ENGENHARIA DE ALTA TENSÃO

TEORIA, SISTEMAS E PRÁTICA

FILIPE AZEVEDO

engebook

AUTOR
FILIPE AZEVEDO

TIÍTULO
ENGENHARIA DE ALTA TENSÃO: TEORIA, SISTEMAS E PRÁTICA

EDITORA
Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
Tel. 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

CHANCELA
Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO
Booki – Conteúdos Especializados
Tel. 220 104 872 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

DESIGN DE CAPA
Luciano Carvalho
Delineatura, Design de Comunicação · www.delineatura.pt

APOIO
RME – Comercialização de Equipamentos e Instalações Elétricas, Lda · www.rme.pt

IMPRESSÃO
Agosto, 2026

DEPÓSITO LEGAL
568279/26

A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2026 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU
621.3 Engenharia Elétrica
621.31 Geração, transmissão, distribuição e controlo de energia elétrica.
Máquinas e equipamentos elétricos. Medições elétricas. Magnetismo aplicado e eletrostática.

ISBN
Papel: 978-989-9305-38-0
E-book: 978-989-9305-39-7

Catalogação da publicação
Família: Engenharia Elétrica
Subfamília: Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica

Índice

Aviso Legal **v**

Agradecimentos **vii**

Prefácio **ix**

Nota do Autor **xiii**

I Fundamentos da Alta Tensão **43**

1 Introdução aos Sistemas de Alta Tensão **45**

1.1 Contexto Histórico: A Guerra das Correntes 46

1.1.1 A Limitação da CC (A Era de Pearl Street) 46

1.1.2 A Vitória da CA (O Princípio do Transformador) 47

1.2 A Economia da Escolha da Tensão (Lei de Kelvin) 48

1.2.1 As Duas Funções de Custo Opostas 49

1.2.2 Determinação do Ótimo 49

1.3 Normalização dos Níveis de Tensão (IEC 60038) 51
1.4 A Estrutura da Rede Portuguesa (RNT e RND) 51
1.4.1 A Espinha Dorsal a 400 kV (RNT) 53
1.4.2 O Sub-Transporte a 220 kV e 150 kV 53
1.4.3 A Distribuição a 60 kV (RND) 54
1.5 Condições Atmosféricas Normalizadas 54
1.5.1 A Física: Livre Percurso Médio e Lei de Paschen 54
1.5.2 Condições Normalizadas (IEC 60060-1) 55
1.5.3 Correção para a Altitude (O Fator δ) 55
1.6 Resumo 57

2 Campos Elétricos e Dielétricos **59**
2.1 O Campo Elétrico e o Potencial 59
2.1.1 Equações Fundamentais: Poisson e Laplace 60
2.2 Uniformidade do Campo e Fator de Utilização 61
2.3 Métodos Analíticos: O Método das Imagens 62
2.4 Métodos Numéricos: Método das Diferenças Finitas (MDF) . . 63
2.5 Métodos Numéricos Avançados 64
2.5.1 O Método de Simulação de Cargas (MSC) 64
2.5.2 O Método dos Elementos Finitos (MEF) 65
2.6 Refração do Campo nas Fronteiras Dielétricas 66
2.7 Física da Polarização e tan δ 67
2.7.1 Perdas Dielétricas 67

2.7.2 Permitividade Complexa e Mecanismos 68
2.8 Mecanismos de Disrupção 68
2.8.1 Mecanismo de Townsend 68
2.8.2 Mecanismo de Streamer (Raether–Meek) 69
2.8.3 Lei de Paschen 70
2.9 Problemas Práticos 71
2.10 Resumo 73

II Produção e Medição **75**

3 Produção de Altas Tensões e Correntes **77**
3.1 Produção de Alta Tensão CA 78
3.1.1 Ligação de Transformadores em Cascata 78
3.2 Circuitos Ressonantes Série 79
3.2.1 Princípio Físico 79
3.2.2 Amplificação de Tensão (O Fator Q) 80
3.3 Produção de Alta Tensão CC 82
3.3.1 O Multiplicador de Tensão de Cockcroft–Walton 83
3.3.2 Queda de Tensão e Ondulação 83
3.4 Produção de Tensões de Impulso (O Gerador de Marx) 84
3.4.1 Princípio de Funcionamento 84
3.4.2 Análise Transitória: A Abordagem de Laplace 85
3.4.3 Rendimento em Tensão 87

