Sistemas de Proteção Contra Descargas Operacionais e Atmosféricas


LONDON
7
Editora


9 798522 316488

NÉLIO FLEURY & LEONARDO GUEDES

Sistemas de Proteção Contra Descargas Operacionais e Atmosféricas

Goiânia
LONDON SEVEN Editora
2021

Copyright © 2021 por

Nélio Benedito Fleury & Leonardo Guerra de Rezende Guedes

Sistemas de Proteção Contra Descargas Operacionais e Atmosféricas
1ª edição
1ª tiragem – maio de 2021 – impresso e e-book
Edição: LONDON7 Editora
ISBN – 9798522316488

Capa: Rossana Jardim

CIP – (*Cataloguing-in-Publication*) – Brasil – Catalogação na Publicação
Ficha Catalográfica feita na Editora

Fleury, N B, 1959- & Guedes, L G de R, 1970
F6393 Sistemas de Proteção Contra Descargas Operacionais e Atmosféricas/ Nélio Benedito Fleury & Leonardo Guerra de Rezende Guedes – 2021 . Capa: Rossana Jardim
1ª ed. Goiânia: London Seven Editora e Serviços, 2021.

310p. : il. in color; 148 x 210 mm (brochura e e-book)Agrade

ISBN 9798522316488

1. Engenharia- 620.
I. Aterramento II. Proteção Elétrica III. *SPDA* IV. Engenharia Elétrica

CDD 620 CDU 621.3

Índice para catálogo sistemático
1. Engenharia-620.

LONDON SEVEN Editora e Serviços ®

Fale Conosco:
contato@london7.com.br

www.london7.com.br Dedicatória

Dedicatória

Para Alice, minha neta, com todo Amor do mundo.
Nélio Fleury

Para Boanerges, meu professor, com toda admiração.
Leonardo Guedes

Agradecimentos

Ao sopro de Vida que Deus nos deu –
o campo eletromagnético,
a eletricidade.

Arte da Capa



Rossana Jardim

Título da obra: Conexão Urbana II

Técnica: Acrílica sobre tela

Dimensão: 60×90cm

Ano: 2003

Rossana Jardim



Rossana Jardim nasceu e trabalha em Goiânia - Goiás. Psicóloga e Psicanalista de Crianças por formação, desde 1998 dedica-se ao trabalho como artista plástica. Iniciou seu trabalho artístico com desenho e pintura. Atualmente de dedica também à colagem, aquarela e objetos.

Seu trabalho se configura como uma fascinação pela mecânica que gera movimento e também pela arquitetura ART Déco. A procura permanente de novas percepções dos objetos, seja pelo foco, cor ou composição da imagem individualiza torna seu trabalho uma assídua jornada instigante.

Rossana Jardim participou do 11º Salão Paulista de Arte Contemporânea de São Paulo e do 3º Prêmio Celg de Artes Plásticas de Goiânia. Recebeu o Diploma de Destaque Cultural do Ano em Artes Plásticas concedido pelo Governo de Goiás. Realizou exposições individuais e coletivas em Goiânia, no Museu de Arte de Goiânia, na Pontifícia Universidade Católica de Goiás, na Potrich Galeria de Arte Contemporânea. E, em São Paulo, realizou exposições coletivas no Museu Florestal Octávio Vecchi, na Casa das Rosas, na Galeria Casa da Xiclet e na Casa do Olhar, em Santo André. Em Nova York, participou da 26ª International Art Expo New York e na Ward-Nasse Gallery.

Prefácio

As obras técnicas dedicadas à proteção de homens e dos sistemas contra as descargas operacionais e atmosféricas são escassas no Brasil e em outros países. Ainda mais pelas diferenças conceituais e paramétricas desses sistemas de proteção influenciados diretamente pelas características do solo e ambiente da região tropical do planeta. Essas características trazem ainda mais complexidade às instalações de proteção contra descargas no Brasil, quando se compara as soluções mais simples para os países de clima temperados, os quais experienciam menos lixiviação e menor incidência relativa de descargas atmosféricas.

