.2.5	Fórmulas para Cálculo do Escoamento de Fluidos Compressíveis (Gases e Vapores) Através de Válvulas.....	429
14.3	Comportamento de Linhas de Transmissão .....	431
14.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Incluindo Medidores e Atuadores.....	432
	Referências Bibliográficas.....	458
15	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS MECÂNICOS .....	459
15.1	Sistema Massa-Mola-Amortecedor .....	459
15.2	Passagem de Automóvel em Obstáculo .....	462
16	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETROMECAÂNICOS .....	483
16.1	Circuito Elétrico R-L Conectado a Bateria.....	483
16.2	Servomecanismo com Não Linearidade do Tipo Atrito de Coulomb .....	485
16.3	Sistema Eletromecânico com Não Linearidade do Tipo Saturação .....	488
16.4	Propulsão de Submarino.....	493
	Referências Bibliográficas.....	511
17	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS HIDRÁULICOS .....	513
17.1	Tanque para Armazenamento de Líquido.....	513
17.2	Tanque com Válvula de Controle na Saída .....	515
17.3	Controle de Nível em Tanque Incluindo a Instrumentação.....	518
17.4	Enchimento de Tanques com Válvula e Bomba Hidráulica na Saída.....	529
17.5	Esvaziamento de Caminhão-tanque por Meio de Bomba Hidráulica .....	539
17.6	Otimização do Tempo de Esvaziamento do Caminhão-tanque da Seção 17.5 .....	544
17.7	Escoamento pelo Circuito Hidráulico do Exemplo 4 da Seção 14.4 .....	546
	Referências Bibliográficas.....	550
18	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS TÉRMICOS E TERMO-HIDRÁULICOS .....	551
18.1	Sistema Térmico .....	551
18.2	Tanque com Sistema de Aquecimento por Vapor .....	554
18.3	Aquecedor Elétrico Residencial de Água .....	565
18.4	Tanque com Agitação Usado para Aquecer o Fluido de Processo .....	575
18.5	Tanque com Aquecimento Via Resistor Elétrico.....	578
18.6	Trocador de Calor Incluindo a Instrumentação e o Cálculo Detalhado dos Coeficientes de Transferência de Calor.....	586
	Referências Bibliográficas.....	612

19	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS QUÍMICOS .....	613
19.1	Reator de Batelada sem Controle .....	613
19.2	Reator de Batelada com Controle Incluindo Instrumentação e Ciclos de Aquecimento e Resfriamento .....	619
	Referências Bibliográficas.....	640