

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	13
PREFÁCIO	15
1 INTRODUÇÃO E DEFINIÇÕES GERAIS	19
1.1 Aplicações da Simulação Dinâmica	20
1.2 Tipos de Modelos para Sistemas Dinâmicos	21
1.3 Modelos Matemáticos	22
1.3.1 Classificação de Modelos Matemáticos	22
1.3.2 Modos de Obtenção de Modelos Matemáticos	26
1.3.3 Comparação das Características de Modelos Obtidos Teórica e Empiricamente	27
Referências Bibliográficas	29
2 FORMA TEÓRICA DE OBTENÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS	31
2.1 Etapas no Estudo da Dinâmica de Sistemas	31
2.2 Método Teórico de Obtenção de Modelos Matemáticos de Sistemas	32
2.2.1 Estágio A: Modelagem Física – do Sistema Real ao Modelo Físico	33
2.2.2 Exemplos de Obtenção de Modelos Físicos	35
2.2.3 Estágio B: Equações de Movimento – do Modelo Físico ao Modelo Matemático	36
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	49

3	REPRESENTAÇÃO DE MODELOS ATRAVÉS DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E DE EQUAÇÕES EM ESPAÇO DE ESTADOS	51
3.1	Linearização de Equações.....	51
3.1.1	Variáveis de Perturbação, de Desvio ou Incrementais	52
3.1.2	Exemplo de Aplicação de Variáveis Incrementais	54
3.1.3	Linearização por Expansão em Série de Taylor	55
3.1.4	Exemplos de Aplicação de Linearização em Modelos de Processos	56
3.2	Formas Usuais de Representação de Modelos Matemáticos	56
3.3	Conceitos Básicos sobre Funções de Transferência	57
3.3.1	Exemplos de Aplicação de Função de Transferência para Representar Modelos	58
3.4	Conceitos Básicos sobre Equações em Espaço de Estados	66
3.4.1	Exemplo de Aplicação de Equações de Estado para Representar Modelo Linear	68
3.4.2	Exemplo de Aplicação de Equações de Estado para Representar Modelo Não-linear	68
3.5	Relação entre Equações de Movimento com Funções de Transferência e com Equações em Espaço de Estados	69
3.5.1	Exemplo 1 de Relação entre Equações de Movimento com Funções de Transferência e com Equações em Espaço de Estados	69
3.5.2	Exemplo 2 de Relação entre Equações de Movimento com Funções de Transferência e com Equações em Espaço de Estados	75
	Referências Bibliográficas	79
4	SOLUÇÃO ANALÍTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS LINEARES.....	81
4.1	Formas de Solução de Equações Diferenciais Ordinárias	81
4.2	Características Básicas dos Sistemas Lineares de 1ª e 2ª Ordem	82
4.2.1	Sistemas de 1ª Ordem	83
4.2.2	Sistemas de 2ª Ordem	83
4.3	Características da Resposta Temporal de Sistemas Lineares	84
4.3.1	Funções de Excitação Usualmente Empregadas.....	85
4.4	Resposta Total (Natural + Forçada) de Sistemas de 1ª e 2ª Ordem	85
4.4.1	Resposta (Movimento) Natural de Sistemas de 1ª Ordem	85
4.4.2	Resposta (Movimento) Total de Sistemas de 1ª Ordem.....	87
4.4.3	Exemplos de Resposta Temporal de Sistemas de 1ª Ordem.....	91
4.4.4	Resposta (Movimento) Natural de Sistemas de 2ª Ordem	98
4.4.5	Resposta (Movimento) Forçado de Sistemas de 2ª Ordem	103
4.4.6	Resposta Total de Sistemas de 2ª Ordem.....	105
4.4.7	Exemplos de Resposta Temporal de Sistemas de 2ª Ordem.....	107
	Referências Bibliográficas	126