Esta obra discute, dentre outros conceitos de proteção, sobre aterramento elétrico e a malha de aterramento, trazendo luz ao obscurantismo leigo dos palpites e lendas sobra a energia. Discute a ciência que envolve a proteção devida aos sistemas e aos seres humanos submetidos à infraestrutura energética e suas "maravilhosas máquinas elétricas" que possibilitam a produtividade e, por que não, um melhor desfrute da vida hodierna.

A obra consegue trazer conceitos de eletromagnetismo aplicado, processos de dimensionamento de malhas e exemplos de laudos de inspeção, sobre a ótica da aplicabilidade cotidiana da energia em conformidade com as normas técnicas às quais os profissionais devem se ater.

Por fim, o esforço e conhecimento dos autores, ambos egressos da Escola de Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás e, meus ex-alunos, trouxeram uma construção linear do conteúdo desta obra apta a levar os engenheiros, eletrotécnicos e profissionais de segurança a compreenderem este ramo da engenharia elétrica.

Boanerges Guedes Filho.

Engenheiro Civil, Eletricista, de Minas e Metalurgia.

Professor Titular aposentado da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação da Universidade Federal de Goiás.

APRESENTAÇÃO

Existe uma característica determinante na aplicação do conhecimento nas profissões das áreas tecnológicas, e em especial aos cursos das áreas das engenharias – nosso conhecimento logo é ultrapassado diante dos avanços tecnológicos e das demandas estabelecidas pelos usuários e contratantes de nossos serviços e produtos. O competitivo mercado de trabalho das engenharias exige o constante conhecimento das práticas, e dos métodos utilizados na prestação destes serviços. As normas técnicas sejam da *Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR* da *ABNT* ou similares internacionais devem ser conhecidas, entendidas e praticadas em cada projeto e em cada execução.

Pode-se citar como exemplo da velocidade de transformação dos arranjos técnicos na Engenharia Elétrica a edição das Normas:

- *ABNT NBR 16.527* – Aterramento para Sistemas de Distribuição;
- *ABNT NBR 16.690* – Instalações Elétricas de Arranjos Fotovoltaicos – Requisitos de Projeto;
- *ABNT NBR 5.419* – Proteção Contra Descargas Atmosféricas (*SPDA*); e
- *ABNT NBR 5.101* – Iluminação Pública: Procedimento.

Até então utilizávamos as normas da "*BS EM/IEC - British Standards International Electrotechnical Commission*" para entender estes temas e então elaborarmos nossos projetos de malha de aterramento, seletividade e coordenação da proteção em média e alta tensão e *SPDA*, eficiência energética, análise de qualidade de energia entre outros.

Agora com os investimentos em Energias Renováveis e Geração Distribuída – Usinas Fotovoltaicas, Eólicas e de Biomassa num cenário de eficiência energética que determina o rendimento maximizado dos sistemas, seja de iluminação pública – *SIP* e de climatização, aliado a *Geração, Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica* de excelente qualidade novas áreas do conhecimento da energia elétrica foram discutidas e novas especificações técnicas foram parametrizadas para constarem dos nossos projetos de proteção de sistemas elétricos e das metodologias para o executarmos.

Nesta obra incluímos um capítulo especial para conhecermos a metodologia para a coordenação e seletividade da proteção para parametrização do sistema de proteção de *Usinas Fotovoltaicas*. Assim como, iremos trabalhar com o conceito de eficiência energética objetivando a minimização das correntes e tensões espúrias – harmônicos que afetam o rendimento dos equipamentos eletroeletrônicos e das luminárias *LED*, efeitos que são minimizados com sistemas eficientes de malha de aterramento.

Dedicamos outro capítulo exclusivo para o gerenciamento dos riscos nos Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas - *SPDA* com estabelece a nova versão da norma e revisamos o capitulo especifico ao dimensionamento destes Sistemas.

O objetivo desta obra é conciliar as normas técnicas *ABNT NBR*, as normas internacionais, as *Resoluções da ANEEL*, as especificações técnicas das *concessionária*s de energia elétrica – especialmente as da *ENEL*, sempre com o foco voltado em soluções e ferramentas práticas, para a elaboração de projetos e execução de instalações elétricas de baixa e média tensão.

