

ÍNDICE

PREFÁCIO	xix
PREÂMBULO	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS	xxv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Evolução Histórica da Energia Eléctrica	3
1.2 Formas de Energia	5
1.3 A Electricidade no Contexto Energético	6
1.3.1 Mundo	6
1.3.2 União Europeia	7
1.3.3 Portugal	9
1.3.4 Península Ibérica	15
1.4 Energia Eléctrica e Ambiente	16
1.5 O Sistema de Energia Eléctrica	20
1.5.1 Estrutura	20
1.5.2 Componentes	21
1.5.3 Requisitos	26
1.5.4 Esquema unifilar	26
1.6 Redes Eléctricas	28
1.6.1 Tensão nominal	28
1.6.2 Função	29
1.6.3 Estrutura topológica	29
1.7 A Rede Eléctrica Portuguesa	31
1.8 Sumário	31
Referências Bibliográficas	33
Apêndice	34
2 CONCEITOS BÁSICOS	35
2.1 Introdução	37
2.2 Energia e Potência. Diagrama de Carga.	37
2.3 Potência em Sistemas de Energia Eléctrica	39
2.3.1 Potência activa e reactiva	39
2.3.2 Potência complexa e aparente	42
2.4 Sistema Eléctrico Trifásico	44
2.4.1 Tensão e corrente	44
2.4.2 Potência activa e reactiva	47

2.4.3	Carga ligada em triângulo	48
2.4.4	Esquema monofásico equivalente	49
2.5	Valores por Unidade	51
2.5.1	Sistemas monofásicos	52
2.5.2	Sistemas trifásicos	53
2.6	Transmissão de Energia	55
2.6.1	Em corrente alternada	55
2.6.2	Em corrente contínua	58
2.7	Caracterização das Cargas	60
2.7.1	Tipologia	60
2.7.2	Elasticidades	61
2.7.3	Elasticidade em relação à tensão	62
2.7.4	Elasticidade em relação à frequência	65
2.8	Sumário	66
3	MÁQUINA SÍNCRONA	69
3.1	Introdução	71
3.2	Princípio de Funcionamento	71
3.3	Força Electromotriz	75
3.4	Reacção do Induzido	78
3.5	Características de Funcionamento	81
3.5.1	Em vazio e em curto-circuito	81
3.5.2	Em carga	84
3.6	Fórmulas da Potência Activa e Reactiva	87
3.7	Efeito da Saliência	90
3.7.1	Reactâncias segundo os eixos directo e de quadratura	90
3.7.2	Fórmulas da potência activa e reactiva modificadas	92
3.8	Modos de Funcionamento	94
3.8.1	Gerador	94
3.8.2	Motor	96
3.8.3	Compensador síncrono	96
3.8.4	Diagramas de fasores	97
3.9	Estabilidade da Marcha Síncrona	98
3.10	Sumário	102
	Referências Bibliográficas	103
4	TRANSFORMADOR E MÁQUINA ASSÍNCRONA	105
4.1	Transformador	107
4.1.1	Introdução	107
4.1.2	Princípio de funcionamento	107

4.1.3	Corrente de magnetização	109
4.1.4	Esquema equivalente	112
4.1.5	Transformador com três enrolamentos	119
4.1.6	Autotransformador	122
4.1.7	Transformador trifásico	124
4.1.8	Transformador com regulação de tensão	129
4.1.9	Transformador desfasador	132
4.2	Máquina Assíncrona	134
4.2.1	Introdução	134
4.2.2	Princípio de funcionamento	135
4.2.3	Modelo matemático	136
4.2.4	Potência mecânica e rendimento	138
4.2.5	Binário	140
4.2.6	Representação em valores p.u.	145
4.2.7	Funcionamento como gerador	148
4.3	Sumário	152
	Referências Bibliográficas	152
5	LINHA ELÉCTRICA DE ENERGIA	153
5.1	Introdução	155
5.2	Resistência e Condutância Transversal	156
5.3	Reactância Longitudinal	158
5.3.1	Linha Monofásica	158
5.3.2	Linha com n Condutores	161
5.3.3	Linha Trifásica	163
5.3.4	Linha Trifásica com Dois Condutores em Feixe	166
5.3.5	Cabos Subterrâneos	168
5.4	Admitância Transversal	169
5.4.1	Linha Monofásica	169
5.4.2	Linha com n Condutores	171
5.4.3	Influência da Terra	171
5.4.4	Linha Trifásica	174
5.4.5	Linha Trifásica com Dois Condutores em Feixe	177
5.4.6	Cabos Subterrâneos	178
5.5	Modelo da Linha em Regime Estacionário	178
5.5.1	Modelo Exacto	178
5.5.2	Esquema Equivalente em π	186
5.5.3	Esquema Equivalente em π Nominal	187
5.5.4	Modelo da Linha Curta	189
5.6	Linha Terminada pela Impedância de Onda	191

