

Prefácio	XIII
Preâmbulo	XV
Apresentação resumida	XVII
Agradecimentos	XXI
Introdução	XXIII
 1. Noções e dados básicos utilizados em aplicações práticas	
nas redes eléctricas	1
1.1. Introdução	1
1.2. Fasores	1
1.2.1. Combinação algébrica de fasores	4
1.2.2. Rotação de fasores e sequência de fases	5
1.2.3. O fasor e a sinusóide	6
1.2.4. Representações dos fasores	7
1.3. Polaridades nos circuitos eléctricos	8
1.3.1. Polaridades nos transformadores	8
1.3.2. Polaridades nos equipamentos a baixa tensão direccionais	9
1.4. Derivação de uma grandeza alternada sinusoidal	10
1.5. Primitivação de uma grandeza alternada sinusoidal	11
1.6. Leis de base e teoremas dos circuitos	12
1.6.1. Introdução	12
1.6.2. Convenções de sinais nos circuitos eléctricos	13
1.6.3. Lei de Ohm	15
1.6.4. Lei dos nós	18
1.6.5. Lei das malhas	19
1.6.6. Teorema da sobreposição	19
1.6.7. Teorema de Thévenin	19
1.6.8. Teorema triângulo/estrela	19
 2. Estudo das correntes de curto-circuitos em sistemas trifásicos	25
2.1. Introdução	25
2.2. Estabelecimento e evolução da corrente de curto-circuito	30
2.2.1. Curto-circuito monofásico (afastado do alternador), num circuito vazio, com uma tensão constante	30
2.2.2. Curto-circuito monofásico (afastado do alternador) num circuito com carga preexistente, com uma tensão constante	33
2.2.3. Curto-circuito trifásico (afastado do alternador), num circuito em vazio, com uma tensão constante	34
2.2.4. Curto-circuito trifásico nos bornes do alternador	35
 3. Caracterização de uma rede trifásica	37
3.1. Introdução	37
3.2. Sistemas trifásicos equilibrados	39
3.2.1. Definições e apresentação	39

3.2.2.	Representação complexa de um sistema trifásico equilibrado	43
3.3.	Sistemas trifásicos desequilibrados	46
3.3.1.	Definição	46
3.3.2.	Apresentação do teorema de Fortescue	46
3.4.	Cálculo de correntes de curto-circuitos numa rede trifásica complexa	57
3.4.1.	Tipos de curto-circuitos	57
3.4.2.	Método de cálculo	57
3.4.3.	Recapitulação das fórmulas que caracterizam diferentes defeitos	75
3.4.4.	Escolha do modo de apresentação das grandezas eléctricas nos cálculos de curto-circuitos	75
3.5.	Considerações sobre a impedância de diversos elementos da rede	79
3.5.1.	Introdução	79
3.5.2.	Impedância das máquinas síncronas	80
3.5.3.	Impedâncias das máquinas assíncronas	83
3.5.4.	Impedâncias dos transformadores de potência a dois enrolamentos	84
3.5.5.	Impedâncias dos transformadores de potência a três enrolamentos	91
3.5.6.	Impedâncias das linhas aéreas	96
3.5.7.	Impedâncias dos cabos subterrâneos	98
3.5.8.	Impedâncias das baterias de condensadores	100
3.5.9.	Impedâncias figurativas da carga da clientela ligada à rede	101
3.6.	Exercícios resolvidos relativos a diversos casos de curto-circuitos	101
4.	Considerações gerais sobre a constituição das redes eléctricas	104
4.1.	Introdução	104
4.1.1.	Rede eléctrica	104
4.1.2.	Classificação das redes eléctricas	106
4.1.3.	Apresentação das redes eléctricas em estudo	113
4.1.4.	Esquema simplificado das redes	115
5.	Características funcionais das diferentes redes	117
5.1.	Redes de transporte e de interligação de nível nacional	117
5.1.1.	Características funcionais dos equipamentos	117
5.1.2.	Constituição	118
5.1.3.	Particularidades de funcionamento	118
5.2.	Redes de transporte e de interligação de nível regional	119
5.2.1.	Características dos equipamentos	119
5.2.2.	Constituição	120
5.2.3.	Particularidades de funcionamento	120
5.3.	Redes de Distribuição local	120
5.3.1.	Características funcionais dos equipamentos	120
5.3.2.	Constituição	121
5.3.3.	Particularidades de funcionamento	121
5.4.	Subestações de transformação e cabinas de distribuição	122
5.4.1.	Modos de alimentação de transformadores na rede	123

