



PROTEÇÃO

DE EQUIPAMENTOS
ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS
CONTRA **SURTOS**
ELÉTRICOS
EM INSTALAÇÕES



José Osvaldo Saldanha Paulino

Célio Fonseca Barbosa

Ronaldo Kascher Moreira

Wagner Almeida Barbosa

Marcelo Augusto Freire Lobo

Ailton Ricaldoni Lobo

José Osvaldo Saldanha Paulino

Célio Fonseca Barbosa

Ronaldo Kascher Moreira

Wagner Almeida Barbosa

Marcelo Augusto Freire Lobo

Ailton Ricaldoni Lobo

PROTEÇÃO
DE EQUIPAMENTOS
ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS
CONTRA **SURTOS**
ELÉTRICOS
EM INSTALAÇÕES

1ª Edição

Lagoa Santa - MG

Editora Clamper

2016



Editora CLAMPER

Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações

Projeto Gráfico, diagramação e revisão:
A2B Comunicação

Capa: Rafael Sola / **Desenhos:** J.O.S. Paulino e Rafael Sola / **Impressão:** Rona Editora

Catálogo na fonte:

Paulino, José Osvaldo Saldanha

Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações

José Osvaldo Saldanha Paulino, Célio Fonseca Barbosa, Ronaldo Kascher Moreira, Wagner Almeida Barbosa, Marcelo Augusto Freire Lobo, Ailton Ricaldoni Lobo - Lagoa Santa: Editora Clamper, 2016.

ISBN: 978-85-93065-00-2

1. Descargas atmosféricas – proteção. 2. Raios – proteção. 3. Equipamentos elétricos e eletrônicos – proteção. 4. Dispositivos de proteção contra surtos – DPS I. Título

CDU- 621.3

Todos os direitos reservados à CLAMPER

Este livro ou parte dele não pode ser reproduzido por qualquer meio sem a autorização prévia por escrito da Editora (clamper.com.br)

Limitação de responsabilidade, isenção de responsabilidade: a editora e os autores desenvolveram os seus melhores esforços na preparação deste livro, entretanto as recomendações e estratégias sugeridas podem não ser adequadas a situações específicas. Normas técnicas e profissionais habilitados devem ser consultados, quando apropriado.

Biografia dos Autores

José Osvaldo Saldanha Paulino é Doutor em Engenharia Elétrica e professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Célio Fonseca Barbosa é Doutor em Engenharia Elétrica, pesquisador da Fundação CPqD e Chairman da ITU-T SG 5.1 (Proteção Elétrica de Sistemas de Telecomunicações).

Ronaldo Kascher Moreira é Doutor em Engenharia Elétrica, professor da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e empresário.

Wagner Almeida Barbosa é Engenheiro Eletricista, MBA em Gestão de Empresas e Negócios, membro de vários comitês de estudos sobre Proteção Elétrica e Diretor Técnico e Industrial da CLAMPER.

Marcelo Augusto Freire Lobo é Engenheiro Eletricista, MBA em Gestão de Empresas e Negócios e Vice Presidente da CLAMPER.

Ailton Ricaldoni Lobo é Engenheiro Eletricista, Sócio Fundador e Presidente das empresas CLAMPER, Nanum e NOE, ex-presidente da Sociedade Mineira dos Engenheiros e atual presidente do Conselho Deliberativo, vice-presidente da ABINEE Nacional (Associação Brasileira da Indústria Eletro-Eletrônica), ex-diretor Regional da ABINEE MG e Coordenador do CE C6 Cigré-Brasil (Geração Distribuída e Energia Renovável).

PREFÁCIO

Este livro foi redigido por professores, pesquisadores e engenheiros. Ele agrega a capacitação científica e acadêmica de universidades e centros de pesquisa à experiência profissional da equipe da CLAMPER, empresa mineira líder no mercado brasileiro do segmento da proteção contra surtos, com intensa atuação no mercado internacional.

Tendo como público alvo engenheiros, técnicos e instaladores, este trabalho objetiva explicar fenômenos complexos em uma linguagem simples e direta, bem como fornecer embasamento para o projeto do sistema de proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos instalados dentro de edificações contra surtos elétricos, em conformidade com a Norma Brasileira de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (NBR 5419), revista e reeditada em 2015 e com a Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (NBR 5410), de 2004.

O livro apresenta, também, os fenômenos envolvidos e faz uma análise das normas técnicas pertinentes e das ferramentas de projeto como a blindagem eletromagnética, o aterramento, a equalização de potenciais, o arranjo dos condutores e a instalação dos Dispositivos de Proteção contra Surtos Elétricos (DPS).

É importante ressaltar que esta obra não substitui a consulta necessária às normas para a execução de projetos, por se tratar de uma ferramenta auxiliar para a compreensão dos fenômenos envolvidos.

INTRODUÇÃO



A CLAMPER é sinônimo de proteção para o mercado. É a sua marca. Esta conquista é fruto de uma busca incansável pela excelência e por melhorar a vida das pessoas. A empresa é hoje, reconhecida pelo mercado como líder na pesquisa, desenvolvimento e fabricação de Dispositivos de Proteção contra Surto Elétricos (DPS) para os diversos segmentos do mercado nacional e internacional.

O nome “CLAMPER” tem origem na principal função dos nossos produtos que é de limitar os surtos elétricos a níveis seguros, garantindo a integridade e longevidade dos equipamentos.

Acreditamos que um bom começo para uma empresa está na escolha de um nome que transmita seus objetivos, metas e propósitos, tornando-se uma marca.

A condução da empresa foi sempre pautada na observância de dois princípios fundamentais, ética e qualidade, que formam pilares de uma produção de excelência, além de serem propulsores da marca “CLAMPER”.

O nosso lema é: Generosidade gera Prosperidade.

Nessa empreitada, tivemos as participações fundamentais dos sócios, colaboradores, clientes, fornecedores e parceiros de diversos setores, que ajudaram a escrever esta história de sucesso.

O projeto de criação da CLAMPER foi gestado durante a construção de uma Estação de Pesquisa de Raios da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), na década de 1980, empresa onde trabalhei por 20 anos. Naquela ocasião, fui um dos responsáveis pela implantação desta estação, localizada na Serra do Cachimbo, região metropolitana de Belo Horizonte.

A filosofia de vida e a prática empresarial que desenvolvemos nos ensinam que o sucesso depende, exclusivamente, de boas escolhas e decisões. Portanto, nos momentos em que a tomada de decisão influencia e direciona o futuro do negócio, esta poderá ser tanto para o sucesso quanto para o insucesso. Mais ainda, as escolhas definem, não só o sucesso, mas, também, a qualidade de vida, a alegria, a felicidade e a prosperidade futuras.

O mundo empresarial exige de quem toma a decisão de implantar e dirigir uma empresa, a exemplo da CLAMPER, algumas qualidades fundamentais: conhecimento, determinação, confiança, coragem, visão de longo prazo, ideias inovadoras e “ESPÍRITO PÚBLICO”.

Foi a partir desse conjunto de atributos e a colaboração de pessoas que acreditaram na proposta, que colocamos em prática a ideia acalentada, por muito tempo, de encarar o desafio e criar a CLAMPER, em 1991.

Na ocasião, percebemos uma grande opor-

tunidade de oferecer ao mercado um produto de extrema importância e necessidade, principalmente por ser o Brasil o país com a maior incidência de raios no mundo.

As atividades da CLAMPER foram iniciadas, exclusivamente, com projetos customizados para atender demandas específicas. Não havia, até então, produtos de prateleira mais padronizados. Com muito empenho e dedicação da equipe, em 1998, lançamos o VCL, desenvolvido para instalação nos quadros de distribuição de energia de quaisquer instalações residenciais, comerciais ou industriais.

Neste momento a empresa ganhou grande destaque e passou a ser conhecida mais amplamente pelo mercado. Apesar deste direcionamento ao mercado mais massificado, a empresa manteve e mantém até hoje sua oferta de soluções customizadas.

Apesar das várias crises econômicas pelas quais o país passou, a condução da empresa sempre valorizou o aprendizado com as vicissitudes, estabelecendo novos rumos e tomando novas decisões. Foi durante a crise econômica de 2003, que decidimos, por exemplo, expandir os negócios da empresa para além das nossas fronteiras. Foi então que começamos a estruturar as atividades de exportação.

Participamos de missões da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) para diversos países e de feiras internacionais para entender o funcionamento dos mercados lá fora e divulgar nossa empresa. Evoluímos para a abertura de uma empresa no México, a CLAMPER México, com o objetivo de explorar a 2ª maior eco-

nomia da América Latina. Hoje, exportamos para mais de 15 países na América Latina, Europa, África e nos Estados Unidos.

A missão inovadora da empresa levou a CLAMPER a adquirir uma empresa de nanotecnologia na incubadora da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2008. O objetivo principal era desenvolver componentes utilizados nos protetores, com melhor desempenho e menor custo, a partir do desenvolvimento de materiais nanoestruturados. Contudo, ao mirar em um alvo, a empresa acertou em cheio outro, tornando-se produtora de uma tinta magnética nanoestruturada para aplicação em impressoras jato de tinta.

Um dos grandes desafios da empresa está na escolha de nossos colaboradores, que costumo chamar de “cúmplices”, no bom sentido, é óbvio, porque sem eles, sem o comprometimento e a dedicação de cada um, jamais conseguiríamos levar a CLAMPER até este patamar e, muito menos, almejar chegar onde queremos no futuro.

Como otimista confesso que sou, mesmo diante de dificuldades, que às vezes bambeiam as pernas, sempre tive confiança no que faço. A nossa inspiração profissional vem de uma característica, que os amigos mais próximos identificam em mim e gostam de destacar, que é o espírito público. É importante acreditar que devemos pensar global e agir local.

Por isso, tenho a crença que a CLAMPER é fruto da coragem, do comprometimento, da dedicação e da competência de nossos “cúmplices”, colaboradores, clientes e fornecedores.

AILTON RICARDONI LOBO
Diretor-Presidente

SUMÁRIO

ABREVIATURAS E SIGLAS	14
SIMBOLOGIA	16
CAPÍTULO 1 –DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	18
1.1 - A formação da descarga	18
1.2 - O número de descargas para a terra	20
1.3 - A corrente da descarga atmosférica	21
1.4 - Os riscos das descargas atmosféricas	24
1.5 - A proteção contra descargas atmosféricas	25
1.6 - Conclusões do capítulo	26
CAPÍTULO 2 – A NORMA BRASILEIRA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS – CONCEITOS BÁSICOS E ANÁLISE DE RISCO	27
2.1 - Proteção de edificações – NBR 5419 Partes 1 e 3	28
2.1.1 - Princípios gerais	28
2.1.2 - As correntes de descarga	30
2.1.3 - Os níveis de proteção	32
2.1.4 - O SPDA externo	35
2.1.5 - As zonas de proteção	37
2.2 - Análise de riscos e de danos às instalações eletroeletrônicas internas	39
2.2.1 - Danos causados por descarga atmosférica direta na estrutura (Fonte S1)	39
2.2.2 - Danos causados por descarga atmosférica próxima à estrutura (Fonte S2).	44
2.2.3 - Danos causados por descarga atmosférica na linha externa de alimentação ou de sinal conectada com a instalação (Fonte S3)	47
2.2.4 - Danos causados por descarga atmosférica próxima à linha externa de alimentação ou de sinal conectada com a instalação (Fonte S4)	50
2.3 - Exemplos de aplicação	52
2.3.1 - Caso 1 - Estação de telecomunicações com torre de 100m	53
2.3.2 - Caso 2 - Estrutura horizontalizada com grandes dimensões em planta	54
2.3.3 - Caso 3 - Estrutura verticalizada de grandes dimensões	56
2.3.4 - Caso 4 - Casa simples de 1 pavimento	58
2.4 - Conclusões do capítulo	60
CAPÍTULO 3 – TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM LAÇOS INTERNOS E EM LINHAS QUE ATENDEM EDIFICAÇÕES	61
3.1 - Técnicas de análise	61
3.1.1 - Domínio do tempo vs domínio da frequência	61
3.1.2 - Laço vs linha	61

3.1.3 - Campo elétrico vs Campo Magnético	62
3.2 - Tensões e correntes induzidas em laços internos de edificações	63
3.2.1 - Aspectos Qualitativos	64
3.2.2 - Tensão induzida em um laço aberto	66
3.2.3 - Corrente induzida em um laço em curto-circuito	68
3.2.4 - Tensão e corrente induzidas em um laço com carga	69
3.2.5 - Metodologia da NBR 5419-4	74
3.3 - Tensões e correntes induzidas em linhas que atendem edificações	75
3.3.1 - Os campos indutores	76
3.3.2 - Tensões e correntes induzidas em linhas aéreas	78
3.3.3 - Tensões e correntes induzidas em condutores enterrados	81
3.3.4 - Tensões e correntes induzidas em cabos blindados	83
3.3.5 - Surtos esperadas no interior de edificações	83
3.3.5.1 - Estimativa de surtos em linhas de baixa tensão	84
3.3.5.2 - Estimativa de surtos em linhas de telecomunicações	86
3.4 - Conclusões do capítulo	89
CAPÍTULO 4 – ATERRAMENTO, EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAIS E ISOLAMENTO	91
4.1 - Aterramento de sistemas elétricos	91
4.1.1 - Aterramento para a segurança pessoal	91
4.1.2 - Aterramento do neutro de transformadores	94
4.1.3 - Configurações de aterramento conforme a NBR 5410	96
4.2 - Aterramento para proteção contra descargas atmosféricas	100
4.2.1 - Prescrições da NBR 5419	100
4.2.2 - Impedância de aterramento	103
4.3 - Equalização de potenciais	107
4.3.1 - Equalizações no exterior de edificações	108
4.3.2 - Equalizações no interior de edificações	112
4.3.3 - Aterramento das blindagens de cabos que interligam edificações	116
4.4 - Isolamento	118
4.4.1 - Isolamento entre partes internas e o SPDA	118
4.4.2 - Interfaces de isolamento	120
4.5 - Conclusões do capítulo	122
CAPÍTULO 5 – BLINDAGEM DA EDIFICAÇÃO, CABOS BLINDADOS E REDUÇÃO DE LAÇOS	123
5.1 - Conceitos básicos de blindagem eletromagnética	123
5.2 - Blindagem da edificação	126
5.2.1 - Premissas consideradas	126
5.2.2 - Descargas que atingem pontos próximos da edificação	127
5.2.3 - Descargas que atingem diretamente a edificação	129

5.2.4 - Volume seguro para a instalação de equipamentos	133
5.3 - Uso de cabos blindados	133
5.3.1 - Modo comum e modo diferencial	133
5.3.2 - Impedância de transferência	134
5.3.3 - Terminações da blindagem	137
5.4 - Arranjo da fiação reduzindo laços	141
5.5 - Conclusões do capítulo	142
CAPÍTULO 6 – CORRENTES QUE CIRCULAM NOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS INSTALADOS NA EDIFICAÇÃO	143
6.1 - Descargas diretas que incidem na edificação (S1)	144
6.1.1 - Correntes nos DPS devido ao acoplamento resistivo	144
6.1.1.1 – Edificação alimentada pela linha aérea de baixa tensão	144
6.1.1.2 – Influência de tubulações metálicas enterradas	148
6.1.2 - Correntes nos DPS devido à indução nos cabos internos da edificação	150
6.2 - Descargas próximas da edificação (S2)	152
6.3 - Descargas diretas nas linhas que atendem à edificação (S3)	153
6.4 - Descargas próximas das linhas que atendem a edificação (S4)	156
6.4.1 - Correntes induzidas nos cabos da linha aérea de energia elétrica	157
6.4.2 - Correntes induzidas nos cabos aéreos blindados de telecomunicações	160
6.4.3 - Correntes induzidas nos cabos blindados enterrados que alimentam a edificação	162
6.5 - Síntese e análise dos valores calculados	164
6.6 - Valores de correntes propostos nas NBR 5419 e NBR 5410	165
6.7 - Conclusões do capítulo	168
CAPÍTULO 7 – DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS)	170
7.1 - O que é e como funciona um DPS	170
7.2 - Componentes de um DPS	173
7.2.1 – Centelhadores	174
7.2.2 - Varistores	175
7.2.3 – Diodos	176
7.2.4 - DPS híbrido ou combinado	176
7.2.5 - Outras tecnologias de componentes de proteção	177
7.3 - Instalação de DPS	178
7.3.1 - Onde instalar um DPS	178

7.3.2 - Como instalar um DPS	179
7.3.2.1 - Comprimento dos cabos de conexão	179
7.3.2.2 - Laço a jusante do DPS	180
7.3.2.3 - Reflexão de onda	180
7.3.3 - Esquemas de instalação de DPS	182
7.4 - Classes de DPS	183
7.5 - Principais parâmetros de um DPS	185
7.5.1 - Tensão máxima de operação contínua (U_c)	185
7.5.1.1 - Linhas de energia elétrica	185
7.5.1.2 - Linhas de telecomunicações	186
7.5.2 - Tensão de proteção (U_p)	187
7.5.3 - Corrente impulsiva (I_{imp})	187
7.5.4 - Corrente nominal (I_n)	187
7.5.5 - Corrente máxima de descarga (I_{max})	188
7.5.6 - Corrente subsequente que o DPS é capaz de interromper (I_{β}) sem operar o desligador	188
7.5.7 - Suportabilidade ao curto-circuito (I_{scpr})	188
7.6 - DPS Multiproteção	189
7.7 - Conclusões do capítulo	191
CAPÍTULO 8 – INSTALAÇÃO DE DPS EM EDIFICAÇÕES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE	193
8.1- Introdução	193
8.2 - Os produtos CLAMPER	194
8.3 - Uma casa	195
8.3.1 - Casa com sistema TN-C	196
8.3.2 - Casa com sistema TN-S e sem SPDA externo	199
8.3.3 - Casa com sistema TN-S e com SPDA externo	200
8.4 - Um prédio de 20 andares	202
8.4.1 - Proteção das instalações de baixa-tensão	202
8.4.2 - Proteção das instalações de telecomunicações	203
8.4.3 - Proteção da antena de televisão	205
8.5 - Fotografias de instalações típicas	205
8.6 - Conclusões do capítulo	206
CAPÍTULO 9 - PROTEÇÃO DE REDES DE BAIXA TENSÃO, SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES E PLANTAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E EÓLICA	207
9.1 - Redes de distribuição de energia em baixa tensão	207
9.2 - Rede de telefonia fixa e de comunicação de dados através de pares metálicos	210

9.2.1 - Prédio da estação de telecomunicações	210
9.2.1.1 - Sistema de energia	211
9.2.1.2 - Distribuidor geral	212
9.2.2 - Armário ótico	213
9.3 - Estações rádio base de telefonia móvel celular	215
9.3.1 - Sistema de energia	215
9.3.2 - Balizamento	216
9.3.3 - Cabos coaxiais e guias de onda conecta dos às antenas da torre	216
9.3.4 - Linhas de telecomunicações	217
9.4 - Sistema de geração fotovoltaico	217
9.4.1 - Sistema de geração fotovoltaico de pequeno porte	217
9.4.1.1 - Proteção contra descargas atmosféricas indiretas	218
9.4.1.2 - Instalação de painéis fotovoltaicos em edificação com SPDA externo isolado do sistema fotovoltaico	220
9.4.1.3 - Instalação de painéis fotovoltaicos em estrutura com SPDA externo conectado aos painéis fotovoltaicos	222
9.4.2 - Planta de geração fotovoltaica de grande porte	223
9.4.3 - Tipos de conexões para os DPS instalados no lado CC do sistema de geração	225
9.4.3.1 - Sistemas com os dois polos isolados	225
9.4.3.2 - Sistemas com um dos polos aterrados	226
9.5 - Sistema de geração eólica	227
9.6 - Conclusões do capítulo	232
CAPÍTULO 10 – PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED, DUTOS DE ÓLEO E GÁS E SISTEMAS FERROVIÁRIOS	233
10.1 - Sistemas de iluminação LED	233
10.1.1 - Sistemas de iluminação pública LED	233
10.1.1.1 - Proteção contra descargas atmosféricas indiretas	234
10.1.1.2 - Proteção contra descargas atmosféricas diretas	235
10.1.2 - Sistema de iluminação interna LED	236
10.1.3 - Instalação e conexões	236
10.2 - Dutos de óleo e gás	237
10.2.1 - Proteção catódica	237
10.2.2 - Seleção de DPS para o retificador	238
10.2.3 - Seleção de DPS para a junta isolante	239
10.2.4 - Seleção de DPS para duto com indução de 60Hz em regime permanente	240
10.3 - Sistemas ferroviários	241
10.3.1 - Descrição dos sistemas de automação e sinalização ferroviários	241
10.3.2 - Linhas de energia	243
10.3.3 - Sistemas de sinalização ferroviária	244
10.3.3.1 - Sensor de descarrilamento – DD	244
10.3.3.2 - Circuito de via – CDV	246

10.3.3.3 - Máquina de chave	246
10.3.3.4 - Sinaleiros	248
10.3.3.5 - Instalação dos DPS nos abrigos que recebem os sinais da ferrovia	249
10.4 - Conclusões do capítulo	249

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Capítulo 1	251
Capítulo 2	252
Capítulo 3	252
Capítulo 4	254
Capítulo 5	255
Capítulo 6	255
Capítulo 7	256
Capítulo 8	256
Capítulo 9	257
Capítulo 10	257

ABREVIATURAS E SIGLAS

ADSL – linha digital assimétrica para assinante (*Asymmetric Digital Subscriber Line*);

AREMA – Associação Americana de Engenharia Ferroviária e Manutenção de Vias (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*);

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações;

BEL – barramento de equalização local;

BEP – barramento de equalização principal;

CA – corrente alternada;

CC – corrente contínua;

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais;

CLP – Controlador Lógico Programável;

CTP-APL – cabo telefônico de pares com isolamento termoplástico sólido, blindagem de fita de alumínio politenado e revestimento externo de polietileno na cor preta;

D1 – tipo de dano: ferimentos em seres vivos;

D2 – tipo de dano: danos físicos à estrutura;

D3 – tipo de dano: falhas em dispositivos eletroeletrônicos;

DPS – dispositivo de proteção contra surtos;

DSLAM – multiplexador de acesso a linha digital do assinante (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*);

ERB – Estação rádio base de telefonia celular;

Ethernet – protocolo de interconexão utilizado em redes locais;

FB – fator de blindagem (dB);

FC – fator de compensação (dB);

FDTD – Diferença Finita no Domínio do Tempo

(Finite-Difference Time-Domain); Fundação CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações;

GASMIG – Companhia de Gás de Minas Gerais;

grad – gradiente;

IEEE – Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*);

IEEE SPDC – Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – Comitê de dispositivos de proteção contra surtos (*Institute of Electrical and Electronic Engineers - Surge Protective Devices Committee*);

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;

IoT – internet das coisas (*internet of things*);

IT – esquema de aterramento onde todas as partes vivas são isoladas da terra ou um ponto da alimentação é aterrado através de impedância;

ITU-T – União Internacional de Telecomunicações – Setor de Normalização de Telecomunicações (*International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector*);

LED – diodo emissor de luz (*Light Emitting Diode*);

LAN – rede local (*Local Area Network*);

L1 – tipo de perda: perda de vida humana;

L2 – tipo de perda: perda de serviço ao público;

L3 – tipo de perda: perda de patrimônio cultural;

L4 – tipo de perda: perda de valor econômico;

MPS – medidas de proteção contra surtos induzidos por descargas atmosféricas;

MTBF – período médio entre danos (*Mean Time Between Faults*);

ABREVIATURAS E SIGLAS

N – cabo neutro;

NP I – nível de proteção “I”;

PE – condutor de proteção;

PEN – condutor que combina as funções de neutro e de fio de proteção;

PLC – Controlador Lógico Programável (*Programmable Logic Controller*);

PSpice – programa de simulação de circuitos eletroeletrônicos (*Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*);

PRBT – para-raios de baixa tensão;

PRMT – para-raios de média tensão;

PTR – ponto de conexão física da rede externa com a rede interna do assinante (ponto de terminação de rede);

QDG – quadro de distribuição geral;

QDC – quadro de distribuição de circuitos;

QDF – quadro de distribuição de força;

R, S, T – fases do sistema trifásico;

RJ45 – conector para cabo UTP/STP, normalmente utilizado para conexões Ethernet;

S1 – fonte de danos: descargas diretas na estrutura;

S2 – fonte de danos: descargas nas vizinhanças da estrutura;

S3 – fonte de danos: descargas diretas nas linhas que alimentam a estrutura;

S4 – fonte de danos: descarga nas vizinhanças das linhas que alimentam a estrutura;

SPDA – sistema de proteção contra descargas atmosféricas;

STP – cabo de par trançado blindado (*Shielded Twisted Pair*).

TIC - Tecnologia da Informação e Comunicação

TIDA – programa computacional para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas;

TINA TI – programa de simulação de circuitos eletroeletrônicos (*Toolkit for Interactive Network Analysis - Texas Instruments*);

TL – linha de transmissão (*Transmission Line*);

TN-C – esquema de aterramento onde as funções de neutro e proteção são combinadas em um único condutor;

TN-C-S – esquema de aterramento onde parte do sistema é TN-S e parte é TN-C;

TN-S – esquema de aterramento onde o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos;

TSI – tensão suportável de impulso atmosférico;

TT – esquema de aterramento que possui um ponto da alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodo de aterramento eletricamente distinto do eletrodo de aterramento da alimentação;

VDSL – linha digital de assinante com taxa de transmissão muito alta (*Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line*);

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas;

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;

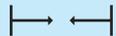
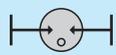
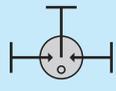
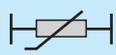
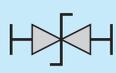
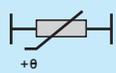
UTP – cabo de par trançado não blindado (*Unshielded Twisted Pair*).

VALE – empresa de mineração;

MRS – empresa ferroviária que opera a malha regional sul (MRS Logística);

WABTEC – Fabricação e Manutenção de Equipamentos Ferroviários Ltda.

TABELA DE SIMBOLOGIA

	Impedância		Aterramento		Protetor de sobrecorrente
	Resistência de aterramento		Centelhador		DPS
	Indutor		Centelhador bipolar a gás		DPS em estado de condução
	Resistor		Centelhador tripolar a gás		DPS Multiproteção
	Capacitor		Varistor		Fusível
	Fonte impulsiva		Diodo supressor		RELÉ
	Fonte senoidal		Termistor		Chave
	Transformador monofásico		Transformador		LED

PROTEÇÃO
DE EQUIPAMENTOS
ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS
CONTRA **SURTOS**
ELÉTRICOS
EM INSTALAÇÕES



DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

1.1 - A FORMAÇÃO DA DESCARGA

As descargas atmosféricas ocorrem em todas as regiões da Terra e são decorrentes do carregamento eletrostático de partículas em suspensão no ar.

A maior parte das descargas está associada com nuvens de chuva que são formadas por gotas de água, vapor de água e cristais de gelo que são carregados eletrostaticamente devido ao atrito e à fragmentação das gotas de água e de cristais de gelo que atingem maiores volumes (pulverização).

Em toda atividade atmosférica que envolve grandes movimentações de ar, tais como, erupções vulcânicas, tempestades, furacões e tornados é comum a ocorrência de descargas atmosféricas.

A zona tropical do planeta, região compreendida entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, Fig.1.1, é caracterizada por

temperatura ambiente alta e elevado índice de chuvas e tempestades, sendo a região de maior incidência de descargas atmosféricas.

Como o Brasil é o país de maior extensão territorial localizado na região tropical, ele é o campeão de incidência de descargas atmosféricas.

As cargas acumuladas na nuvem induzem cargas de sinal contrário na superfície do solo e um campo elétrico se forma entre a nuvem e o solo. Dentro da própria nuvem e entre nuvens próximas existem cargas de polaridades opostas acumuladas em diferentes regiões, gerando também campos elétricos de altas intensidades.