Sumário

1 GRANDEZAS ELÉTRICAS 27

1.1 Potencial Elétrico 28
1.2 Tensão 29
1.3 Corrente 29
1.4 Resistência 30
1.5 Impedância 32
1.6 Potência 34
1.7 Fator de Potência 35
1.8 Energia 37
1.9 Circuitos Monofásicos, Trifásicos e fator de Potência 37
1.10 Domínio do Tempo 38

2 SISTEMAS ENERGIZADOS 39

2.1 Proteções em Sistemas Energizados 39
2.2 Correntes de Falha em Sistemas Elétricos 43
2.3 Malha de Aterramento e de Proteção 52

3 FUNDAMENTOS DE ATERRAMENTO 59

3.1 Malha de Terra – Malha de Aterramento 60
3.2 Eletrodos de Aterramentos 62
3.3 Comportamento da Tensão e Corrente Durante Surtos 64
3.4 Dimensão das Malhas Básicas 65

4 SOLO E RESISTIVIDADE 67

4.1 Resistência de aterramento 68
4.2 Hastes Interligadas em Paralelo 70

4.3 Resistividade Aparente 72
4.4 Redução de Camadas 74
4.5 Resistividade elétrica do solo 78

5 MEDIÇÕES DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.. 83

5.1 Princípios das Medições da Resistência de Aterramento.... 83
5.2 Método de Medição da Resistência de Aterramento..... 86

6 SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS - *SPDA*S 95

6.1 Raios..... 95
6.2 Nível de Proteção Contra Descarga Atmosférica..... 98
6.3 Projeto do *SPDA* 102
6.4 Subsistema de Captação 103
6.5 Subsistema de Descida 104
6.6 Subsistema de Aterramento 106
6.7 Posicionamento do Subsistema de Captação 109
6.8 Posicionamento do Subsistema de Captação Utilizando o Método da Esfera Rolante 110
6.9 Exemplo de *SPDA* – Plano Fictício 118
6.10 Ensaio de Continuidade Elétrica das Armaduras 121

7 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DA PROTEÇÃO123

7.1 Ramal Alimentador 128
7.2 Cálculo das relações de corrente dos TC da SE projetada131
7.3 Cálculo do tempo "T_{02}" de atuação dos relés da SE Projetada 132
7.4 Coordenação entre o Religadores..... 136
7.5 Coordenação dos ajustes da UFV..... 141

8 GERENCIAMENTO DE RISCOS EM *SPDA* ABNT NBR 5.419 153

8.1 Necessidade do gerenciamento de risco 153

8.2 Interpretação dos termos a serem utilizados no gerenciamento de risco 156

8.3 Cálculo de verificação da necessidade de proteção 159

8.4 Exemplo de Cálculo de Gerenciamento de Riscos 162

8.5 Gerenciamento de Riscos e Avaliação da Probabilidade P_X de Dano 165

9 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO 179

9.1 Arranjo dos quatros pontos igualmente espaçados ou arranjo de Wenner 180

9.2 Aplicação do Método Wenner segundo a ABNT NBR-15.751181

9.3 Métodos de Estratificação do Solo 189

9.4 Resistividade Aparente do solo 196

10 PROJETO MALHA DE TERRA 205

10.1 Projeto de Malha de Aterramento em Subestações 205

10.2 Modelagem do Solo (Estratificação do Solo) 207

10.3 Geometria Básica da Malha 208

10.4 Cálculo Preliminar da Resistência de Aterramento 209

10.5 Geometria da Malha 212

10.6 Dimensionamento do Condutor da Malha 216

10.7 Projeto Final da Malha 220

10.8 Cálculo das Tensões Permissíveis 223

10.9 Projeto Malha de Aterramento 235

11 MALHA DE ATERRAMENTO E CORREÇÃO DE HARMÔNICOS 239

11.1 Tensão Senoidal e Corrente Não Senoidal 239
11.2 Redução das Correntes Harmônicas Através de Filtros.. 246
11.3 Redução das Correntes Harmônicas Através da Malha de Aterramento 251

12 CORROSÃO NO SISTEMA DE ATERRAMENTO..... 259

12.1 Eletronegatividade dos Metais..... 259
12.2 Reação de Corrosão..... 260
12.3 Corrosão no Sistema de Aterramento..... 265
12.4 Aeração Diferencial..... 268
12.5 Proteção contra corrosão 269
12.6 O Religador e a Corrosão 271