3.5 Resumo 90

4 Técnicas de Medição em Alta Tensão **93**

4.1 Espinterómetros de Esferas: A Física da Calibração 94

4.1.1 Base Teórica: O Critério do Streamer 94

4.1.2 Fator de Correção Atmosférica (K_d) 95

4.1.3 Determinação Estatística: O Método Up-and-Down . . 95

4.2 Divisores de Tensão: Teoria dos Transitórios 96

4.2.1 Divisores Resistivos 96

4.2.2 Divisores Capacitivos Amortecidos (O Divisor R-C) . . 97

4.2.3 O Divisor Misto (Tipo Zaengl) 98

4.3 Medição de Corrente: Bobinas de Rogowski e OCT 99

4.3.1 A Bobina de Rogowski 99

4.3.2 Transformadores de Corrente Óticos (OCT) 99

4.4 Processamento Digital de Sinal nas Medições de AT 101

4.4.1 Frequência de Amostragem (Critério de Nyquist) . . . 101

4.4.2 Resolução Vertical e ENOB 101

4.5 Problemas Resolvidos 102

4.6 Resumo 105

III Transporte de Energia **107**

5 Isoladores de Alta Tensão e Isolamento Exterior **109**

5.1 Tecnologias e Materiais dos Isoladores 109

5.1.1 Vidro Temperado (Campânula e Espigão) 110
5.1.2 Porcelana (Cerâmica) 110
5.1.3 Isoladores Compósitos (Poliméricos) 111
5.2 A Física da Hidrofobia 112
5.2.1 Transferência de Hidrofobia (O Efeito LMW) 113
5.3 O Mecanismo de Contornamento por Poluição 113
5.3.1 O Processo Físico (Passo a Passo) 113
5.3.2 Modelo Matemático: A Teoria de Obenaus 114
5.4 Projeto: Seleção da Linha de Fuga (IEC 60815) 115
5.4.1 Classes de Poluição (SPS) 115
5.4.2 Equação de Dimensionamento 115
5.5 Distribuição de Tensão e Rendimento da Cadeia 116
5.5.1 O Modelo Capacitivo 116
5.5.2 Dedução Matemática 117
5.5.3 Rendimento da Cadeia (η) 117
5.5.4 Métodos para Melhorar o Rendimento 118
5.6 Normas de Ensaio de Isoladores (IEC 60383) 118
5.6.1 Ensaios de Tipo 118
5.6.2 Ensaios de Amostragem 119
5.6.3 Ensaios de Rotina 119
5.7 Problemas Resolvidos 120
5.8 Resumo 123

6 Linhas Aéreas de Transporte: Física e Mecânica **125**

6.1 A Física dos Condutores 126

6.1.1 Condutores ACSR 126

6.1.2 Efeito Pelicular e Resistência 127

6.2 Parâmetros da Linha: Dedução Matricial 127

6.2.1 Fluxo Ligado e Indutância 127

6.2.2 Condutores em Feixe 128

6.3 Fenómeno de Coroa 129

6.3.1 Tensão Crítica Disruptiva (Lei de Peek) 129

6.3.2 Perdas por Efeito de Coroa 130

6.4 Projeto Mecânico: A Catenária 130

6.4.1 A Aproximação Parabólica 130

6.5 Equação de Mudança de Estado 131

6.6 Dinâmica dos Condutores: Vibrações Eólicas 132

6.6.1 Vibração Eólica (Alta Frequência) 132

6.6.2 Galope (Baixa Frequência) 133

6.7 Problemas Resolvidos 133

6.8 Resumo 135

7 Cabos de Alta Tensão: Projeto e Aplicação **137**

7.1 Constituição e Materiais dos Cabos 137

7.1.1 1. O Condutor 138

7.1.2 2. Camadas Semicondutoras 139
7.1.3 3. Isolamento (XLPE) 139
7.1.4 4. Bainha Metálica 139
7.2 Projeto Eletrostático 140
7.2.1 Distribuição do Campo Elétrico (CA) 140
7.2.2 O Fenómeno da «Inversão de Campo» (HVDC) 141
7.3 Parâmetros Elétricos 142
7.3.1 Capacidade e Corrente de Carga 142
7.3.2 Indutância 142
7.4 Capacidade de Transporte Térmica (IEC 60287) 143
7.4.1 A Equação de Neher–McGrath 143
7.4.2 Resistências Térmicas 143
7.5 Acessórios de Cabos: Os Pontos Fracos 144
7.5.1 Terminais e Cones Defletores 144
7.6 Sistemas de Ligação das Bainhas 144
7.6.1 Cross-Bonding (Transposição de Bainhas) 145
7.7 Problemas Resolvidos 145

IV Subestações e Equipamentos 149

8 Transformadores de Potência: Projeto e Física 151
8.1 Projeto Eletromagnético 152
8.1.1 Física do Núcleo: Histerese e Correntes de Foucault . . 152