5.6.1	Linha com Perdas	191
5.6.2	Linha sem Perdas	193
5.6.3	Capacidade de Transporte	198
5.6.4	Limite Térmico	198
5.6.5	Limite de Estabilidade Estática	198
5.6.6	Limite de Estabilidade de Tensão	203
5.7	Sumário	207
	Referências Bibliográficas	208
6	TRÂNSITO DE ENERGIA	209
6.1	Introdução	211
6.2	Sistema com Dois Barramentos	211
6.2.1	Equações do Trânsito de Energia	212
6.2.2	Equações na Forma Real	214
6.2.3	Características das Equações	215
6.3	Sistema com n Barramentos	220
6.3.1	Modelo Matemático	220
6.3.2	Tipos de Barramentos	223
6.3.3	Classificação das Variáveis	223
6.4	Solução do Trânsito de Energia	224
6.4.1	Cálculo das Tensões	224
6.4.2	Potência Injectada no Nó de Balanço	225
6.4.3	Potências Transitadas nas Linhas	226
6.5	Método de Gauss-Seidel	227
6.5.1	Algoritmo	227
6.5.2	Barramentos Tipo PQ	228
6.5.3	Barramentos Tipo PV	233
6.6	Controlo das Potências Transitadas	237
6.6.1	Baterias de Condensadores ou Reactâncias Indutivas	237
6.6.2	Transformadores com Regulação de Tensão	238
6.6.3	Desfasadores	241
6.7	Representação das Cargas	244
6.8	Método de Newton-Raphson	247
6.8.1	Algoritmo	247
6.8.2	Aplicação ao Trânsito de Energia	249
6.8.3	Processo Iterativo	252
6.9	Método do Desacoplamento	259
6.10	Modelo de Corrente Contínua	263
6.11	Programas de Trânsito de Energia	266
6.12	Barramento de Balanço Distribuído	271

6.13	Análise de Contingências	273
6.14	Sumário	276
	Referências Bibliográficas	277
7	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	279
7.1	Introdução	281
7.2	Corrente e Potência de Curto-Circuito	282
7.2.1	Teorema da Sobreposição	283
7.2.2	Teorema de Thévenin	284
7.3	Curto-Circuito de Um Gerador Síncrono	285
7.4	Modelos dos Elementos da Rede	288
7.4.1	Gerador	288
7.4.2	Transformador e Linha	289
7.4.3	Cargas	289
7.5	Cálculo das Correntes de Curto-Circuito Simétrico	291
7.5.1	Redução da Rede	291
7.5.2	Impedância Equivalente a Montante	295
7.5.3	Matriz das Impedâncias Nodais	298
7.6	Método das Componentes Simétricas	303
7.7	Propriedades das Componentes Simétricas	306
7.7.1	Desacoplamento	306
7.7.2	Potência Trifásica	307
7.8	Impedâncias Simétricas	310
7.8.1	Gerador	310
7.8.2	Linha	313
7.8.3	Transformador	316
7.9	Curto-Circuitos Assimétricos	322
7.9.1	Curto-Circuito Fase-Terra	325
7.9.2	Curto-Circuito Fase-Fase	331
7.9.3	Curto-Circuito Fase-Fase-Terra	334
7.9.4	Cálculo da Corrente nos Ramos da Rede	337
7.10	Cálculo Digital das Correntes de Curto-Circuito	337
7.11	Sumário	348
	Referências Bibliográficas	349
8	CONTROLO DE FREQUÊNCIA E DE TENSÃO	351
8.1	Introdução	353
8.2	Controlo Frequência-Potência Activa	354
8.2.1	Introdução	354
8.2.2	Controlo Primário e Secundário	355