As descargas ocorrem quando os valores desses campos elétricos excedem o valor suportável pelo ar, levando à sua ionização. Como consequência, o ar que antes se comportava como um isolante passa a se comportar como um condutor, permitindo a circulação de cargas elétricas.

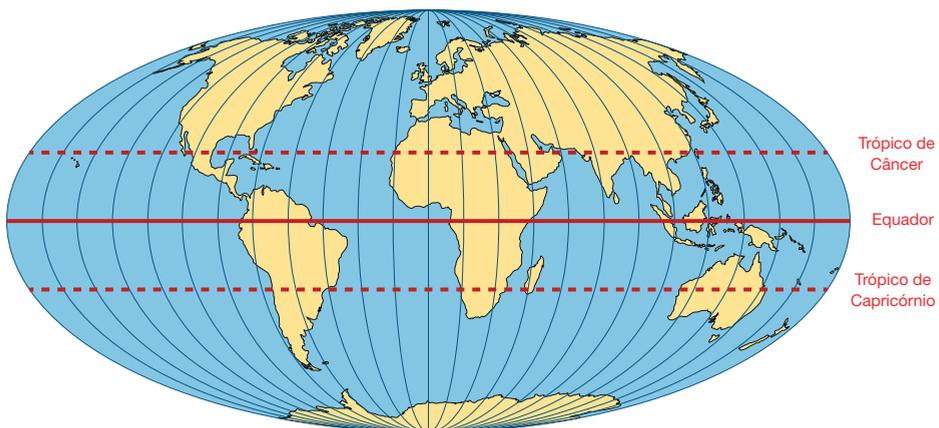


Fig.1.1 – A região tropical fica situada entre os Trópicos de Câncer e Capricórnio.

As descargas podem ocorrer dentro das nuvens, entre nuvens, da nuvem para o espaço e da nuvem para o solo, como pode ser visto na Fig.1.2.

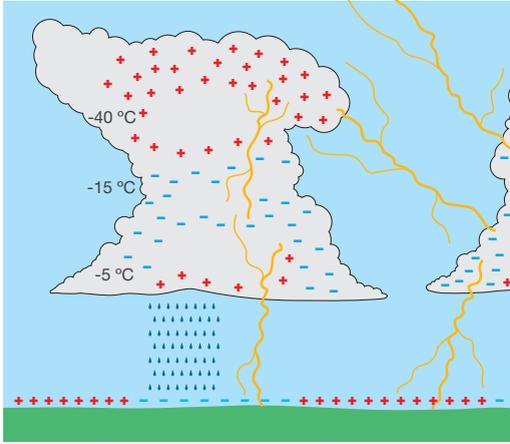


Fig.1.2- Diferentes tipos de descargas atmosféricas.

As distâncias envolvidas em uma descarga nuvem-solo são da ordem de centenas de metros e a ionização do ar se dá em etapas. Um trecho de ar de comprimento na faixa de 50 a 100m é ionizado, o processo é interrompido por alguns microssegundos e um novo trecho é ionizado. O trajeto formado apresenta diversas derivações, resultando em um canal ionizado semelhante a uma raiz. Esse canal é chamado de líder descendente. Quando a ponta da raiz se aproxima do solo, um segundo canal ionizado originado no solo avança em direção ao líder descendente e, ao se encontrarem, é inicia-

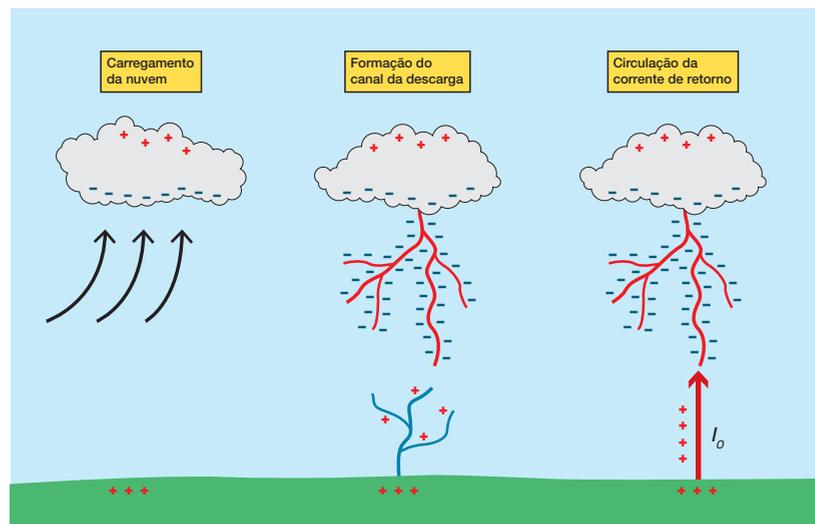
da a circulação de uma corrente intensa denominada corrente de retorno. Esse canal ionizado que se inicia no solo é chamado de líder ascendente.

A Fig.1.3 ilustra as principais etapas de uma descarga nuvem-solo, onde se observa o carregamento da nuvem, a formação do canal de descarga e a circulação da corrente de retorno. A descarga atmosférica pode começar na nuvem e se propagar em direção ao solo (descargas descendentes) ou pode começar no solo e se propagar em direção à nuvem (descargas ascendentes). Em terrenos planos, em geral, a descarga se inicia na nuvem e se propaga em direção ao solo. Em terrenos com elevações (montanhas) a descarga pode se iniciar nos pontos mais elevados e se propagar em direção à nuvem, conforme mostrado na Fig.1.4.

Quando o líder atinge o solo (no caso de uma descarga descendente) ou atinge a base da nuvem (no caso de uma descarga ascendente), um caminho condutor é formado entre a nuvem e o solo. Uma corrente de grande intensidade circula por este caminho, anulando a carga depositada no canal ionizado e parte da carga acumulada na nuvem. Antes da formação do canal ionizado, as correntes envolvidas são de baixa intensidade.

As descargas podem ser de polaridade negativa, quando a nuvem está carregada negativamente em relação à terra, ou de polaridade positiva, quando a nuvem está carregada

Fig. 1.3 - Principais etapas de uma descarga nuvem solo: carregamento da nuvem, formação do canal de descarga e circulação da corrente de retorno.



positivamente em relação à terra. Em Minas Gerais cerca de 77% das descargas nuvem-solo são de polaridade negativa [1]. A NBR 5419-1 [2] sugere a adoção de um percentual de 90% para as descargas de polaridade negativa se o local não for especificado.

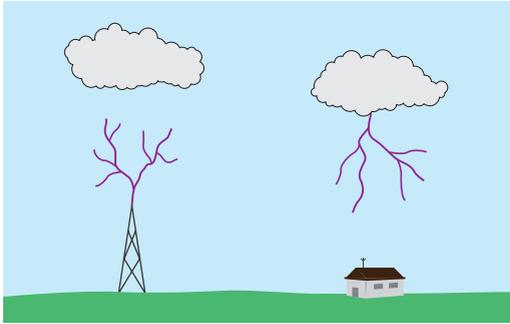


Fig.1.4 – Formação de descargas atmosféricas ascendente e descendente.

1.2 - O NÚMERO DE DESCARGAS PARA A TERRA

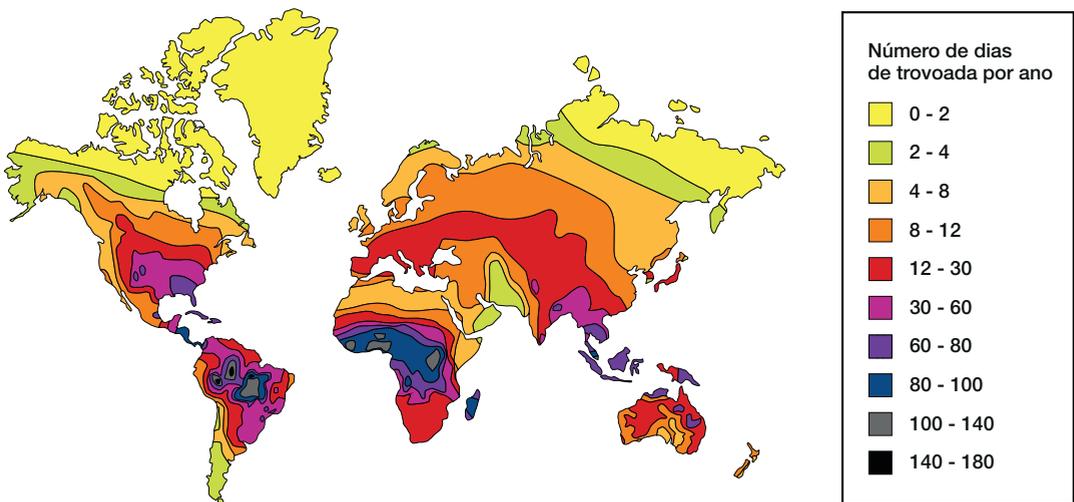
Os seres humanos detectam a ocorrência de uma descarga atmosférica através de dois sentidos, a visão e a audição. A descarga atmosférica produz uma grande luminosidade detectada pelo olho humano que é chamada de relâmpago e produz um grande ruído sonoro captado pelos ouvidos que é

chamado de trovão (que é o ruído provocado pela expansão do ar aquecido pela descarga). Uma forma de medir a quantidade de descargas atmosféricas que incide em uma determinada região é através do nível ceráunico. O nível ceráunico é o número de dias de trovoada que ocorre por ano em um dado local. Um mapa ceráunico mostra os níveis ceráunicos de uma dada região. A Fig.1.5 mostra o mapa ceráunico da Terra. Os dados da Fig.1.5 confirmam que as descargas atmosféricas são mais frequentes na região tropical do planeta.

Outra forma mais precisa para avaliar a atividade elétrica da atmosfera é através da utilização de sensores e antenas que captam a radiação eletromagnética emitida pela descarga. Neste caso, é medida a densidade de descargas para terra, que é o número de descargas que incidem por ano em um quilômetro quadrado. A Fig.1.6 mostra os valores das densidades de descargas para a terra no estado de Minas Gerais

A nova versão da NBR 5419-2 [3] traz mapas detalhados da densidade de descargas para a terra em todo o país. Os mapas são divididos por região e também podem ser acessados no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no endereço: www.inpe.br/webleat/ABNT_NBR5419_Ng.

Fig.1.5 – Mapa ceráunico mundial (número de dias de trovoada por ano). Figura disponível em várias publicações. Adaptação feita pelo autor.



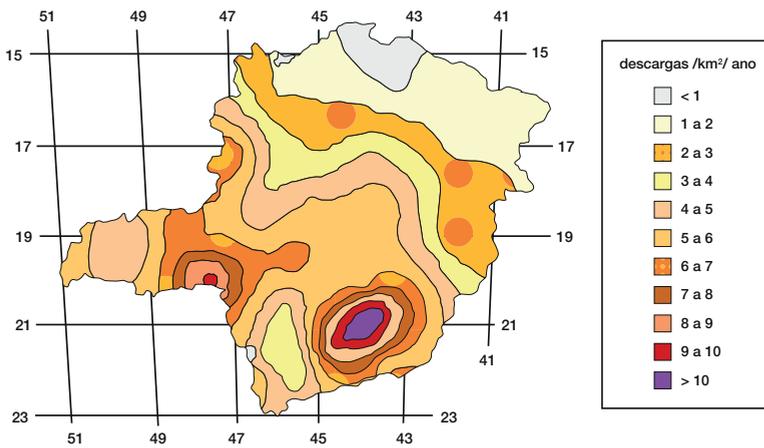


Fig.1.6- Mapa de densidade de descargas atmosféricas (descargas/km²/ano) obtidos por contadores de descargas. Base de dados: 1985 a 1995 (CEMIG). Adaptado de [1].

1.3 - A CORRENTE DA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Duas técnicas para a medição direta das correntes das descargas atmosféricas têm sido muito utilizadas. A primeira consiste na medição das correntes das descargas que incidem em torres ou edificações elevadas, que são equipadas com instrumentos especiais para realizar essas medições. A segunda é a utilização de foguetes que são disparados em direção a uma nuvem carregada, estendendo um fio de cobre fino entre a nuvem e um ponto no solo. Esta segunda técnica é conhecida pela sigla em inglês RTL (*Rocket Triggered Lightning*). A Fig.1.7. ilustra estas técnicas.

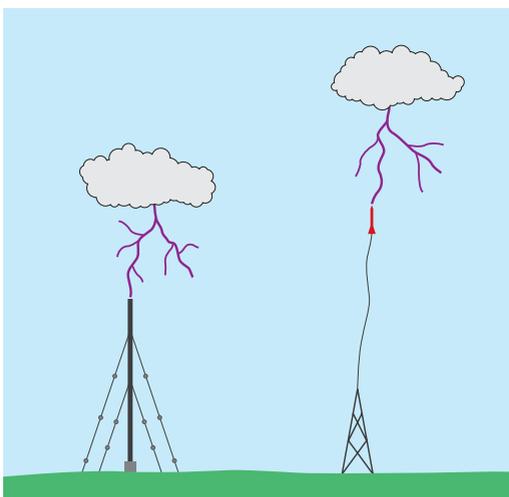


Fig.1.7-Técnicas para medição direta dos parâmetros de uma descarga atmosférica. Esquerda: Torre fixa instrumentada; Direita: Descargas iniciadas por foguetes.

Medições dos valores das correntes das descargas que incidem em edificações e torres elevadas começaram a ser feitas há bastante tempo e na década de 1930 foi iniciado um importante projeto de medição de correntes no Empire State Building [4], na época o edifício mais alto do mundo. Desde então, vários laboratórios foram instalados ao redor do planeta com o objetivo de medir a intensidade e a forma de onda das correntes de descarga atmosférica. Dentre outros locais, medições foram feitas em vários países europeus, nos EUA, no Canadá, no Japão, na China e na África do Sul. Na década de 1980, um desses laboratórios foi instalado em Minas Gerais pela CEMIG (Estação Morro do Cachimbo) [5] e continua em atividade. Dentre as diversas campanhas de medição com torres instrumentadas, destaca-se o trabalho desenvolvido por Berger no Monte San Salvatore - Suíça [6]. As medições de Berger constituem, ainda hoje o mais completo conjunto de dados sobre as descargas atmosféricas, como foi recentemente reconhecido pelo CIGRÉ [7].

A utilização de foguetes para iniciar descargas atmosféricas entre o solo e a nuvem começou a ser feita em Saint Privat D'Allier - França, na década de 1970 [8] e desde então vários campos de testes foram instalados ao redor do mundo, notadamente nos USA, México, Japão e China. De 2000 a 2008 um desses campos foi instalado no INPE de Cachoeira Paulista-SP, e um grande projeto de pesquisas foi realizado com participação de empresas francesas, canadenses e brasileiras, contando com a

participação da UNICAMP, da Fundação CPqD, da UFMG e do INPE [9]. As Figs.1.8 e 1.9 mostram uma descarga captada neste projeto.



Fig. 1.8 - Foguete lançado para iniciar uma descarga atmosférica no campo de testes do INPE em Cachoeira Paulista - SP.



Fig. 1.9 - Descarga iniciada por foguete no campo de testes do INPE em Cachoeira Paulista - SP.

Medições indiretas dos valores das correntes das descargas atmosféricas também são feitas. A partir da medição dos campos eletromagnéticos gerados pelas descargas, que são captados por antenas, é possível estimar o valor e a forma de onda das correntes de descarga. Se forem utilizadas várias antenas, é possível estimar o ponto de incidência das descargas através de técnica de triangulação. A Fig.1.10 mostra uma ilustração do primeiro destes sistemas que foi instalado em Minas Gerais pela CEMIG na década de 1980. A partir deste sistema pioneiro, a rede se expandiu e hoje o Sistema RINDAT (Rede Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas) fornece os pontos de incidência das descargas e também uma estimativa dos parâmetros da descarga. O sistema cobre hoje toda a região Sul e Sudeste e está sendo expandido para as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte [10].

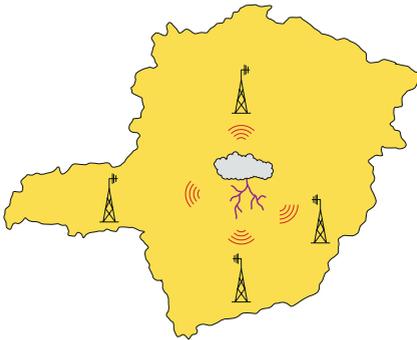


Fig.1.10- Ilustração do primeiro sistema de rastreamento de descargas atmosféricas instalado pela CEMIG em Minas Gerais na década de 1980 [1].

As medições realizadas mostram que é comum a ocorrência de várias descargas no mesmo canal ionizado (relâmpago). A primeira descarga geralmente é a de maior intensidade e é chamada de descarga principal. As demais componentes são chamadas de descargas subsequentes. As formas de onda típicas de uma descarga principal e das subsequentes são mostradas na Fig.1.11.

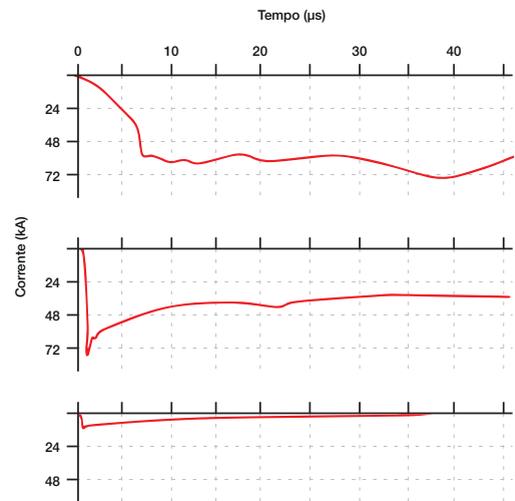


Fig.1.11 - Formas de onda típicas de uma descarga nuvem-solo de polaridade negativa. Primeira curva: descarga principal; segunda e terceira curvas: descargas subsequentes. Adaptado de [11 e 12].

Anderson e Erikson [11], após examinarem os valores medidos de intensidades de des-

cargas, propuseram os seguintes valores para a mediana e o desvio padrão para a descarga principal negativa:

MEDIANA = 31,1kA
DESVIO PADRÃO = 0,48kA.

É importante lembrar que a mediana corresponde ao valor acima do qual 50% das descargas são superiores e 50% são inferiores. No caso da descarga principal negativa, isso significa que 50% das descargas são superiores a 31,1kA e 50% são de valores inferiores a 31,1kA. Guimarães et al. [5], analisando apenas dados medidos em Minas Gerais, propõem um valor para a mediana da descarga principal negativa igual a 45kA, ou seja, um valor superior ao utilizado quando se considera as medições realizadas ao longo do planeta.

A partir dos valores medidos ao redor do mundo, Anderson e Erikson [11] propõem a expressão mostrada na Fig.1.12 para o cálculo da probabilidade de um valor de descarga ser excedido, válida para descargas principais negativas. Essa expressão é também recomendada [12] para estudos de proteção de redes e linhas de transmissão de energia elétrica. Pela expressão da Fig.1.12, a probabilidade de uma descarga ter um valor de corrente igual ou superior a 99kA é igual 5%. A tabela na Fig.1.12 mostra a distribuição de probabilidade acumulada de ocorrência de valores de pico das descargas principais negativas nuvem-sole. A NBR 5419-1 [2] propõe a Tabela 1.1 com valores de pico das correntes e as probabilidades associadas. Os valores da Tabela 1.1

apresentam pequenas diferenças em relação aos valores mostrados na Fig. 1.12.

Estas diferenças são devido ao fato de que os valores da Tabela 1.1 foram obtidos diretamente a partir de dados de medição e os da figura 1.12 a partir da expressão analítica aproximada.

TABELA 1.1 (ADAPTADA DA NBR 5419-1) - DESCARGAS PRINCIPAIS NEGATIVAS NUVEM-SOLO

Valor de pico da corrente (kA)	% de descargas com valores acima dos valores da primeira coluna
3	99
5	95
20	80
30	60
35	50
50	30
60	20
80	10
100	5

As formas de onda mostradas na Fig.1.11 são difíceis de serem reproduzidas em laboratório e a normas utilizam formas de onda mais simples, em geral denominadas de dupla exponencial (porque podem ser matematicamente representadas pela soma de duas expressões exponenciais) e que são facilmente geradas em laboratório. As Figs. 1.13 e 1.14 mostram formas de onda típicas geradas em laboratório com indicação dos principais parâmetros que caracterizam a forma de onda. Na Fig.1.13 a onda é mostrada numa escala de tempo longa para que a cauda da onda possa ser visualizada.

Valor de pico da corrente (kA)	% de descargas acima dos valores da primeira coluna
5	99
20	76
31	50
50	22
70	11
100	5

$$P(I_o \geq i_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_o}{31}\right)^{2,6}}$$

$P(I_o \geq i_o)$ é a probabilidade de que o valor de pico da corrente tenha um valor I_o que seja superior ao valor i_o

Fig.1.12 Probabilidade acumulada de ocorrência de valores de pico das descargas principais negativas nuvem-sole. Expressão retirada de [11].

Na Fig. 1.14 a onda é mostrada numa escala de tempo curta para que a frente de onda possa ser visualizada.

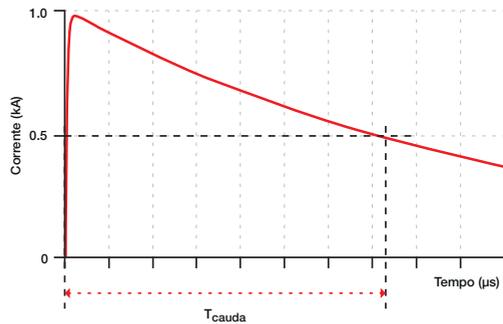


Fig. 1.13 – Onda de corrente que representa uma descarga atmosférica gerada em laboratório. A onda é mostrada numa escala de tempo longa para que a cauda da onda possa ser visualizada.

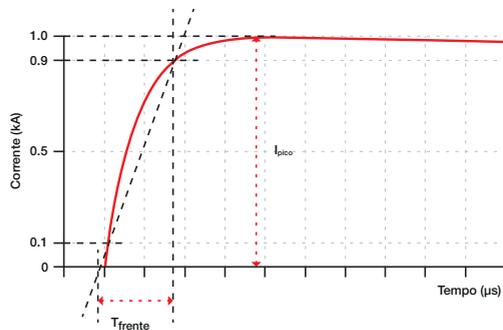


Fig. 1.14 – Onda de corrente que representa uma descarga atmosférica gerada em laboratório. A onda é mostrada numa escala de tempo curta para que a frente de onda possa ser visualizada.

Os principais parâmetros das ondas mostradas nas Figs. 1.13 e 1.14 são o valor de pico (I_{pico}), o tempo de frente de onda (T_{frente}) e o tempo de cauda de onda (T_{cauda}).

É comum que entre a descarga principal e as descargas subsequentes ocorra uma etapa de corrente contínua que pode durar um tempo longo (milissegundos).

A Fig. 1.15 ilustra a forma de onda da corrente de uma descarga completa constituída de uma descarga principal, uma etapa de longa duração (que engloba a cauda da corrente principal e a etapa de corrente contínua) e uma descarga subsequente. A onda da Fig. 1.15 é a onda de corrente que é utilizada no ensaio de aeronaves. Os aviões são regularmente atingidos por descargas atmosféricas e por razões de segurança os

ensaios realizados nas aeronaves são bastante rigorosos, procurando representar todas as etapas de uma descarga [13].

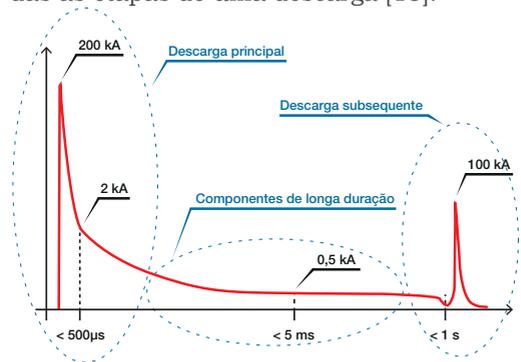


Fig. 1.15 – Ilustração da onda de corrente que representa uma descarga atmosférica completa. Os valores mostrados são os valores utilizados em ensaios de aeronaves. Adaptado de [13].

É interessante observar que a onda de corrente mostrada na Fig. 1.15 irá submeter a aeronave a três esforços distintos: o eletrodinâmico, o térmico e o eletromagnético.

De forma simplificada, pode se afirmar que os esforços eletrodinâmicos (ou seja, as forças de atração ou repulsão entre condutores que conduzem correntes) dependem do valor da corrente. Já os esforços térmicos dependem do valor da corrente e da sua duração e os esforços eletromagnéticos dependem da taxa de variação temporal da corrente.

Conforme será discutido em detalhes no Capítulo 2, a normalização brasileira de proteção contra descargas atmosféricas também utiliza um conjunto de ondas de corrente que representa todas as etapas da descarga, considerando todos os tipos de solicitação.

1.4 - OS RISCOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Aproximadamente cem pessoas são vitimadas por descargas atmosféricas por ano no Brasil. A grande maioria dos acidentes ocorre em áreas descampadas, onde as pessoas estão desabrigadas. Um grande acidente ocorreu em 2014 no litoral de São Paulo e vitimou nove pessoas, resultando em quatro óbitos [14].

Centenas de animais são mortos por descargas atmosféricas por ano no país. A maioria dos acidentes ocorre junto das cercas que utilizam arames metálicos, de modo

que as cercas e currais precisam ser protegidos contra os efeitos das descargas. A referência [15] apresenta soluções para a proteção de propriedades rurais contra descargas atmosféricas.

Um grande número de incêndios em edificações é iniciado por descargas atmosféricas. No caso de instalações que armazenam material combustível, as consequências podem ser catastróficas. Grande parte dos incêndios florestais também é iniciada por descargas atmosféricas.

Milhões de dólares são perdidos anualmente devido a queima de equipamentos elétricos e eletrônicos ao redor do mundo, conforme ilustrado na Fig.1.16. Numa sociedade cada vez mais dependente de equipamentos eletroeletrônicos, além dos custos financeiros, a perda de equipamentos traz uma série de transtornos para os usuários que ficam privados de serviços hoje considerados essenciais.

Sistemas de distribuição de energia elétrica e de combustíveis, hospitais, semáforos e serviços de telecomunicações, dentre outros, são serviços essenciais que podem deixar de operar devido às descargas atmosféricas. Conforme [16], cerca de 40% dos desligamentos que ocorrem nas redes de distribuição de energia elétrica são provocados por descargas atmosféricas.

1.5 - A PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os primeiros sistemas de proteção contra descargas atmosféricas baseados em observações experimentais e análises científicas datam de mais de 200 anos atrás. Benjamin Franklin publicou em 1753 um pequeno artigo sobre como proteger edificações contra as descargas atmosféricas [17].

Desde então, um grande número de estudos e pesquisas foram realizados e existem hoje metodologias de proteção que ainda não garantem 100% de proteção, mas que já atingem percentuais elevados de segurança. Muita ênfase se deu à proteção das pessoas e edificações e somente a partir da década de 1970 é que a proteção dos equipamentos eletrônicos e elétricos começou a ser mais estudada. Os equipamentos anteriores ao uso dos circuitos transistorizados e integrados eram bastante resistentes às sobretensões e por isso a proteção dos mesmos não era tarefa prioritária. Com a mudança de tecnologia e também devido à grande disseminação de equipamentos com circuitos integrados nas instalações industriais, comerciais e residenciais, surgiu a necessidade de desenvolver tecnologias para a proteção destes equipamentos contra as sobre tensões originadas pelas descargas atmosféricas.