8.1.2 Limites de Indução e Saturação 153
8.2 Fenómenos Transitórios: Corrente de Ligação (Inrush) 154
8.3 Forças de Curto-Circuito: O Desafio Mecânico 155
8.3.1 Forças Radiais (Tensão Circunferencial) 155
8.3.2 Forças Axiais (Telescopagem) 155
8.4 O Autotransformador nas Redes de Transporte 155
8.4.1 Princípio de Funcionamento 156
8.4.2 A Vantagem em Potência (Potência Própria vs. Potência de Trânsito) 156
8.5 Configurações de Enrolamentos e Grupos Horários 157
8.5.1 Porquê o Terciário em Triângulo? 157
8.6 Reguladores em Carga (OLTC) 157
8.7 Projeto Dielétrico (Sistema Óleo-Papel) 158
8.7.1 Mecanismo de Distribuição do Campo 158
8.8 Envelhecimento Térmico e Esperança de Vida 159
8.8.1 Lei de Arrhenius e Regra de Montsinger 159
8.9 Problemas Resolvidos 160
8.10 Resumo 161

9 Tecnologia da Aparelhagem de Corte e Física do Arco 163
9.1 Física do Arco Elétrico 164
9.1.1 Ionização Térmica 164
9.1.2 Modelos de Arco para Simulação 165

9.2 O Processo de Interrupção: Interação com a Rede 166
9.2.1 1. Restabelecimento Dielétrico (U_d) 166
9.2.2 2. Tensão Transitória de Restabelecimento (TTR) 166
9.3 Classes de TTR Normalizadas (IEC 62271-100) 167
9.3.1 Defeito aos Terminais (T10, T30, T60, T100) 167
9.3.2 O Defeito Quilométrico (SLF) 168
9.4 Tecnologias de Interrupção: Porquê o SF_6? 168
9.4.1 Propriedades-Chave 168
9.4.2 Mecanismos de Extinção do Arco 169
9.5 Mecanismos de Manobra 169
9.5.1 Comando por Molas 169
9.5.2 Comando Hidráulico 170
9.6 O Futuro: Disjuntores HVDC 171
9.6.1 O Disjuntor CC Híbrido 171
9.7 Problemas Resolvidos 172
9.8 Resumo 173

10 Sistemas de Ligação à Terra em Subestações de Alta Tensão 175

10.1 Efeitos Fisiológicos da Corrente 176
10.1.1 Limiares de Corrente (IEC 60479-1) 176
10.1.2 Critérios Energéticos de Dalziel 176
10.2 A Física da Subida de Potencial (GPR) 177
10.2.1 Cenários de Choque 177

10.3 Física e Modelização do Solo 178
10.3.1 Medição: O Método de Wenner de 4 Elétrodos 178
10.3.2 Modelo de Solo de Duas Camadas 179
10.4 Projeto da Malha de Terra (IEEE 80) 179
10.4.1 Passo 1: Limites Toleráveis 180
10.4.2 Passo 2: Resistência da Malha (R_g) 180
10.4.3 Passo 3: Tensão de Malha Máxima (E_m) 181
10.5 Materiais e Corrosão 181
10.6 Problemas Resolvidos 182
10.7 Resumo 183

V Proteção e Automação 185

11 Proteção de Sistemas de Alta Tensão e Subestações Digitais 187

11.1 Base Matemática: Componentes Simétricas 188
11.1.1 A Matriz de Transformação 188
11.1.2 Redes de Sequência para Análise de Defeitos 189
11.2 Transformadores de Medida: Os Olhos do Sistema 190
11.2.1 Transformadores de Corrente (TI) e Saturação 190
11.2.2 Transformadores de Tensão Capacitivos (TTC) 190
11.3 Proteção de Distância (Relé 21) 191
11.3.1 Princípio de Funcionamento 191
11.3.2 Algoritmo Digital (DFT) 191

11.3.3 A Característica Quadrilateral 192
11.4 Proteção Diferencial (Relé 87) 192
11.4.1 A Característica de Restrição Percentual 193
11.5 A Subestação Digital: IEC 61850 193
11.5.1 Arquitetura e Modelo de Dados 193
11.5.2 Tráfego em Tempo Real: GOOSE e SV 194
11.6 Problemas Resolvidos 194
11.7 Resumo 196

VI Coordenação de Isolamento e Transitórios 199

12 Sobretensões e Métodos de Proteção 201
12.1 Introdução 201
12.2 Física das Ondas Viajantes 202
12.2.1 Dedução das Equações do Telegrafista 202
12.2.2 Solução de d'Alembert e Impedância de Onda 204
12.3 Reflexão e Refração de Ondas 205
12.3.1 Diagramas de Rede de Bewley 206
12.4 Fenómeno da Descarga Atmosférica e Modelização 208
12.4.1 Modelo Matemático: A Função de Heidler 209
12.4.2 O Modelo Eletrogeométrico (MEG) 209
12.5 Transitórios de Manobra 211
12.5.1 Tensão Transitória de Restabelecimento (TTR) 211

