

Preface	XXI
Prefácio	XXIII
Preâmbulo	XXV
Apresentação resumida	XXIX
Agradecimentos	XXXV
1. Introdução	1
1.1. Objectivo	1
1.2. Considerações gerais sobre as redes eléctricas	1
1.2.1. Definição	1
1.2.2. Constituição	2
1.2.3. Diferentes tipos de redes eléctricas	3
1.2.4. Subestações de transformação	3
1.2.5. Local de protecção e controlo	3
2. Exigências para um bom comportamento funcional das redes eléctricas	5
2.1. Exigências estruturais	5
2.2. Necessidade de protecção	7
2.3. Relés de protecção e sistemas de protecção	8
2.4. Considerações gerais sobre os defeitos e sobre outras condições anormais de funcionamento da rede	9
2.4.1. Generalidades	9
2.4.2. Tipos de defeitos	9
2.4.3. Defeitos de isolamento	10
2.4.3.1. Tipos de defeitos de isolamento	10
2.4.3.2. Causas dos defeitos de isolamento	11
2.4.4. Defeitos “de exploração”	12
2.4.5. Condições anormais de funcionamento da rede	12
2.4.6. Conceitos de base das protecções eléctricas	15
2.4.7. Funções dos sistemas de protecção	16
2.4.7.1. Funções em caso de curto-circuito	16
2.4.7.2. Funções em caso de outras situações anormais, diferentes dos curto-circuitos	17
2.5. Efeitos das correntes de curto-circuitos	17
2.5.1. Posição do problema	17
2.5.2. Efeitos electrodinâmicos e térmicos	18
2.5.2.1. Introdução	18
2.5.2.2. Duração admissível dos curto-circuitos	18
2.5.3. Efeitos sobre as tensões	19
2.6. Planeamento das instalações	19
3. Qualidades dos sistemas de protecção contra os defeitos	21
3.1. Introdução	21

3.2.	Selectividade.....	21
3.3.	Fiabilidade	22
3.4.	Rapidez	23
3.5.	Sensibilidade.....	24
3.6.	Compatibilidade.....	24
3.7.	Flexibilidade	25
3.8.	Disponibilidade.....	25
4.	Considerações económicas sobre os sistemas de protecção das redes de distribuição e de interligação e de transporte	27
4.1.	Introdução.....	27
4.2.	Redes de distribuição.....	29
4.3.	Redes de interligação e /ou de transporte	30
5.	Realização da selectividade nos sistemas de protecção	31
5.1.	Zonas de protecção.....	31
5.2.	Delimitação das zonas de protecção num sistema eléctrico típico.....	31
5.3.	Protecção principal e protecção de reserva.....	33
5.4.	Selectividade e tipos de protecção.....	35
5.4.1.	Introdução.....	35
5.4.2.	Protecções selectivas dependentes.....	36
5.4.3.	Protecções selectivas independentes	36
6.	Evolução histórica nos dispositivos de protecção	39
6.1.	Introdução.....	39
6.2.	Fusíveis.....	39
6.2.1.	Generalidades	39
6.2.2.	Tipos de fusíveis	40
6.2.2.1.	Introdução.....	40
6.2.2.2.	Fusíveis de corrente zero.....	40
6.2.2.3.	Fusíveis limitadores de corrente.....	41
6.2.2.4.	Fusíveis especiais	42
6.2.3.	Limitações técnicas dos fusíveis	42
6.2.4.	Curva característica dos fusíveis	43
6.2.5.	Algumas definições	43
6.2.5.1.	Intensidade limite de fusão I_f	43
6.2.5.2.	Intensidade de fusão I_f	43
6.2.5.3.	Intensidade nominal ou calibre I_n	44
6.2.5.4.	Corrente mínima de corte	44
6.2.5.5.	Poder de corte.....	45
6.2.5.6.	Zona de incerteza de fusão	45
6.2.5.7.	Tensão nominal	45
6.3.	Os relés de protecção	45