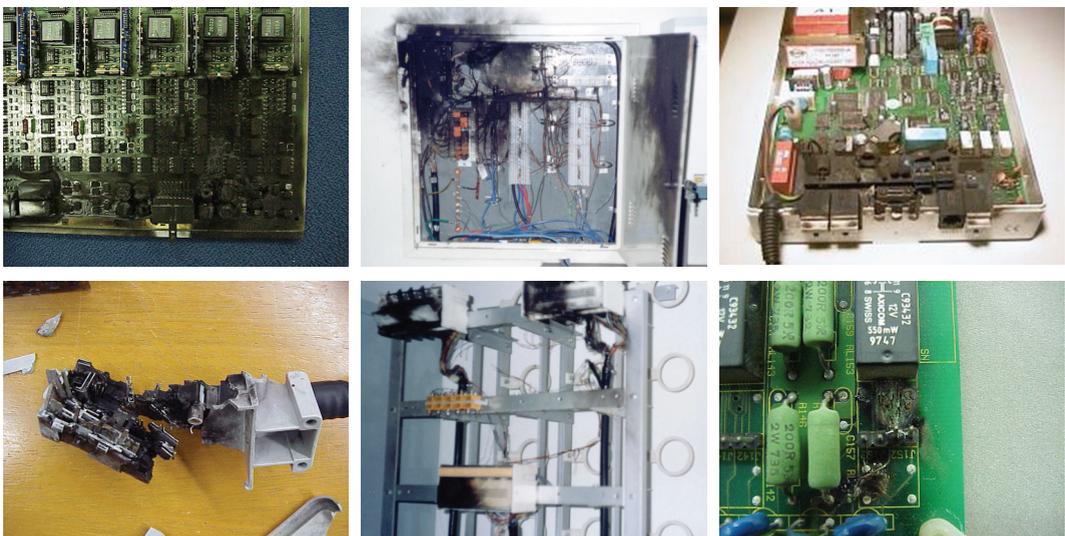


Fig. 1.16– Danos em equipamentos provocados por descargas atmosféricas.

No Brasil, a Norma Brasileira de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (NBR 5419) publicada em 2015 passou a incorporar uma parte específica sobre a proteção de equipamentos eletroeletrônicos instalados dentro de edificações. Antes disto, a Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão de 2004, NBR 5410 [18], já recomendava a instalação de dispositivos de proteção contra surtos (DPS) nas linhas de energia e de telecomunicações que alimentam edificações instaladas em regiões de atividade atmosférica significativa.

Não existe uma única tecnologia que garanta a proteção dos equipamentos. Na realidade, somente com a aplicação de uma série de medidas, coordenadas entre si, é possível atingir um patamar seguro de proteção. O objetivo deste livro é ajudar o leitor a definir o conjunto de medidas mais adequado para cada situação, tendo como base a sua fundamentação técnica e as recomendações das normas NBR 5410 e NBR 5419.

1.6 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formu-

ladas com base no exposto ao longo deste capítulo:

- ✓ Devido à sua grande extensão territorial e sua localização no planeta, o Brasil é um dos países com maior incidência de descargas atmosféricas;
- ✓ A descarga atmosférica é um dos fenômenos naturais que mais provoca mortes de pessoas e animais em todo o mundo e é responsável pelo desligamento de linhas de energia e de telecomunicações e também pela queima de equipamentos eletroeletrônicos;
- ✓ Os valores das correntes envolvidas em uma descarga são extremamente elevados, obrigando que linhas, estruturas e equipamentos sejam protegidos contra os efeitos das descargas;
- ✓ A adoção de um conjunto de medidas, devidamente coordenadas, permite atingir níveis seguros de proteção para os equipamentos eletroeletrônicos instalados nas edificações.

A NORMA BRASILEIRA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

CONCEITOS BÁSICOS E ANÁLISE DE RISCO

A norma brasileira NBR 5419 [1 a 4], revisada e reeditada em 2015, apresenta um conjunto de critérios a serem adotados para a proteção de edificações contra descargas atmosféricas. A norma é dividida em quatro partes conforme pode ser visto na Fig. 2.1.

A nova edição da norma é bastante completa e as duas maiores inovações estão nas partes 2 e 4 que tratam, respectivamente, da análise de riscos e da proteção de equipamentos e sistemas elétricos e eletrônicos internos.

O objetivo deste livro é analisar a proteção dos sistemas internos, portanto, será dado destaque à Parte 4. Como algumas das técnicas de proteção (projeto da malha de aterramento e SPDA interno) descritas na

Parte 3 são relevantes, elas também serão detalhadas. No tocante ao gerenciamento de riscos (Parte 2 da norma) serão analisados apenas os aspectos relativos aos riscos e danos às instalações eletroeletrônicas internas. A Parte 4 da norma basicamente analisa as MPS (Medidas de Proteção Contra Surtos) detalhadas na Fig. 2.2.

As interseções da NBR 5419 com a norma NBR 5410 de 2004 [2], que trata da proteção das instalações de baixa tensão também precisam ser analisadas, pois algumas medidas sugeridas são comuns às duas normas e outras são complementares. As maiores superposições são relativas ao aterramento, equipotencialização e à instalação de DPS (Fig. 2.3) e serão avaliadas nos Capítulos 4 e 6.

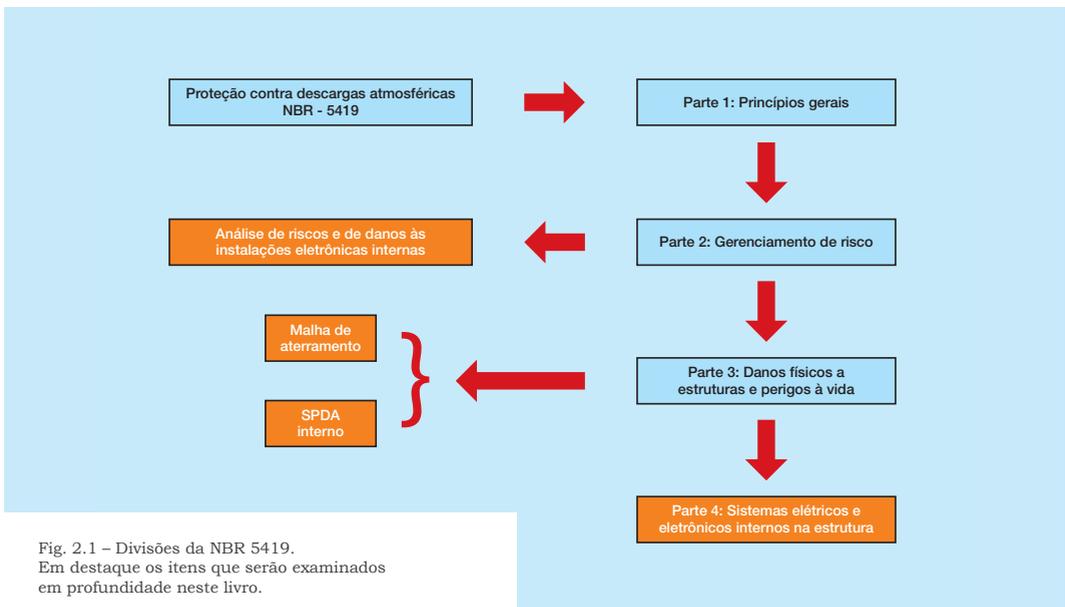


Fig. 2.1 – Divisões da NBR 5419. Em destaque os itens que serão examinados em profundidade neste livro.

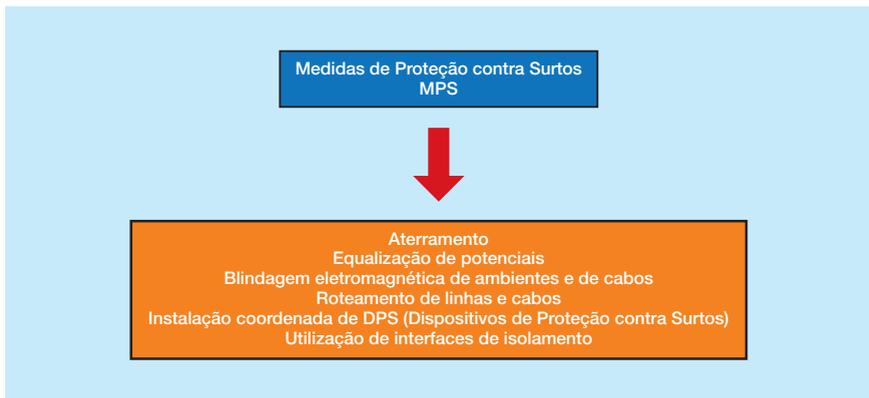


Fig. 2.2 –Medidas de proteção contra surtos (MPS).

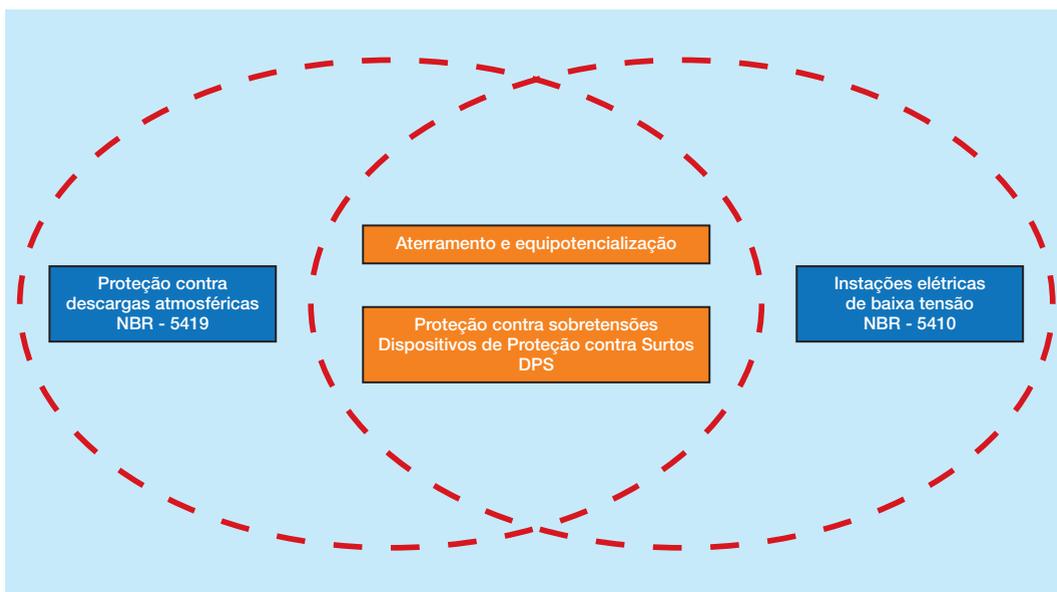


Fig. 2.3 – Pontos de interseção da NBR 5410 com a NBR 5419.

Um pequeno resumo das Partes 1 e 3 da NBR 5419 [1 e 3] é apresentado no Item 2.1. O Item 2.2 é um extrato da Parte 2 [2] referente à análise do risco de danos às instalações eletroeletrônicas internas, o qual é apresentado juntamente com alguns exemplos de aplicação que abrangem uma instalação de telecomunicações, uma indústria, um prédio e uma casa.

2.1 - PROTEÇÃO DE EDIFICAÇÕES - NBR 5419 PARTES 1 E 3

2.1.1 - PRINCÍPIOS GERAIS

A definição de critérios para a proteção de uma edificação contra descargas atmosféricas

deve considerar a proteção da edificação em si, das pessoas que estão dentro e no entorno e dos vários sistemas existentes nela (distribuição de água, gás, energia elétrica e telecomunicações).

Como possibilidades de interação das descargas com a edificação, devem ser consideradas as descargas diretas na edificação (fonte de danos S1), as descargas nas imediações da edificação (fonte de danos S2), as descargas diretas nas linhas de energia e telecomunicações que alimentam a edificação (fonte de danos S3) e as descargas nas vizinhanças das linhas de energia e telecomunicações (fonte de danos S4), conforme mostrado na Fig. 2.4.

Fig. 2.4
Fontes de danos
possíveis conforme
a NBR 5419.

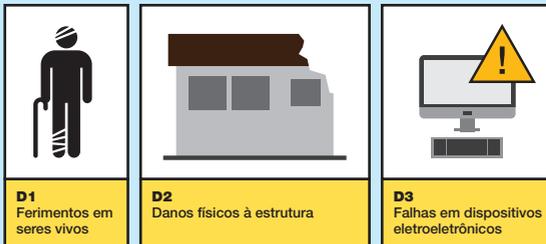
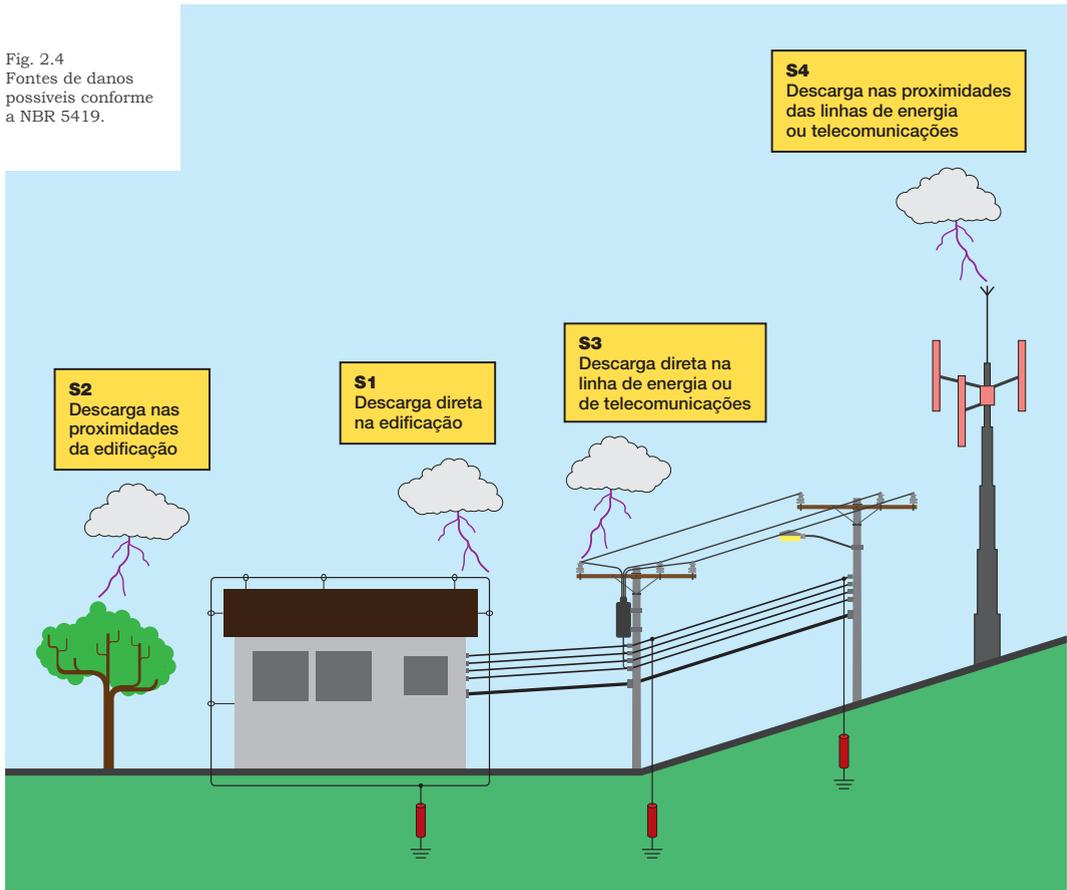


Fig. 2.5
Tipos de danos devido às descargas atmosféricas.

As quatro possibilidades de interação podem provocar os três tipos de danos mostrados na Fig. 2.4.

Os danos podem provocar perdas classificadas da forma mostrada na Fig. 2.6.



Fig. 2.6 - Tipos de perdas devido aos danos causados pelas descargas atmosféricas.

2.1.2 - AS CORRENTES DE DESCARGA

Para a execução dos projetos a norma sugere um conjunto de formas de onda e também uma série de valores máximos para os valores de pico das correntes de descarga a serem utilizados.

Para os estudos são sugeridas quatro formas de onda:

- ☑ Corrente com características de uma descarga principal de polaridade posi-

tiva (Fig. 2.7);

- ☑ Corrente com características de uma descarga principal de polaridade negativa (Fig. 2.8);
- ☑ Corrente com características de uma descarga subsequente de polaridade negativa (Fig. 2.9);
- ☑ Corrente com características da descarga de corrente contínua de longa duração (Fig. 2.10).

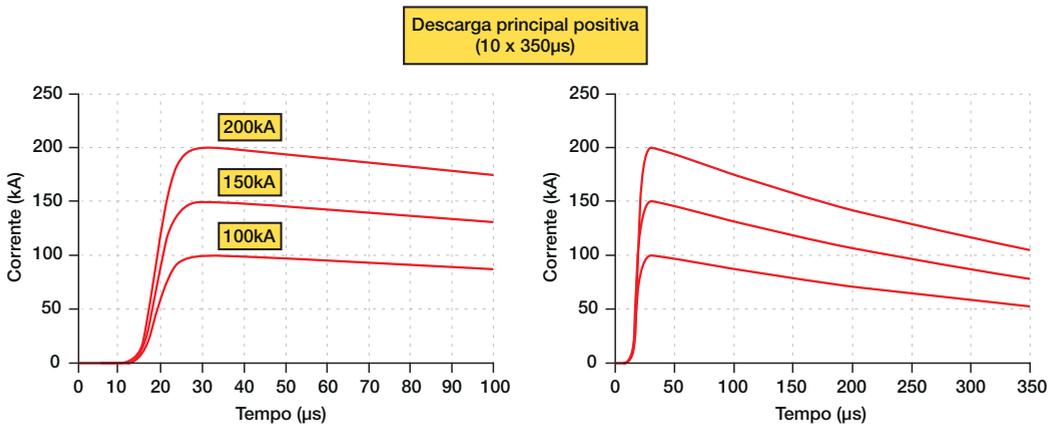


Fig. 2.7 - Onda de corrente com características de uma descarga principal de polaridade positiva, tempo de frente igual a 10µs e tempo de cauda igual a 350µs.

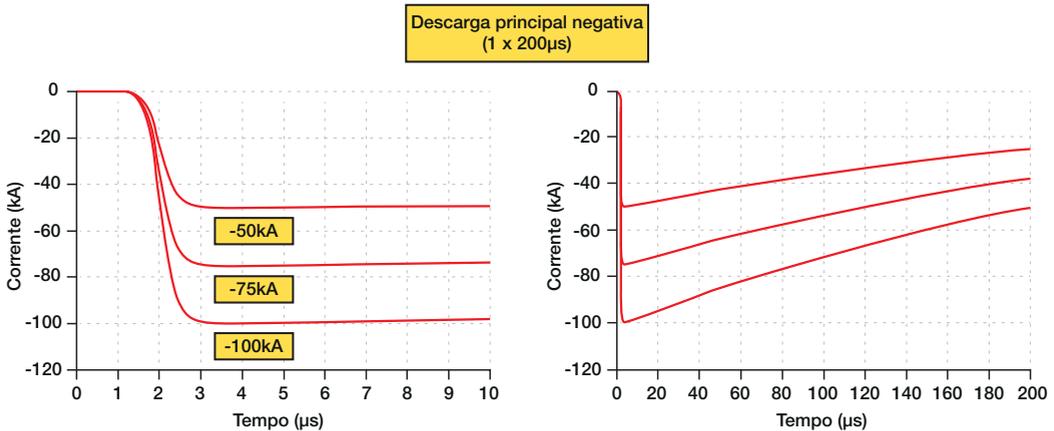


Fig. 2.8 - Onda de corrente com características de uma descarga principal de polaridade negativa, tempo de frente igual a 1µs e tempo de cauda igual a 200µs.

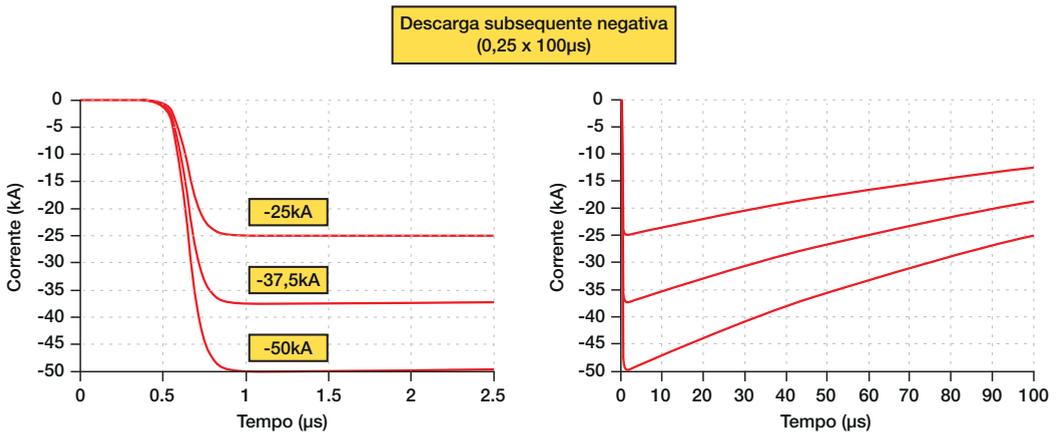


Fig. 2.9
Onda de corrente com características de uma descarga subsequente de polaridade negativa, tempo de frente igual a 0,25µs e tempo de cauda igual a 100µs.

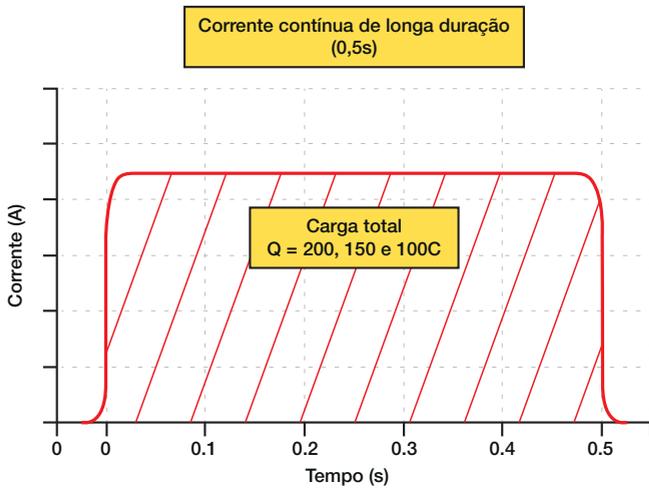


Fig. 2.10 - Onda de corrente com características da etapa de corrente contínua.

A norma fornece expressões analíticas para representação das ondas de corrente mostradas nas Figs, 2.7 a 2.9. A Fig. 2.11 mostra as expressões.

Parâmetros	Descarga principal positiva	Descarga principal negativa	Descarga subsequente negativa
I_0 (kA)	200 - 150 - 100	100 - 75 - 50	50 - 37,5 - 25
k	0,93	0,986	0,993
T_1 (µs)	19	1,82	0,454
T_2 (µs)	485	285	143

Fig. 2.11 - Expressão analítica para representação das ondas de corrente da descarga. Expressão retirada de [1].

$$I(t) = \frac{I_0}{k} \frac{(t/T_1)^{10}}{1+(t/T_1)^{10}} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

2.1.3 - OS NÍVEIS DE PROTEÇÃO

A norma define quatro níveis de proteção e para cada nível são recomendados valores máximos e mínimos das correntes de descarga. Os valores máximos são utilizados para o projeto e definição das bitolas dos condutores, espessura de telhas e chapa metálicas, capacidade de condução de corrente dos DPS, valores dos campos magnéticos e distâncias de separação. Os valores mínimos são utilizados para a determinação dos raios das esferas rolantes que serão utilizadas para o projeto do SPDA e para definição das zonas de proteção.

O Nível I garante uma proteção mais efetiva e o Nível IV proporciona uma proteção menos efetiva. A Tabela 2.1 mostra os níveis de proteção e os valores de pico máximos das correntes utilizados para os estudos relativos aos esforços térmicos, eletrodinâmicos e eletromagnéticos. As formas de onda das correntes são as mostradas no item anterior.

Para os estudos relativos à eficiência do sistema de captação das descargas a norma sugere, dentre os métodos normatizados, a utilização do método da esfera rolante como o mais indicado.

O método da esfera rolante é utilizado para definir se uma descarga que se aproxima de uma edificação irá atingir um ponto do

SPDA externo ou se atingirá um ponto desprotegido da estrutura (Fig. 2.12).

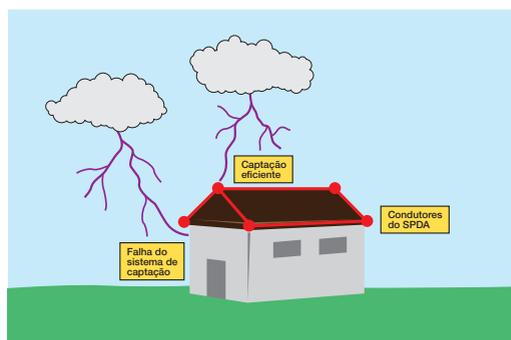


Fig. 2.12 – Falha do sistema de captação.

O método é derivado do chamado modelo eletrogeométrico. Neste modelo, é considerado que a descarga se forma em etapas devido ao fato de que a distância nuvem-solo é muito grande para ser ionizada de uma única vez.

Para uma descarga descendente, a mesma se inicia na base da nuvem e se propaga em direção ao solo, em etapas. Quando se aproxima de um objeto aterrado, um canal ionizado se inicia no objeto e avança em direção ao canal que vem da nuvem e, ao se encontrarem, o processo de circulação da corrente de retorno ou da descarga propriamente dita é iniciado. Esse canal ionizado que se inicia no solo é denominado líder as-

TABELA 2.1

Valores de pico das correntes de descarga utilizados para os estudos de proteção relativos aos esforços térmicos, eletrodinâmicos e eletromagnéticos

CORRENTE PRINCIPAL POSITIVA				
PARÂMETROS	Níveis de proteção			
	I	II	III	IV
VALOR DE PICO (kA)	200	150	100	100
CORRENTE PRINCIPAL NEGATIVA				
VALOR DE PICO (kA)	100	75	50	50
CORRENTE SUBSEQUENTE NEGATIVA				
VALOR DE PICO (kA)	50	37,5	25	25
CORRENTE CONTÍNUA DE LONGA DURAÇÃO				
CARGA TOTAL (C)	200	150	100	100

cedente. A distância entre a ponta do canal que vem da nuvem e a ponta do objeto aterrado, no momento em que se inicia a formação do líder ascendente é denominada raio de atração da estrutura.

O raio de atração é função do valor de pico da corrente da descarga, conforme mostrado na expressão da Fig. 2.13.

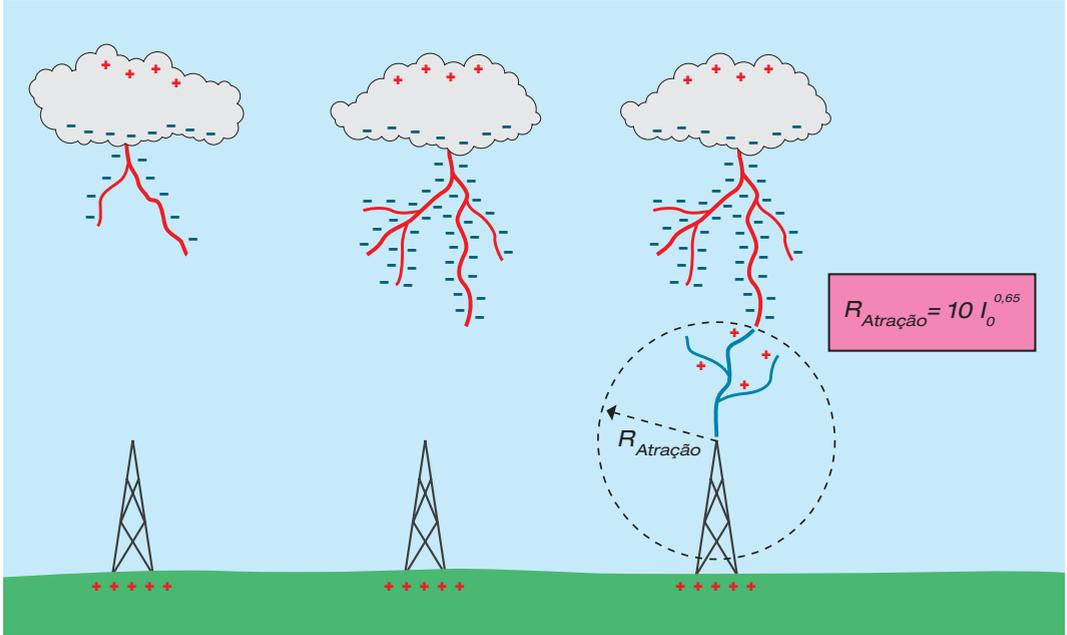


Fig. 2.13 – Modelo eletrogeométrico. Definição do raio de atração de uma estrutura.