5	INTEGRAÇÃO NUMÉRICA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS E LINGUAGENS DE SIMULAÇÃO	127
5.1	Solução de Equações Diferenciais Ordinárias por Métodos Numéricos.....	127
5.1.1	Tipos de Métodos Numéricos para Resolver Equações Diferenciais Ordinárias	128
5.1.2	Métodos Numéricos de Integração de Passo Simples para Resolver Problemas de Valor Inicial	129
5.1.3	Método de Euler	130
5.1.4	Método de Runge-Kutta	131
5.1.5	Exemplo de Aplicação do Método de Runge-Kutta de 2ª Ordem	135
5.1.6	Sistemas de Equações	136
5.1.7	Exemplos de Aplicação do Método de Runge-Kutta para Sistema de Equações.....	136
5.1.8	Equações Diferenciais de Ordem Superior a 1.....	138
5.1.9	Exemplos de Aplicação do Método de Runge-Kutta para Equações de Ordem Superior a 1	138
5.1.10	Exemplos de Preparação de Problemas para Integração Numérica	141
5.2	Utilização de Pacotes de Simulação	146
5.2.1	Linguagens de Simulação Orientadas a Equações	146
5.2.2	Pacotes de Simulação Orientados a Módulos	148
5.3	Seleção da Ferramenta de Simulação Empregada neste Livro	148
5.3.1	Formas Possíveis de Representação de Modelos no Simulink/Matlab®	149
5.3.2	Representação de Modelos através de Função de Transferência no Simulink/Matlab®	150
5.3.3	Representação de Modelo Linear em Espaço de Estados no Simulink/Matlab®	150
5.3.4	Representação de Modelos Não-lineares em Espaço de Estados no Simulink/Matlab®	151
	Referências Bibliográficas	152
6	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS MECÂNICOS	153
6.1	Sistemas Mecânicos Translacionais	153
6.1.1	Movimento e Força	153
6.1.2	Potência, Trabalho e Energia	154
6.1.3	Elementos Ideais de Sistemas Mecânicos	155
6.1.4	Equações de Lagrange	157
6.1.5	Exemplos de Modelagem de Sistemas Mecânicos Translacionais.....	159
6.2	Sistemas Mecânicos Rotacionais	165
6.2.1	Movimento Angular e Torque	165
6.2.2	Potência, Trabalho e Energia	166
6.2.3	Elementos Mecânicos Rotacionais Ideais	167

6.2.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Mecânicos Rotacionais	168
6.3	Transformadores Mecânicos Ideais	177
6.3.1	Alavanca Ideal	177
6.3.2	Jogo Ideal de Engrenagens	178
6.3.3	Exemplos de Modelagem de Sistemas com Transformadores Mecânicos Ideais	179
	Referências Bibliográficas	184
7	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS	185
7.1	Sistemas Elétricos	185
7.1.1	Tensão e Corrente	185
7.1.2	Trabalho, Potência e Energia.....	186
7.1.3	Elementos Elétricos Ideais.....	186
7.1.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Elétricos.....	187
7.2	Analogias entre Sistemas Mecânicos e Elétricos	191
7.2.1	Procedimento para Geração de Análogo Elétrico de Sistema Mecânico	191
7.2.2	Exemplos de Analogia entre Sistemas Mecânicos e Elétricos	193
7.3	Transformadores Elétricos Ideais	197
7.3.1	Introdução a Circuitos Magnéticos	197
7.3.2	Equações Descritoras de Um Transformador Elétrico Ideal	199
7.3.3	Impedâncias Referidas ao Primário ou Secundário do Transformador	201
7.3.4	Exemplo de Modelagem de Sistema com Transformador Elétrico Ideal	202
	Referências Bibliográficas	205
8	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS ELETROMECHANICOS	207
8.1	Princípio de Funcionamento dos Sistemas Eletromecânicos Acoplados por Campo Magnético	207
8.2	Máquinas Elétricas Rotativas.....	209
8.3	Equações Descritoras de um Sistema Eletromecânico Ideal	210
8.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Eletromecânicos	211
	Referências Bibliográficas	238
9	MODELAGEM ANALÍTICA DE NÃO-LINEARIDADES EM SISTEMAS MECÂNICOS, ELÉTRICOS E ELETROMECHANICOS	241
9.1	Saturação	242
9.2	Zona Morta ou Zona de Insensibilidade	244
9.3	Atrito de Coulomb e Atrito Seco	245
9.4	Folga em Engrenagens (<i>Backlash</i>)	245
9.5	Histerese	246
9.6	Relês	248
9.7	Exemplos da Aplicação de Elementos Não-lineares.....	249
	Referências Bibliográficas	265