13 SOBRETENSÕES DE ORIGENS ATMOSFÉRICA..... 273

13.1 A Descarga Atmosférica em Linhas de Transmissão 274
13.2 Método Eletrogeométrico..... 274

14 DIMENSIONAMENTO DE CABOS-GUARDA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO..... 279

14.1 Calculo da Resistência de falta 279
14.2 Resistividade do solo, Resistência de aterramento das torres e Resistência da malha de terra das Subestações. 280
14.3 Tempo desejado de atuação da proteção 281
14.4 Outros fatores 282
14.5 Exemplo de Cálculo do Cabo-Guarda..... 282

15 EXEMPLO DE LAUDO DE CONFORMIDADE DE MALHA DE ATERRAMENTO 289

15.1 Finalidade 290
15.2 Características da Malha de Aterramento 291

15.3 Características Eletromecânicas dos Equipamentos da SE292
15.4 Modelagem e Resistividade do Solo 295
15.5 Dimensionamento do Condutor da Malha 300
15.6 Dimensionamento Mecânico 301
15.7 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO 301
15.8 Geometria da Malha 303
15.9 Cálculo Preliminar da Resistência de Aterramento 304
15.10 Cálculo das Tensões Permissíveis 305
15.11 Tensão Máxima De Passo Permissível 305
15.12 Tensão de Passo Existente na Periferia da Malha 307
15.13 Tensão Máxima de Toque Permissível 307
15.14 Tensão de Toque Existente 308
15.15 Corrente Máxima de Choque 308
15.16 Corrente de Choque Existente Devido à Tensão de Passo Sem Brita na Periferia de Malha 308
15.17 Corrente de Choque Existente na Periferia da Malha Devido à Tensão de Passo, com Camada de Brita 309
15.18 Corrente de Choque Devido à Tensão de Toque Existente, sem Brita 309
15.19 Corrente de Choque Devido à Tensão de Toque Existente, com Brita 309
15.20 Medição da Resistência da Malha de Aterramento 310
15.21 Conclusão 312

BIBLIOGRAFIA 313

Índice de Figuras

Figura 1: Analisador de Energia 33
Figura 2: Triângulo de Potências 35
Figura 3: Barramento MT da UC da estrutura ENEL 1.925.106-3 alimentada pela S.E. Jaraguá 46
Figura 4: Modelo de Correspondência 47
Figura 5: Dados Informados pela *concessionária* 48
Figura 6: Diagrama da instalação elétrica 56
Figura 7: Resistividade do solo 60
Figura 8: Tensão de contato e tensão de passo 61
Figura 9: Diferentes camadas do solo 68
Figura 10: Dados característicos do aterramento 73
Figura 11: Curvas de Endrenyi 76
Figura 12: Camadas do solo do exemplo 77
Figura 13: Metro quadrado de solo 78
Figura 14: Curva característica do índice de umidade do solo 79
Figura 15: Curva característica da resistividade versus temperatura 80
Figura 16: Exemplos de resistividade versus concentração de sais 81
Figura17: Resistência versus distância 84
Figura 18: Resistência medida no barramento 84
Figura 19: Resistência medida na haste 85
Figura 20: Utilização do terrômetro 87
Figura 21: Traçado da medições de resistência 90
Figura 22: Medição da malha P 93
Figura 23: Forma de onda típica do impulso da descarga atmosférica 96
Figura 24: Exemplo de índices de ZPR 100
Figura 25: Modelo de hastes de captação 104
Figura 26: Conector TEL-630 108
Figura 27: Conector TEL-650 108
Figura 28: Cálculo de instalação do mastro/captor 110
Figura 29: Esfera rolante 111
Figura 30: Exemplo de área protegida por duas hastes. 111
Figura 31: Área de proteção de quatro hastes formando um quadrado 115
Figura 32: Imagem fictícia da infraestrutura do exemplo 118
Figura 33: Croqui e dimensões da infraestrutura fictícia do exemplo 119
Figura 34: Dimensionamento de *SPDA* para o exemplo fictício 120
Figura 35: Ensaio de resistência 122