12.5.2 Corte de Corrente (*Current Chopping*) 212
12.5.3 O Efeito de Ferranti 212
12.6 Coordenação de Isolamento 213
12.6.1 Níveis de Isolamento Normalizados (Contexto REN) . 213
12.6.2 Descarregadores de Sobretensões (MOV) 214

13 Descarregadores de Sobretensões: Teoria, Tecnologia e Dimensionamento 217

13.1 Evolução Histórica e Tecnologia 218
13.1.1 A Era dos Espinterómetros (Descarregadores com Explosores) 218
13.1.2 Carboneto de Silício (SiC) com Explosores em Série . . 218
13.1.3 Varístores de Óxido Metálico (MOV/ZnO) 219
13.2 Física do Varístor de Óxido Metálico 219
13.2.1 Microestrutura 219
13.2.2 Teoria de Bandas e Mecanismo de Condução 220
13.3 Características Elétricas e Modelização 221
13.3.1 A Característica V-I 221
13.3.2 Modelo de Circuito Equivalente 221
13.4 Procedimento de Dimensionamento e Seleção 222
13.4.1 Passo 1: Tensão de Serviço Contínuo (U_c) 222
13.4.2 Passo 2: Capacidade para Sobretensões Temporárias (TOV) 223
13.4.3 Passo 3: Classe de Energia e Descarga de Linha 223
13.4.4 Passo 4: Margens de Coordenação de Isolamento . . . 224

13.5 O Efeito da Distância de Separação 224
13.6 Mecânica da Instalação: Comprimento das Ligações 226

14 Coordenação de Isolamento: Métodos Estatísticos 229
14.1 Princípios da Coordenação Probabilística 230
14.1.1 O Modelo de Interferência Solicitação-Suportabilidade 230
14.2 Definições Estatísticas das Variáveis 230
14.2.1 A Distribuição da Solicitação (Sobretensão) 230
14.2.2 A Distribuição da Suportabilidade (Isolamento) 231
14.3 Cálculo do Risco de Falha 232
14.3.1 O Método Simplificado da IEC 232
14.4 Da Tensão à Geometria: O Fator de Intervalo 233
14.5 Correções Atmosféricas (IEC 60060-1) 233
14.5.1 Densidade Relativa do Ar (δ) 234
14.5.2 Expoente m 234
14.6 Resumo 236

VII Futuro e Manutenção 239

15 Transporte em HVDC: Tecnologia e Física 241
15.1 A Física e a Economia do Transporte em CC 242
15.1.1 O Limite da Corrente Capacitiva (CA) 242
15.1.2 Distância Económica de Equilíbrio 242
15.2 Conversores Comutados pela Linha (LCC) 243

15.2.1 Análise da Ponte de Graetz 243
15.2.2 Sobreposição de Comutação e Harmónicos 244
15.3 Conversores de Fonte de Tensão (VSC) 245
15.3.1 Controlo Vetorial (Desacoplamento $P - Q$) 245
15.3.2 Conversor Modular Multinível (MMC) 246
15.4 Física do Isolamento: O Desafio dos Cabos CC 246
15.4.1 Condutividade e Inversão da Solicitação 246
15.5 Configurações HVDC 248
15.6 Resumo 250

16 Ensaios, Diagnóstico e Gestão de Ativos **251**

16.1 Técnicas de Ensaio em Alta Tensão (IEC 60060-1) 251
16.1.1 Tensão de Impulso Atmosférico (LI) 251
16.1.2 Tensão de Impulso de Manobra (SI) 252
16.2 Medição das Perdas Dielétricas ($\tan\delta$) 253
16.2.1 O Princípio da Ponte de Schering 253
16.3 Diagnóstico de Descargas Parciais (DP) 254
16.3.1 O Modelo Capacitivo «abc» 254
16.3.2 Análise de DP Resolvidas em Fase (PRPD) 254
16.4 Análise de Gases Dissolvidos (DGA) 255
16.4.1 O Triângulo de Duval 255
16.5 Análise da Resposta em Frequência (SFRA) 255

