

ENGENHARIA DE ALTA TENSÃO

TEORIA, SISTEMAS E PRÁTICA

FILIPPE AZEVEDO

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

Catálogo 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 $\tan \delta$	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	Ensaio de Tipo	118
5.6.2	Ensaio de Amostragem	119
5.6.3	Ensaio 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	Fenômeno 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 Eléttodos	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 Sobreensões 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 (<i>Current Chopping</i>)	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 Espinterômetros (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 Varistor 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	Ensaaios, 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.

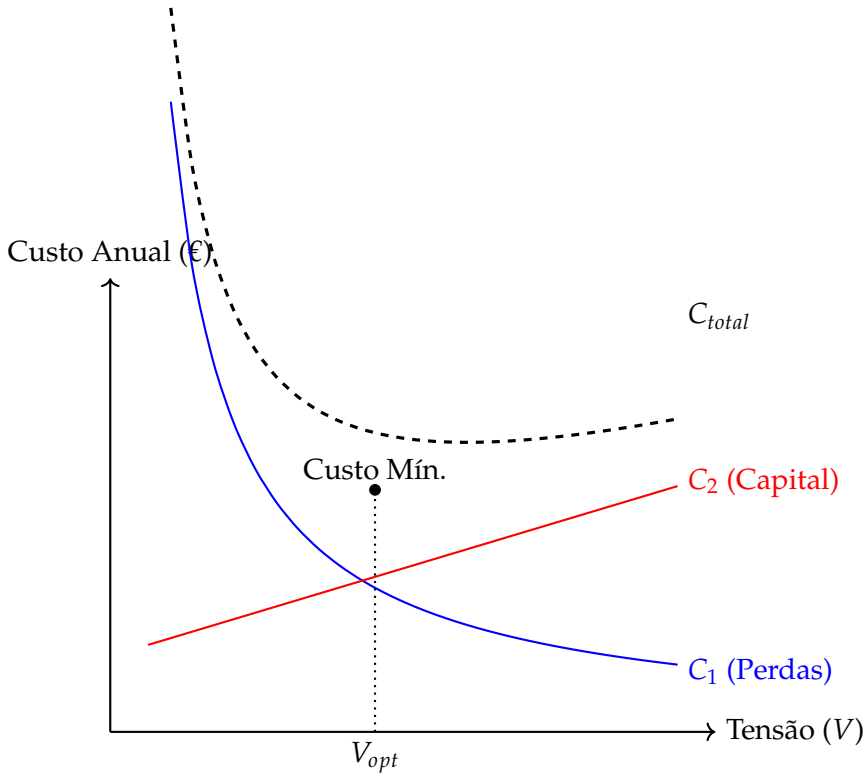


Figura 1.1: Lei de Kelvin: a tensão económica resulta de um compromisso entre o custo das perdas (decrecente com V) e o custo do isolamento/estruturas (crescente com V).

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.