A Fig. 2.14 mostra uma edificação e, através de um corte, as esferas relativas a dois valores de corrente com raios r_{E1} e r_{E2} .

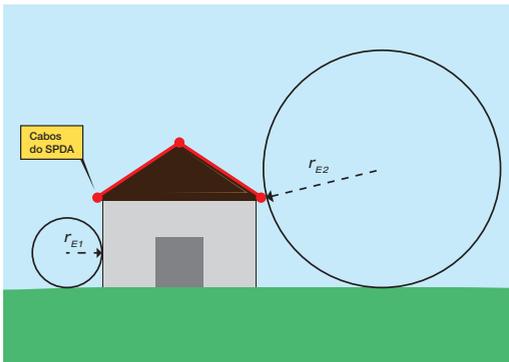


Fig. 2.14 – Edificação e duas esferas rolantes relativas a dois valores diferentes de corrente. A esfera de raio r_{E1} corresponde a uma corrente de valor menor do que a corrente relativa à esfera de raio r_{E2} .

Na Fig. 2.15 a esfera de raio r_{E2} ao rolar sobre a edificação toca apenas nos captores do SPDA, não tocando em nenhum ponto da edificação. Já na Fig. 2.16, a esfera de raio r_{E1} rola sobre a edificação e toca na edificação em pontos onde não se tem captores do SPDA. Isso significa que, nesse caso, o sistema de captação falhou e a edificação pode ser atingida diretamente.

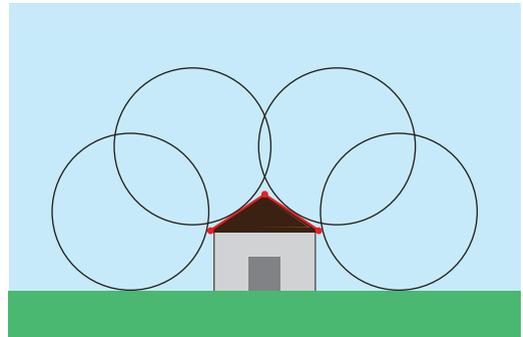


Fig. 2.15 – Esfera que ao rolar sobre a edificação só toca nos captores do SPDA. Para o valor de corrente associado a essa esfera, o sistema de captação funciona eficientemente.

Para o valor de corrente associado à esfera mostrada na Fig. 2.16, o SPDA precisa ser melhorado para que seja eficiente. A Fig. 2.17 mostra um novo SPDA que atua de forma eficiente.

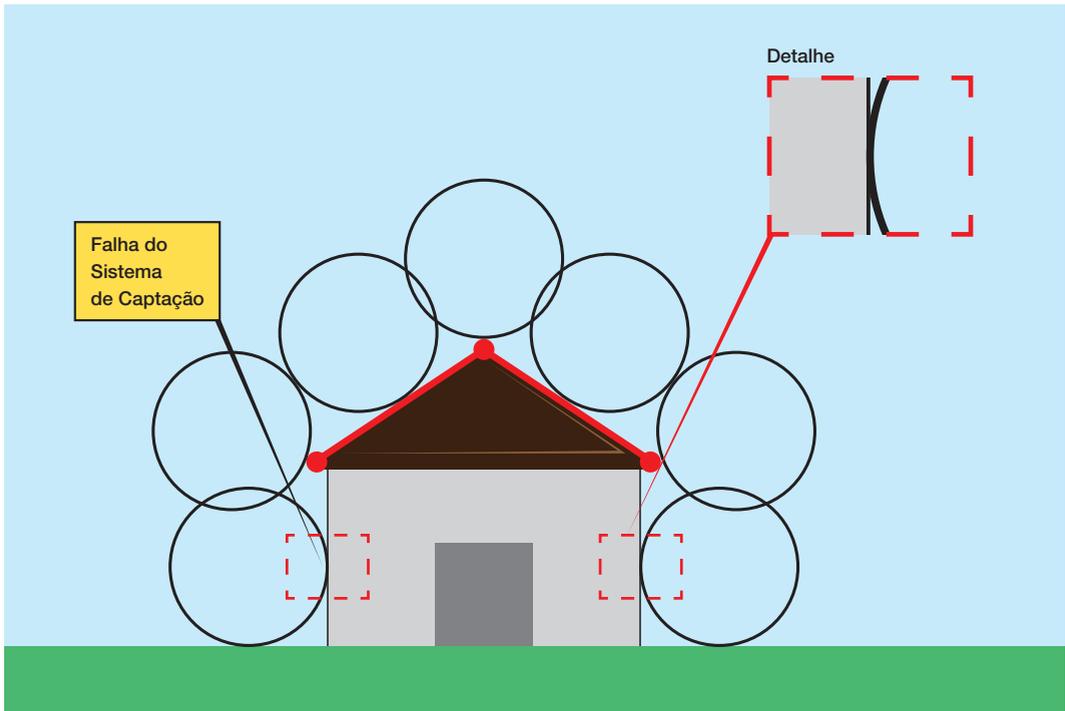


Fig. 2.16 – Esfera que ao rolar sobre a edificação toca em pontos da mesma onde não existem captores do SPDA. Para o valor de corrente associado a essa esfera, o sistema de captação não funciona eficientemente.

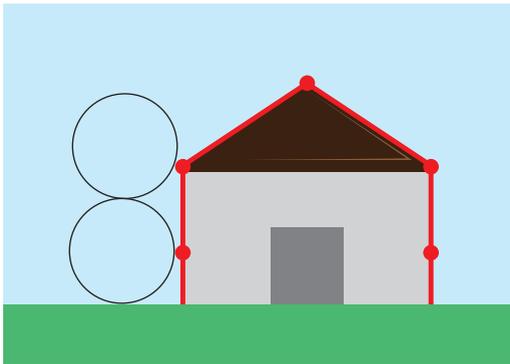


Fig. 2.17 – O novo SPDA, com reposicionamento dos captores, funciona de forma eficiente.

Voltando aos níveis de proteção, para os estudos relativos ao raio de atração das estruturas são sugeridos na norma quatro valores de pico para as correntes e, consequentemente, quatro valores para os raios da esfera rolante, mostrados na Tabela 2.2. Como visto anteriormente, quanto maior o grau de proteção, menor é o valor de corrente considerado.

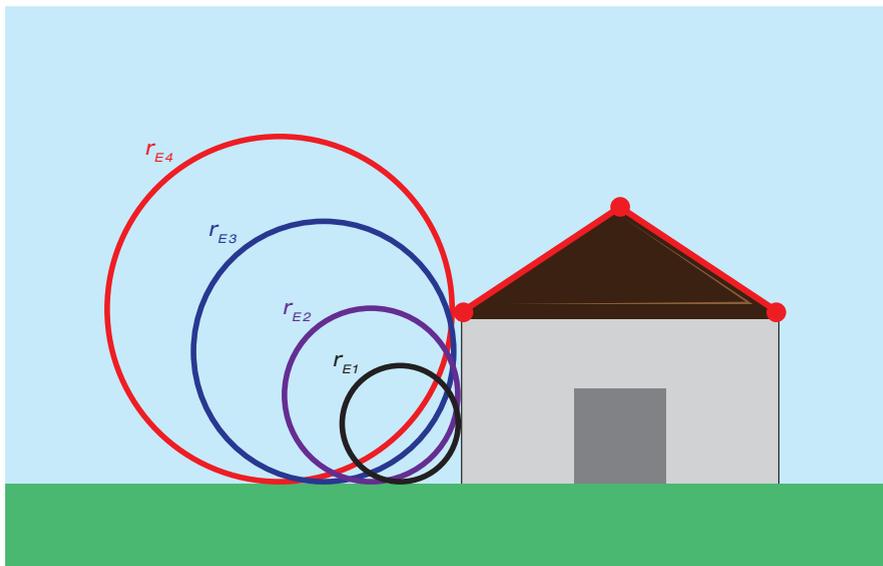
O valor de corrente considerado para o Nível I é igual a 3 kA. Somente 1% das descargas terão valores inferiores a este valor.

A Fig. 2.18 ilustra os raios das esferas rolantes propostos na norma. Na figura as relações entre os raios são as mesmas mostradas na Tabela 2: $r_{E1} = 0,33 r_{E4}$, $r_{E2} = 0,50 r_{E4}$, $r_{E3} = 0,75 r_{E4}$.

TABELA 2.2

Valores de pico das correntes de descarga utilizados para o cálculo dos raios das esferas rolantes utilizadas nos projetos

PARÂMETROS	Níveis de proteção			
	I	II	III	IV
VALOR DE PICO (kA)	3	5	10	16
RAIO DA ESFERA (M)	20	30	45	60



2.1.4 - O SPDA EXTERNO

O SPDA externo consiste na instalação de condutores metálicos envolvendo a edificação de modo a interceptar a descarga, evitando que a mesma atinja a edificação. Este conjunto de condutores é ligado a um sistema de aterramento (via condutores de descida), constituído de condutores enterrados, que se encarrega de dissipar a corrente da descarga pelo solo (Fig.2.19).

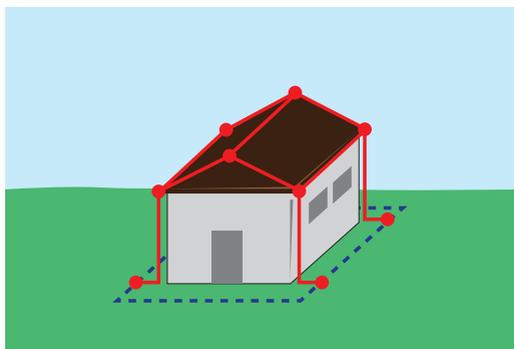


Fig. 2.19 – SPDA constituído de condutores para a interceptação da descarga que são ligados na malha de aterramento para dissipação da corrente no solo.

A corrente da descarga se divide entre os condutores do SPDA externo. Essa divisão de correntes será importante nos estudos relativos aos campos magnéticos que atingem o interior da edificação. A norma caracteriza essa divisão de correntes utili-

zando um fator denominado k_c . O fator k_c é mostrado na Fig. 2.20 para alguns arranjos de SPDA. Na norma são apresentados arranjos mais complexos de SPDA com a respectiva divisão de correntes.

Para que não ocorram centelhamentos entre as partes metálicas da edificação e entre essas partes metálicas e os condutores do SPDA é promovida uma equalização de potências, através da interligação de todas as partes metálicas.

É comum se fazer a observação de que interligar os condutores por onde flui a corrente de descarga com a tubulação de distribuição de gás é algo perigoso, pois a interligação fará com que parte da corrente da descarga circule nos canos de gás e isso poderá iniciar um incêndio. Realmente, a interligação irá fazer com que parte da corrente da descarga circule pela tubulação, que tem paredes grossas, dimensionadas para suportar a circulação dessa corrente. Por outro lado, se a interligação não for feita, poderá ocorrer um centelhamento entre a tubulação e os condutores do SPDA.

O centelhamento nada mais é do que a formação de um arco voltaico entre os dois metais (condutores do SPDA e tubulação) e a temperatura do arco elétrico é muito elevada, podendo atingir valores acima de 5000°C, basta lembrar que a solda elétrica

nada mais é do que a utilização de um arco voltaico para fundir metais e fazer a solda. Portanto, se um arco é formado entre os condutores do SPDA e a tubulação de gás, a chance de que ocorra a perfuração da tubulação e um incêndio seja iniciado é muito alta.

Se os sistemas estiverem interligados, as chances são muito menores. A interligação só não precisa ser feita se a distância entre os dois sistemas for muito grande (alguns metros), pois as tensões desenvolvidas pela

corrente de descarga podem ser da ordem de centenas de milhares de volts, podendo provocar centelhamentos de grandes comprimentos. A situação descrita é ilustrada nas Figs. 2.21 e 2.22.

Esse raciocínio feito para tubulação de gás vale para os demais sistemas (redes de água, energia elétrica, comunicação, etc.) que possuam partes metálicas, embora nesses casos o risco de incêndio dependa da presença de material combustível nas imediações do arco elétrico.

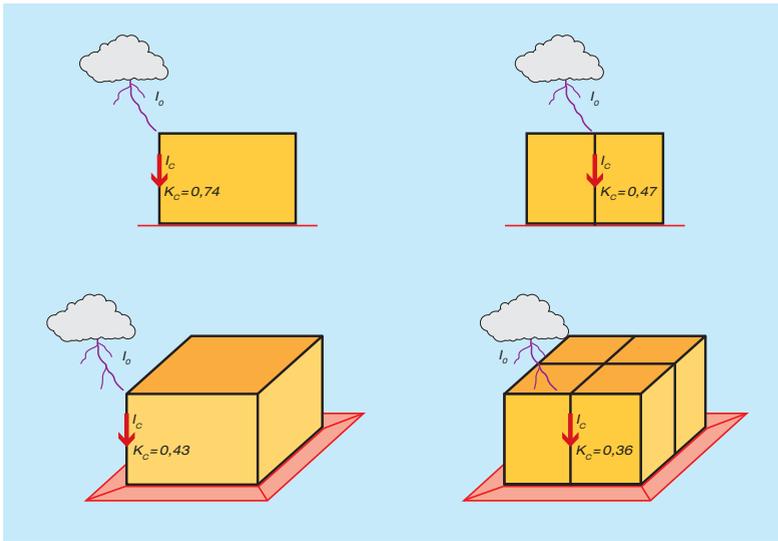


Fig. 2.20
Divisão de correntes pelos condutores do SPDA externo. A divisão de correntes é caracterizada pelo fator k_c . Adaptado de [3].

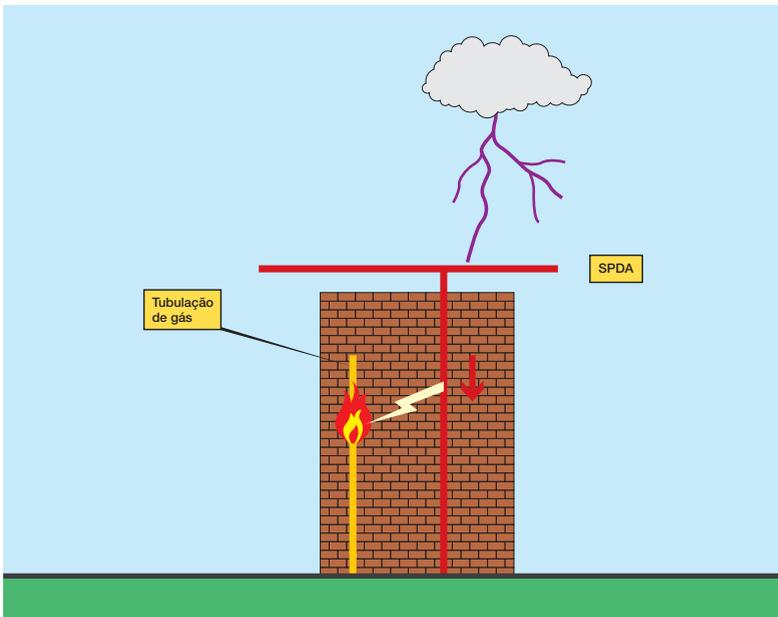
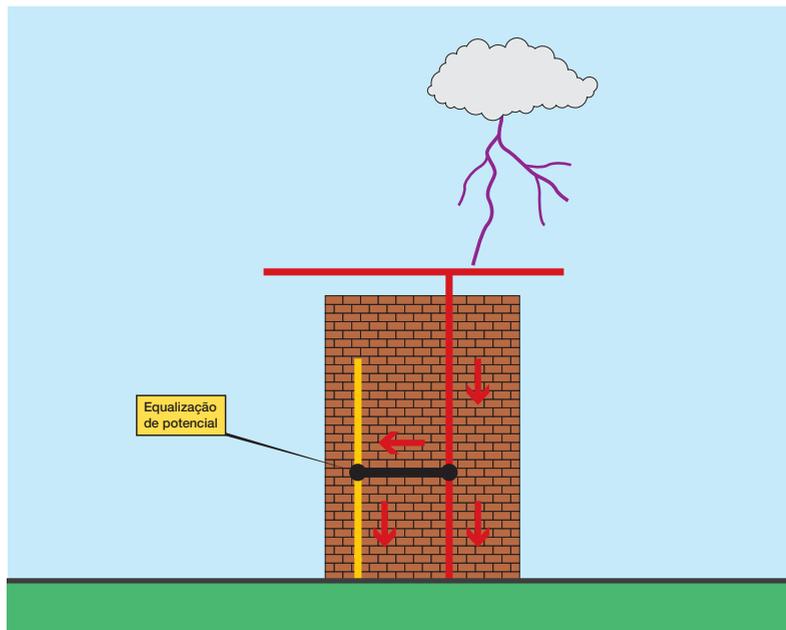


Fig. 2.21
Centelhamento entre tubulação de gás e condutor do SPDA externo. O centelhamento ocorre devido à falta de equalização entre a tubulação e o SPDA.

Fig. 2.22
A equalização de potencial evita o centelhamento entre a tubulação de gás e o condutor do SPDA externo.



A equalização de potencial é uma das técnicas mais importantes para a proteção da edificação, das pessoas e dos equipamentos e, se por alguma razão a equipotencialização não puder ser feita, é necessário que seja mantida uma distância de segurança entre as partes internas e o SPDA externo.

Uma alternativa, na inviabilidade de se fazer a equipotencialização direta ou de se manter uma distância de segurança garantindo o isolamento, é realizar a equipotencialização através de DPS com capacidade de condução de corrente e energia compatíveis com a corrente esperada no ponto. No Capítulo 4 este assunto será tratado em detalhes.

2.1.5 - AS ZONAS DE PROTEÇÃO

A proteção contra surtos é baseada no conceito de Zonas de Proteção contra Raios (ZPR), onde a severidade do surto é compatível com a suportabilidade dos sistemas internos existentes. Um projeto de proteção baseado na norma NBR 5419 é desenvolvido de forma que as delimitações de sucessivas ZPR se caracterizem por significativas mudanças na severidade do surto.

A fronteira de uma ZPR é definida pelas medidas de proteção empregadas no projeto. A Fig.2.23 apresenta uma estrutura dotada de

SPDA com as ZPR 0_a , ZPR 0_b , ZPR 1 e ZPR 2.

As ZPR são definidas na NBR 5419 [4] como:

☺ ZPR 0 - zona externa à estrutura onde a ameaça é devido à não atenuação do campo eletromagnético da descarga atmosférica e onde os sistemas internos podem estar sujeitos às correntes de surto totais ou parciais. A ZPR 0, com base no modelo eletrogeométrico, é subdividida em:

✓ ZPR 0_A - zona onde a ameaça é devido à descarga atmosférica direta e a totalidade do campo eletromagnético gerado pela descarga;

✓ ZPR 0_B - zona protegida contra as descargas atmosféricas diretas, mas onde a ameaça é causada pela totalidade do campo eletromagnético.

☺ ZPR 1, ZPR 2, ZPR n: zonas internas à estrutura onde as correntes de surto são limitadas, podendo ou não ter o campo eletromagnético limitado.

Em geral:

☺ ZPR 1: zona onde a corrente de surto é limitada pela distribuição das correntes e interfaces isolantes e/ou por DPS ou

2.2 - ANÁLISE DE RISCOS E DE DANOS ÀS INSTALAÇÕES ELETOELETRÔNICAS INTERNAS

Serão tratadas neste item as inovações descritas na Parte 2 da NBR 5419 [2], enfocando o risco de danos em equipamentos elétricos e eletrônicos internos à estrutura. O leitor que já possui algum conhecimento prévio sobre as técnicas de proteção contra descargas atmosféricas pode, facilmente, entender o que será descrito a seguir e, nos próximos capítulos, ele poderá aprofundar e refinar seus conhecimentos sobre as técnicas utilizadas. Entretanto, para o leitor que não possui informações sobre as técnicas de proteção, é recomendável que faça uma leitura prévia dos Capítulos 4, 5 e 6, onde são descritas em detalhes as medidas de proteção contra surtos que serão utilizadas para a avaliação dos riscos.

Características específicas tais como dimensões físicas da edificação, quantidades e arranjos físicos das linhas metálicas que adentram a instalação, densidade de descargas atmosféricas na região, valor da resistividade do solo, existência de laços de indução, etc, definem quais fontes de danos têm mais peso nos riscos associados às descargas atmosféricas. Em termos práticos, enfocando a possibilidade de danos em equipamentos elétricos e eletrônicos pelas descargas atmosféricas, está-se lidando com o Dano D3 (falhas em dispositivos eletroeletrônicos). Verifica-se que, em princípio, qualquer uma das quatro fontes (S1, S2, S3 e S4) pode ser sua causadora. A fonte que mais contribui para os danos dos equipamentos elétricos e eletrônicos depende das características da estrutura e dos serviços metálicos entrantes (rede de alimentação elétrica, rede de telecomunicação, de controle, etc.).

O risco na NBR 5419-2 é definido como o valor relativo a uma provável perda anual média. A NBR 5419-2 calcula o risco multiplicando três parâmetros, a saber:

- ☑ Número de eventos perigosos em um ano;
- ☑ Probabilidade de um destes eventos danificar os sistemas eletroeletrônicos;

- ☑ A perda consequente deste dano.

O produto entre o número de eventos perigosos em um ano e a probabilidade de um destes eventos danificar os sistemas eletroeletrônicos fornece o número de danos por ano. Invertendo-se esse número, obtém-se o período médio entre danos nos sistemas eletroeletrônicos, também conhecido pela sigla MTBF (*Mean Time Between Faults*).

Pode-se então avaliar, para cada fonte (S1, S2, S3 ou S4), o período entre danos nos sistemas eletroeletrônicos para uma dada configuração de projeto de SPDA, permitindo ao projetista uma avaliação crítica das medidas de proteção mais adequadas para o aumento desse período com o menor investimento. A seguir é feita uma análise da contribuição de cada fonte de danos.

2.2.1 - DANOS CAUSADOS POR DESCARGA ATMOSFÉRICA DIRETA NA ESTRUTURA (FONTE S1)

A fonte S1 acopla muita energia à instalação, pois trata-se de uma fonte de corrente. Basicamente, a Fonte S1 produz transitórios que podem danificar os equipamentos internos de duas formas:

- ☑ A parcela de corrente da descarga que trafega pelos condutores de descida do SPDA externo gera campos magnéticos variantes no tempo que, quando atravessam os laços internos formados pelas redes elétricas e eletrônicas que se interligam aos equipamentos, induzem surtos nas mesmas;
- ☑ A elevação de tensão do aterramento da instalação atinge um patamar aproximadamente igual ao produto da corrente da descarga que penetra o aterramento por sua impedância. Esta tensão acaba sendo aplicada aos serviços metálicos entrantes (transferência de potencial). Em outras palavras, a corrente da descarga se divide entre a malha de aterramento da edificação e os cabos e tubulações metálicas que adentram a edificação. As parcelas de corrente que circulam pelos cabos das redes de energia e de telecomunicação geram surtos que podem atingir os equipamentos internos.

O número de eventos que causam danos nos equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S1 (E_{S1}) é obtido conforme mostrado na Fig. 2.24.

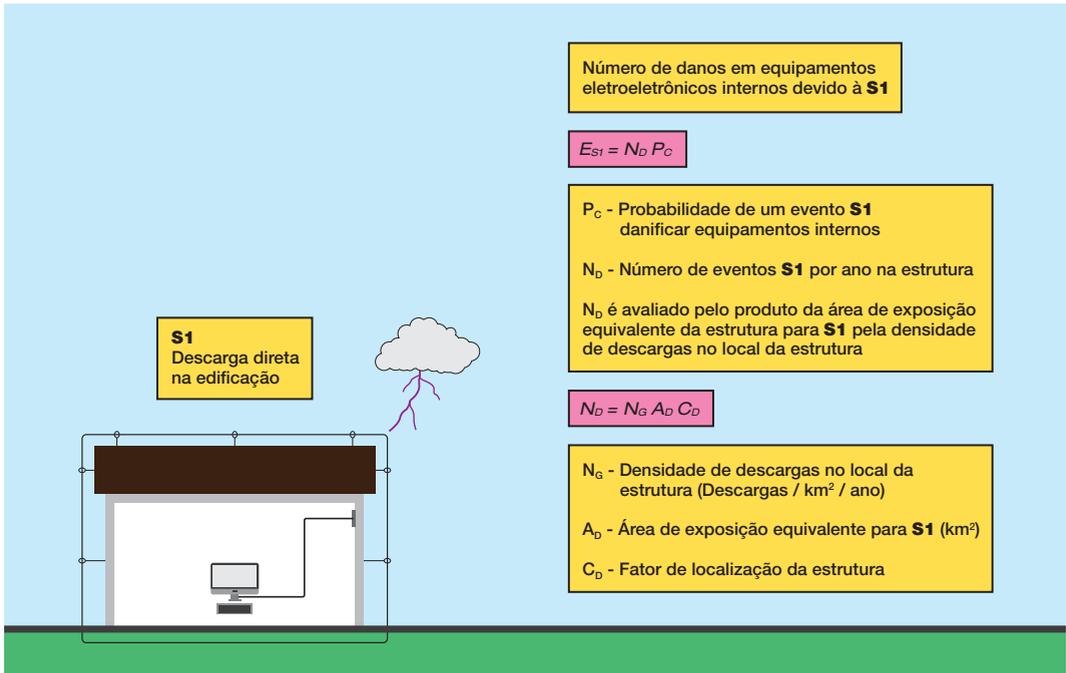


Fig. 2.24 - Número de danos em equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S1 (E_{S1}).

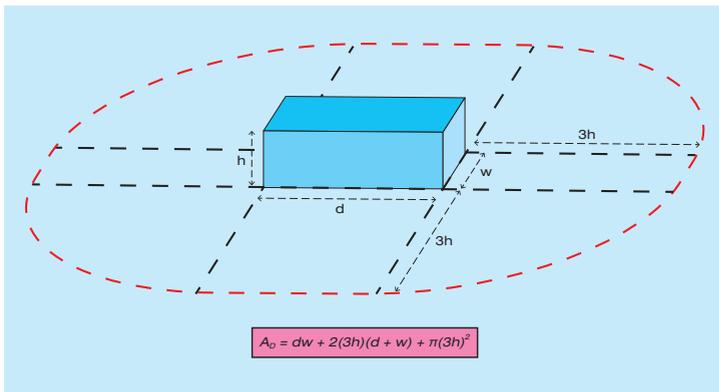


Fig. 2.25 - Área equivalente para estruturas simples para cômputo do número de eventos S1. Adaptado de [2].

No cômputo de A_D a altura da estrutura tem muito peso. Em estruturas simples, calcula-se a área da estrutura planificada, multiplicando-se por três a sua altura (Fig. 2.25).