Figura 36: Diagrama unificar de Subestação de 975 KVA - Ao Tempo 125
Figura 37: Curva "C" característica de atuação de um disjuntor eletromagnético 127
Figura 38: Características de ajustes da Subestação Jaraguá 128
Figura 39: Disjuntor Religador Automático OSM Noja Power 134
Figura 40: Correntes no Rele NOJA 135
Figura 41: Correntes no Rele URPE 7144n 136
Figura 42: Coordenadograma para as Correntes no Rele Fase T03 > T02 138
Figura 43: Coordenadograma para as Correntes no Rele Neutro 139
Figura 44: Infográfico da área de exposição 160
Figura 45: Galpão de uma Indústria Metalúrgica 162
Figura 46: Estrutura do Galpão 163
Figura 47: Fontes x Danos x Perdas 167
Figura 48: Área de exposição equivalente 170
Figura 49: Figura 49: Exemplo de camadas do solo: (a) real (b) estratificado 179
Figura 50: Configuração do Arranjo de Wenner 180
Figura 51: Croquis para medições em áreas retangulares 184
Figura 52: MI 3123 SMARTEC Earth/Clamp 186
Figura 53: MTD-20KW 187
Figura 54: MTD-20KWe 188
Figura 55: Curvas típicas de resistividade para solos de duas camadas 189
Figura 56: Prolongação da curva de resistividade 190
Figura 57: Assíntota à curva de resistividade 190
Figura 58: Espessura d da primeira camada do solo (camada superior) 192
Figura 59: Estratificação do solo em duas camadas 192
Figura 60: Plotagem das medições 193
Figura 61: Resultado estratificação do solo 195
Figura 62: Camadas de resistividades que compõem um solo não homogêneo 196
Figura 63: Resistividade Aparente do solo 196
Figura 64: Efeitos de dispersão pelas camadas do solo 197
Figura 65: Solo com muitas camadas reduzido a um Solo Equivalente 198
Figura 66: Resistividade Aparente 200
Figura 67: Resultado estratificação do solo 202
Figura 68: Redução das camadas do solo 203
Figura 69: Plotagem da resistividade 208
Figura 70: Formato inicial da malha 212
Figura 71: Geometria geral da Malha 214
Figura 72: Dimensionamento da vala dos eletrodos 221
Figura 73: Dimensionamento da vala em piso 222
Figura 74: Detalhes de interligação 222

Figura 75: Circuito representativo da Tensão de Toque 226
Figura 76: Circuito representativo da Tensão de Passo 229
Figura 77: Fluxograma do projeto da malha de aterramento 235
Figura 78: Aterramento de cerca elétrica interna à malha 237
Figura 79: Aterramento de cerca elétrica externa 237
Figura 80: Tensão e Corrente de Alimentação do Conj. Retificador + Luminárias CC 240
Figura 81: Medições de Potências PQS, FP, Correntes e Tensões Harmônicas de uma Luminária LED 2 x 20W 241
Figura 82: Painel de resultados das medições 241
Figura 83: Correntes no domínio da frequência 242
Figura 84: Análise da qualidade da energia elétrica 246
Figura 85: Demonstração das medições realizadas 247
Figura 86: Demonstração das medições no padrão e QDG 249
Figura 87: Gráfico comparativo das grandezas analisadas 250
Figura 88: Esquema proteção e neutro separados Esquema proteção e neutro Comuns 252
Figura 89: BEP e Barramento de Neutro 254
Figura 90: Resistência de Contato entre os barramentos $RC = 114{,}3\Omega$ 254
Figura 91: Demonstração de medições de resistência de aterramento 255
Figura 92: Demonstração de medições de qualidade de energia 256
Figura 93: Vista geral malha projetada e conexão dos Barramentos 257
Figura 94: Pilha eletroquímica 261
Figura 95: Cuba eletrolítica sem Ligação Externa 262
Figura 96: Cuba eletrolítica com Ligação Externa 263
Figura 97: Pilha eletroquímica bloqueada 264
Figura 98: Diferentes materiais no sistema de aterramento 266
Figura 99: Área de ferro do eletrodo exposta. 267
Figura 100: Diferentes concentrações de sais e umidade 267
Figura 101: Isolação da conexão do cabo de descida 269
Figura 102: Esquema de Zona de Proteção 276
Figura 103: Zona de Proteção de várias estruturas de para-raios 276
Figura 104: Zona de Proteção para cabo esticado 277
Figura 105: Escoamento de correntes em curto fase-terra. 280
Figura 106: Fluxo de correntes em curto fase-terra nas torres subsequentes 281
Figura 107: Torre da linha de 500 kV 283
Figura 108: Perfil de correntes 285
Figura 109: Perfil de correntes com cabo-guarda adicional 286
Figura 110: Resistividade do Solo Medição 01: “Vão de entrada da Subestação” 296