10	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS FLUÍDICOS.....	267
10.1	Sistemas Fluídicos (Hidráulicos e Pneumáticos)	267
10.1.1	Pressão e Vazão (Fluxo)	267
10.1.2	Potência e Energia.....	268
10.1.3	Elementos Ideais de Sistemas Fluídicos.....	269
10.1.1	Analogias entre Sistemas Elétricos e Sistemas Fluídicos	284
10.1.5	Geração das Equações de Movimento para Sistemas Fluídicos.....	285
10.1.6	Exemplos de Modelagem de Sistemas Fluídicos	289
10.2	Transformador Fluídico	325
10.3	Transdutor Mecânico/Fluídico	325
	Referências Bibliográficas	326
11	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS TÉRMICOS	329
11.1	Sistemas Térmicos	329
11.1.1	Temperatura e Fluxo de Calor	329
11.1.2	Potência Térmica e Energia	330
11.1.3	Elementos Ideais de Sistemas Térmicos	330
11.1.4	Geração das Equações de Movimento para Sistemas Térmicos	345
11.1.5	Exemplos de Modelagem de Sistemas Térmicos.....	346
11.2	Sistemas com Fontes Internas de Calor	364
11.2.1	Placas Planas com Fontes de Calor Distribuídas Uniformemente	365
11.2.2	Cilindros Maciços Longos com Frontes de Calor Distribuídas Uniformemente	366
11.2.3	Exemplos de Sistemas com Fontes Internas de Calor	368
11.3	Transformador Térmico Ideal	369
11.4	Transdutor Térmico	370
11.5	Resumo das Normas de Obtenção das Equações de Movimento	370
11.5.1	Sistemas Mecânicos (Rotacionais e Translacionais)	370
11.5.2	Sistemas Elétricos	370
11.5.3	Sistemas Eletromecânicos	371
11.5.4	Sistemas Fluídicos	371
11.5.5	Sistemas Térmicos	372
11.5.6	Resumo das Analogias entre Sistemas	372
	Referências Bibliográficas	373
12	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS TERMO-HIDRÁULICOS	375
12.1	Conservação de Energia	375
12.1.1	Formas de Energia.....	376
12.1.2	Formas de Trabalho	377
12.1.3	Equação para Conservação da Energia	377
12.2	Equações de Estado	380