6.3.1.	Introdução	45
6.3.2.	Relés electromecânicos	46
6.3.2.1.	Apresentação	46
6.3.2.2.	Vantagens e inconvenientes dessa geração de relés	46
6.4.	Relés estáticos	47
6.4.1.	Apresentação	47
6.4.2.	Justificação da evolução dos relés electromecânicos para os relés estáticos	47
6.4.3.	Constituição e operação	50
6.4.4.	Vantagens e inconvenientes	50
6.5.	Relés digitais	51
6.5.1.	Dados históricos	51
6.5.2.	Concepção e realização	52
6.5.3.	Integração de funções	54
6.5.4.	Programa de parametrização	55
6.5.5.	Protecções adaptáveis	55
6.5.6.	Comunicações das protecções digitais	56
6.5.7.	Hierarquia na comunicação de protecções digitais numa subestação	57
6.5.8.	Separação das funções de protecção e de controlo-comando	58
6.5.9.	Acompanhamento de uma protecção em serviço	59
6.5.10.	Auto-controlo	59
6.5.11.	Mudanças de EEPROM	60
6.5.12.	Resumo das vantagens e inconvenientes dos relés digitais	60
6.6.	Evolução futura das protecções dos sistemas eléctricos	61
6.6.1.	A quinta geração de relés de protecção	61
6.6.2.	Técnica baseada na medida de fasores	62
6.7.	Aplicação dos relés de protecção	62
6.8.	Classificação dos relés de protecção	62
6.8.1.	Classificação de acordo com o número de grandezas de medida	63
6.8.2.	Classificação quanto ao tipo de resposta	63
6.8.3.	Classificação dos relés de acordo com o nível da sua utilização na subestação	63
7.	Normas	65
7.1.	Equipamentos de protecção	65
7.2.	Transformadores de medida	66
7.2.1.	Generalidades	66
7.2.2.	Transformadores de corrente	66
7.2.3.	Transformadores de tensão	66
8.	Alimentação das protecções	67
8.1.	Introdução	67
8.2.	Transformadores de corrente	68
8.2.1.	Tipos de transformadores de corrente destinados às protecções	68

8.2.2.	Circuito equivalente de um transformador de corrente expresso em valores secundários.....	68
8.2.3.	Exigências da protecção a serem respeitadas pelos transformadores de corrente.....	70
8.2.3.1.	Resposta secundária dos transformadores de corrente.....	70
8.2.3.1.1.	Introdução.....	70
8.2.3.1.2.	Regime de curto-circuito simétrico.....	71
8.2.3.1.3.	Regime transitório.....	72
8.2.4.	Factor de dimensionamento para o regime transitório.....	72
8.2.5.	Comportamento de um transformador de corrente ao qual é aplicada uma corrente primária comportando uma componente aperiódica	73
8.2.6.	Particularidades dos transformadores de corrente segundo a construção de seus circuitos magnéticos.....	74
8.2.6.1.	Transformadores de corrente a núcleos saturáveis, classe TPX.....	74
8.2.6.1.1.	Introdução.....	74
8.2.6.1.2.	Estudo de dois casos de sobredimensionamento	75
8.2.6.2.	Boa prática de abordagem do problema do sobredimensionamento.....	78
8.2.6.3.	Transformadores de corrente a núcleos linearizados	79
8.2.6.4.	Transformadores de corrente não convencionais.....	82
8.2.6.5.	Soma das correntes secundárias dos transformadores de corrente	83
8.3.	Transformadores de tensão	84
8.3.1.	Tipos de transformadores de tensão	84
8.3.1.1.	Introdução	84
8.3.1.2.	Transformadores de tensão indutivos	84
8.3.1.3.	Transformadores de tensão capacitivos	85
8.3.1.4.	Transformadores de tensão não-convencionais	86
8.3.2.	Protecção térmica dos transformadores de tensão.....	86
9.	Protecção de tensão.....	89
9.1.	Princípio	89
9.2.	Aplicações	89
9.3.	Utilização como mínimo de tensão de fase	89
9.4.	Utilização como máximo de tensão de fase	90
10.	Protecção de frequência	91
10.1.	Introdução.....	91
10.2.	Princípio	91
10.3.	Temporização	92
10.4.	Aplicações	92
11.	Protecção de máxima intensidade.....	93
11.1.	Protecção contra os defeitos entre fases	93
11.1.1.	Generalidades	93
11.1.2.	Tipos de protecção de máxima intensidade.....	93