Figura 111: Resistividade do Solo Medição 02: “Lateral Direita da Subestação’ 296
Figura 112: Caixa de inspeção da Malha e terreno de instalação dos eletrodos..... 310
Figura 113: Medição da Resistência da Malha de Aterramento 311

Índice de Tabelas

Tabela 1: Princípios da Proteção dos circuitos elétricos. 43
Tabela 2: Correntes de Falha no Alimentador da Subestação Jaraguá 49
Tabela 3: Dados da Subestação 51
Tabela 4: Correntes para ajustes de relés e disjuntores 51
Tabela 5: Parâmetros de sistema 54
Tabela 6: Parâmetros requisitados pela ABNT NBR 16.527 55
Tabela 7: Correntes identificadas a para rede distribuição em exemplo 57
Tabela 8: Exemplos de resistividade de diferentes tipos de solo 79
Tabela 9: Exemplos de medições 89
Tabela 10: Determinação de *dp* para diferentes distâncias (dC) 91
Tabela 11: Critério de Interceptação 98
Tabela 12: Método de Proteção por Classe de *SPDA* 103
Tabela 13: Configuração e área de secção mínima, condutores de captação, hastes captoras e condutores de descida 105
Tabela 14: Configuração e área de secção mínima do eletrodo de aterramento 107
Tabela 15: Parâmetro R em função do Nível de Proteção 113
Tabela 16: Características obtidas do CE-O&M-SSP-081-2020 129
Tabela 17: Correntes identificadas da Subestação Jaraguá 129
Tabela 18: Identificação do Rele Disjuntor 214R SE Jaraguá/FASE 130
Tabela 19: Identificação do Rele Disjuntor 214R SE Jaraguá/NEUTRO 131
Tabela 20: Identificação de correntes de coordenação 137
Tabela 21: Ajustes para os Relé URPE 7104-50/51 e URPE 7104-50N/51N 140
Tabela 22: Identificação dos inversores 141
Tabela 23: Ajustes de sobretensão e subtensão 142
Tabela 24: Ajustes de sobrefrequencia e subfrequencia 143
Tabela 25: Limite de distorção harmônica de corrente 143
Tabela 26: Subtensão de Fase (UV1) 145

Tabela 27: Intervalos para Subtensão de Fase (27) 145
Tabela 28: Configurações OV1 146
Tabela 29: Intervalos para Subtensão de Fase (59) 146
Tabela 30: Sobretensão Configurações OV2 147
Tabela 31: Intervalos para Subtensão de Fase (47) 147
Tabela 32: Intervalos para Subtensão de Fase (46) 147
Tabela 33: Intervalos para Sobre corrente Direcional (67) 149
Tabela 34: Sobre corrente de fase com restrição de tensão (51V) 150
Tabela 35: Proteções Relé NOJA Power-50/51 e Relé Noja Power-50N/51N 150
Tabela 36: Quadro Resumo das Proteções da entrada MT SE UFV Moreira a ser implantada no software de controle e gerenciamento do Disjuntor Religador Automático OSM Noja Power 151
Tabela 37: Fontes de danos, tipos de danos e tipos de perdas pelo ponto de impacto 158
Tabela 38: Fator de Localização 161
Tabela 39: *SPDA* em função da Frequência Média Anual Previsível 161
Tabela 40: Características da estrutura 164
Tabela 41: Medida de Proteção Adicional 171
Tabela 42: Probabilidade de redução de danos físicos 171
Tabela 43: Cálculo R1 175
Tabela 44: Valores Típicos de Risco Tolerável (R_T) 176
Tabela 45: Número mínimo de linhas de medição 183
Tabela 46: Tabela D-1 da NTC- 60 CELG-D 191
Tabela 47: Características do empreendimento 193
Tabela 48: Medidas obtidas 193
Tabela 49: Cálculos de resistividade 195
Tabela 50: Parâmetros para cálculo da estratificação do solo 201
Tabela 51: Características do empreendimento 207
Tabela 52: Dimensões para conexões 211
Tabela 53: Calculo de correntes 212
Tabela 54: Hastes de Aterramento 215
Tabela 55: Coeficiente térmico de algumas emendas ao cobre 219
Tabela 56: Potência da Subestação 220
Tabela 57: Dimensionamento do condutor 220
Tabela 58: Corrente limite de largar de longa duração (I_{chld}) 225
Tabela 59: Resistividade de alguns materiais 228
Tabela 60: Coeficientes de ajuste 232
Tabela 61: Dimensões do empreendimento 234
Tabela 62: Valores medidos no padrão e QDG 248
Tabela 63: Medições no Armário Técnico AT - R6 256