16.6 Resumo 257

17 Gestão de Ativos e Engenharia de Fiabilidade 259

17.1 Matemática da Fiabilidade 259

17.1.1 Funções Fundamentais 260

17.1.2 A Curva da Banheira 260

17.1.3 A Distribuição de Weibull 261

17.2 Física do Envelhecimento: Cinética Química 261

17.2.1 A Equação de Arrhenius 261

17.2.2 Fator de Aceleração do Envelhecimento (F_{AA}) 262

17.3 Modelização Estocástica: Cadeias de Markov 262

17.4 O Algoritmo do Índice de Saúde (HI) 263

17.4.1 Método da Soma Ponderada 263

17.5 Matriz de Risco e Tomada de Decisão 264

17.6 Problemas Resolvidos 265

17.7 Resumo 267

18 Segurança em Alta Tensão e Trabalhos em Tensão 269

18.1 Efeitos Fisiológicos da Eletricidade 269

18.1.1 Modelo de Impedância do Corpo (Z_B) 270

18.1.2 Limiares de Fibrilhação Ventricular 270

18.2 Indução Eletrostática nos Trabalhadores 271

18.2.1 Modelo de Acoplamento Capacitivo 271

18.3 Riscos de Arco Elétrico 272

18.3.1 Termodinâmica do Arco 273
18.3.2 Categorias de Proteção (EPI) 273
18.4 Técnicas de Trabalhos em Tensão (TET) 273
18.4.1 1. Método à Distância (Varas Isolantes) 274
18.4.2 2. Método ao Potencial (Mão Nua) 274
18.5 Cálculo da Distância Mínima de Aproximação 275
18.6 Resumo 276

VIII Projeto Integrado de Engenharia 279

19 Estudo de Caso: Projeto da Subestação «Alpha» de 400/220 kV 283
19.1 Critérios de Projeto e Restrições Ambientais 284
19.2 Topologia e Análise de Fiabilidade 285
19.2.1 Justificação de Fiabilidade 285
19.3 Dimensionamento Rigoroso dos Barramentos (IEC 60865-1) . 286
19.3.1 Balanço Térmico (Regime Contínuo) 286
19.3.2 Forças Eletrodinâmicas de Curto-Circuito 287
19.3.3 Verificação da Ressonância Mecânica 288
19.4 Coordenação de Isolamento e Distâncias 288
19.5 Projeto da Malha de Terra (IEEE 80) 289
19.5.1 Modelo do Solo 289
19.5.2 Cálculo de Projeto 289

19.6 Coordenação das Proteções 290
19.6.1 Zonas da Proteção de Distância (Plano R-X) 290
19.7 Síntese dos Resultados de Projeto 291

A Fundamentos Matemáticos da Alta Tensão 293

A.1 Análise Vetorial e Teoria do Campo Eletromagnético 293
A.1.1 Equações de Maxwell 294
A.1.2 Relações Constitutivas 294
A.1.3 Potencial Elétrico e Gradiente 295
A.2 Sistemas de Coordenadas e Operadores Diferenciais 295
A.2.1 Coordenadas Cartesianas (x, y, z) 296
A.2.2 Coordenadas Cilíndricas (ρ, ϕ, z) 296
A.2.3 Coordenadas Esféricas (r, θ, ϕ) 297
A.3 Funções Hiperbólicas na Teoria das Linhas de Transmissão . . 297
A.3.1 Definições e Identidades 297
A.3.2 Equações da Linha de Transmissão Longa 298
A.3.3 Parâmetros ABCD para Linhas Longas 298
A.4 Transformadas de Laplace para Análise de Transitórios 299
A.4.1 Definição 299
A.4.2 Teoremas Fundamentais 299
A.4.3 Pares de Transformadas Comuns na Engenharia de AT 300
A.5 Distribuições Estatísticas na Coordenação de Isolamento . . . 300
A.5.1 Distribuição Normal (Gaussiana) 301

A.5.2 Distribuição de Weibull 301
A.5.3 Cálculo do Risco na Coordenação de Isolamento 302
A.6 Aproximações Numéricas para a Análise de Campos 302
A.6.1 Método das Diferenças Finitas (MDF) 302
A.6.2 Base do Método dos Elementos Finitos (MEF) 303

B Dados Técnicos de Cabos e Materiais 305
B.1 Condições de Instalação de Referência 305
B.2 Cabos XLPE de 60 kV (Al) 306
B.3 Cabos XLPE de 150 kV (Al) 307
B.4 Cabos XLPE de 220 kV (Al) 308
B.5 Cabos XLPE de 400 kV (Cu) 309
B.6 Propriedades dos Materiais 310

C Algoritmos Computacionais e Código de Simulação 311
C.1 Método das Diferenças Finitas (MDF) 311
C.2 Análise do Circuito do Gerador de Marx 313
C.3 Análise Estatística de Weibull 314

D Normas REN e IEC 317
D.1 Distâncias de Segurança (REN) 317

E Lista de Símbolos e Nomenclatura 319

Glossário de Termos e Abreviaturas 323

perto da interseção das duas curvas.