8.3	Regulador de Velocidade	356
8.3.1	Princípio de Funcionamento	356
8.3.2	Modelo Matemático do Regulador	358
8.3.3	Modelo Matemático da Turbina	360
8.3.4	Resposta em Regime Estacionário e Transitório	361
8.4	Controlo de Uma Rede Isolada	365
8.4.1	Modelo Matemático	365
8.4.2	Controlo Primário	368
8.4.3	Controlo Secundário	374
8.5	Controlo de Redes Interligadas	378
8.5.1	Modelo Matemático de Duas Redes Interligadas	379
8.5.2	Controlo Primário	380
8.5.3	Controlo Secundário	381
8.5.4	Controlo Secundário para n Redes Interligadas	391
8.6	Controlo Terciário	392
8.7	Controlo Tensão-Potência Reactiva	392
8.7.1	Introdução	392
8.7.2	Produção e Consumo de Potência Reactiva	393
8.8	Regulador de Tensão	394
8.8.1	Princípio de Funcionamento	394
8.8.2	Modelo Matemático	397
8.8.3	Resposta em Regime Estacionário e Transitório	399
8.8.4	Compensação da Carga	404
8.9	Injecção de Potência Reactiva	405
8.9.1	Modelo Simplificado do Sistema	405
8.9.2	Condensadores e Bobinas em Derivação	406
8.9.3	Condensadores em Série	408
8.9.4	Compensadores Síncronos	409
8.9.5	Compensadores Estáticos	410
8.10	Transformadores com Regulação de Tensão	416
8.11	Sumário	420
	Referências Bibliográficas	421
9	ESTABILIDADE TRANSITÓRIA	423
9.1	Introdução	425
9.2	Estabilidade Estática e Transitória	426
9.2.1	Definições	426
9.2.2	Modelos Matemáticos	426
9.3	Gerador Ligado a Uma Rede Infinita	427
9.4	Modelo da Máquina Síncrona	428

9.4.1	Regime Estacionário	428
9.4.2	Regime Transitório	430
9.4.3	Relação entre o Ângulo do Rotor e o Argumento da F.e.m.	434
9.5	Regime Transitório Electromecânico	436
9.5.1	Dinâmica Rotacional	436
9.5.2	Constante de Inércia	437
9.5.3	Factor de Amortecimento	438
9.5.4	Tempo de Arranque	438
9.5.5	Equação de Oscilação	439
9.6	Pequenas Perturbações	440
9.6.1	Linearização da Equação de Oscilação	440
9.6.2	Frequência Natural de Oscilação	441
9.6.3	Resposta no Domínio do Tempo	442
9.7	Grandes Perturbações: Critério da Igualdade das Áreas	443
9.8	Aplicações do Critério da Igualdade das Áreas	450
9.8.1	Aumento da Potência	450
9.8.2	Desligação de Uma Linha com Circuito Duplo	450
9.8.3	Defeito numa Linha com Circuito Duplo	453
9.9	Extensão a um Sistema com Duas Máquinas	459
9.10	Solução no Domínio do Tempo por Integração Numérica	462
9.10.1	Modelo Clássico	462
9.10.2	Gerador	463
9.10.3	Rede	464
9.10.4	Cálculos Preliminares	465
9.10.5	Integração das Equações de Oscilação	466
9.10.6	Programa de Simulação	467
9.10.7	Limitações do Modelo Clássico	469
9.11	Modelo Completo	474
9.11.1	Modelo Electromagnético do Gerador	475
9.11.2	Regulador de Tensão	476
9.11.3	Regulador de Velocidade	477
9.12	Técnicas para Ampliar os Limites de Estabilidade Transitória	478
9.13	Sumário	478
	Referências Bibliográficas	480
10	SOBRETENSÕES E TRANSITÓRIOS ELECTROMAGNÉTICOS	481
10.1	Introdução	483
10.2	Sobretensões Atmosféricas	483
10.3	Propagação de Ondas Electromagnéticas em Linhas	484
10.3.1	Equação de Propagação	484