11.1.3.	Vantagens e inconvenientes das protecções de máxima intensidade	94
11.1.4.	Regulação do relé de máxima intensidade de corrente de fases	94
11.1.5.	Realização da selectividade com relés de máxima intensidade nas redes eléctricas	95
11.1.5.1.	Redes com alimentação bilateral	96
11.1.5.2.	Redes com alimentação unilateral	97
11.1.5.3.	Realização da selectividade nas redes eléctricas radiais.....	97
11.1.5.4.	Selectividade/coordenação pelo tempo	98
11.1.5.5.	Selectividade/coordenação pela corrente	100
11.1.5.6.	Selectividade/coordenação pela combinação de corrente e tempo	103
11.1.6.	Elaboração e aplicação do intervalo de tempo selectivo.....	106
11.1.6.1.	Entre relés a tempo constante	106
11.1.6.2.	Entre relés a tempo inverso	108
11.1.6.3.	Entre um relé a tempo inverso e um fusível.....	108
11.1.7.	Utilização de relés de protecção de máxima intensidade direcciona l contra os defeitos entre fases	108
11.2.	Protecção de máxima intensidade contra os defeitos à terra	110
11.2.1.	Introdução	110
11.2.2.	Ligação dos relés de protecção contra os defeitos à terra	111
11.2.3.	Factores que influenciam o nível de regulação dos relés de protecção de máxima intensidade contra os defeitos à terra.....	113
11.2.3.1.	Introdução	113
11.2.3.2.	Influência das características dos transformadores de corrente	114
11.2.3.3.	Influência das correntes de fuga e das correntes capacitivas desequilibradas.....	114
11.2.3.4.	Influência das correntes capacitivas que circulam nos cabos de alimentação sãos, em caso de defeito à terra num ponto qualquer da rede	115
11.2.3.5.	Influência de não simultaneidade de funcionamento dos pólos de um disjuntor.....	117
11.2.3.6.	Influência de desequilíbrios da rede.....	117
11.2.4.	Utilização das protecções de máxima intensidade direccionais homopolares	118
11.3.	Filosofia de aplicação de protecções de máxima intensidade de corrente nas redes de transporte e de distribuição	119
11.3.1.	Redes de transporte	119
11.3.1.1.	Linhas de interligação de tensões inferiores a 150 kV	119
11.3.1.2.	Linhas de tensão superior a 150 kV	120
11.3.1.3.	Transformadores de distribuição AT/MT entre barramentos das subestações de transformação de distribuição	120
11.3.1.4.	Transformadores de distribuição em paralelo em MT alimentados em alta tensão por barramentos separados ou por linhas diferentes	122
11.3.1.5.	Transformadores de distribuição em paralelo em MT alimentados em alta tensão por um barramento único	122

11.3.2.	Protecção de máxima intensidade das chegadas MT dos transformadores de distribuição como protecção de reserva dos sistemas de protecção dos cabos de alimentação MT.....	123
11.3.2.1.	Introdução.....	123
11.3.2.2.	Determinação do comprimento máximo de cabo protegido em reserva pelo relé de máxima intensidade no painel a MT do transformador	125
11.4.	Filosofia de aplicação de protecções nas redes de distribuição.....	128
11.4.1.	Generalidades.....	128
11.4.2.	Protecções instaladas ao nível dos ramais ou artérias numa rede radial	130
11.4.2.1.	Introdução.....	130
11.4.2.2.	Protecção de terra sensível	132
11.4.2.3.	Protecção contra os defeitos à terra intermitentes.....	133
11.4.2.4.	Protecção diferencial longitudinal.....	133
11.4.3.	Protecção de máxima intensidade direcciona.....	134
11.4.4.	Protecções instaladas ao nível dos ramais ou artérias com dupla alimentação.....	134
11.4.5.	Protecções instaladas ao nível dos painéis de artérias de alimentação MT em paralelo	134
11.4.6.	Protecções instaladas ao nível do painel de bateria de condensadores	135
11.4.7.	Regulação dos relés de protecção nas redes de distribuição	135
11.4.7.1.	Domínio de aplicação	135
11.4.7.2.	Regulações das protecções dos ramais de saída nas cabinas primárias e secundárias	136
11.4.7.2.1.	Protecção de fase, $I>$	136
11.4.7.2.2.	Protecção de fase, $I>>$	138
11.4.7.2.3.	Protecção homopolar a tempo constante, $I0>$	138
11.4.7.2.4.	Protecção homopolar a tempo constante, $I0>>$	139
11.4.7.2.5.	Protecção homopolar a tempo dependente, $I0>$	139
11.4.7.2.6.	Protecção diferencial longitudinal.....	140
11.4.7.3.	Regulações das protecções dos transformadores MT/MT e MT/BT.....	140
11.4.8.	Exemplos de aplicação de protecção de ramais de diversos tipos.....	141
11.4.9.	Manobras em carga na rede de distribuição	143
12.	Protecção dos transformadores de potência	145
12.1.	Convenções sobre os terminais dos transformadores.....	145
12.2.	Tipos de transformadores mais utilizados na rede	146
12.3.	Natureza dos defeitos dos transformadores de potência	146
12.3.1.	Defeitos internos	146
12.3.2.	Defeitos externos.....	147
12.4.	Considerações gerais sobre as protecções para os transformadores de potência.....	147
12.4.1.	Introdução.....	147
12.4.2.	Necessidade de protecção	147
12.5.	Tipos de protecção para transformadores de potência.....	148