5.4.2.	Exame dos problemas postos pela alimentação de um transformador de distribuição passivo MAT/MT ou AT/MT em derivação numa linha da rede de interligação	124
5.5.	Modos de exploração de transformadores de distribuição	126
5.6.	Cabinas de distribuição	128
6.	Estudo dos regimes de neutro	129
6.1.	Generalidades	129
6.2.	Regimes de neutro nas redes de distribuição	130
6.2.1.	Introdução	130
6.2.2.	Neutro isolado	130
6.2.3.	Neutro ligado à terra	136
6.3.	Regime de neutro nas redes de transporte	140
6.3.1.	Introdução	140
6.3.2.	Limitação da potência de curto-circuito monofásica	141
6.3.3.	Limitação das sobretensões	142
6.3.4.	O bom funcionamento das protecções	143
6.3.5.	Simplicidade das instalações	144
7.	Ligação manual de disjuntores e controlo de sincronismo nas redes	145
7.1.	Generalidades	145
7.2.	Aparelhos de sincronização	146
7.2.1.	Os sincronizadores	146
7.2.2.	Os controladores de sincronismo	150
8.	Considerações sobre a tensão da rede de distribuição em funcionamento normal	151
8.1.	Introdução	151
8.2.	Queda de tensão	151
8.2.1.	Efeito da queda de tensão	152
8.2.2.	Efeito da variação da tensão num equipamento de utilização	154
8.2.3.	Métodos de redução da diferença entre a tensão máxima e a tensão mínima prevista na rede	154
8.2.4.	Regulação automática e manual da relação de transformação dos transformadores	154
8.2.5.	Influência no nível de tensão de distribuição duma produção descentralizada	155
9.	Estudo das sobretensões nas redes eléctricas	157
9.1.	Generalidades	157
9.2.	Sobretensões devidas às descargas atmosféricas	157
9.3.	Sobretensões de manobras de comutação	159
9.4.	Sobretensões a frequência normal da rede	163
9.4.1.	Caso de defeito monofásico à terra	163
9.4.2.	Caso da descarga da capacidade de uma linha a alta tensão	164
9.4.3.	Caso de linhas (longas) ou de cabos (longos) em vazio: efeito Ferranti	164

9.5.	Descarregadores de sobretensão e disruptores	166
9.5.1.	Generalidades	166
9.5.2.	Tipos de equipamentos de protecção contra as sobretensões	167
9.5.3.	Comportamento dos descarregadores de sobretensão aquando de defeitos à terra na rede	171
9.6.	Protecção de transformadores contra as sobretensões	171
9.6.1.	Introdução	171
9.6.2.	Caso de um transformador com os seus neutros ligados à terra	172
9.6.3.	Caso de um transformador com os seus neutros isolados	173
9.7.	Coordenação dos isolamentos	173
9.7.1.	Introdução	173
9.7.2.	Compromisso técnico-económico	174
10.	Protecção contra a ferroressonância nas subestações	175
10.1.	Introdução	175
10.2.	Ferroressonância monofásica	175
10.3.	Ferroressonância trifásica	179
11.	Trabalhos em tensão	181
11.1.	Introdução	181
11.2.	Equipotencial à volta da zona de trabalho	182
11.2.1.	Realização do esquema do "berço"	182
11.2.2.	Realização do esquema do "shunt"	183
11.3.	Aspectos relativos aos automatismos de religação automática	184
11.3.1.	Introdução	184
11.3.2.	Precauções após um defeito nos barramentos	185
11.3.3.	Precauções após um colapso geral de tensão	185
11.4.	Aspectos relativos às protecções diferenciais dos barramentos	186
11.4.1.	Introdução	186
11.4.2.	Comportamento das protecções de barramentos no caso do estabelecimento de um "berço"	186
11.4.3.	Comportamento das protecções diferenciais de barramentos no caso de colocação de um "shunt"	188
12.	Transformadores de potência	191
12.1.	Ligações dos enrolamentos trifásicos	191
12.1.1.	Ligação estrela	191
12.1.2.	Ligação triângulo	192
12.1.3.	Ligação zigzague	193
12.2.	Diagramas de ligações	194
12.3.	Desvios de fase	196
12.3.1.	Caso do grupo de ligação estrela/estrela	197
12.3.2.	Caso do grupo de ligação triângulo/triângulo	197
12.3.3.	Grupo de ligação estrela/triângulo	198