10.3.2	Solução da Equação de Propagação	485
10.3.3	Condições de Fronteira	487
10.3.4	Linha em Vazio	489
10.3.5	Linha em Curto-Circuito	489
10.3.6	Outras Terminações	492
10.3.7	Efeito das Perdas na Linha	494
10.4	Sobretensões de Manobra	497
10.4.1	Disjuntores	497
10.4.2	Corte de Uma Corrente de Curto-Circuito	498
10.4.3	Tensão Transitória de Restabelecimento	500
10.4.4	Resistência em Paralelo com o Disjuntor	511
10.4.5	Tensão de Restabelecimento à Frequência Nominal	515
10.4.6	Defeito Quilométrico	521
10.4.7	Corte de Uma Corrente Capacitiva	531
10.4.8	Corte de Uma Corrente de Magnetização	537
10.4.9	Defeito Consecutivo	542
10.5	Cálculo Digital de Transitórios Electromagnéticos	543
10.5.1	Elementos com Parâmetros Concentrados	544
10.5.2	Elementos com Parâmetros Distribuídos	553
10.5.3	Equações Nodais	555
10.5.4	Alteração de Topologia	555
10.6	Sumário	557
	Referências Bibliográficas	558
11	TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	559
11.1	Introdução	561
11.2	Potência Transmitida em C.C. e em C.A.	562
11.3	Vantagens da Transmissão em Corrente Contínua	563
11.4	Aplicações da Transmissão em Corrente Contínua	565
11.5	Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua	566
11.5.1	Configuração	566
11.5.2	Componentes	567
11.6	Conversor Trifásico em Ponte	569
11.6.1	Válvulas	570
11.6.2	Análise do Funcionamento do Conversor	571
11.6.3	Controlo do Ângulo de Ignição	574
11.6.4	Factor de Potência	574
11.6.5	Dimensionamento do Transformador do Conversor	576
11.7	Comutação da Corrente entre Válvulas	577
11.7.1	Ângulo de Comutação	577

11.7.2	Tensão Contínua	579
11.7.3	Factor de Potência	581
11.8	Funcionamento como Inversor	582
11.9	Conversor a 12 Pulsos	586
11.10	Sistema de Transmissão em C.C. Biterminal	588
11.10.1	Modos Básicos de Funcionamento	588
11.10.2	Inversão do Trânsito de Potência	593
11.11	Harmónicas e Filtros	596
11.11.1	Harmónicas no Lado da Corrente Alternada	596
11.11.2	Filtros de Corrente Alternada	599
11.11.3	Harmónicas no Lado da Corrente Contínua	600
11.12	Controlo dos Sistemas de Transmissão em C.C.	602
11.12.1	Arquitectura do Sistema de Controlo	602
11.12.2	Sistemas de Ignição	603
11.12.3	Sistema de Controlo da Corrente	607
11.13	Estabilidade do Sistema de Controlo de Corrente	608
11.13.1	Modelo Discreto do Conversor	608
11.13.2	Modelo Analítico de Um STCC Biterminal	611
11.13.3	Fronteiras de Estabilidade	614
11.14	Trânsito de Energia em Sistemas C.A./C.C.	615
11.14.1	Equações em Valores p.u.	615
11.14.2	Modelo em Regime Estacionário do STCC	618
11.14.3	Solução Computacional	620
11.15	Sumário	624
	Referências Bibliográficas	627
12	ELEMENTOS DE ANÁLISE ECONÓMICA E FINANCEIRA	629
12.1	Introdução	631
12.2	Valor Temporal do Dinheiro	631
12.3	Custo da Energia Produzida	633
12.3.1	Custo Médio	633
12.3.2	Custo Marginal de Curto Prazo	635
12.3.3	Custo Marginal de Longo Prazo	637
12.4	Preços de Mercado	638
12.4.1	Mercado Perfeito	638
12.4.2	Monopólio	641
12.4.3	Preços de Ramsey	644
12.5	Avaliação Económica do Investimento	647
12.5.1	Valor Actual Líquido	648
12.5.2	Taxa Interna de Rentabilidade	648