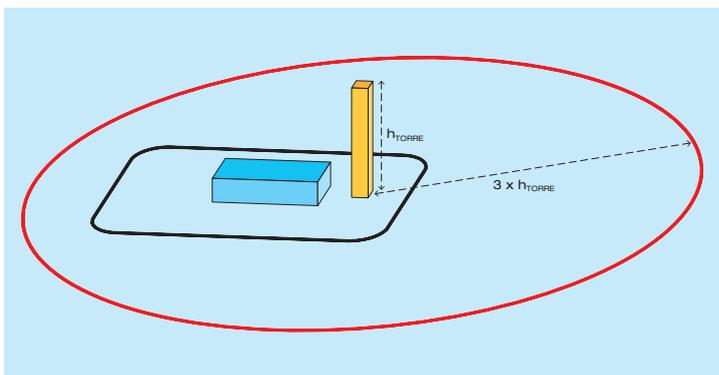


Fig. 2.26 - Área equivalente para estruturas com partes mais elevadas para cômputo do número de eventos S1. Adaptado de [2].

Em estruturas complexas com partes distintas, com alturas e geometria distintas, avalia-se a interação gráfica das áreas conforme Fig. 2.27.

O parâmetro C_D , que corresponde ao fator de localização da estrutura, é obtido na Tabela 2.3 (Tabela A.1 da Parte 2 da norma).

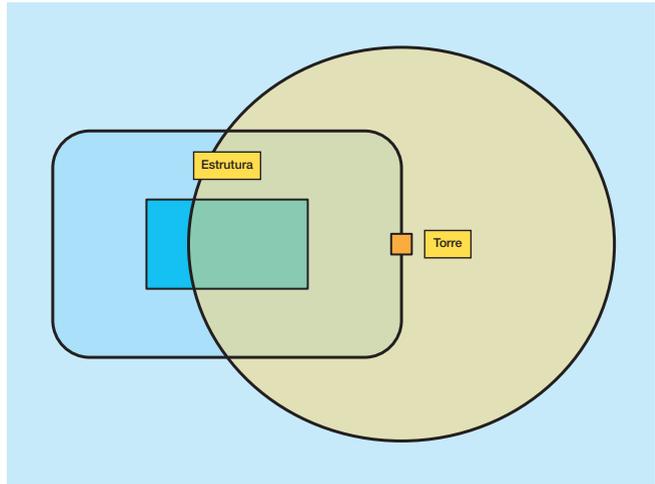


Fig. 2.27 - Área equivalente para estruturas com partes mais elevadas considerando interação de áreas para cômputo do número de eventos S1. Adaptado de [2].

TABELA 2.3	
Fator de localização da estrutura C_D (Tabela A.1 da NBR 5419-2)	
LOCALIZAÇÃO RELATIVA	C_D
Estrutura cercada por objetos mais altos	0,25
Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos	0,5
Estrutura isolada, nenhum outro objeto nas vizinhanças	1
Estrutura isolada no topo de uma colina ou monte	2

O cálculo de P_c (probabilidade de um evento S1 danificar equipamentos internos) é mostrado na Fig. 2.28. O parâmetro P_{DPS} está indicado na Tabela 2.4 (Tabela B.3 da norma) transcrita abaixo.

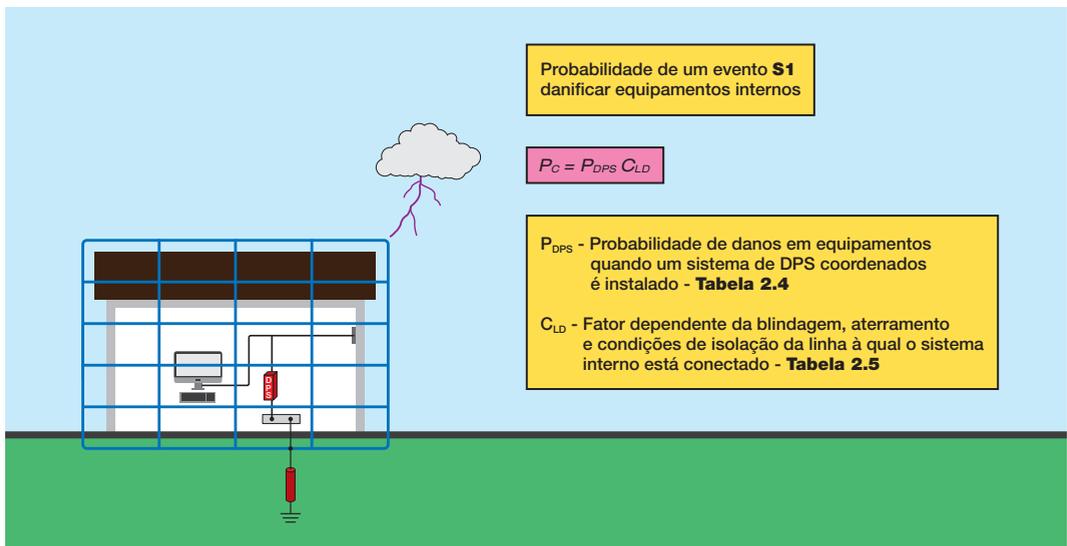


Fig. 2.28 - Probabilidade de um evento S1 danificar equipamentos internos (P_c).

Verifica-se que adquire valores de 1 (nenhuma redução na probabilidade de dano) considerando a instalação sem DPS a 0,01 (redução de cem vezes), caso exista um sistema de DPS coordenados para o Nível de Proteção I.

de S1 danificar equipamentos internos também se torna zero. A condição para zerá-lo é atender simultaneamente a três requisitos:

TABELA 2.4 Valores de probabilidade de PDPS em função do NP para o qual os DPS foram projetados (adaptado da Tabela B-3 da NBR 5419-2)	
NÍVEL DE PROTEÇÃO	P_{DPS}
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
III-IV	0,05
II	0,02
I	0,01
DPS especial*	0,005 - 0,001

* DPS com características melhores de proteção (maior corrente nominal, menor tensão de proteção) comparados com os requisitos definidos para o NP I.

Já o parâmetro C_{LD} indicado na Tabela 2.5 (Tabela B4 da norma) tem valores iguais a zero ou a 1. Sendo zero, a probabilidade P_C

- ☑ Sistemas internos blindados;
- ☑ Cabo protegido contra descargas atmosféricas ou cabeamento em dutos para cabos protegido contra descargas atmosféricas, eletrodutos metálicos ou tubos metálicos;
- ☑ Conexão na entrada da estrutura com blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento.

Caso os sistemas internos não sejam blindados e não sejam conectados a linhas externas (sistemas independentes); ou sejam conectados a linhas externas por meio de interfaces isolantes; ou sejam conectados a linhas externas constituídas de cabo protegido contra descargas atmosféricas; um sistema coordenado de DPS não é necessário para reduzir P_C , desde que a tensão induzida não seja maior que a tensão suportável U_w do sistema interno.

TABELA 2.5 Valores dos fatores C_{LD} (descargas diretas) e C_{LI} (descargas indiretas) (Tabela B.4 da NBR 5419-2)			
TIPO DE LINHA EXTERNA	CONEXÃO NA ENTRADA	C_{LD}	C_{LI}
Linha aérea não blindada	Indefinida	1	1
Linha enterrada não blindada	Indefinida	1	1
Linha de energia com neutro multiaterrado	Nenhuma	1	0,2
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,3
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem não interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0,1
Linha enterrada blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Linha aérea blindada (energia ou sinal)	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	1	0
Cabo protegido contra descargas atmosféricas ou cabeamento em dutos para cabos protegido contra descargas atmosféricas, eletrodutos metálicos ou tubos metálicos	Blindagem interligada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento	0	0
Nenhuma linha externa	Sem conexões com linhas externas (sistemas independentes)	0	0
Qualquer tipo	Interfaces isolantes de acordo com a ABNT 5419-4	0	0

Nota: Os valores de C_{LD} referem-se aos sistemas internos blindados; para sistemas internos não blindados $C_{LD}=1$.

O período entre danos em equipamentos internos devido a S1 é mostrado na Fig. 2.29.

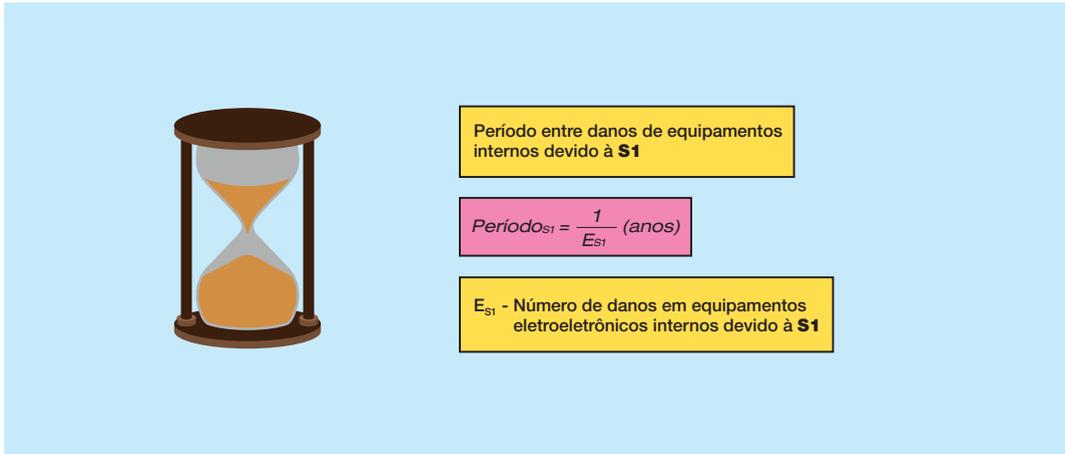


Fig. 2.29 –Período médio entre danos em equipamentos internos devido a S1.

Este período é fortemente dependente da altura da estrutura e do NP utilizado para especificação dos DPS. Considerando uma instalação clássica de telecomunicações dotada de torre muito alta, tem-se o gráfico mostrado na Fig. 2.30. Para a situação considerada com altura de torre de 50 m, ter-se-ia um período entre falhas de 1,4; 28;

71 e 142 anos para instalação sem DPS e com DPS coordenado com NP III/IV, II e I, respectivamente.

Caso a torre tivesse altura de 80 m, os períodos passariam a ser de 0,6; 11; 28 e 55 anos para instalação sem DPS e com DPS coordenado com NP III/IV, II e I, respectivamente.

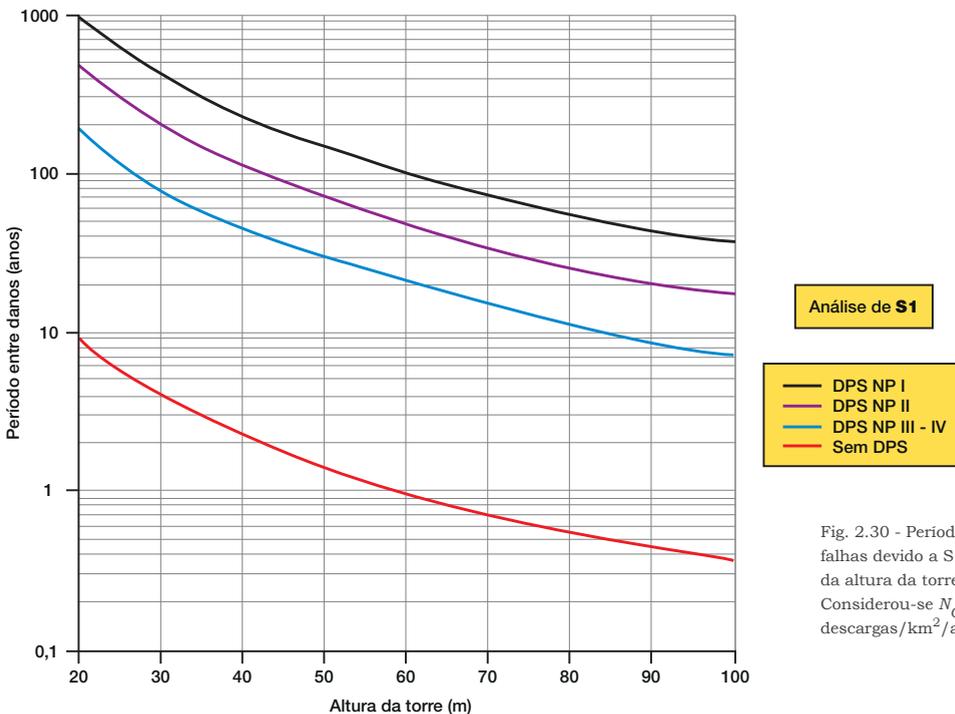


Fig. 2.30 - Período entre falhas devido a S1 em função da altura da torre e de P_{DPS} . Considerou-se $N_G = 10$ descargas/km²/ano, $C_{LD} = 1$.

2.2.2 - DANOS CAUSADOS POR DESCARGA ATMOSFÉRICA PRÓXIMA À ESTRUTURA (FONTE S2)

A Fonte S2 acopla menos energia à instalação quando comparada à Fonte S1 pois, trata-se de indução provocada por descarga próxima à estrutura. O campo provocado pela corrente da descarga próxima é preponderantemente magnético e variante no tempo, e penetra nos laços involuntários

criados entre cabos de redes elétricas e eletrônicas da instalação. Descargas que incidam a até 500m da estrutura são consideradas fontes S2. O número de eventos de falhas dos equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S2 é dado na Fig. 2.31. A altura da estrutura não influencia A_M . Em estruturas simples, calcula-se A_M como sendo a área em planta da estrutura somada à área no seu entorno, limitada a uma distância 500 m, conforme Fig. 2.32.

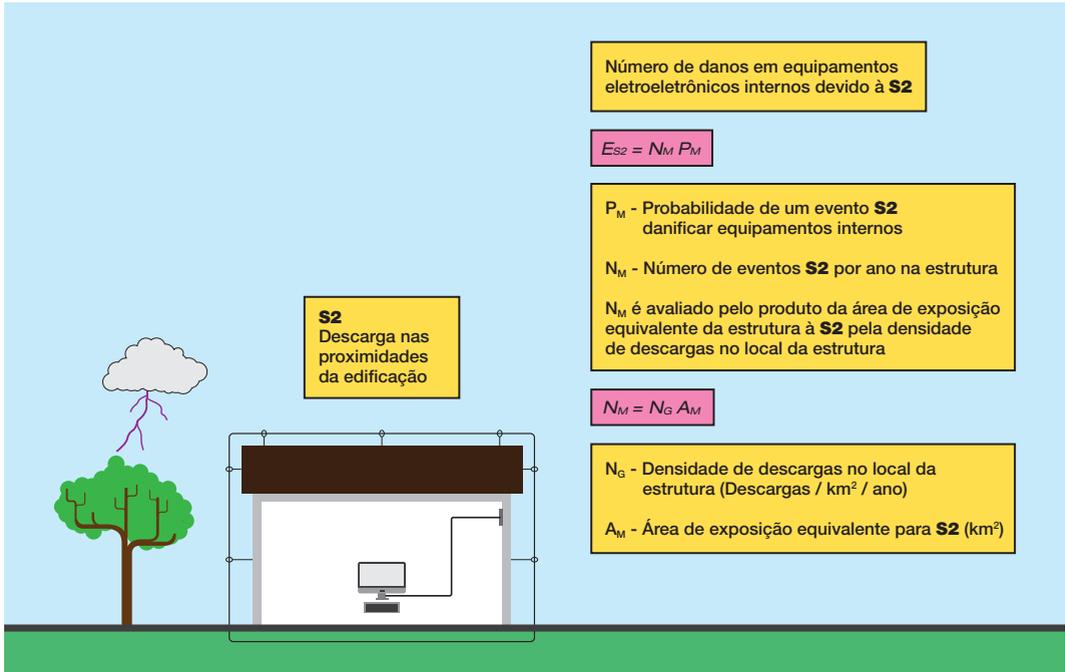


Fig. 2.31 - Número de danos em equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S2 (E_{S2}).

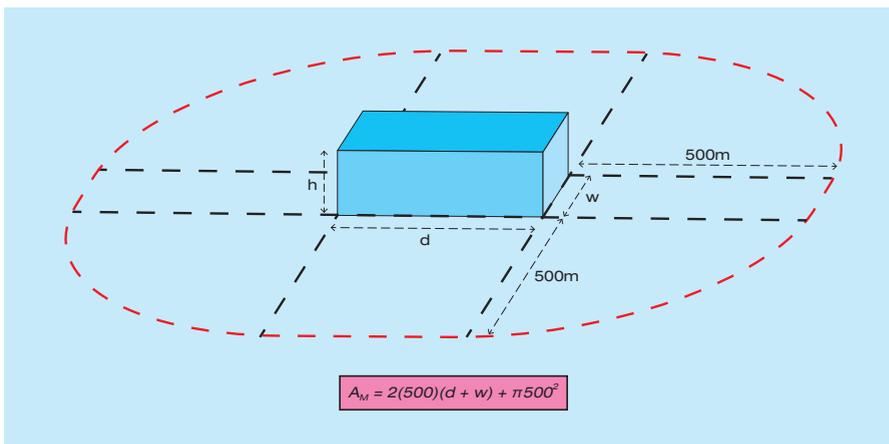


Fig. 2.32
Área equivalente para estruturas simples para cômputo do número de eventos S2.

A vista em planta de A_M fica delimitada conforme Fig. 2.33. O cálculo de P_M é mostrado na Fig. 2.34.

O fator K_{S1} considera a blindagem, eventualmente provida pelo arranjo do SPDA externo utilizado para compor a ZPR 1, ao campo magnético total produzido pela descarga. O fator K_{S2} considera a blindagem, eventual-

mente provida pelo arranjo utilizado para compor a ZPR 2, ao campo magnético remanescente na ZPR 1.

O fator K_{S3} é obtido através da Tabela 2.6 (Tabela B.5 da norma). Ele está relacionado à forma na qual os cabos internos de energia e de sinais internos estão roteados dentro da estrutura.

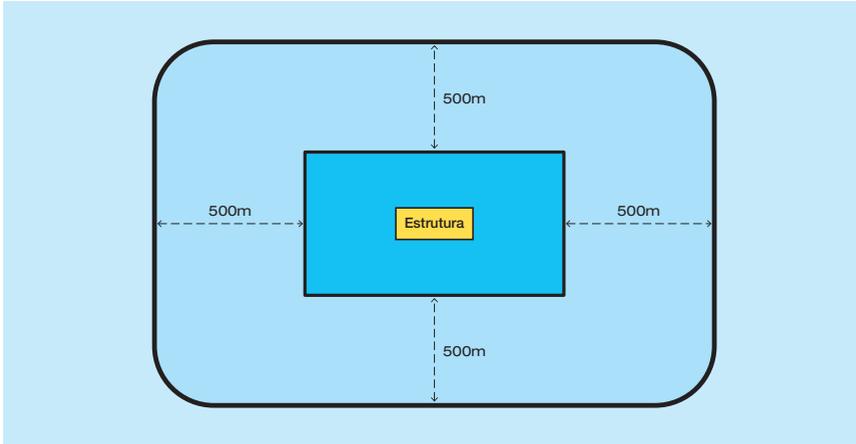


Fig. 2.33 - Área equivalente A_M para cômputo da quantidade de eventos S2.

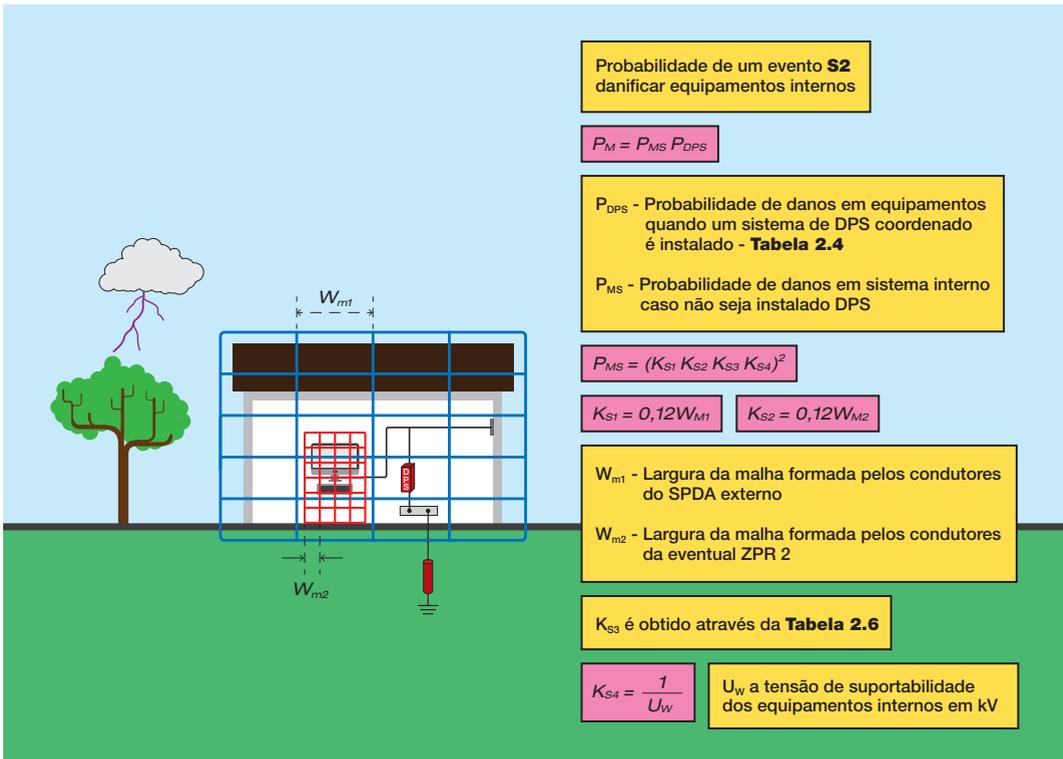


Fig. 2.34 - Probabilidade de um evento S2 danificar equipamentos internos (P_M).

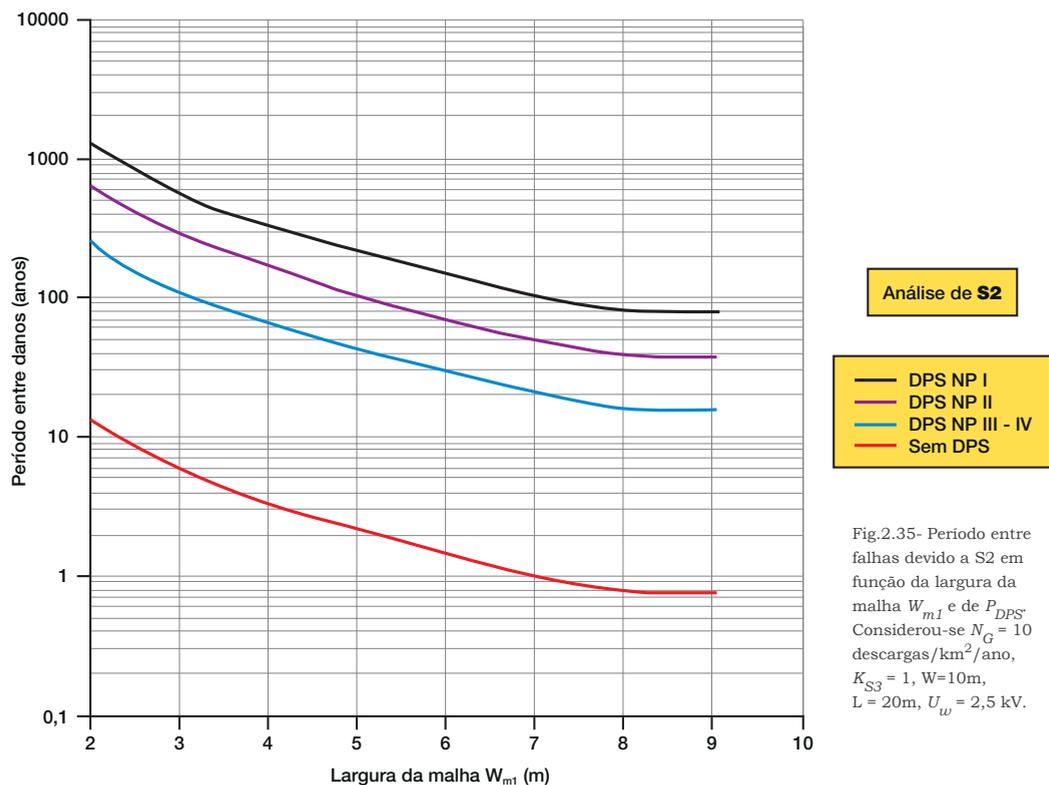
TABELA 2.6
Valor do fator K_{S3} dependente da fiação interna (Tabela B.5 da NBR 5419-2)

TIPO DE FIAÇÃO INTERNA	K_{S3}
Cabo não blindado – sem preocupação no roteamento no sentido de evitar laços ^a	1
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar grandes laços ^b	0,2
Cabo não blindado – preocupação no roteamento no sentido de evitar laços ^c	0,01
Cabos blindados e cabos instalados em eletrodutos metálicos ^d	0,0001

^a Condutores em laço com diferentes roteamentos em grandes edifícios (área do laço da ordem de 50m²).
^b Condutores em laço roteados em um mesmo eletroduto ou condutores em laço com diferentes roteamentos em edifícios pequenos (área do laço da ordem de 10m²).
^c Condutores em laço roteados em um mesmo cabo (área do laço da ordem de 0,5m²).
^d Blindagens e eletrodutos metálicos interligados a um barramento de equipotencialização em ambas extremidades e equipamentos estão conectados no mesmo barramento equipotencialização.

O período entre danos de equipamentos internos devido a S2 (Período_{S2}) é calculado invertendo-se E_{S2} , da mesma forma que foi feito com E_{S1} (Fig. 2.29). Este período é fortemente dependente do fator de blindagem provido pela malha do SPDA externo e com o NP utilizado para especificação dos DPS. Considerando uma estrutura com

comprimento de 20m e largura de 10m, o gráfico mostrado na Fig. 2.35 apresenta o período entre danos causados por S2. Para W_{m1} com 8,3m e 4m e DPS coordenados com NP III/IV tem-se períodos de 15 e 67 anos respectivamente. Sem a instalação de DPS, estes períodos seriam de 0,77 e 3,3 anos, respectivamente.



2.2.3 - DANOS CAUSADOS POR DESCARGA ATMOSFÉRICA NA LINHA EXTERNA DE ALIMENTAÇÃO OU DE SINAL CONECTADA COM A INSTALAÇÃO (FONTE S3)

A Fonte S3, que representa uma injeção de corrente diretamente na linha, acopla muita energia à instalação. Uma vez atingida a linha em um ponto intermediário, a corrente da descarga se distribui nos dois sentidos até atingir a instalação. Uma proteção

natural que as instalações têm em relação à S3 são as disrupções que ocorrem nas estruturas das linhas devido aos elevados valores das tensões que viajam pela linha. Estas tensões são obtidas pelo produto da impedância de surto longitudinal da linha, da ordem de 500Ω, pela corrente de descarga (metade do valor de pico). O número de eventos de falhas dos equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S3 é mostrado na Fig. 2.36.