Tabela 64: Novas medições no Armário Técnico AT - R6 258
Tabela 65: Eletronegatividade dos Metais..... 260
Tabela 66: Raio da Esfera Rolante em função da corrente máxima..... 275
Tabela 67: Comparação das Grandezas Elétricas..... 312

1 Grandezas Elétricas

Antes de iniciar este estudo faz-se necessário estreitar o conhecimento das grandezas elétricas, e especialmente entender o fenômeno da energia elétrica.

Uma das principais fontes de energia da civilização contemporânea é a energia elétrica. O princípio físico em função do qual uma das partículas atômicas, o elétron, apresenta uma carga que, por convenção, se considera de sinal negativo constitui o fundamento dessa forma de energia, que tem uma infinidade de aplicações na vida moderna.

Eletricidade é o fenômeno físico associado a cargas elétricas estáticas ou em movimento. Seus efeitos se observam em diversos acontecimentos naturais, como nos relâmpagos, que são faíscas elétricas de grande magnitude geradas a partir de nuvens carregadas. Modernamente, confirmou-se que a energia elétrica permite explicar grande quantidade de fenômenos físicos e químicos.

A constituição elétrica da matéria se fundamenta numa estrutura atômica em que cada átomo é composto por uma série de partículas, cada uma com determinada carga elétrica. Por isso se define carga elétrica como propriedade característica das partículas que constituem as substâncias e que se manifesta pela presença de forças. A carga elétrica apresenta-se somente em duas variedades, convencionalmente denominadas positiva e negativa.

A energia elétrica e a energia liberada pela passagem ou deslocamento de um elétron de determinado átomo para outro átomo. Os átomos com muitos elétrons - no estado fundamental de átomos com muitos elétrons, estes ocupam orbitais atômicos de modo que a energia total do átomo seja a mínima possível, os elétrons das últimas camadas com pouca excitação podem se deslocar.

O deslocamento de um elétron para outro átomo pode ser provocada pela excitação eletromagnética, ou melhor, por um campo eletromagnético. A esta excitação eletromagnética chamaremos de potencial elétrico.

1.1 Potencial Elétrico

Potencial elétrico é a capacidade que um corpo energizado tem de atrair ou repelir outras cargas elétricas, ou seja, a capacidade de fazer deslocar *1 elétron* de *um átomo* para outro. Destaca-se que quanto mais elétrons possuir determinado átomo da matéria, mais condutora esta será.

Neste início de entendimento, fica claro que o elétron irá circular em um ambiente aberto - geração hidroelétrica ou termoelétrica ou fechado – geração fotovoltaica ou sistemas de armazenamento de energia.

Em um sistema fechado o elétron circula e volta a ocupar um átomo que foi excitado e perdeu elétrons e adquire carga positiva os quais são chamados de *Cátion*. Um exemplo clássico são os painéis fotovoltaicos onde a energia luminosa faz circular os elétrons das placas de silício ao absorverem a luz do sol. Estes elétrons devem retornar aos átomos de silício, caso contrário ao longo da operação perderíamos matéria.