12.5.1.	Protecção Buchholz.....	148
12.5.2.	Protecções contra a sobrepressão na cuba.....	149
12.5.2.1.	Protecção contra a sobrepressão absoluta.....	149
12.5.2.2.	Protecção contra a sobrepressão relativa.....	149
12.5.3.	Protecções diferenciais para transformadores de potência.....	149
12.5.3.1.	Generalidades.....	149
12.5.3.2.	Apresentação do princípio de operação numa situação teórica.....	150
12.5.3.3.	Apresentação do princípio de operação na situação real.....	152
12.5.3.4.	Considerações sobre problemas específicos que aparecem na utilização da protecção diferencial para transformadores.....	153
12.5.3.4.1.	Introdução.....	153
12.5.3.4.2.	Efeito das correntes de curto-circuitos externos.....	153
12.5.3.4.3.	Efeito da regulação em carga.....	154
12.5.3.4.4.	Efeito dos erros próprios aos transformadores de corrente.....	154
12.5.3.4.5.	Efeito da corrente de magnetização.....	154
12.5.3.5.	Técnicas de estabilização.....	154
12.5.3.5.1.	Técnica baseada numa baixa impedância.....	155
12.5.3.5.2.	Técnica baseada numa forte impedância.....	158
12.5.3.6.	Efeito das correntes de arranque dos transformadores de potência.....	160
12.5.3.6.1.	Considerações gerais.....	160
12.5.3.6.2.	Exame detalhado dos factores que influenciam a forma e a grandeza das correntes de arranque dos transformadores de potência.....	161
12.5.3.6.2.1.	Instante da ligação.....	161
12.5.3.6.2.2.	A posição do regulador em carga.....	161
12.5.3.6.2.3.	O tipo do circuito magnético do transformador de potência.....	161
12.5.3.6.3.	Repercussão na protecção do transformador de potência da corrente que acompanha o arranque do transformador.....	162
12.5.3.7.	Influência de tensões da rede anormalmente altas.....	163
12.5.3.8.	Tratamento físico das correntes de medida para alimentação das protecções diferenciais para transformadores.....	163
12.5.3.8.1.	Introdução.....	163
12.5.3.8.2.	Comparação dos dois modos de tratamento.....	164
12.5.3.9.	Técnicas de medida a partir das correntes de entrada.....	165
12.5.3.9.1.	Métodos analógicos clássicos.....	165
12.5.3.9.2.	Métodos de medida digital.....	165
12.5.4.	Aplicação de protecções diferenciais analógicas para transformadores de distribuição.....	166
12.5.4.1.	Caso de transformadores a dois enrolamentos.....	166
12.5.4.2.	Caso sem transformador de ponto neutro do lado do triângulo.....	168
12.5.4.3.	Caso com transformador de ponto neutro do lado do triângulo.....	168
12.5.4.4.	Aplicação de protecção diferencial analógica para transformadores de interligação a três enrolamentos.....	169
12.5.4.4.1.	Caso de transformadores com os enrolamentos numa só cuba.....	169

12.5.4.4.2.	Caso de um banco de três autotransformadores monofásicos.....	169
12.5.4.5.	Aplicação de protecção diferencial digital para transformadores a dois ou a três enrolamentos.....	170
12.5.4.6.	Problemas de cablagem de protecções diferenciais para transformadores	171
12.5.5.	Apresentação das protecções diferenciais para transformadores	171
12.5.6.	Protecção de terra restrita	171
12.5.7.	Protecção de massa-cuba	173
12.5.8.	Protecção contra as sobrecargas.....	173
13.	Protecção diferencial longitudinal para linhas aéreas ou cabos subterrâneos.....	175
13.1.	Generalidades	175
13.2.	Protecção diferencial utilizando fios pilotos.....	177
13.2.1.	Considerações gerais sobre a estruturação das protecções	177
13.2.2.	Princípios de realização	180
13.2.2.1.	Princípio de circulação de corrente.....	181
13.2.2.2.	Princípio de comparação de tensão	182
13.2.3.	Particularidades de representação da protecção diferencial.....	183
13.2.4.	Vigilância do circuito diferencial.....	184
13.2.5.	Critérios de segurança	184
13.2.5.1.	Critério de segurança baseado na corrente	185
13.2.5.2.	Critério de segurança baseado na tensão.....	185
13.2.5.3.	Apresentação dos critérios de segurança.....	186
13.3.	Protecção diferencial longitudinal utilizando cabos a fibras ópticas ou feixes hertzianos.....	186
13.3.1.	Introdução	186
13.4.	Protecção diferencial longitudinal utilizando correntes portadoras.....	187
13.4.1.	Técnicas de medida a partir das correntes de entrada.....	188
13.4.1.1.	Métodos analógicos clássicos	188
13.4.1.2.	Métodos de medida digital.....	188
13.4.2.	Características dos dados transmitidos	189
13.4.2.1.	Caso das fibras ópticas	189
13.4.2.2.	Caso dos feixes hertzianos.....	190
13.4.3.	Tipos de cabos a fibras ópticas.....	190
13.4.4.	Comunicação numa protecção digital	190
13.4.5.	Funções suplementares integradas nas protecções diferenciais longitudinais digitais	191
13.4.6.	Efeito da capacidade primária e regulação das protecções	191
13.4.6.1.	Introdução	191
13.4.6.2.	Problemas de regulação da protecção diferencial de um cabo subterrâneo, sob o efeito das correntes, em serviço normal, em vazio.....	192
13.4.6.3.	Problemas de regulação da protecção diferencial de um cabo subterrâneo, sob o efeito das correntes, em serviço normal, em carga	193