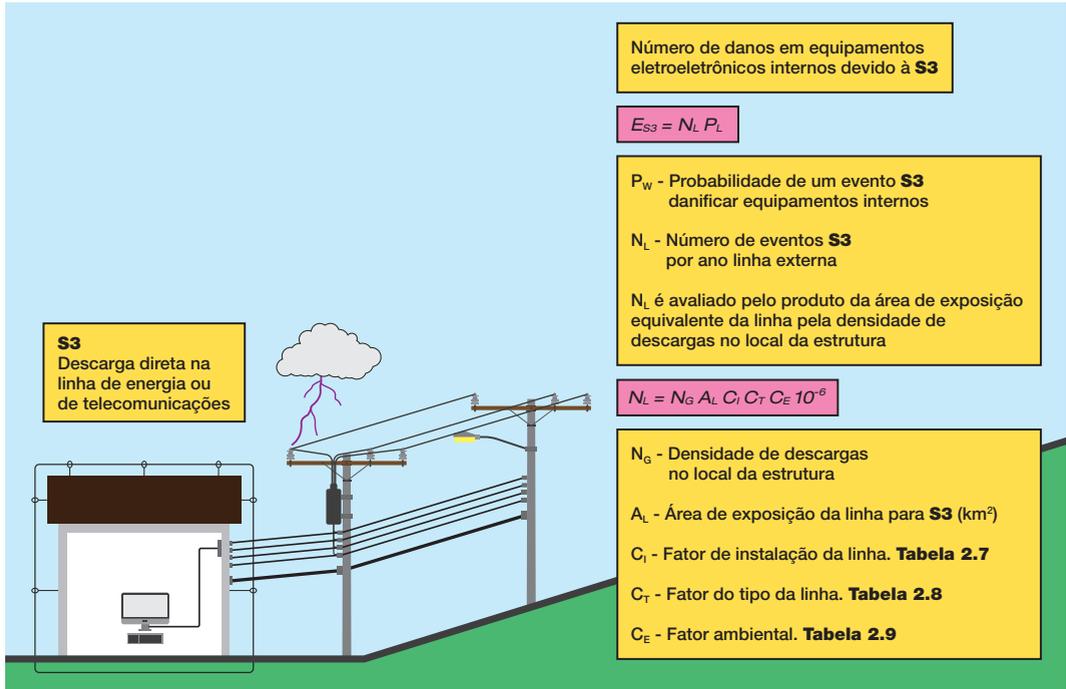


Fig. 2.36- Número de danos em equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S3 (E_{S3}).

TABELA 2.7 - Fator de instalação da linha C_I (Tabela A.2 da NBR 5419-2)

ROTEAMENTO	C_I
Aéreo	1
Enterrado	0,5
Cabos enterrados instalados completamente dentro de uma malha de aterramento	0,01

TABELA 2.8 - Fator tipo de linha C_T (Tabela A.3 da NBR 5419-2)

INSTALAÇÃO	C_T
Linha de energia ou sinal	1
Linha de energia em AT (com transformador AT/BT)	0,2

TABELA 2.9 - Fator ambiental C_E
(Tabela A.4 da NBR 5419-2)

AMBIENTE	C_E
Rural	1
Suburbano	0,5
Urbano	0,1
Urbano com edifícios mais altos que 20m	0,01

Calcula-se A_L como sendo a área em torno da linha delimitada por um retângulo com

comprimento igual ao comprimento da linha (limitado a 1000m) e largura de 40m. Para linhas subterrâneas, a largura considerada para a área de exposição pode ser ampliada ou diminuída em função da resistividade elétrica aparente do solo (Fig. 2.37).

No cômputo de A_L , caso a linha esteja perto de outra estrutura, a contribuição desta estrutura no aumento da área de exposição a S3 deve ser levada em consideração. O cálculo da probabilidade de um evento S3 danificar equipamentos internos (P_W) é dado na Fig. 2.38.

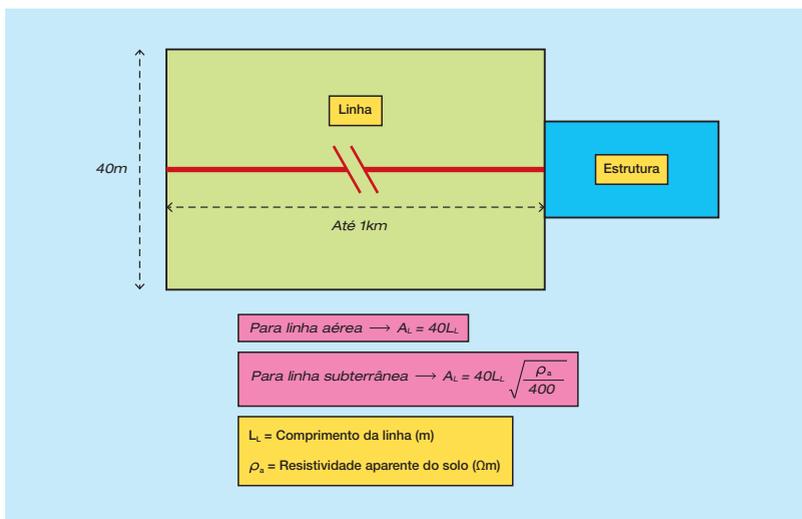


Fig. 2.37 - Área equivalente de exposição da linha para cômputo do número de eventos S3.

Fig. 2.38
Probabilidade de um evento S3 danificar equipamentos internos (P_W).

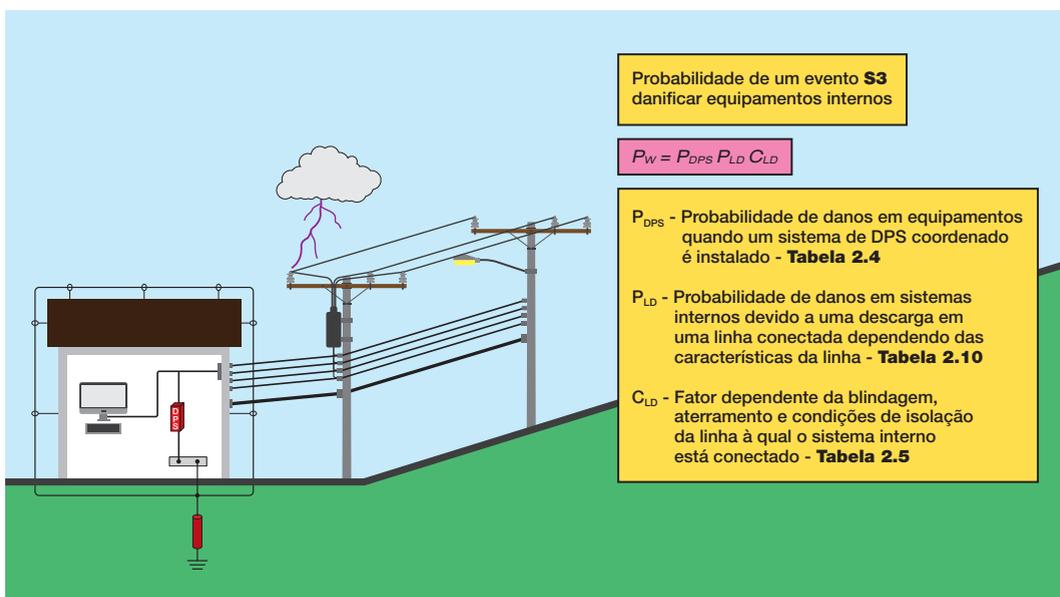


TABELA 2.10

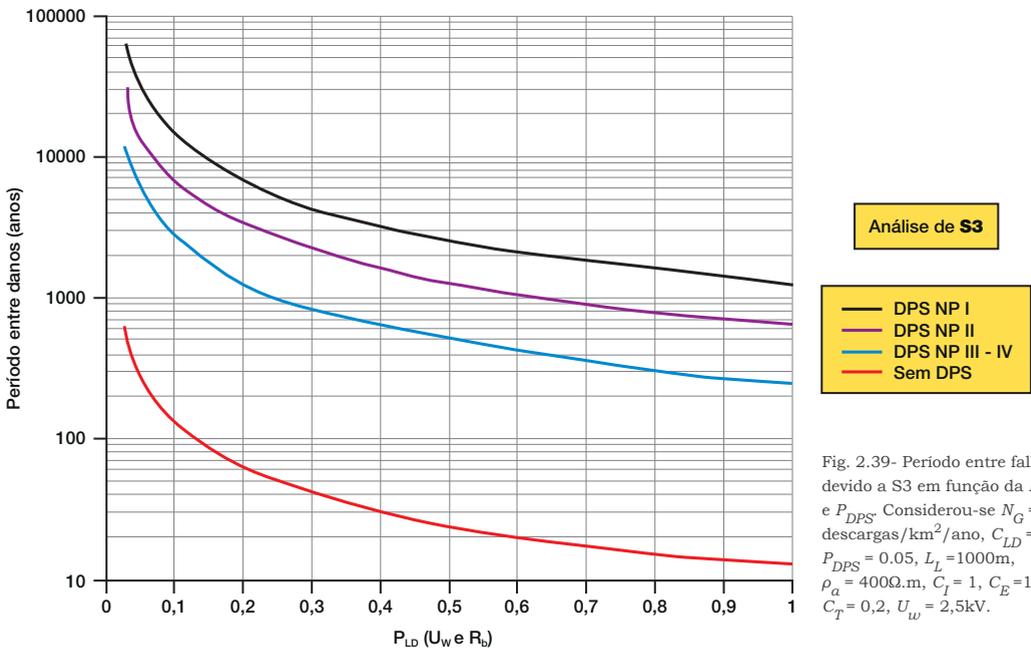
Valores da probabilidade P_{LD} dependendo da resistência R_B da blindagem e da tensão suportável U_w do equipamento (Adaptado da Tabela B.8 da NBR-5419-2)

TIPO DE LINHA	CONDIÇÕES DO ROTEAMENTO, BLINDAGEM E INTERLIGAÇÃO		TENSÃO SUPORTÁVEL U_w EM kV				
			1	1,5	2,5	4	6
			1	1	1	1	1
LINHAS DE ENERGIA OU SINAL	Blindada aérea ou enterrada cuja blindagem está interligada ao mesmo barramento de equipotencialização do equipamento	$5 \Omega/\text{km} < R_b$	1	1	0,95	0,9	0,8
		$1 \Omega/\text{km} < R_b \leq 5 \Omega/\text{km}$	0,9	0,8	0,6	0,3	0,1
		$R_b \leq 1 \Omega/\text{km}$	0,6	0,4	0,2	0,04	0,02

O período entre danos de equipamentos internos devido à S3 (Período S3) é calculado invertendo-se E_{S3} , da mesma forma que foi feito para o cômputo de E_{SI} (Fig. 2.29). Este período é fortemente dependente do Nível de Proteção (NP) selecionado para o sistema coordenado de DPS. Depende também, em menor escala, do Nível Suportável (U_w) de surto dos equipamentos e da resistência elétrica longitudinal da blindagem da linha, caso exista (Fig. 2.39).

Por exemplo, para as condições mostradas na Fig. 2.39 e considerando uma linha sem DPS instalado, tem-se um período de 12,5 anos entre danos para linha sem blindagem ($P_{LD} = 1$) e 625 anos para linha blindada com $R_B \leq 1 \Omega/\text{km}$ e $U_w = 6 \text{ kV}$ ($P_{LD} = 0,02$).

Na mesma figura se for considerado uma linha sem blindagem ($P_{LD} = 1$), tem-se períodos entre danos de 12,5; 250; 625 e 1250 anos para linhas sem DPS, com DPS NP I,



com DPS NP II e com DPS NP III-IV respectivamente.

2.2.4 - DANOS CAUSADOS POR DESCARGA ATMOSFÉRICA PRÓXIMA À LINHA EXTERNA DE ALIMENTAÇÃO OU DE SINAL CONECTADA COM A INSTALAÇÃO (FONTE S4)

A fonte S4 acopla menos energia à instalação quando comparada à S3, pois trata-se de indução provocada por descarga próxi-

ma à linha que atende à instalação. Descargas que incidam a até 2000m da linha são consideradas Fontes S4. O número de danos nos equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S4 é dado na Fig. 2.40.

Calcula-se AI como sendo a área em torno da linha delimitada por um retângulo com comprimento igual ao comprimento da linha (limitada a 1000m) e largura de 4000m (Fig. 2.41). O cálculo da probabilidade de um

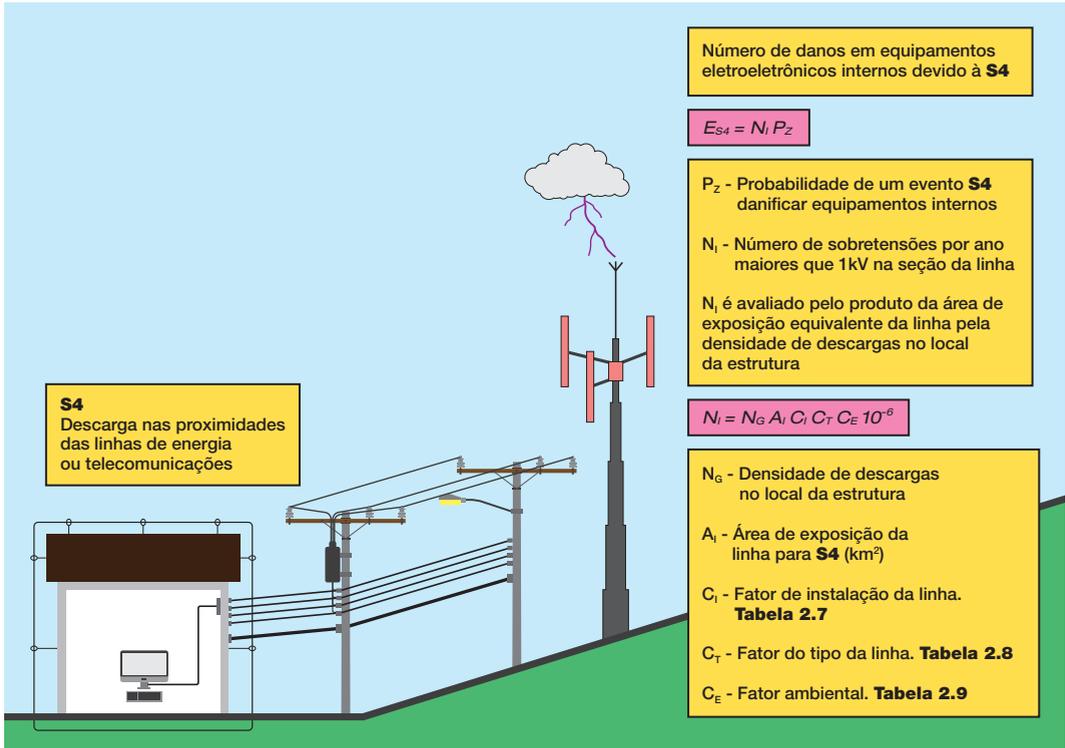


Fig. 2.40 – Número de danos nos equipamentos eletroeletrônicos internos devido à S4.

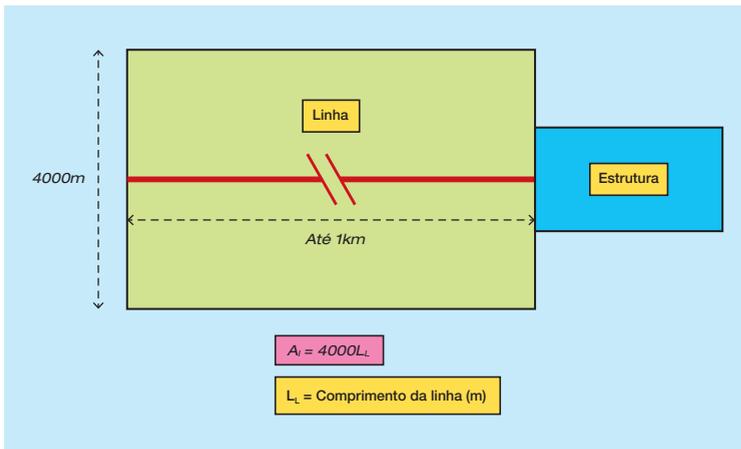


Fig. 2.41 - Área equivalente de exposição da linha para cômputo do número de eventos S4.

evento S4 danificar equipamentos internos (P_Z) é mostrado na Fig. 2.42.

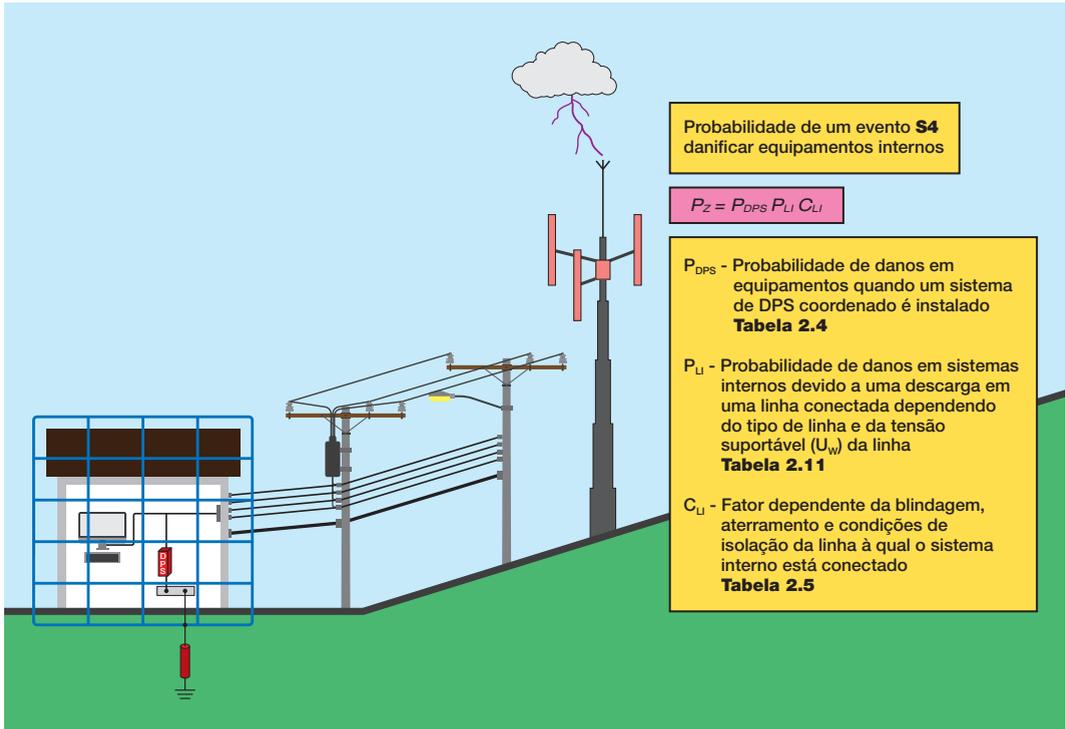


Fig. 2.42 - Probabilidade de um evento S4 danificar equipamentos internos (P_Z).

TABELA 2.11					
Valores da probabilidade P_{LI} dependendo do tipo de linha e da tensão suportável de impulso U_w dos equipamentos (Tabela B.9 da NBR 5419-2)					
TIPO DE LINHA	TENSÃO SUPORTÁVEL U_w EM kV				
	1	1,5	2,5	4	6
Linhas de energia	1	0,6	0,3	0,16	0,1
Linhas de sinais	1	0,5	0,2	0,08	0,04

O período entre danos de equipamentos internos devido a S4 (Período_{S4}) é calculado invertendo-se E_{S4} , da mesma forma que foi feito com E_{S1} (Fig. 2.29).

Este período é fortemente dependente do Nível de Proteção (NP) selecionado para o sistema coordenado de DPS. Depende também, em menor escala, do Nível Suportável (U_w) de surto dos equipamentos e do tipo da linha (Fig. 2.43).

Por exemplo, para as condições mostradas na Fig. 2.43 e considerando uma linha

sem DPS instalado, tem-se um período de 1,25 anos entre danos para o caso de equipamentos com nível de suportabilidade $U_w = 1\text{kV}$ ($P_{LI} = 1$) e 12,5 anos para o caso de equipamentos com nível de suportabilidade $U_w = 6\text{kV}$ ($P_{LD} = 0,1$).

Na mesma figura se forem considerados equipamentos com nível de suportabilidade $U_w = 2,5\text{kV}$ ($P_{LD} = 0,3$), tem-se períodos entre danos de 4,2; 82; 205 e 411 anos para linhas sem DPS, com DPS NP I, com DPS NP II e com DPS NP III-IV, respectivamente.

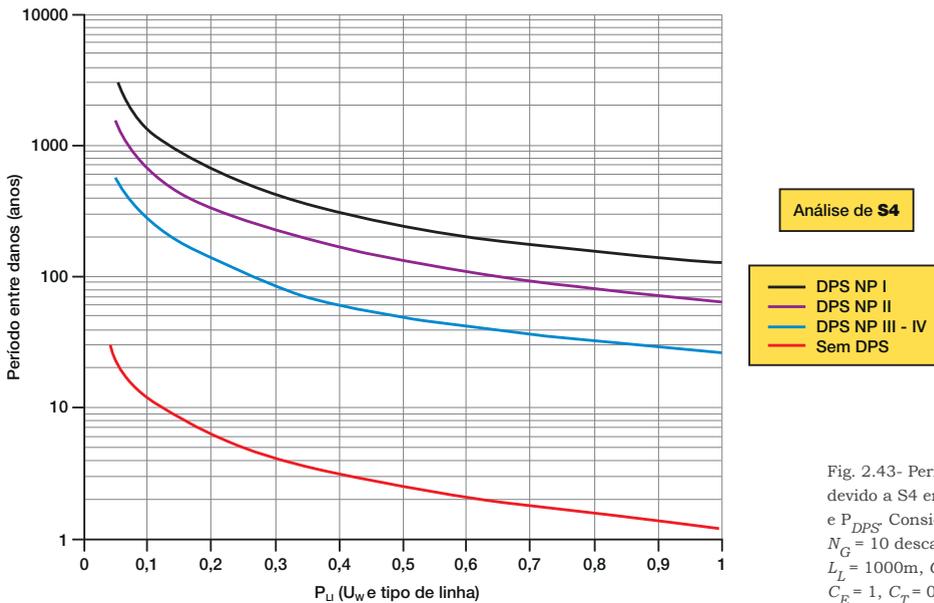


Fig. 2.43- Período entre falhas devido a S4 em função da P_{LI} e P_{DPS} . Considerou-se $N_G = 10$ descargas/km²/ano, $L_L = 1000m$, $C_{LI} = 0,1$, $C_I = 1$, $C_E = 1$, $C_T = 0,2$.

2.3 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

A ferramenta de análise de danos é importante para subsidiar as soluções de projeto que serão adequadas com base no conhecimento da fonte de dano que mais contribuiu para a diminuição do período entre falhas da instalação. Para todos os casos estudados nesse item serão mantidos fixos os parâmetros mostrados na Tabela 2.12.

TABELA 2.12			
Parâmetros fixos utilizados nos casos estudados			
PARÂMETROS FIXOS	SIGLA	VALORES	TABELA
Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha à qual o sistema interno está conectado	C_{LD}	1	2.5
Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha à qual o sistema interno está conectado	C_{LI}	0,1	2.5
Largura da malha formada pelos condutores da eventual ZPR 2	W_{m2}	10m	---
Tensão suportável de impulso dos equipamentos	U_w	2,5kV	---
Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga em uma linha conectada dependendo das características da linha	P_{LD}	1	2.10
Resistividade aparente do solo	ρ_a	400Ωm	---
Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga em uma linha conectada dependendo do tipo de linha e da tensão suportável (U_w) da linha	P_{LI}	0,3	2.11
Comprimento da linha	L_L	1000m	---
Fator de instalação da linha	C_I	1	2.7
Fator ambiental	C_E	1	2.9
Fator do tipo de linha (baixa tensão, alta tensão com transformador, telecomunicações)	C_T	0,2	2.8

Para todos os casos estudados, os parâmetros que serão variados estão mostrados na Tabela 2.13.

TABELA 2.13 Parâmetros variáveis utilizados nos casos estudados			
PARÂMETROS VARIÁVEIS	SIGLA	VALORES	TABELA
Probabilidade de falha dos equipamentos quando um sistema de DPS coordenados é instalado	P_{DPS}	1 - 0,05 - 0,02 0,01 - 0,001	2.4
Fator dependente do arranjo da fiação interna	K_{SS3}	1 - 0,2	2.6
Largura da malha formada pelos condutores do SPDA externo	W_{m1}	3 - 5 - 10m	---

2.3.1 - CASO 1 - ESTAÇÃO DE TELECOMUNICAÇÕES COM TORRE DE 100M.

A Fig. 2.44 ilustra o caso que será estudado. Na tabela 2.14 são mostradas as 3

situações que serão analisadas e também o período total esperado entre falhas. A seguir são analisadas as contribuições de cada fonte de danos para a composição do período total esperado entre falhas.

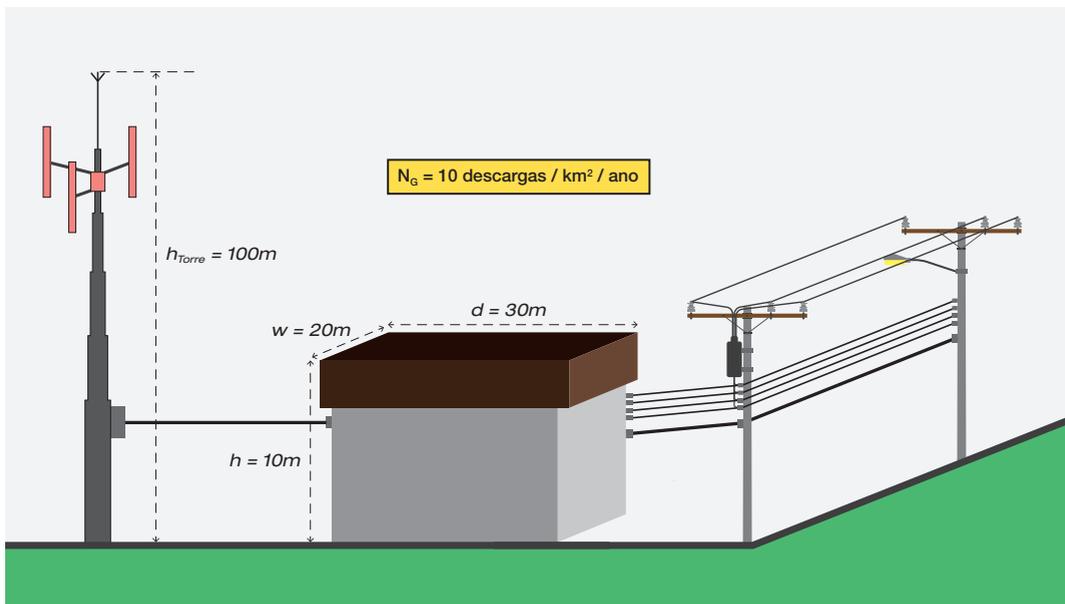


Fig. 2.44 - Estação de telecomunicações. Arranjo típico com torre de 100m de altura.

TABELA 2.14 Situações estudadas para o caso de uma estação de telecomunicações com torre de 100m de altura				
SITUAÇÕES ESTUDADAS	DPS instalado	Arranjo otimizado da fiação interna	Largura da malha do SPDA externo	Período entre falhas (anos)
Situação 1	Sim - NP III e IV	Não	10	5
Situação 2	Sim - NP I	Não	10	22
Situação 3	Sim - DPS especial	Não	10	223

Os valores dos períodos entre falhas referentes às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e o período total entre falhas são mostrados na Fig. 2.45. A análise a seguir é referente aos dados mostrados na Fig. 2.45.

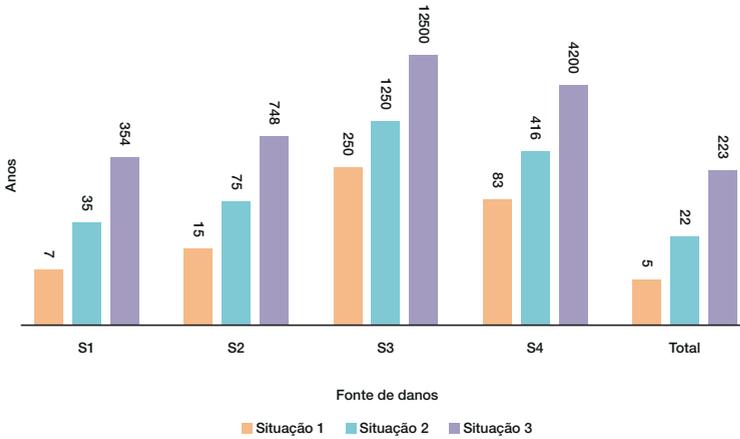


Fig. 2.45 – Períodos esperados entre falhas devido às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e período total esperado entre falhas. Estação de telecomunicações com torre de 100m de altura.