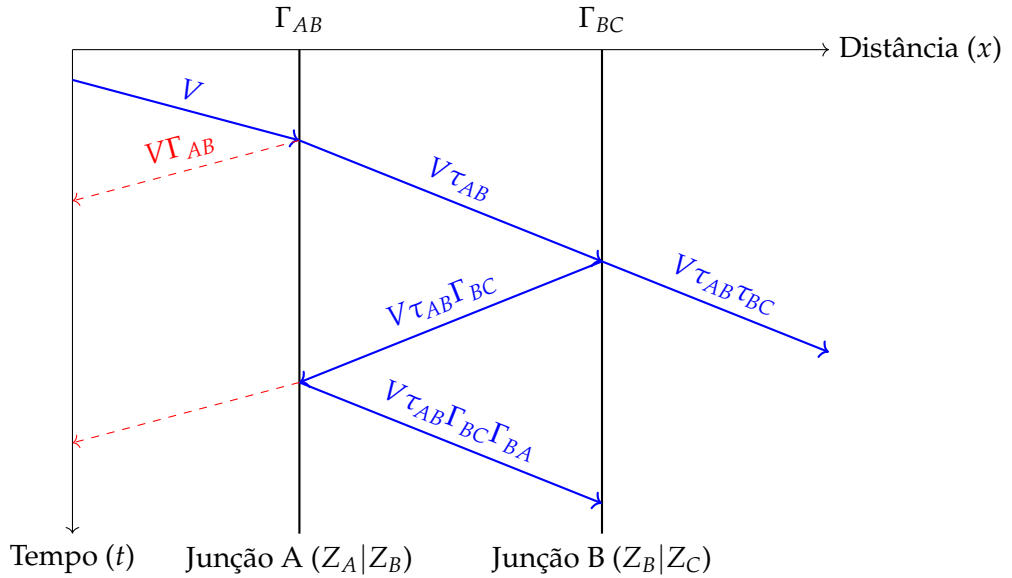


Figura 12.2: Diagrama de Rede de Bewley representando reflexões múltiplas num troço de linha delimitado pelas junções A e B.

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

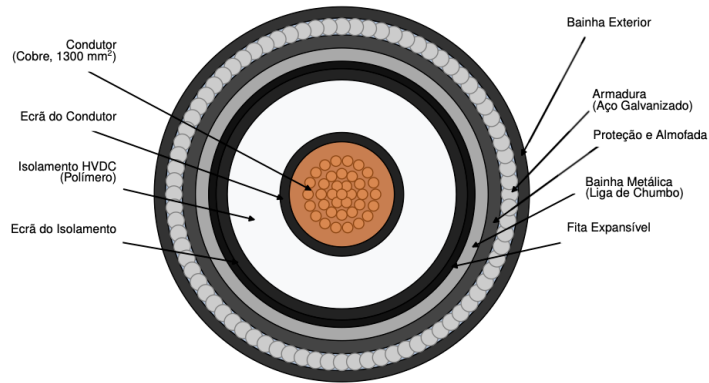


Figura 15.4: Vista em corte de um cabo HVDC unipolar (1300 mm²), ilustrando a sequência de camadas internas de proteção e isolamento, incluindo o isolamento polimérico e a bainha de liga de chumbo. Fonte: trabalho original do autor.

Onde $\alpha \approx 0,1 \text{ K}^{-1}$. Isto implica que uma subida de 10°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.

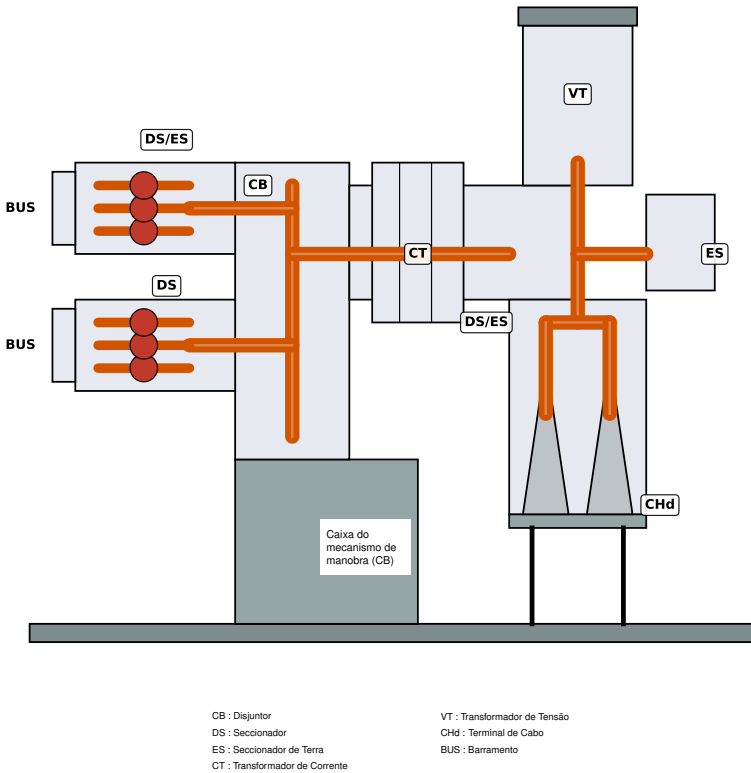


Figura 19.1: Corte esquemático de um painel típico de uma Subestação Isolada a Gás (GIS), mostrando a disposição interna do disjuntor (CB), dos seccionadores (DS), dos seccionadores de terra (ES), dos transformadores de medida (CT/VT) e dos terminais de cabo (CHd). Fonte: trabalho original do autor.

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 ($\tan \delta$), 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 μ s), 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 fenômenos 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



engebeck