13.4.6.4.	Problemas de regulação da protecção diferencial de um cabo subterrâneo, sob o efeito de um defeito monofásico à terra, em vazio	193
13.5.	Apresentação das protecções diferenciais longitudinais para linhas ou cabos	194
13.6.	Protecção diferencial longitudinal de uma estrutura mista linha-cabo a duas extremidades	194
13.6.1.	Introdução	194
13.6.2.	Princípio geral	194
13.6.3.	Particularidades	195
13.6.4.	Alguns exemplos ilustrativos de ligação de transformadores do tipo Tore	195
13.7.	Protecção diferencial longitudinal para linhas a três extremidades ou mais	198
13.7.1.	Introdução	198
13.7.2.	Organização das protecções	199
13.7.3.	Apresentação dos meios de telecomunicação	201
13.7.3.1.	Generalidades	201
13.7.3.2.	Principais características dos feixes hertzianos	201
13.7.3.3.	Sincronização da rede numérica	202
13.7.3.4.	Medidas tomadas para garantir a fiabilidade e a disponibilidade das comunicações	202
13.7.3.5.	Disponibilidade e fiabilidade das ligações hertzianas	202
13.8.	Protecção diferencial longitudinal para linhas a três extremidades, apresentando uma derivação em cabo subterrâneo	203
13.8.1.	Introdução	203
13.8.2.	Apresentação das protecções diferenciais para linhas a três ou mais extremidades	204
14.	Protecção de barramentos	205
14.1.	Introdução	205
14.2.	Protecção de barramentos em subestações a alta e a muito alta tensão	205
14.3.	Protecção diferencial de barramentos de subestações a alta e a muito alta tensão	206
14.3.1.	Generalidades	206
14.3.2.	Princípio de realização prática	207
14.3.2.1.	Introdução	207
14.3.2.2.	Aplicação ao caso simples em que os transformadores de corrente são todos iguais	208
14.3.2.2.1.	Introdução	208
14.3.2.2.2.	Comportamento na ausência de saturação de transformadores de corrente	208
14.3.2.2.2.1.	Defeito "interior"	208
14.3.2.2.2.2.	Defeito "exterior"	209
14.3.2.2.3.	Comportamento na presença de saturação de transformadores de corrente	210

14.3.2.2.3.1.	Defeito interior	210
14.3.2.2.3.2.	Defeito exterior.....	211
14.3.2.3.	Estabilização da protecção diferencial de barramento contra a saturação dos transformadores de corrente	212
14.4.	Protecção diferencial de barramentos «a percentagem» ou «a baixa impedância»	212
14.4.1.	Aplicação ao caso mais geral em que os transformadores de corrente não são todos iguais	214
14.4.2.	Aplicação ao caso de subestações com barramentos múltiplos	216
14.4.2.1.	Introdução	216
14.4.2.2.	Realização da «imagem da subestação»	216
14.4.3.	Exame do comportamento da protecção de barramentos a baixa impedância em diferentes situações de exploração da subestação.....	219
14.4.3.1.	Comportamento selectivo em caso de defeito no barramento	219
14.4.3.2.	Comportamento numa manobra de comutação de barramentos	219
14.4.3.3.	Comportamento em caso de isolamento completo de um painel	221
14.4.3.4.	Comportamento em caso de disjuntor do painel de inter-barras desligado e aparecimento de um defeito entre os transformadores de corrente e o disjuntor desse painel	221
14.4.3.5.	Comportamento em caso de aparecimento de um defeito entre os transformadores de corrente e o disjuntor do painel de inter-barras com ou sem recusa de abertura desse disjuntor.....	222
14.4.3.6.	Comportamento em caso de defeito nos barramentos com recusa de desligação do disjuntor do painel de inter-barras	223
14.4.3.7.	Vigilância da corrente diferencial numa protecção diferencial de barramentos do tipo a baixa impedância	224
14.4.3.8.	Prolongação das ordens de disparo dadas pela protecção diferencial de barramentos.....	224
14.4.3.9.	Duração exagerada da presença de uma ordem de disparo pela protecção diferencial de barramentos.....	224
14.4.3.10.	Critérios de segurança.....	225
14.4.3.11.	Ligação do disjuntor de inter-barras	225
14.4.3.12.	Apresentação das protecções diferenciais de barramentos	225
14.5.	Protecção diferencial de barramentos a alta impedância	226
14.6.	Protecção diferencial de barramentos do tipo digital.....	227
14.6.1.	Apresentação	227
14.6.2.	Princípio de medida	229
14.6.3.	«Check zone» e critério de segurança	229
14.6.4.	Exame do comportamento da protecção digital de barramentos em diferentes situações de exploração da subestação.....	229
14.6.4.1.	Comportamento em caso de disjuntor do painel de inter-barras desligado e aparecimento de um defeito entre os transformadores de corrente e o disjuntor desse painel	229