Na Situação 1 foi instalado DPS para Nível de Proteção III/IV, afiação interna formando laços e a largura da malha do SPDA externo igual a 10m. Verifica-se na figura um período total de 5 anos entre danos. A fonte S1, que causa um dano a cada 7 anos, é a maior contribuinte de danos. Destaca-se a altura da torre como a responsável pela quantidade de eventos S1.

Na Situação 2 foi instalado DPS para Nível de Proteção I, fiação interna formando laços, largura da malha do SPDA externo igual a 10m. Observa-se que o DPS NP I diminui a contribuição de todas as fontes de danos aumentando o período total para 22 anos. A Fonte S1 passa a contribuir com um dano a cada 35 anos.

Aplicando-se DPS com características superiores às especificadas para o NP I, Situação 3, tem-se o período máximo possível, supondo que outras modificações na linha en-

trante não sejam empreendidas. Nota-se que o período total passou a ser de 223 anos.

Neste exemplo, a análise mostra que a mitigação de S1 como fonte de dano na instalação é possível adotando sistemas internos blindados e agindo sobre a linha entrante. A linha deve ser instalada em eletrodutos metálicos ou tubos metálicos, conectados na entrada da estrutura ao barramento de equipotencialização que o equipamento. Pode-se, neste caso, prescindir da blindagem dos sistemas internos, caso se comprove que as descargas na estrutura não induzam internamente tensões maiores que as suportadas pelo equipamento (U_w).

2.3.2 - CASO 2 - ESTRUTURA HORIZONTALIZADA COM GRANDES DIMENSÕES EM PLANTA.

A Fig. 2.46 ilustra o caso que será estudado.

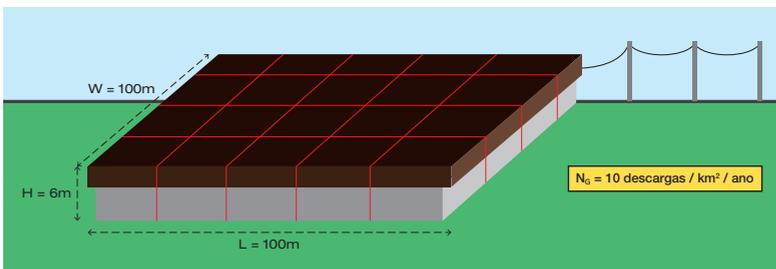


Fig. 2.46 Estrutura horizontalizada com grandes dimensões em planta.

Na tabela 2.15 são mostradas as 6 situações que serão analisadas e também o período total esperado entre falhas. A seguir são analisadas a contribuição de cada fonte de danos para a composição do período total esperado entre falhas.

TABELA 2.15				
Situações estudadas para o caso de uma edificação de grande extensão horizontal				
SITUAÇÕES ESTUDADAS	DPS instalado	Arranjo otimizado da fiação interna	Largura da malha do SPDA externo	Período entre falhas (anos)
Situação 1	Sim - NP III-IV	Não	10	10
Situação 2	Sim - NP II	Não	10	24
Situação 3	Sim - NP III-IV	Não	5	19
Situação 4	Sim - NP III-IV	Sim	10	35
Situação 5	Sim - NP II	Não	5	47
Situação 6	Sim - NP II	Sim	10	88

Os valores dos períodos entre falhas referentes às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e o período total entre falhas são mostrados na Fig. 2.47.

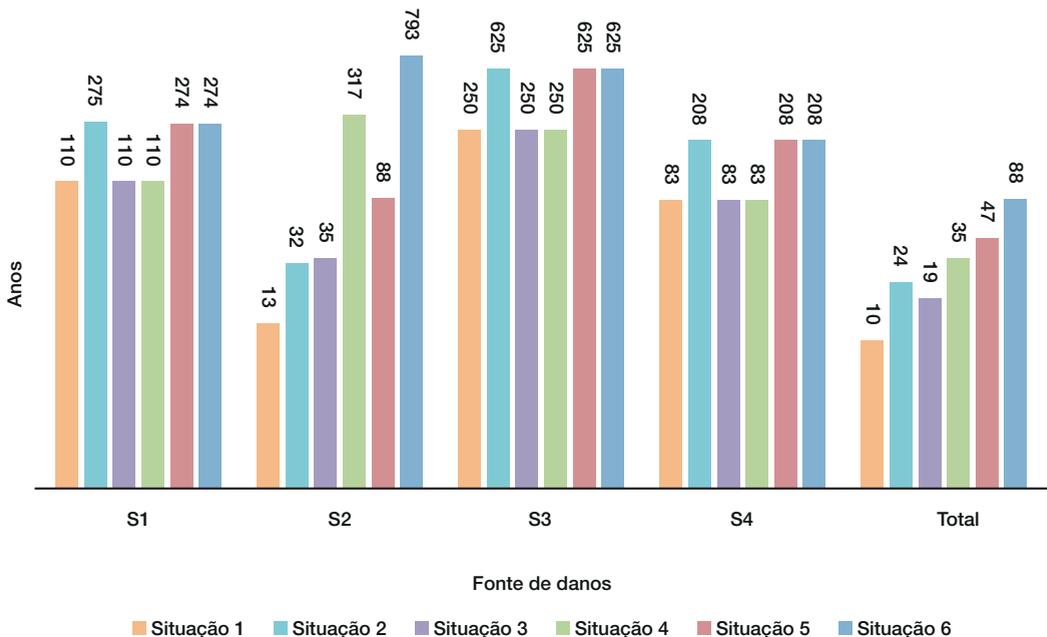


Fig. 2.47 – Períodos esperados entre falhas devido às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e período total esperado entre falhas. Estrutura horizontalizada de grandes dimensões em planta.

A análise a seguir é referente aos dados mostrados na Fig. 2.47.

Considerou-se na Situação 1 apenas a instalação de sistema DPS coordenados NP III/IV. Verifica-se um período total de 10 anos entre danos. A Fonte S2, que causa um dano a cada 13 anos, é a maior contribuinte.

Na Situação 2 os DPS coordenados foram especificados para NP II. Verifica-se o aumento do período total de 10 para 24 anos entre danos. A Fonte S2 continua sendo a maior contribuinte com um dano a cada 32 anos.

Uma medida eficaz para se controlar os efeitos das descargas próximas à instalação (Fonte S2) é a diminuição da malha provida pelo SPDA externo. Por exemplo, implantando-se um SPDA com malha de 5m, retornando os DPS para NP III/IV, tem-se a Situação 3. Comparando-se os resultados da Situação 3 com a Situação 1, o aumento da contribuição de S2 vai de 13 para 35 anos e faz com que o período total entre falhas seja ampliado de 10 para 19 anos.

Caso a malha do SPDA fosse reduzida ainda mais, para 2,5m, o período total entre danos passaria a ser de 35 anos.

Voltando a malha do SPDA para 10m (retirando-se o efeito de blindagem provido pelo SPDA externo), mas instalando-se a fiação interna com a preocupação de se evitar grandes laços (com áreas menores que 10m^2), tem-se a Situação 4 (onde $K_{S3}=0,2$). Verifica-se um período total de 35 anos entre danos. A Fonte S2 passa a causar um

dano a cada 317 anos, e S4 passa a ser a maior contribuinte do período entre danos (83 anos).

Outra medida eficaz seria adotar as Situações 2 e 3 conjuntamente, o que é representado pela Situação 5, diminuindo a malha do SPDA externo para 5m para agregar fator de blindagem, e adotando sistema de DPS coordenados com NP II, ao invés de NP III/IV. Como resultado, o período total entre danos passa de 10 (Situação 1) para 47 anos. Observa-se a efetividade deste arranjo, proporcionando período entre danos de 47 anos. A Fonte S2 é a maior contribuinte com período de 88 anos.

Adotando-se simultaneamente DPS coordenados NP II (Situação 2) reinstalando-se a fiação interna com a preocupação de se evitar grandes laços (Situação 4, $K_{S3}=0,2$), com áreas menores que 10m^2 , tem-se o período total entre falhas aumentado para 88 anos, conforme mostrado na Fig. 2.47. Verifica-se neste arranjo que a Fonte S4 é a mais crítica, contribuindo com um período de 208 anos e resultando em um período total entre danos de 88 anos.

2.3.3 - CASO 3 - ESTRUTURA VERTICALIZADA DE GRANDES DIMENSÕES.

A Fig. 2.48 ilustra o caso que será estudado, considerando os períodos esperados entre falhas devido às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e o período total esperado entre falhas.

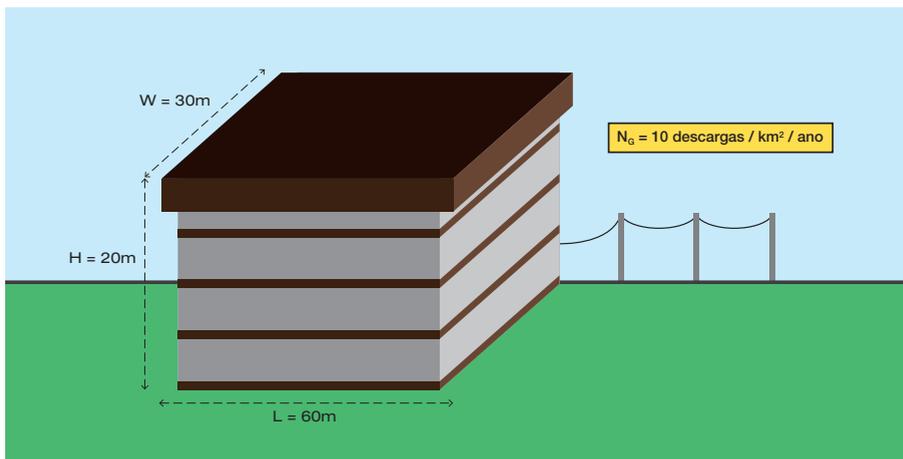


Fig. 2.48 Estrutura verticalizada de grandes dimensões.

Na tabela 2.16 são mostradas as 5 situações que serão analisadas e também o período total esperado entre falhas. A seguir são analisadas as contribuições de cada fonte de danos para a composição do período total esperado entre falhas.

TABELA 2.16 Situações estudadas para o caso de estrutura verticalizada				
SITUAÇÕES ESTUDADAS	DPS instalado	Arranjo otimizado da fiação interna	Largura da malha do SPDA externo	Período entre falhas (anos)
Situação 1	Não	Não	10	0,5
Situação 2	Não	Não	3	1,4
Situação 3	Sim - NP III-IV	Não	10	10
Situação 4	Sim - NP III-IV	Não	3	27
Situação 5	Sim - NP II	Não	10	26
Situação 6	Sim - NP II	Não	3	68

Os valores dos períodos entre falhas referentes às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e o período total entre falhas são mostrados na Fig. 2.49.

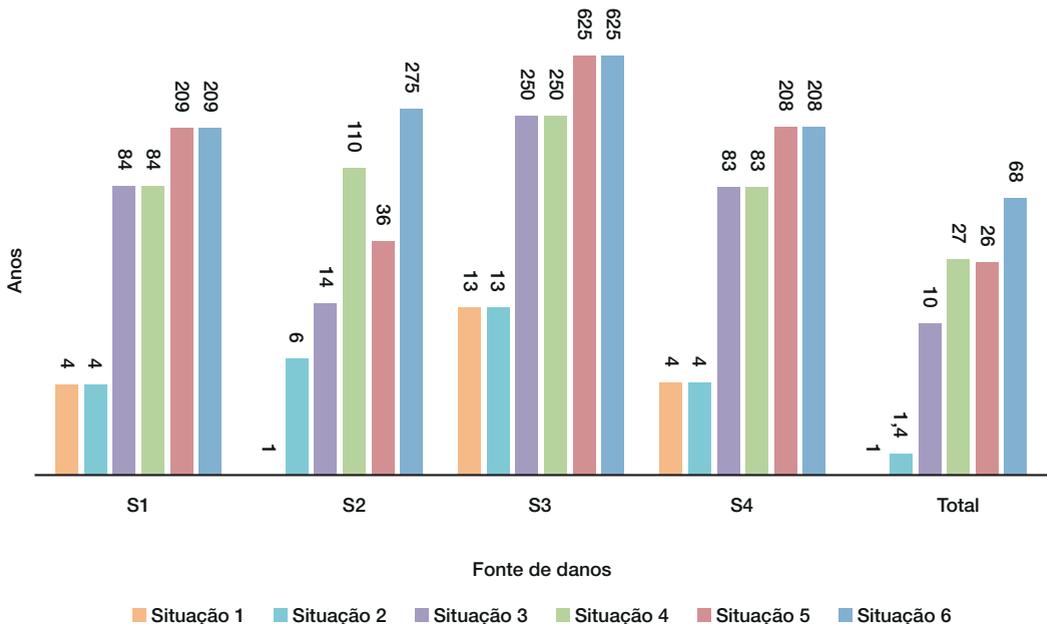


Fig. 2.49 - Períodos esperados entre falhas devido às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e período total esperado entre falhas. Estrutura verticalizada tipo prédio de escritórios de grandes dimensões.

A análise a seguir é referente aos dados mostrados na Fig. 2.49.

Considera-se para a Situação 1, que o prédio tem apenas SPDA externo com malha de 10m. Nenhuma medida de proteção adicional foi tomada. Verifica-se, para a Situação 1, um período total de 0,5 anos (6 meses) entre danos (arredondado para 1 ano na figura). A Fonte S2, que causa um dano a cada 0,7 anos (8,5 meses) é a maior contribuinte (também arredondado para 1 ano na figura).

No intuito de melhorar o desempenho da proteção frente a S2, a malha do SPDA externo foi diminuída para 3m, para incrementar o efeito de blindagem (Situação 2). Obteve-se um aumento do período entre danos devido a S2 de 0,7 para 5,5 anos, superando a contribuição de S4 e perfazendo um período total de 1,4 anos, ainda muito pequeno.

Na Situação 3 considerou-se apenas a instalação de sistema DPS coordenados NP III/IV. Verifica-se um aumento substancial no período entre danos devido a S2 de 0,7 para 14 anos, perfazendo um período total entre danos de 10 anos, evidenciando a eficiência dos DPS coordenados.

Na Situação 4 aplicou-se simultaneamente DPS coordenados NP III / IV (Situação 3) com a malha do SPDA externo e dimensão de 3m, para efeito de blindagem (Situação

2). Obtém-se um aumento expressivo do período total entre danos para 27 anos, sendo os maiores contribuintes para os danos as Fontes S1 e S4.

Na Situação 5 a malha do SPDA externo voltou a ser de 10m sem efeito de blindagem, mas foi considerada a instalação de DPS coordenados Classe II. Obtém-se um aumento expressivo do período total entre danos para 26 anos, praticamente o período conseguido na Situação 4. Neste cenário o maior contribuinte para os danos é a Fonte S2, com 36 anos.

Na Situação 6 a malha do SPDA externo voltou a ser de 3m, propiciando efeito de blindagem e, ao mesmo tempo, considerou-se a instalação de DPS coordenados Classe II, combinando-se a Situação 4 e a Situação 5. Obtém-se um período total entre danos para 68 anos, sendo o maior contribuinte para os danos a Fonte S1.

2.3.4 - CASO 4 - CASA SIMPLES DE 1 PAVIMENTO.

Nesta situação a casa se encontra apenas com SPDA externo com malha de 10m. Nenhuma medida de proteção adicional foi tomada. A Fig. 2.50 ilustra esta situação. Na

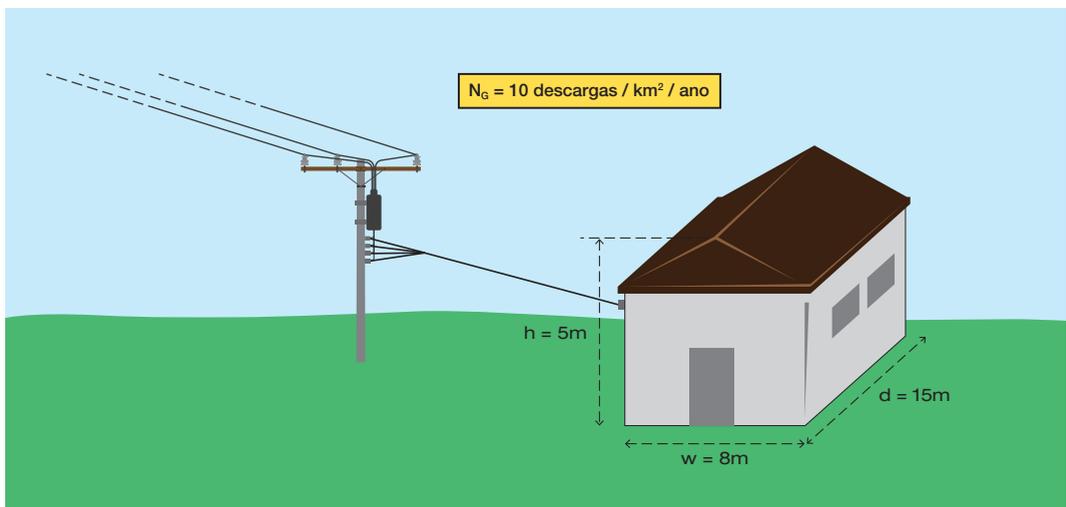


Fig. 2.50 - Casa simples de um pavimento.

Tabela 2.17 são mostradas as 5 situações que serão analisadas e também o período total esperado entre falhas. A seguir são analisadas as contribuições de cada fonte de danos para a composição do período total esperado entre falhas.

TABELA 2.17 Situações estudadas para o caso da casa simples de um pavimento				
SITUAÇÕES ESTUDADAS	DPS instalado	Arranjo otimizado da fiação interna	Largura da malha do SPDA externo	Período entre falhas (anos)
Situação 1	Não	Não	10	0,6
Situação 2	Sim - NP III-IV	Não	10	12
Situação 3	Sim - NP III-IV	Não	3	40
Situação 4	Sim - NP II	Não	3	99
Situação 5	Sim - NP II	Não	10	31

Os valores dos períodos entre falhas referentes às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e o período total entre falhas são mostrados na Fig. 2.51.

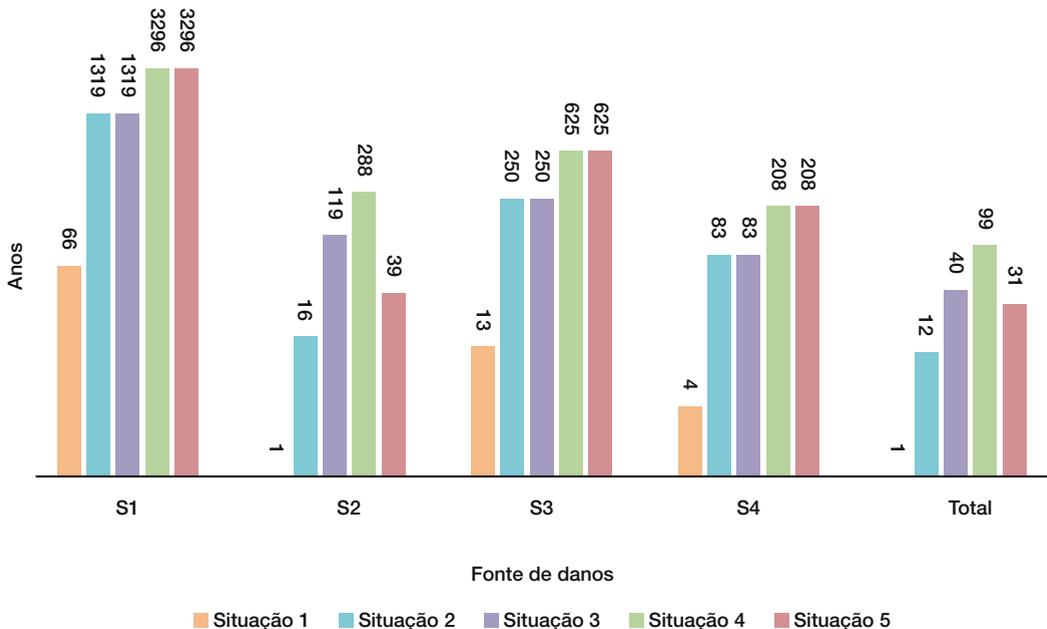


Fig. 2.51 - Períodos esperados entre falhas devido às fontes de danos S1, S2, S3 e S4 e período total esperado entre falhas. Casa simples de um pavimento.

A análise a seguir é referente aos dados mostrados na Fig. 2.51.

Considera-se na Situação 1 que a casa não tem DPS instalado, fiação interna formando

laços e largura da malha do SPDA externo igual a 10m. Computa-se um período total de 0,61 anos (7,3 meses) entre danos (arredondado para 1 ano na figura). Por ordem de contribuição decrescente para os danos

temos a Fonte S2 com 0,77 anos (arredondado para 1 ano na figura), a Fonte S4 com 4 anos, a Fonte S3 com 13 anos e a Fonte S1 com 66 anos.

Comparando-se com o Caso 3 (prédio de grande altura), verifica-se o grande aumento do período dos danos devidos a S1 que era de 4,18 anos, em decorrência da diferença de alturas entre as estruturas e a pequena variação do período devido à S2, que era de 0,71 anos. A altura da estrutura não influencia o número de danos devido a S2.

Na Situação 2 a casa foi dotada de sistemas DPS coordenados NP III / IV, fiação interna formando laços, e a largura da malha do SPDA externo é 10m. Todos os períodos aumentaram com esta ação, passando o período total entre danos a ser de 12 anos, muito superior aos 7,3 meses calculados na Situação 1. O maior contribuinte para os danos continua sendo a Fonte S2, com 16 anos.

Na Situação 3, além da instalação de sistema DPS coordenados NP III / IV, foi agregada malha do SPDA externo de 3m no intuito de conferir fator de blindagem à casa. O período total entre danos que era de 12 anos com apenas a utilização de DPS coordenados NP III / IV, passou a ser de 40 anos. A Fonte S2, que era na Situação 2 a mais agressora, passou a contribuir com em período entre falhas de 120 anos. Observa-se que agora a Fonte S4 passou a ser a mais agressiva, com período entre danos de 84 anos.

Na Situação 4, repetiu-se a Situação 3 com malha do SPDA externo de 3m, mas mudou-se para NP II o sistema de DPS coordenados. O período total entre danos aumentou para 99 anos, bem superior aos 40 anos conseguidos na Situação 3. A Fonte S4 permanece como principal contribuinte para os danos.

Na Situação 5 repetiu-se a Situação 2, mas utilizando DPS coordenados com NP II, ao invés de NP III / IV. A malha do SPDA externo foi mantida em 10m, não agregando blindagem. O período total entre danos passa a ser de 31 anos. Na Situação 2, onde utilizou-se, também, somente DPS com NP III / IV, este período era de 12 anos.

2.4 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo desse capítulo:

- ☑ A avaliação do período entre falhas dos equipamentos elétricos e eletrônicos internos, realizada com base na análise de riscos apresentada na Parte 2 da NBR 5419:2015, é uma ferramenta poderosa que auxilia o projetista na escolha das técnicas de proteção mais adequadas. Essa escolha considera o tipo de edificação, os tipos de linhas de alimentação e de telecomunicações que atendem à estrutura, a localização da edificação e as condições ambientais mais relevantes;
- ☑ Evidencia-se, com base na análise do período entre falhas, a fonte de dano (S1, S2, S3 ou S4) que mais contribui para a redução desse período e otimiza-se o projeto de proteção investindo-se nas ações mais adequadas e eficazes;
- ☑ Em muitos casos existem mais de uma solução de projeto que apresentam eficiências semelhantes. Neste caso, a decisão sobre a melhor solução para o SPDA pode ser definida com base na configuração mais econômica;
- ☑ Da análise dos exemplos apresentados, é possível concluir que a instalação de DPS coordenados é uma das técnicas mais eficazes e que a escolha adequada do NP da instalação influencia bastante na eficiência da proteção;
- ☑ Os cálculos relativos à análise de riscos foram feitos para uma densidade de descargas para a terra igual a 10 descargas /km²/ano. O período entre danos é inversamente proporcional à densidade de descargas, por exemplo, se para uma densidade igual a 10 descargas/km²/ano o período entre danos é igual a 15 anos, para uma densidade igual a 1 descarga/km²/ano o período entre danos será igual a 150 anos.

TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM LAÇOS INTERNOS E EM LINHAS QUE ATENDEM EDIFICAÇÕES

3.1 - TÉCNICAS DE ANÁLISE

3.1.1 - DOMÍNIO DO TEMPO VS DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Há duas possibilidades de se trabalhar com fenômenos eletromagnéticos: no domínio do tempo ou no domínio da frequência. No domínio do tempo, as grandezas (tensões, correntes, campos eletromagnéticos) são expressas pelos seus valores instantâneos, determinados pela variável tempo. Dessa forma, uma tensão $V(t)$ é definida no domínio do tempo como $V(t) = f(t)$, onde $f(t)$ é uma expressão matemática envolvendo a variável tempo (t). Já no domínio da frequência, as grandezas são expressas por uma notação complexa (fasor), tendo a frequência angular como variável. Dessa forma, uma tensão $V(\omega)$ é definida no domínio da frequência como $V(\omega) = f(\omega) + j g(\omega)$, onde $f(\omega)$ e $g(\omega)$ são expressões matemáticas envolvendo a frequência angular (ω) e j denota a unidade imaginária ($j = \sqrt{-1}$).

A escolha do domínio do tempo ou da frequência depende da preferência de cada pessoa e também das características do problema. Em geral, problemas que envolvem regime permanente são mais facilmente tratados no domínio da frequência, enquanto problemas que envolvem transitórios ficam mais simples no domínio do tempo. Por exemplo, o cálculo das tensões e correntes de regime permanente em um sistema elétrico de potência é muito mais facilmente tratado no domínio da frequência, pois essas grandezas podem ser expressas por fasores. Além disso, nesse exemplo a frequência é fixa ($f = 60$ Hz, no Brasil), isto

é, a frequência angular vale: $\omega = 2 \pi f = 2 \pi 60 = 377$ rad/s.

O estudo de transitórios, como os surtos atmosféricos, é mais facilmente realizado no domínio do tempo. Cabe observar que alguns autores preferem tratar problemas transitórios no domínio da frequência, utilizando para isso as transformadas de Fourier.

3.1.2 - LAÇO VS LINHA

Para o cálculo de surtos induzidos, circuitos condutores fechados podem ser tratados como laços (“loops”) ou como linhas. A escolha de um caso ou outro depende do comprimento do circuito e do tempo de frente (no domínio do tempo) ou do comprimento de onda (no domínio da frequência) da grandeza indutora. Para essa definição, é conveniente usar o conceito de comprimento elétrico (L_p) do circuito, que no domínio do tempo pode ser definido conforme mostrado na Fig. 3.1, onde l é o comprimento físico do circuito, T é o tempo de frente da onda e v é a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Essa velocidade depende do meio e , no caso do ar, ela é muito próxima da velocidade da luz no vácuo ($v \approx c = 3 \times 10^8$ m/s).

A classificação de um circuito como “laço” ou como “linha” é feita com base em seu comprimento elétrico. Considere-se o circuito mostrado na Fig. 3.2 (A), onde um condutor é disposto na forma de um retângulo de comprimento $l = 30$ m e terminado em uma impedância Z na sua extremidade direita, cuja tensão é medida por um voltímetro. Do lado esquerdo do laço há um fio vertical onde flui a corrente i que apresenta

um tempo de frente $T = 1 \mu\text{s}$. Nessas condições, o comprimento elétrico do circuito é dado por $l_E = 30 / (1 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8) = 0,1$.