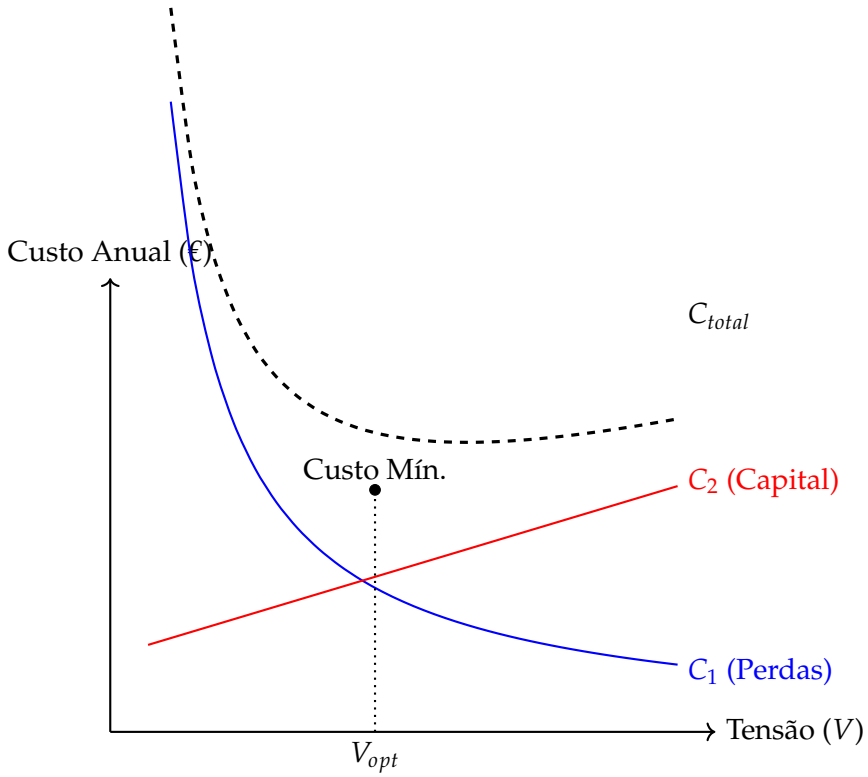

Figura 1.1: Lei de Kelvin: a tensão económica resulta de um compromisso entre o custo das perdas (decrescente com V) e o custo do isolamento/estruturas (crescente com V).

Nas redes modernas, esta otimização é discreta e não contínua, uma vez que temos de escolher entre níveis normalizados (p. ex., 220 kV ou 400 kV). Para o transporte de grandes blocos de potência ($> 1000\,\text{MV} \cdot \text{A}$), 400 kV é tipicamente a escolha económica na Europa.

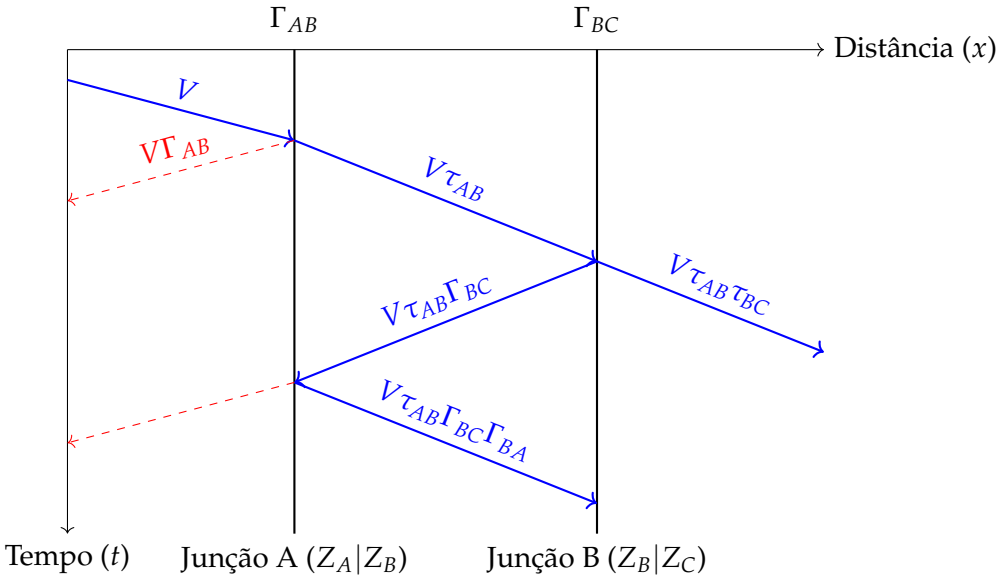

Figura 12.2: Diagrama de Rede de Bewley representando reflexões múltiplas num troço de linha delimitado pelas junções A e B.