12.5.3	Tempo de Retorno Bruto	650
12.5.4	Relação Benefício/Custo	650
12.6	Sumário	651
	Referências Bibliográficas	651
13	OPERAÇÃO OPTIMIZADA	653
13.1	Introdução	655
13.2	Despacho Económico sem Perdas	656
13.2.1	Método dos Multiplicadores de Lagrange	656
13.2.2	Limites da Potência Gerada	659
13.2.3	Curva de Custo de Produção Linear	660
13.3	Despacho Económico com Perdas	662
13.4	Método dos Coeficientes B	664
13.4.1	Sistema com Dois Geradores	664
13.4.2	Sistema com Qualquer Número de Geradores	669
13.4.3	Procedimento Computacional	671
13.5	Modelo das Perdas pelo Método do Nó de Balanço	673
13.5.1	Sistema com Dois Geradores	674
13.5.2	Sistema com Qualquer Número de Geradores	677
13.5.3	Procedimento Computacional	680
13.6	Coordenação Hidro-Térmica	682
13.7	Trânsito de Energia Optimizado	688
13.7.1	Método do Gradiente	689
13.7.2	Método de Newton	693
13.8	Estimação de Estado	701
13.8.1	Definição	701
13.8.2	Método dos Mínimos Quadrados	703
13.8.3	Sistemas Não Lineares	709
13.8.4	Método AEP	711
13.8.5	Deteção de Dados Errados	714
13.9	Diagrama de Transição de Estado	715
13.10	Sumário	716
	Referências Bibliográficas	718
14	ORGANIZAÇÃO E GESTÃO DO SISTEMA ELÉCTRICO	721
14.1	Introdução	723
14.2	A Reestruturação do Sector Eléctrico	724
14.3	Características da Energia Eléctrica	725
14.4	A Vertente Ambiental	726
14.5	Modelos Organizacionais do Sistema Eléctrico	727

14.6	Directivas Europeias	732
14.6.1	Directiva 92/96/CE	732
14.6.2	Directiva Europeia 2002/54/CE	734
14.7	Quadro Legal em Portugal	735
14.7.1	Reforma de 1995	735
14.7.2	Desenvolvimentos Recentes	737
14.8	Regulação do Sector Eléctrico	738
14.8.1	Necessidade de Regulação	738
14.8.2	Formas de Regulação	739
14.9	Mercados de Electricidade	741
14.9.1	Bolsa de Electricidade (pool)	741
14.9.2	Contratos Bilaterais	742
14.9.3	Remuneração da Disponibilidade	744
14.9.4	Contratos Financeiros	745
14.10	Mercado Ibérico de Electricidade (MIBEL)	746
14.11	Rede de Transporte	747
14.11.1	Congestionamento da Rede	747
14.11.2	Gestão do Congestionamento	748
14.11.3	Preços Nodais	751
14.11.4	Tarifa de Uso da Rede	752
14.11.5	Remuneração das Perdas	753
14.11.6	Facturação da Energia Reactiva	754
14.11.7	Serviços de Sistema	756
14.12	Cálculo dos Preços Nodais	757
14.12.1	Modelo Matemático Geral	757
14.12.2	Modelo Simplificado	758
14.13	Sistema Tarifário Português	762
14.13.1	Princípios Básicos de Um Tarifário	762
14.13.2	Tarifa de Energia e Potência	763
14.13.3	Tarifa de Uso Global do Sistema	764
14.13.4	Tarifa de Uso da Rede de Transporte	765
14.13.5	Tarifa de Uso da Rede de Distribuição	766
14.13.6	Tarifa de Comercialização	768
14.13.7	Tarifa de Clientes Finais	768
14.14	Qualidade da Energia Eléctrica	769
14.14.1	Forma de Onda da Tensão	769
14.14.2	Harmónicas	770
14.14.3	Transitórios Electromagnéticos	772
14.14.4	Cavos de Tensão	772
14.14.5	Continuidade de Serviço	774

14.14.6	Qualidade Comercial	774
14.15	Produção Descentralizada	775
14.15.1	Introdução	775
14.15.2	Motivação	776
14.15.3	Situação na UE e em Portugal	777
14.15.4	Integração na Rede da Produção Descentralizada	778
14.15.5	Harmónicas e Tremulação	781
14.16	O Hidrogénio	781
14.17	Energia Eléctrica para o Futuro	783
14.18	Sumário	785
	Referências Bibliográficas	786

ÍNDICE REMISSIVO

787