12.3.4.	Grupo de ligação triângulo/estrela	199
12.3.5.	Grupo de ligação estrela/ziguezague	199
12.3.6.	Grupo de ligação triângulo/ziguezague	200
12.4.	Índices horários e diagramas horários	201
12.5.	Índice numérico	201
12.6.	Grupos de ligação, diagramas e esquemas eléctricos de conexões	202
12.6.1.	Grupo estrela/triângulo, (Yd11)	202
12.6.2.	Grupo “falso” estrela/triângulo, Yd1 (Yd11 ligado em Yd1)	203
12.6.3.	Grupo estrela/triângulo, (Yd1)	204
12.6.4.	Grupo estrela/triângulo, Yd5	204
12.6.5.	Grupo triângulo/estrela, (Dy11)	205
12.6.6.	Grupo estrela/estrela, (Yy0)	205
12.7.	Exercício para ilustrar as precauções a tomar antes da ligação em paralelo de duas redes	206
13.	Transformadores de medida.....	207
13.1.	Introdução	207
13.2.	Transformadores de corrente	208
13.2.1.	Definição	208
13.2.2.	Transformadores do tipo Tore	208
13.2.3.	Transformadores do tipo bobinado	208
13.2.4.	Características eléctricas secundárias fundamentais dos transformadores de corrente	209
13.2.5.	Tipos de transformadores de corrente destinados às protecções	214
13.2.6.	Precauções na utilização dos transformadores de corrente	217
13.2.7.	Curva de magnetização dos transformadores de corrente	217
13.2.8.	Mudança de valores de relação de transformação de transformadores de corrente	218
13.2.9.	Soma das correntes secundárias dos transformadores de corrente	220
13.2.10.	Verificação das características dos transformadores de corrente de uma subestação em reestruturação	222
13.3.	Transformadores de tensão	223
13.3.1.	Definição	223
13.3.2.	Características eléctricas secundárias fundamentais dos transformadores de tensão	223
13.3.3.	Tipos de transformadores de tensão	225
13.3.4.	Transformadores de tensão e ferroressonância	227
13.3.5.	Posicionamento dos transformadores de tensão nas subestações.....	227
13.3.6.	Comportamento térmico dos transformadores de tensão	228
13.3.7.	Cálculo da queda de tensão no cabo de conexão do secundário do transformador de tensão	229
13.3.8.	Comportamento dos transformadores de tensão em relação às sobretensões	230

14.	Aplicação prática na rede de transformadores de potência desfasadores	231
14.1.	Introdução	231
14.2.	Teoria de base	232
14.3.	Trânsito de energia numa rede sem transformador desfasador	232
14.4.	Comportamento numa rede sem transformador desfasador e com o disjuntor desligado	233
14.5.	Trânsito de energia numa rede com transformador desfasador	233
14.6.	Efeito do ângulo introduzido pelo desfasador	234
14.7.	Dois casos de aplicação	234
14.7.1.	Caso correspondente à aplicação relativa a um trânsito de potência entre duas regiões ou países, ambos com redes de muito forte potência	234
14.7.2.	Caso correspondente à aplicação relativa a um trânsito de potência por duas linhas em paralelo ligando duas regiões ou países	235
14.7.3.	Exemplo de redistribuição global da potência	236
15.	Religação automática associada às protecções nas redes a média, a alta e a muito alta tensão	237
15.1.	Generalidades	237
15.2.	Definições	240
15.3.	Programas de religação automática	241
15.3.1.	Religações monofásicas	241
15.3.2.	Religações trifásicas	243
15.4.	Condições para a religação automática	244
15.5.	Bloqueio da ligação manual ou da religação automática	244
15.6.	Tipos de religação automática trifásica nas redes a 150 kV e a 380 kV	245
15.6.1.	Introdução	245
15.6.2.	Caso de religação automática trifásica rápida de linha de tensão igual a 150 kV	245
15.6.3.	Caso de religação automática trifásica lenta de linhas de tensão igual ou superior a 150 kV	246
15.7.	Critério de escolha do tipo de religação automática trifásica nas redes a alta ou a muito alta tensão	248
15.7.1.	Introdução	248
15.7.2.	Linha a 150 kV, sem derivação, afastada das centrais	248
15.7.3.	Linha a 150 kV afastada das centrais com derivação para um transformador de distribuição	248
15.7.4.	Linha a 150 kV afastada das centrais com derivação activa	251
15.7.5.	Linhas de interligação a 380 kV	253
15.7.6.	Particularidades da religação automática das linhas de interligação perto das centrais	253
15.7.7.	Exercício resolvido ilustrando as condições a serem reunidas e o tipo de religação automática permitido	257
15.8.	Particularidades relativas à religação automática associada às protecções	