Calcule a tensão máxima na extremidade da linha para ambos os casos.
Resolução: *Caso 1: Circuito Aberto* Idealmente, $Z_2 = \infty$.

$$\Gamma = \frac{\infty - 400}{\infty + 400} = 1$$

$$V_{total} = V_{inc} + \Gamma V_{inc} = 1000 + 1000 = 2000\,\text{kV}$$

Isto confirma que a tensão **duplica** numa extremidade aberta, que é o cenário mais perigoso para o isolamento da subestação.
Caso 2: Terminação Capacitiva O condensador comporta-se como uma impedância dinâmica $Z_C = 1/(sC)$ no domínio de Laplace. A tensão

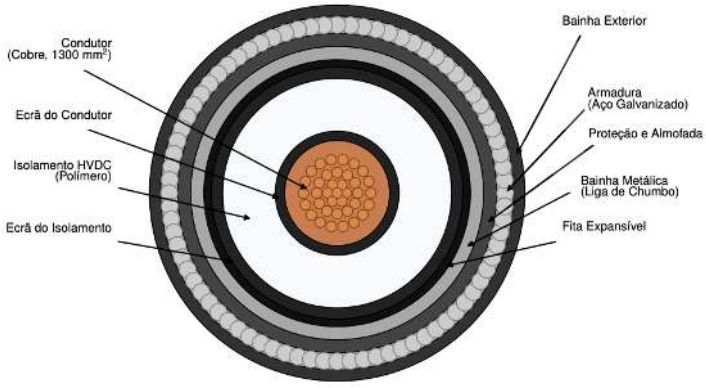

Figura 15.4: Vista em corte de um cabo HVDC unipolar (1300 mm^2), ilustrando a sequência de camadas internas de proteção e isolamento, incluindo o isolamento polimérico e a bainha de liga de chumbo. Fonte: trabalho original do autor.

Onde $\alpha \approx 0{,}1\ K^{-1}$. Isto implica que uma subida de $10\,^{\circ}C$ duplica a condutividade.

O Fenómeno: em plena carga, o condutor está quente (90 °C) e a bainha exterior está fria (20 °C). O isolamento interior torna-se mais condutor, empurrando a queda de tensão para as camadas exteriores, mais frias. O perfil do campo elétrico **inverte-se**: a solicitação máxima passa da superfície do condutor (situação normal) para a bainha exterior. Se a carga cair subitamente, o cabo arrefece e o campo comporta-se dinamicamente. Esta «Inversão da Solicitação» exige materiais especiais «DC-XLPE» com nanocargas.

19.1 Critérios de Projeto e Restrições Ambientais

A subestação liga a espinha dorsal de 400 kV ao anel de sub-transporte de 220 kV. A vida útil de projeto é de 40 anos.

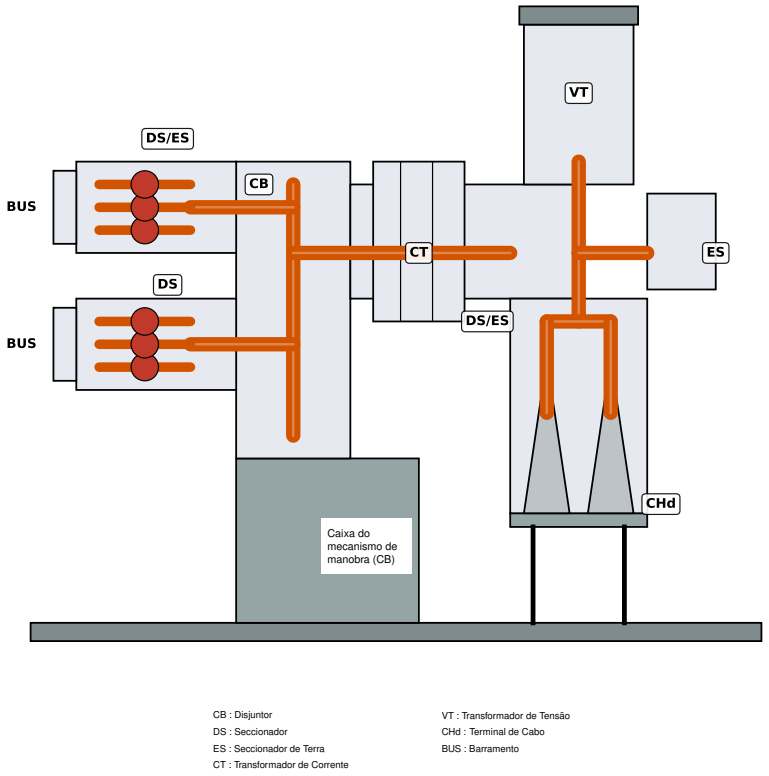

Figura 19.1: Corte esquemático de um painel típico de uma Subestação Isolada a Gás (GIS), mostrando a disposição interna do disjuntor (CB), dos seccionadores (DS), dos seccionadores de terra (ES), dos transformadores de medida (CT/VT) e dos terminais de cabo (CHd). Fonte: trabalho original do autor.