12.2.1	Equação de Estado do Gás Ideal	380
12.2.2	Equações de Estado para Fluidos Não-ideais	382
12.2.3	Equações de Estado Viriais	383
12.2.4	Equações de Estado Analíticas (Cúbicas) com Dois Parâmetros	384
12.2.5	Estados Correspondentes	386
12.2.6	Equações de Estado Analíticas (Cúbicas) com Três Parâmetros	387
12.2.7	Equações de Estado Não-analíticas	390
12.2.8	Equações de Estado Aplicadas a Misturas	391
12.3	Aproximações Normalmente Usadas para Estimar Variações de Entalpia Δh e Entalpia de Vaporização Δh_{vap}	393
12.3.1	Aproximações Usadas para Estimar Variações de Entalpia Δh de Gases Perfeitos, Líquidos e Sólidos	393
12.3.2	Exemplo de Cálculo de Variação de Entalpia Δh da Água nos Estados Vapor e Líquido	395
12.3.3	Aproximações Usadas para Estimar Variações de Entalpia Δh em Gases Reais com Base em Equações de Estado	398
12.3.4	Exemplo de Cálculo de Variação de Entalpia Δh do Propano	400
12.3.5	Aproximações Usadas para Estimar a Entalpia de Vaporização Δh_{vap}	403
12.3.6	Exemplo de Cálculo da Entalpia de Vaporização Δh_{vap} da Água	405
12.4	Aproximações Normalmente Usadas para Estimar a Massa Específica ρ	406
12.4.1	Aproximações Usadas para Estimar a Massa Específica ρ de Líquidos	406
12.4.2	Exemplo de Cálculo da Massa Específica ρ da Água no Estado Líquido	407
12.4.3	Aproximações Usadas para Estimar a Massa Específica ρ de Gases com Base em Equações de Estado	407
12.5	Pressão de Vapor	410
12.5.1	Exemplo de Cálculo da Pressão de Vapor da Água	412
12.6	Coefficiente Global de Transferência Térmica U	413
12.7	Exemplos de Modelagem de Sistemas Termo-hidráulicos	417
	Referências Bibliográficas	436
13	MODELAGEM ANALÍTICA DE SISTEMAS QUÍMICOS	439
13.1	Relação de Continuidade dos Componentes de Uma Reação Química (Balanço de Componentes)	439
13.1.1	Exemplos de Balanço de Componentes	441
13.2	Cinética (Taxa de Reação) de Reações Químicas	444
13.3	Conservação (Balanço) de Energia	445
13.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Químicos	446
	Referências Bibliográficas	458
14	MODELAGEM DINÂMICA DE MEDIDORES E ATUADORES	459
14.1	Comportamento de Sensores e Transmissores	459

14.1.1	Medição de Vazão	462
14.1.2	Medição de Pressão e de Nível	462
14.1.3	Medição de Temperatura	463
14.1.4	Medição de Composição	463
14.1.5	Medição de pH	463
14.2	Comportamento de Válvulas e Amadores Pneumáticos	463
14.2.1	Cavitação, <i>Flashing</i> e Vazão Crítica em Válvulas	465
14.2.2	Vazão de Líquidos com Escoamento Subcrítico através de Válvulas	468
14.2.3	Efeito de Redutores de Diâmetro de Tubulação	472
14.2.4	Efeito da Cavitação ou <i>Flashing</i>	473
14.2.5	Fórmulas para Cálculo do Escoamento de Fluidos Compressíveis (Gases e Vapores) através de Válvulas	474
14.3	Comportamento de Linhas de Transmissão	476
14.4	Exemplos de Modelagem de Sistemas Incluindo Medidores e Amadores... ..	477
	Referências Bibliográficas	488
15	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS MECÂNICOS	489
15.1	Sistema Massa-mola-amortecedor	489
15.2	Passagem de Automóvel em Obstáculo	493
16	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS E ELETROMECA- NÍCOS	517
16.1	Circuito Elétrico R-L Conectado a Bateria.....	517
16.2	Servomecanismo com Não-linearidade do Tipo Atrito de Coulomb	519
16.3	Sistema Eletromecânico com Não-linearidade do Tipo Saturação	523
16.4	Propulsão de Submarino	529
	Referências Bibliográficas	549
17	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS HIDRÁULICOS	551
17.1	Enchimento de Tanques com Válvula e Bomba Hidráulica na Saída	551
17.2	Esvaziamento de Caminhão através de Bomba Hidráulica	560
17.3	Controle de Nível em Tanque Incluindo Instrumentação	566
18	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS TÉRMICOS E TERMO- HIDRÁULICOS	585
18.1	Sistema Térmico	585
18.2	Tanque com Sistema de Aquecimento por Vapor	588
18.3	Aquecedor Elétrico Residencial de Água	601
18.4	Trocador de Calor Incluindo a Instrumentação e o Cálculo Detalhado dos Coeficientes de Transferência de Calor	613
	Referências Bibliográficas	645

19	EXEMPLOS DE SIMULAÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS QUÍMICOS	647
19.1	Reator de Batelada sem Controle	647
19.2	Reator de Batelada com Controle Incluindo Instrumentação e Ciclos de Aquecimento e Resfriamento	654
	Referências Bibliográficas	678