nas redes a média tensão	257
15.8.1. Generalidades	257
15.8.2. Princípio e regulações	258
15.8.3. Colocação fora de serviço dos religadores automáticos	260
16. Problema de reconstituição da rede após colapso de tensão	261
16.1. Introdução	261
16.2. Medidas preventivas e plano de salvaguarda	261
16.2.1. Redução preventiva da tensão distribuída	261
16.2.2. Deslastre progressivo das cargas	262
16.2.3. Separação em sub-redes	263
16.3. Precauções durante a reconstituição da rede	266
16.3.1. Reconstituição passo a passo	266
16.3.2. Bloqueio dos reguladores de tensão dos transformadores de distribuição	267
16.3.3. Controlo da potência reactiva gerada	268
16.3.4. Função de mínima tensão temporizada	270
17. Sistemas de teleprotecção	273
17.1. Generalidades	273
17.2. Necessidade de uma cooperação estreita entre os engenheiros de protecção e os engenheiros de telecomunicações	274
17.3. Elementos constitutivos dos sistemas de teleprotecção	275
17.4. Influência das perturbações sobre a segurança de funcionamento dos sistemas de teleprotecção	275
17.5. Segurança de funcionamento dos sistemas de teleprotecção	277
17.5.1. Codificação das mensagens	277
17.5.2. Limitação da largura de banda	277
17.5.3. Transmissão por vários trajectos	277
17.6. Métodos de transmissão e de recepção dos sinais de teleprotecção	278
17.6.1. Introdução	278
17.6.2. Transmissão em corrente contínua	278
17.6.3. Transmissão a frequência vocal	278
17.6.4. Transmissão por correntes portadoras nas linhas aéreas (P.L.C.)	279
17.6.5. Multiplexagem	280
17.7. Tipos de sistemas de teleprotecção	281
17.7.1. Sistemas de comparação analógica	281
17.7.2. Sistemas de comando	281
18. Produção eléctrica descentralizada	283
18.1. Introdução	283
18.2. As fontes de produção descentralizada	284
18.2.1. Introdução	284
18.2.2. Energias renováveis	285
18.2.3. Energia das pilhas de combustível	288

18.2.4.	Energias clássicas	288
18.2.5.	Energias de co-geração	289
18.3.	Condições de ligação à rede	290
18.3.1.	Ligação em média tensão	291
18.3.2.	Ligação em alta tensão	292
18.3.3.	Sistema automático de seccionamento	293
18.3.4.	Estudo da potência de curto-circuito	293
18.3.5.	Fecho de anel	294
18.3.6.	Conexão das eólicas	295
18.3.7.	Influência de uma produção descentralizada no nível de tensão de distribuição	297
19.	Qualidade da electricidade	301
19.1.	Introdução	301
19.2.	As fragilidades da rede	302
19.3.	Caracterização da alimentação eléctrica	303
19.3.1.	A amplitude da tensão	303
19.3.2.	A frequência da tensão	304
19.3.3.	A forma de onda da tensão	305
19.3.4.	A simetria da onda da alimentação eléctrica	307
19.4.	Definição dos objectivos e dos índices que definem a qualidade da electricidade	307
	Bibliografia	309
	Apêndices	313
	Apêndice 1	313
	Apêndice 2	317
	Apêndice 3	321
	Apêndice 4	363
	Apêndice 5	373
	Apêndice 6	377
	Apêndice 7	383
	Apêndice 8	385
	Apêndice 9	387