Lei de Kelvin (Economia da Tensão), 6
Lei de Paschen, 12, 28, 263
Ligação em Cascata, 36
Linha de Fuga
IEC 60815, 69
USCD, 70

M

Malha de Terra
IEEE 80, 131, 228
Método de Wenner, 130
Modelização do Solo, 130
Mecanismos de Disrupção
Streamer (Raether–Meek), 28
Townsend, 26
Mecanismos de Polarização, 26
Método das Diferenças Finitas (MDF), 21, 242
Método dos Elementos Finitos (MEF), 23, 242
Modelo Eletrogeométrico (MEG), 159
Monitorização de Condição, 195
Multiplicador de Tensão de Cockcroft–Walton, 40

O

Ondas Viajantes
Reflexão, 155
Refração, 155

P

Perdas Dielétricas (tan δ), 25, 197
Perdas por Histerese, 104
Permitividade (Complexa), 26
Proteção de Distância (Relé 21)
Característica Quadrilateral, 143, 144
Zonas, 230
Proteção Diferencial (Relé 87), 144

R

Regulador em Carga (OLTC), 109
REN (Redes Energéticas Nacionais), 9, 163

S

Sobretensões Temporárias (TOV), 164, 170
Subestação Digital
GOOSE, 145
IEC 61850, 145
Sampled Values (SV), 145
Subestação Isolada a Gás (GIS), 125, 224, 262
Subida do Potencial de Terra (GPR), 129

T

Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento (TCTR/RRRV), 119, 161
Tensão de Impulso
Forma de Onda (1,2/50 μs), 48
Gerador de Marx, 42

ENGENHARIA DE ALTA TENSÃO
TEORIA, SISTEMAS E PRÁTICA

FILIPE AZEVEDO

Sobre a obra

Engenharia de Alta Tensão: Teoria, Sistemas e Prática é um guia abrangente dos princípios e das tecnologias que tornam possível o transporte moderno de energia elétrica. Reúne os fundamentos físicos dos fenómenos de alta tensão e os métodos de engenharia utilizados para projetar, ensaiar, proteger e manter sistemas elétricos reais, num tratamento rigoroso de um domínio em que os campos eletromagnéticos, os materiais dielétricos, as solicitações ambientais, as forças mecânicas e a segurança operacional têm de ser compreendidos em conjunto.

O livro começa pelos fundamentos dos campos elétricos, dos dielétricos, dos mecanismos de disrupção e dos efeitos atmosféricos, desenvolvendo depois as tecnologias nucleares da engenharia de alta tensão: linhas aéreas, isoladores, cabos, transformadores, aparelhagem de manobra e corte, ligação à terra, proteção, sobretensões, descarregadores e coordenação de isolamento. Ao longo de toda a obra, a ênfase é colocada na interpretação física clara, no rigor analítico e na relevância prática de engenharia.

Um traço distintivo da obra é a sua forte ligação à prática real de transporte e de subestações: a exposição está ancorada na estrutura do sistema elétrico português e alinhada com as normas IEC e IEEE, e os exemplos trabalhados, os problemas resolvidos e as discussões orientadas para o projeto conduzem o leitor dos conceitos às decisões de engenharia.

Os capítulos finais abordam os ensaios, o diagnóstico, a fiabilidade, a gestão de ativos, a segurança e um estudo de caso integrado de projeto de uma subestação, completando uma visão ampla da disciplina, dos primeiros princípios à aplicação no terreno. Escrito para estudantes finalistas, investigadores e engenheiros no ativo, este livro pretende ser, ao mesmo tempo, um texto de ensino e uma referência profissional duradoura.

Sobre o autor

Filipe Azevedo é Professor no ISEP (Politécnico do Porto) e Investigador Sénior no INESC TEC — Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência. É licenciado e mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Universidade do Porto, e doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, com distinção e louvor. Iniciou a carreira profissional na EFACEC Energia, antes de transitar para o ensino superior e a investigação. Desde 2000, leciona no ISEP nas áreas dos sistemas elétricos de energia, da economia dos sistemas de energia e da inteligência artificial, sendo responsável por unidades curriculares de proteções de alta tensão, sistemas de energia e distribuição de energia elétrica. A sua investigação centra-se na inteligência artificial, nas redes inteligentes, na integração de energias renováveis, nos mercados de eletricidade e nos métodos de apoio à decisão para o planeamento e a exploração. Com mais de duas décadas de experiência académica e científica, alia o rigor científico à visão prática de engenharia em aplicações de sistemas de energia onde a segurança, a fiabilidade e o desempenho operacional são críticos.

Apoio

Também disponível em formato *e-book*

ISBN: 978-989-9305-38-0

www.**quanticaeditora**.pt

engebook