14.6.4.2.	Comportamento em caso de aparecimento de um defeito entre os transformadores de corrente e o disjuntor do painel de inter-barras com ou sem recusa de abertura desse disjuntor.....	231
14.7.	Protecção de barramentos das cabinas de média tensão	232
14.7.1.	Generalidades	232
14.7.2.	Princípios de realização	232
14.7.3.	Problemas particulares	233
14.7.4.	CrITÉrio de segurança contra disparos intempestivos.....	234
15.	Protecção contra as falhas dos disjuntores	235
15.1.	Generalidades	235
15.2.	Realização	236
15.3.	Esquema de princípio para a rede a 150 kV	237
15.4.	Esquema de princípio para a rede a 380 kV	238
15.5.	CrITÉrios de segurança contra os disparos intempestivos	239
16.	Protecção de distância	241
16.1.	Generalidades	241
16.2.	Princípio de operação	244
16.3.	Princípio do escalonamento de tempo.....	245
16.3.1.	Introdução.....	245
16.3.2.	Zonas de distância.....	246
16.3.3.	Exemplo de comportamento, em escalonamento de tempo, de um relé de distância para diferentes localizações de defeitos	247
16.4.	Diagrama de impedâncias no plano R-X.....	247
16.4.1.	Introdução.....	247
16.4.2.	Exame do diagrama em situação normal da rede	248
16.4.3.	Exame do diagrama em situação de defeito na rede.....	249
16.4.3.1.	Defeito franco	250
16.4.3.2.	Defeito com resistência de defeito	250
16.4.3.3.	Zona de defeito	251
16.5.	Função medida de distância.....	251
16.5.1.	Introdução.....	251
16.5.2.	Caracterização das zonas de medida.....	253
16.5.3.	Determinação das grandezas ou anéis de medida.....	253
16.5.3.1.	Generalidades	253
16.5.3.2.	Grandezas de medida a considerar nos cálculos da impedância de defeito efectuados pelos relés de distância.....	254
16.5.3.2.1.	Para os defeitos entre fases	254
16.5.3.2.2.	Para os defeitos fase-terra	255
16.5.4.	Factores que influenciam a medida do relé de distância	255
16.5.4.1.	Introdução.....	255
16.5.4.2.	Estudo da influência do factor de terra	256
16.5.4.2.1.	Introdução.....	256

16.5.4.2.2.	Dedução matemática do factor de terra	256
16.5.4.3.	Estudo da influência da resistência de defeito	258
16.5.4.4.	Considerações gerais	258
16.5.4.5.	A fórmula de C. Van Warrington	261
16.5.5.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito bifásico sem resistência de defeito num circuito, em vazio, com alimentação unilateral	262
16.5.5.1.	Introdução	262
16.5.5.2.	Medida analógica	263
16.5.5.3.	Método digital	264
16.5.6.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito bifásico com resistência de defeito num circuito, em vazio, com alimentação unilateral	266
16.5.6.1.	Introdução	266
16.5.6.2.	Método analógico	266
16.5.6.3.	Método digital	267
16.5.7.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito bifásico com resistência de defeito num circuito, em vazio, com alimentação bilateral	269
16.5.8.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito bifásico com resistência de defeito num circuito, com carga, com alimentação bilateral	270
16.5.9.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito monofásico sem resistência de defeito num circuito, em vazio, com alimentação unilateral	272
16.5.9.1.	Medida analógica	273
16.5.9.1.1.	Caso em que o relé permite o factor de terra regulável só em amplitude	275
16.5.9.1.2.	Caso em que o relé permite o factor de terra regulável em amplitude e em fase	276
16.5.9.2.	Medida estática e digital	276
16.5.10.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito monofásico com resistência de defeito num circuito, em vazio, com alimentação unilateral	278
16.5.10.1.	Medida analógica	279
16.5.10.2.	Medida estática e digital	283
16.5.11.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito monofásico com resistência de defeito num circuito, com carga, com alimentação bilateral	286
16.5.12.	Medida de um relé de distância em presença de um defeito bifásico com resistência de arco num circuito, com carga, com alimentação bilateral	287
16.5.12.1.	Estudo da influência da indução mútua homopolar para as linhas duplas	288
16.5.12.2.	Estudo da influência da relação entre as impedâncias da linha e da fonte nas extremidades	293
16.5.12.2.1.	Introdução	293
16.5.12.2.2.	Caso em que as duas fontes de extremidades têm a mesma impedância de curto-circuito e em que as impedâncias de curto-circuito da linha e da fonte diferem	294