Em um sistema aberto, a excitação eletromagnética faz com os elétrons livres da superfície terrestre sejam direcionados a circularem em determinados "geradores" que são conduzidos até ao ponto que sua energia – energia elétrica seja convertida em outra forma de energia e ai então seja devolvida à superfície terrestre. Quando formos falar dos circuitos e dos condutores retornaremos a este assunto.

A esta excitação eletromagnética damos o nome de *tensão* ou *diferença de potencial*.

1.2 Tensão

A *tensão* é uma unidade que mede a *Diferença de Potencial Elétrico* (*d.d.p.*) que permite a passagem da carga de *1 Coulomb* durante *1 segundo*. Esta grandeza é medida pela unidade *Volt* (*V*) em homenagem a *Alessandro Volta*, quem inventou a bateria química.

1.3 Corrente

A corrente elétrica representa a passagem durante 1 segundo de uma carga equivalente a *1 Coulomb*. Esta grandeza é medida pela unidade *Ampére* (*A*) em homenagem a *André-Marie Ampère* que fez importantes contribuições para o estudo do eletromagnetismo. Assim, *tem-se* que *1A* equivale à passagem durante *1 segundo* de $6{,}25 \times 10^{-18}$ *elétrons* (*e*).

$$1A = 6{,}25 \times 10^{-18}\ e/segundo$$

1.4 Resistência

A resistência elétrica representa a característica físico-química do material que, ao receber uma excitação eletromagnética de *1V* faz conduzir uma corrente elétrica de *1A*. Esta grandeza é medida pela unidade *Ohm (Ω)*, derivado do sobrenome do físico *Georg Simon Ohm*. Logo, a resistência que, conduz *1A* ao ser submetida a uma excitação ou tensão de *1V* equivale a *1Ohm*.

$$1\,\Omega = 1V / 1\,A$$

A resistência de um dado material pode ser obtida por:

$$R = \rho . \frac{\ell}{\alpha}$$

onde ℓ representa o comprimento do condutor, a sua área e ρ é a resistividade do material.

A resistividade de determinado material é uma de suas características próprias, e que somente permite variação com a mudança da temperatura em que está submetido, ou melhor, do ambiente onde está instalado. Observa-se que quanto maior a temperatura em que o material está submetido, maior será a sua resistividade. Portanto, para determinado condutor de comprimento e área definida, somente através da temperatura que alteramos a sua resistência à passagem da corrente elétrica. Quanto maior a temperatura maior a sua resistência à passagem da corrente elétrica, uma vez que a resistência que é função da resistividade varia em função da temperatura na seguinte razão:

$$\rho = \rho o[1 + \alpha . t + \beta . t^2]$$

onde α e β são coeficientes que variam de acordo com o material.

Para determinado material a uma temperatura constante, a zero grau célsius, por exemplo, cuja grandeza possui os parâmetros $(\Omega.mm^2/m)$ *tem-se* que a resistividade ρ pode ser conhecida como:

- Alumínio: *32 x 10-3* $(\Omega.mm^2/m)$;
- Cobre: *17 x 10-3* $(\Omega.mm^2/m)$;
- Níquel: *100 x 10-3* $(\Omega.mm^2/m)$.

Para temperaturas distintas de zero grau célsius *tem-se* que a resistividade de determinado material seria proporcional a sua resistividade em *zero grau* e a temperatura em que está submetida.

$$\rho = \rho o[1 + \alpha.t]$$

onde α pode ser definido com o seguinte valor:

- Alumínio: *0,0036*;
- Cobre: *0,0040*;
- Níquel: *0,0050*.

Para melhor entendermos esta fórmula, em um condutor de cobre *tem-se* que sua resistividade a *zero grau* é de *17* x 10^{-3} $(\Omega.mm^2/m)$ e que este condutor será instalado em um circuito que poderá ser submetido a até *50G* onde será utilizado condutores isolado em *PVC 70G*, assim a resistividade a zero grau deverá ser agravada em 20%.

$$\rho = \rho o[1 + \alpha.t]$$

$$\rho = \rho o[1 + 0{,}004.50] = \rho o.1{,}20$$

Assim ao calcularmos a capacidade de condução de um determinado condutor de cobre independente da configuração de