16.5.12.2.3.	Caso em que as duas fontes de extremidades têm impedâncias de curto-circuito diferentes e que a linha e a fonte têm, numa extremidade, a mesma impedância de curto-circuito.	295
16.5.12.3.	Estudo da influência das capacidades entre os condutores e entre esses e a terra, na medida do relé de distância	298
16.5.12.4.	Estudo da influência de uma corrente de alimentação intermédia no nó da rede.....	298
16.5.12.4.1.	Caso de uma alimentação com a corrente entrando no nó.....	298
16.5.12.4.2.	Caso de uma alimentação com a corrente saindo do nó	304
16.6.	Função detecção de defeito (arranque)	305
16.6.1.	Introdução	305
16.6.2.	Métodos de detecção de defeitos.....	306
16.6.2.1.	Arranque por máxima de intensidade.....	306
16.6.2.2.	Arranque por mínimo de impedância.....	307
16.6.2.2.1.	Caso de uma linha simples, com relés de distância a um sistema de medida.....	308
16.6.2.2.2.	Caso de uma linha dupla, com relés de distância a um sistema de medida e característica de arranque com a forma de um círculo	309
16.6.2.2.3.	Caso de uma linha simples, com relés de distância com vários sistemas de medida e característica de arranque com a forma de um polígono	311
16.6.3.	Função localização de defeitos	312
16.7.	Concepção do relé de protecção de distância do ponto de vista de funcionamento das zonas de medida.....	313
16.7.1.	Introdução.....	313
16.7.2.	Protecção com comutação de zonas	314
16.7.3.	Protecção sem comutação de zonas	315
16.8.	Regulações normais das protecções de distância	316
16.8.1.	Introdução.....	316
16.8.2.	Regulação de um relé de distância de uma linha aérea.....	317
16.8.2.1.	Situação teórica.....	317
16.8.2.2.	Situação real	318
16.8.3.	Regulações habituais das temporizações das zonas de distância.....	320
16.8.4.	Exemplo de cálculo dos valores de regulação de um relé de distância de uma linha aérea.....	321
16.9.	Performance da protecção de distância	321
16.9.1.	Introdução.....	321
16.9.2.	Precisão de medida	321
16.9.3.	Tempo de operação	321
16.9.4.	SIR.....	322
16.10.	Protecção de distância para transformadores de potência	323
16.10.1.	Generalidades	323
16.10.2.	Escalonamento em tempo das medidas de distância e determinação direcciona através de transformadores estrela/triângulo	325

16.11.	Tipos de relés de distância segundo o número de elementos (sistemas) de medida	326
16.11.1.	Relé a um elemento de medida	326
16.11.1.1.	Apresentação e constituição	326
16.11.1.2.	Alguns exemplos de determinação da distância ao defeito	328
16.11.1.2.1.	Caso de um defeito monofásico com terra	328
16.11.1.2.2.	Caso de um defeito bifásico sem terra	328
16.11.1.2.3.	Caso de um defeito trifásico sem terra	330
16.11.2.	Relé a 3 elementos de medida	330
16.11.3.	Relé a 6 elementos de medida	332
16.11.4.	Relé "full scheme"	333
16.12.	Problemas de determinação da direcção	334
16.12.1.	Introdução	334
16.12.2.	Auto-polarização	337
16.12.2.1.	Introdução	337
16.12.2.2.	Defeitos próximos com tensão nula	337
16.12.3.	Autopolarização em relés digitais	338
16.12.4.	Polarização cruzada	338
16.12.4.1.	Seleção da tensão de polarização cruzada	340
16.12.4.2.	Implementação de memória da tensão	342
16.12.5.	Determinação direccionada adaptativa	343
16.13.	Tipos de relés segundo as características no plano $R-X$	343
16.13.1.	Introdução	343
16.13.2.	Relé de impedância	343
16.13.3.	Relé mho auto-polarizado	345
16.13.4.	Relé mho deslocado	346
16.13.5.	Relé mho a polarização cruzada	347
16.13.6.	Relé de reactância	348
16.13.7.	Relé de tipo poligonal	350
16.14.	Bloqueio da protecção de distância no caso de uma anomalia do circuito de tensão de medida	351
17.	Sistemas de teleprotecção	353
17.1.	Generalidades	353
17.2.	Necessidade de uma cooperação estreita entre os engenheiros das protecções e os engenheiros das telecomunicações	354
17.3.	Elementos constitutivos dos sistemas de teleprotecção	354
17.4.	Tipos de sistemas de teleprotecção	355
17.4.1.	Introdução	355
17.4.2.	Sistemas de comparação analógica	355
17.4.3.	Sistemas de transferência de sinal de comando	355
17.4.3.1.	Introdução	355
17.4.3.2.	Sistemas de transferência de sinal de comando de aceleração de disparo	356
17.4.3.2.1.	Teledisparo condicionado com ultrapassagem de zona (POTT)	356

17.4.3.2.2.	Funções complementares do teledisparo condicionado com ultrapassagem de zona (POTT).....	357
17.4.3.2.2.1.	Introdução.....	357
17.4.3.2.2.2.	Função “eco do disjuntor”.....	358
17.4.3.2.2.3.	Função “fonte fraca”.....	359
17.4.3.2.2.4.	Função de bloqueio por inversão de corrente em linhas paralelas.....	359
17.4.3.2.3.	Teledisparo condicionado sem ultrapassagem de zona (PUTT).....	362
17.4.3.2.4.	Teledisparo condicionado com aceleração de zona (ZA).....	364
17.4.3.3.	Sistemas de transferência de sinal de comando de bloqueio ou de desbloqueio de disparo.....	365
17.4.3.3.1.	Sistema de bloqueio de disparo a comparação direccional.....	366
17.4.3.3.2.	Sistema de desbloqueio de disparo a comparação direccional.....	367
18.	Protecção das baterias de condensadores.....	369
18.1.	Objectivos das baterias de condensadores.....	369
18.1.1.	Introdução.....	369
18.1.2.	Vantagens técnicas da utilização das baterias de condensadores.....	371
18.1.3.	Análise do aumento do nível de tensão pelas baterias de condensadores.....	371
18.2.	Relés de protecção das baterias de condensadores e do seu painel de conexão aos barramentos.....	372
18.2.1.	Generalidades.....	372
18.2.2.	Protecções externas.....	372
18.2.2.1.	Protecção contra os curto-circuitos no painel de ligação da bateria.....	372
18.2.2.1.1.	Introdução.....	372
18.2.2.1.2.	Cálculo dos diferentes parâmetros necessários à determinação da protecção.....	373
18.2.2.1.3.	A escolha da protecção contra os curto-circuitos deve ser feita em função dos parâmetros anteriores.....	374
18.2.2.2.	Protecção contra as sobrecargas permanentes.....	376
18.2.2.3.	Protecção contra sobretensões.....	376
18.2.2.4.	Protecção contra falta de tensão.....	376
18.2.3.	Protecções internas.....	377
19.	Funções de protecção especiais das redes eléctricas.....	379
19.1.	Função de protecção contra a ligação de um disjuntor sobre defeito.....	379
19.1.1.	Introdução.....	379
19.1.2.	Ligação manual de um disjuntor sobre defeito.....	379
19.1.3.	Ligação automática de um disjuntor sobre defeito.....	380
19.2.	Função de protecção de disjuntor por mínima de pressão.....	380
19.3.	Protecção contra um condutor rompido, caído ao solo do lado AT de um transformador de distribuição passivo em antena.....	381
19.3.1.	Introdução.....	381
19.3.2.	Caso de neutro ligado à terra.....	382
19.3.3.	Caso de neutro AT do transformador isolado.....	383

19.4.	Função de bloqueio do disparo da protecção do painel de inter-barras aquando da transferência de um painel de um barramento para um outro	384
19.5.	Função de bloqueio da ligação do transformador de potência em caso de defeito interno	384
19.6.	Função de protecção contra o retorno de potência activa numa rede sã.....	385
19.7.	Função de protecção de abertura do anel direcciona para um defeito polifásico na linha	386
19.8.	Função de protecção de abertura de anel direcciona para um defeito monofásico na linha.....	387
19.9.	Função de tele-bloqueio de um relé de distância no caso de uma derivação de característica específica na linha que ele protege.....	388
19.10.	Função de disparo por discordância dos pólos de um disjuntor.....	390
19.11.	Função de protecção relativa a precauções na mudança de barramento de um painel.....	391
19.12.	Protecção com a limitação da corrente de terra por inserção de uma bobina de auto-indução	391
19.13.	Função de religação automática associada às protecções nas redes a média, a alta e a muito alta tensão	392
19.13.1.	Generalidades	392
19.13.2.	Definições.....	394
19.13.3.	Programas de religações automáticas	396
19.13.3.1.	Religações monofásicas.....	396
19.13.3.2.	Religações trifásicas.....	397
19.13.4.	Condições para a religação automática	398
19.13.5.	Bloqueio da ligação manual ou da religação automática	398
19.13.6.	Tipos de religação automática trifásica nas redes a 150 e a 380 kV	399
19.13.6.1.	Introdução.....	399
19.13.6.2.	Caso de religação automática trifásica rápida de uma linha de tensão igual a 150 kV	399
19.13.6.3.	Caso de religação automática trifásica lenta de linhas de tensão iguais ou superiores a 150 kV	400
Bibliografia.....		403
Apêndices.....		407
Apêndice 1.....		407
Apêndice 2.....		411
Apêndice 3.....		415
Apêndice 4.....		417
Apêndice 5.....		419
Apêndice 6.....		427
Apêndice 7.....		431
Apêndice 8.....		499