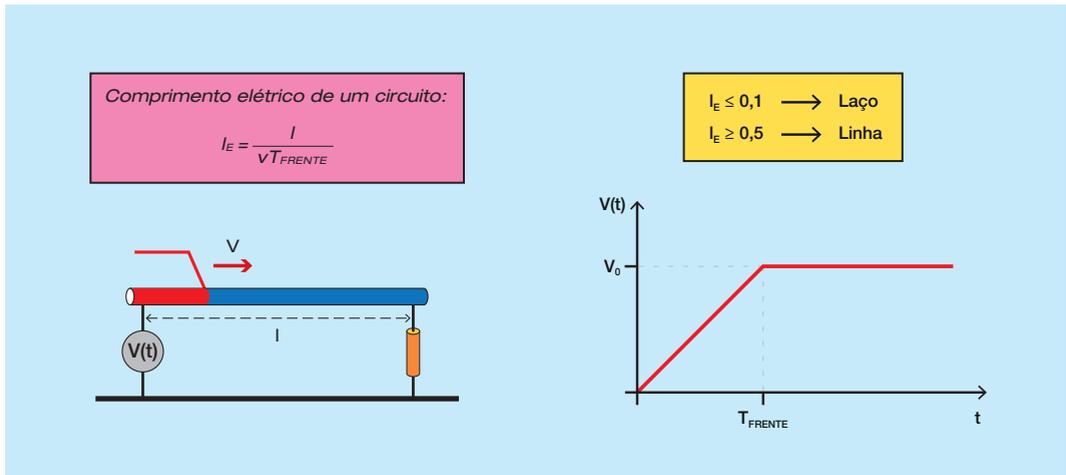


Fig. 3.1 - Comprimento elétrico de um circuito no domínio do tempo.

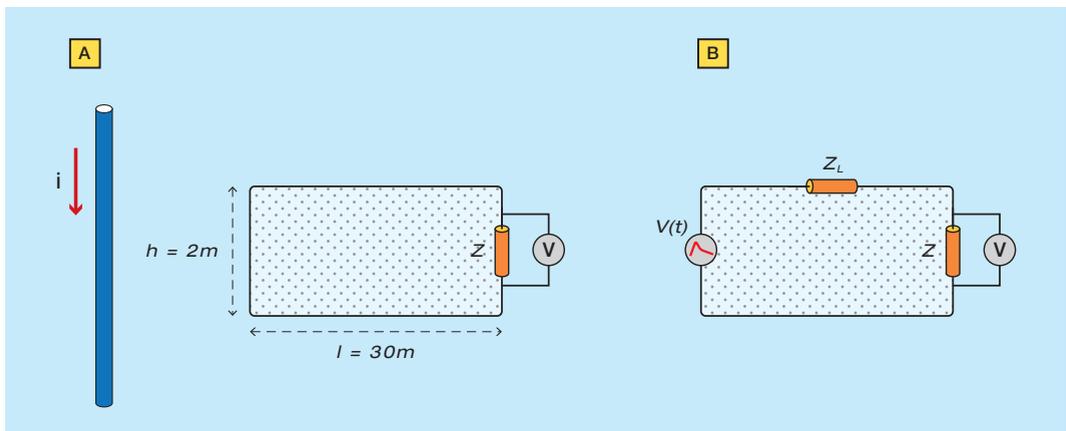


Fig. 3.2. (A) - Laço excitado por uma corrente; (B) - Circuito equivalente.

De uma forma geral, circuitos com comprimento elétrico igual ou menor que 0,1 podem ser tratados como laços, enquanto aqueles com comprimento elétrico igual ou maior que 0,5 devem ser tratados como linhas. Circuitos com comprimento elétrico entre 0,1 e 0,5 podem ser tratados como laços com base em uma aproximação que se torna progressivamente melhor na medida em que o comprimento elétrico diminui, e vice-versa. Cabe ressaltar que, dependendo do tempo de frente da grandeza indutora, um mesmo circuito pode ser classificado como laço ou como linha. Por exemplo, se a corrente do exemplo tivesse um tempo de frente de $0,1 \mu\text{s}$, o mesmo circuito de 30m

teria de ser tratado como uma linha. Para uma análise mais detalhada sobre os critérios para essa classificação, recomenda-se a referência [1].

A vantagem de tratar um circuito como laço reside na possibilidade de desprezar os fenômenos de propagação, o que simplifica muito o cálculo das tensões e correntes induzidas.

3.1.3 - CAMPO ELÉTRICO VS CAMPO MAGNÉTICO

Duas abordagens podem ser utilizadas para o cálculo de tensões induzidas: (i) baseada na variação temporal do fluxo magnético na

área formada pelo laço; e (ii) baseada na integral do campo elétrico ao longo do condutor.

O cálculo das tensões induzidas com base no campo magnético é bastante adequado para laços, nos quais há uma área bem definida para integrar o campo magnético e os efeitos de propagação podem ser desprezados. Por exemplo, considere-se o circuito da Fig. 3.2 (A), onde a corrente i induz tensões e correntes no laço. O cálculo da tensão medida pelo voltímetro pode ser feito através do circuito mostrado na Fig. 3.2 (B). Nesse circuito, a tensão induzida no laço foi “concentrada” em uma fonte de tensão $V(t)$, cuja magnitude corresponde à tensão de circuito aberto induzida no laço. O cálculo das tensões e correntes será tratado na Seção 3.2.

No caso de linhas, a abordagem a partir do campo magnético não é muito prática. A abordagem mais utilizada é a proposta por Agrawal et al.[2], que se baseia no campo elétrico tangencial ao condutor. Nesse modelo, diversas fontes de tensão são inseridas no condutor, cada uma delas correspondendo ao produto do campo elétrico tangencial ($E_k(t)$) pelo comprimento do trecho k considerado, conforme mostrado na Fig. 3.3.

Cada segmento da linha irá corresponder a uma fonte de tensão cuja amplitude é dada pelo produto do campo elétrico pelo comprimento do segmento, resultando em diversas fontes de tensão distribuídas ao longo da linha, conforme mostrado na Fig. 3.3. Como resultado, ondas de tensão e corrente

serão excitadas pelas fontes distribuídas e se propagarão ao longo da linha. A tensão e a corrente em um dado ponto da linha resultam da superposição das diversas ondas incidentes e refletidas.

Fica claro, portanto, que tratar um circuito como uma linha requer uma solução bem mais complexa do que tratá-lo como um laço, necessitando normalmente de programas de computador dedicados para esse cálculo [3]-[5]. Felizmente, a maioria dos casos de instalações elétricas em edificações pode ser tratada como laço, onde a solução através do campo magnético resulta em fórmulas compactas e de fácil uso. Essa característica será analisada na seção seguinte.

3.2 - TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM LAÇOS INTERNOS DE EDIFICAÇÕES

Essa seção aborda as tensões e correntes induzidas por descargas atmosféricas (“surtos”) nos laços (“loops”) formados pelo cabeamento interno de edificações. As descargas atmosféricas normalmente incidem no SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas) de uma edificação ou em objetos elevados situados nas proximidades, como árvores ou torres. Os intensos campos eletromagnéticos produzidos pelas descargas atmosféricas podem induzir surtos perigosos nos condutores internos da edificação, que são aplicados nas portas dos equipamentos elétricos e eletrônicos. Caso a intensidade do surto seja superior ao nível de resistibilidade de um dado equipa-

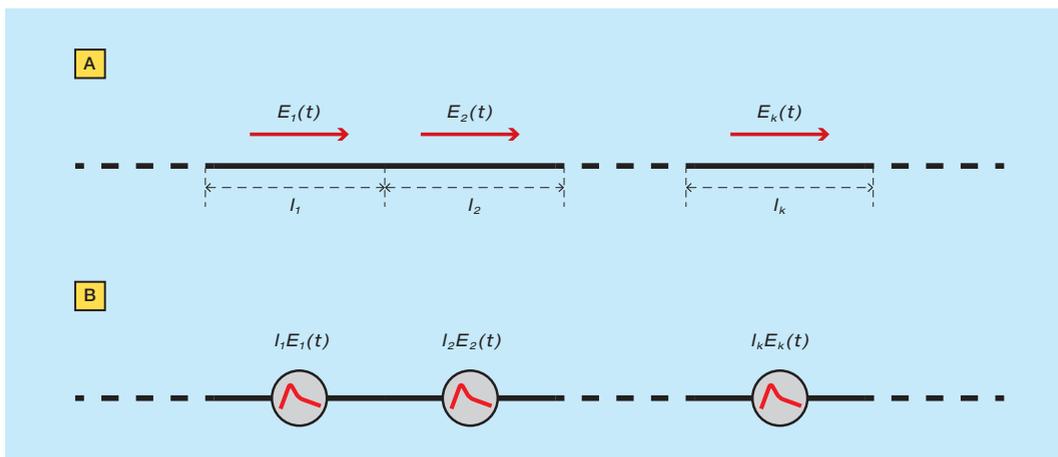


Fig. 3.3 - Modelo de Agrawal para indução de tensões em linhas.

mento, ele será danificado. A Fig. 3.4 ilustra como descargas atmosféricas incidindo em diferentes pontos induzem surtos no laço formado pelo cabo de força e pelo cabo de sinais de uma televisão.

O acoplamento dos campos eletromagnéticos com os laços internos de edificações é complexo, de forma que será apresentada aqui apenas uma visão geral do problema. O objetivo é apresentar uma abordagem qualitativa que, com a utilização de fórmulas aproximadas, possibilite estimar os valores dos surtos esperados nas portas dos equipamentos. Essa abordagem também possibilita dimensionar técnicas de proteção visando mitigar os surtos de forma a garantir a integridade dos equipamentos instalados no interior da edificação.

Essa seção considera os circuitos eletricamente curtos, isto é, aqueles que podem ser tratados como laços (ver Seção 3.1.2). A abordagem será feita no domínio do tempo, considerando a corrente de retorno de uma descarga atmosférica como fonte de excitação. Esses surtos são gerados por descargas atmosféricas que atingem a estrutura que abriga o laço ou que atingem um ponto nas proximidades da estrutura (ver Fig. 3.4).

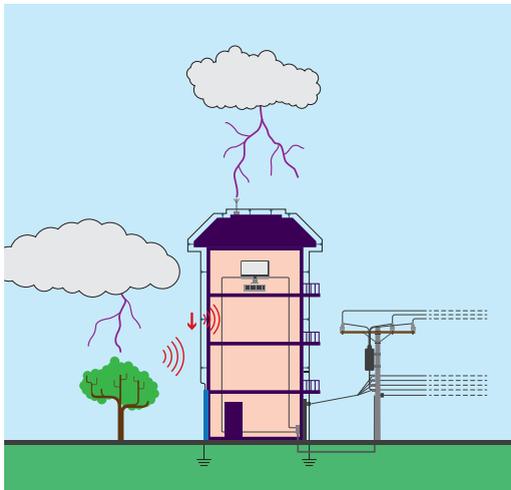


Fig. 3.4 - Indução de surtos no cabeamento interno de uma edificação.

3.2.1 ASPECTOS QUALITATIVOS

Considere-se o circuito da Fig. 3.5(A), onde a corrente i gera um campo magnético que “ilumina” o laço da figura. Como a corrente

é vertical, o campo magnético é azimutal, i.e., as suas linhas de campo são circulares, centradas no condutor e contidas em planos horizontais. O sentido do campo magnético é dado pela “regra da mão direita”, ou seja, abraçando-se o condutor com a mão direita e estendendo-se o polegar no sentido da corrente, os outros dedos indicam o sentido do campo magnético (ver Fig. 3.6). Por exemplo, na Fig. 3.5(A) as linhas do campo magnético “entram” no plano do laço, o que é indicado pelos símbolos “xxx” na figura. Já na Fig. 3.5(B), como o sentido da corrente foi invertido, as linhas do campo magnético “saem” do plano do laço, o que é indicado pelos símbolos “...” na figura.

O sentido e a variação do campo magnético que atravessa o laço determina a polaridade da tensão induzida. Considera-se que a corrente na Fig. 3.5(A) aumenta linearmente com o tempo, o que faz com que a intensidade do campo magnético também aumente linearmente com o tempo. Nessa condição, a corrente induzida no laço se opõe à variação do campo magnético no laço, o que leva a uma corrente induzida no sentido anti-horário (veja a regra da mão-direita) e uma tensão negativa detectada pelo voltímetro. De maneira análoga, na Fig.3.5(B) a corrente induzida circula no sentido horário e a tensão no voltímetro tem polaridade positiva.

A intensidade da tensão induzida no laço é proporcional ao fluxo magnético concatenado pelo laço. Isso significa que quanto maior a área do laço iluminada pelo campo magnético, maior será a tensão induzida. Dessa forma, reduzindo o tamanho do laço da Fig. 3.7(A) para o laço da Fig. 3.7(B), reduz-se a tensão induzida. Outra forma de reduzir a tensão induzida é aumentar a distância entre o laço e a fonte indutora, pois a intensidade do campo magnético cai com o aumento da distância da fonte.

Outra possibilidade é mudar a posição do plano do laço em relação ao condutor por onde flui a corrente indutora. Isso é mostrado na Fig. 3.7.C, onde o laço é girado de um ângulo θ em relação ao plano que contém a corrente indutora e passa pelo centro do laço. Como resultado, a tensão induzida fica atenuada pelo fator $k = \cos \theta$. O caso $\theta = 90^\circ$ leva a $\cos \theta = 0$ e uma tensão induzida

nula, pois as linhas de campo magnético ficam tangenciais ao plano do laço, resultando em um fluxo magnético nulo.

A tensão induzida em um laço também pode ser reduzida através da transposição do laço, que significa mudar a posição relativa entre seus condutores. Isso é mostrado na Fig. 3.7(D), onde a tensão induzida em uma parte do laço tem polaridade positiva e na outra

parte tem polaridade negativa, cancelando-se mutuamente. Para um laço adequadamente transposto, a tensão reduzida resultante é próxima de zero. A técnica de transposição é muito utilizada em cabos de comunicação, como aqueles utilizados em linhas de telecomunicações (pares trançados) e nos cabos de dados, como por exemplo, nos cabos UTP de rede Ethernet (UTP: *Unshielded Twisted Pair*), conforme mostrado na Fig. 3.8.

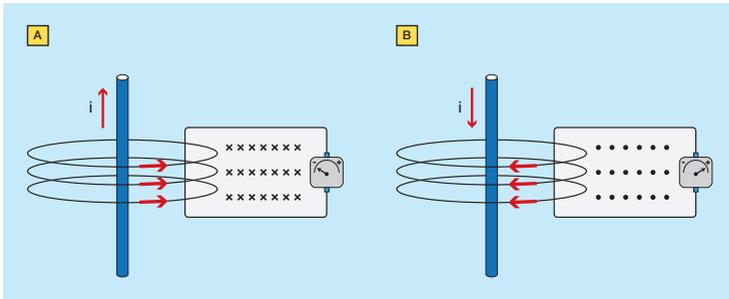


Fig. 3.5 - Laço iluminado por campo magnético. (A) Corrente ascendente; (B) Corrente descendente.

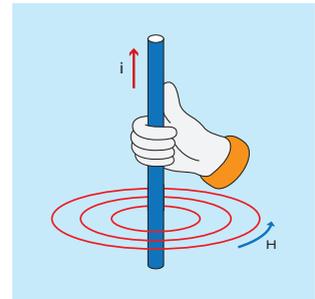


Fig. 3.6 - Regra da Mão Direita.

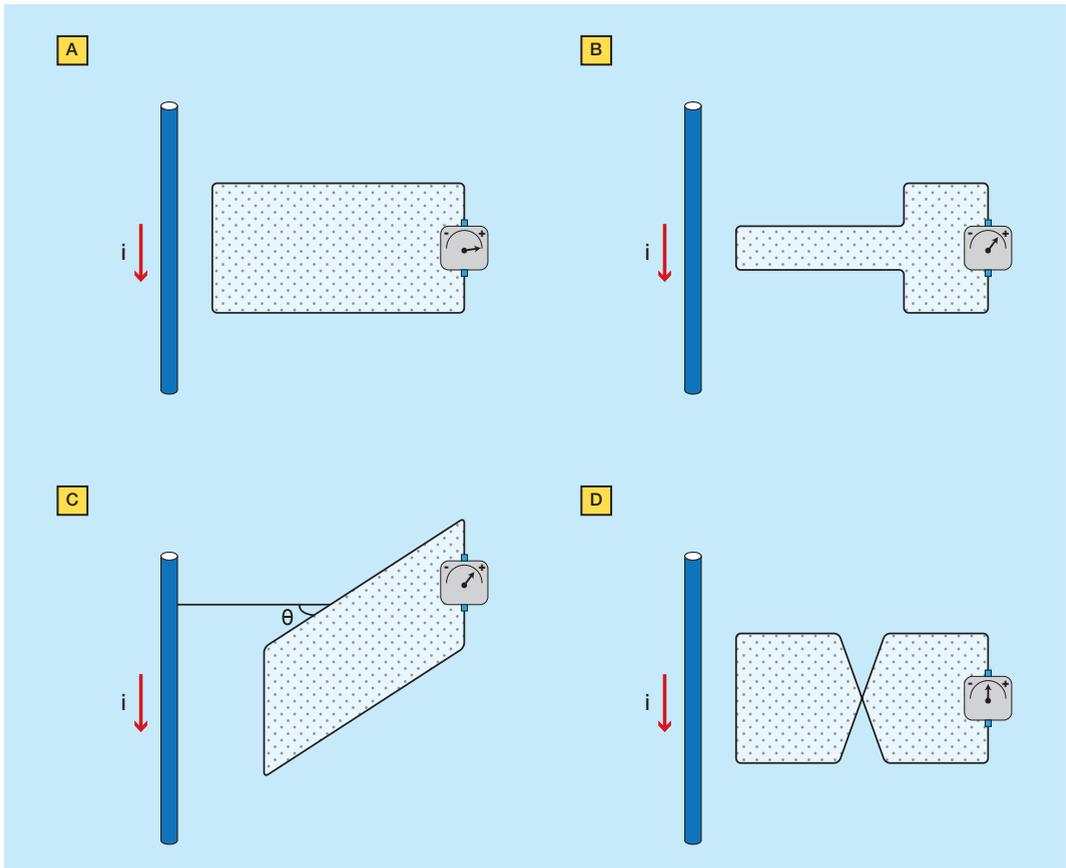
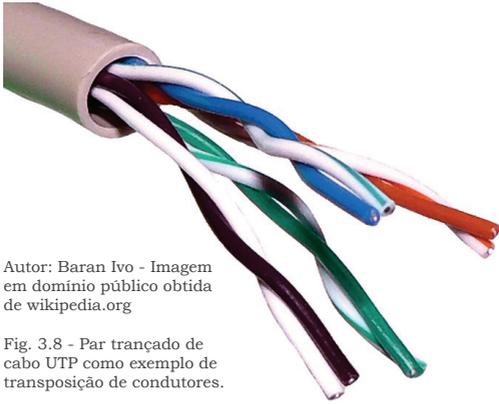


Fig. 3.7 - Variações da tensão induzida em um laço. (A) Caso de referência; (B) Área do laço reduzida; (C) Laço em ângulo; (D) Laço transposto.



Autor: Baran Ivo - Imagem em domínio público obtida de wikipedia.org

Fig. 3.8 - Par trançado de cabo UTP como exemplo de transposição de condutores.

3.2.2 - TENSÃO INDUZIDA EM UM LAÇO ABERTO

Na seção anterior foram vistos vários aspectos qualitativos que afetam a tensão induzida. Nesta seção serão vistos os aspectos quantitativos, i.e., aqueles que possibilitam o cálculo da tensão induzida em um laço, considerando que o mesmo está aberto.

Considera-se a situação mostrada na Fig.3.9, onde a corrente indutora flui por um condutor com comprimento muito maior que a distância que o separa do laço e situado no mesmo plano que contém o laço. Cabe observar que a resistência do voltímetro é assumida como muito elevada, de forma que o laço pode ser considerado aberto na posição do voltímetro. Segundo a Lei de Ampère [6], a intensidade do campo magnético é proporcional à corrente e inversamente proporcional à distância do fio, i.e.:

$$H = \frac{i(t)}{2\pi x} \tag{3.1}$$

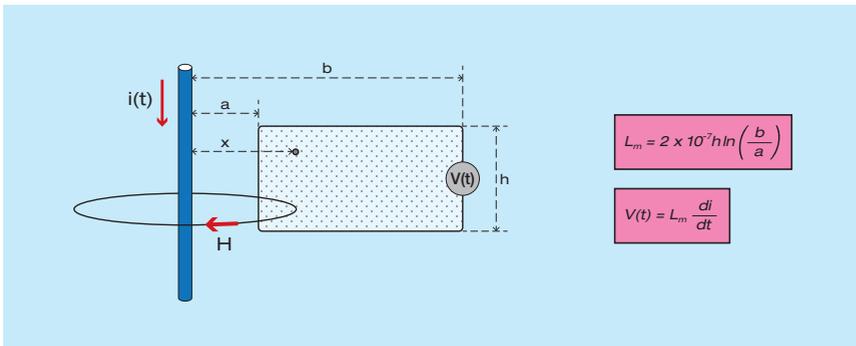


Fig. 3.9 Dimensões consideradas no cálculo da tensão induzida: a = 20m; b = 24m; h = 2m.

Observe-se que, no caso considerado de um fio longo retilíneo, o campo magnético não varia com a altura. O fluxo magnético Φ concatenado no laço é dado pela integral do campo magnético ao longo do laço, multiplicada pela permeabilidade magnética μ do meio. Dessa forma, o fluxo magnético é dado por:

$$\Phi = \frac{i(t) \mu h}{2\pi} \int_a^b \frac{dx}{x} = \frac{i(t) \mu h}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{3.2}$$

Segundo a Lei de Faraday [6], a tensão induzida no laço é dada pela taxa de variação temporal do fluxo magnético:

$$V(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu h}{2\pi} \frac{di}{dt} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{3.3}$$

Observe-se que na equação (3.3) o sinal negativo indica a polaridade da tensão induzida, conforme visto na seção anterior. A permeabilidade magnética do ar é muito próxima da do vácuo e vale $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Inserindo-se esse valor em (3.3) obtém-se:

$$V(t) = 2 \times 10^{-7} h \frac{di}{dt} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \tag{3.4}$$

Por exemplo, considera-se que o laço tem 2m de altura, 4m de largura e está situado a 20 m de uma torre metálica atingida por um raio. Nessas condições, $h = 2$ m, $a = 20$ m e $b = 24$. Considera-se que a taxa de variação da corrente é $di/dt = 100$ kA/ μ s, que corresponde ao valor padronizado para a descarga negativa principal [7]. Inserindo-se esses valores em (3.4), obtém-se o valor de pico da tensão induzida $V_p = 7,3$ kV. A fórmula (3.4) pode ser escrita de uma forma mais compacta, conforme indicado na Fig. 3.9.

A forma de onda da tensão induzida depende da forma de onda da corrente indutora. A Fig.3.10(A) mostra a forma de onda de corrente trapezoidal, considerando o valor de pico de 100kA e o tempo de frente de 1 μ s. Já a Fig.3.10(B) mostra a forma de onda tensão induzida para essa corrente, obtida a partir da fórmula (3.4). Observa-se que a tensão induzida é nula depois que a corrente indutora atinge o valor de 100kA, pois ela passa a ser constante ($di/dt = 0$).

Por sua vez, a Fig.3.11(A) mostra a forma de onda padronizada [7], com o valor de pico de 100kA, enquanto a Fig.3.11(-B) mostra a forma de onda tensão induzida para essa corrente, também obtida a partir da fórmula (3.4). Observa-se que a tensão induzida tem duração menor que a corrente indutora, pois a indução ocorre prin-

cipalmente durante a frente da onda de corrente (elevados valores de di/dt). Além disso, o valor de pico da tensão induzida (10,2kV) é maior do que o calculado para a corrente trapezoidal (7,3kV), porque a taxa de variação temporal da corrente atinge o valor máximo de 139,6kA/ μ s em um momento durante a frente de onda.

Para as dimensões consideradas na Fig.3.9, a indutância mútua entre o condutor vertical (torre) e o laço é $L_m = 2 \times 10^{-7} \times 2 \times \ln(24/20) = 7,3 \times 10^{-8}$ H, ou seja, $L_m = 73$ nH. Note-se que, embora a indutância mútua seja muito pequena, a tensão induzida no caso considerado atingiu 7,3 kV de pico. Isso decorre da elevada taxa de variação temporal da corrente das descargas atmosféricas (no exemplo, 100kA/ μ s).

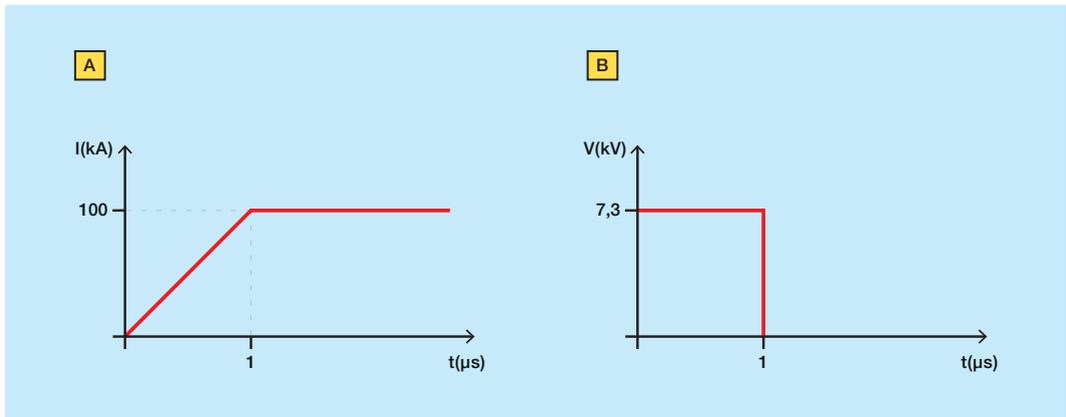


Fig. 3.10 - (A) Corrente trapezoidal; (B) Tensão induzida no laço da Fig. 3.8.

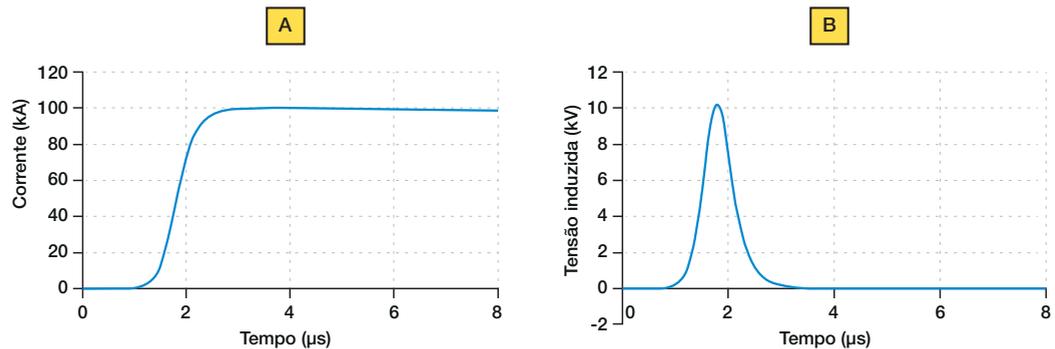


Fig. 3.11 - (A) Corrente de descarga negativa principal; (B) Tensão induzida no laço da Fig. 3.9.

3.2.3 - CORRENTE INDUZIDA EM UM LAÇO EM CURTO-CIRCUITO

Considera-se a situação mostrada na Fig.3.12, onde que o voltímetro foi substituído por um amperímetro, caracterizando um laço em circuito fechado. Conforme visto anteriormente, a corrente induzida no laço tende a cancelar o campo magnético incidente. De fato, caso a resistência dos fios do laço seja nula, a corrente que flui pelo laço é aquela necessária para cancelar totalmente a tensão induzida pela corrente indutora. Em termos matemáticos, essa condição de contorno se expressa por:

$$L_{Laço} \frac{di_2}{dt} = L_m \frac{di_1}{dt} \quad (3.5)$$

onde i_1 é a corrente indutora, i_2 é a corrente induzida, L_m é a indutância mútua entre o circuito da corrente indutora e o laço, e $L_{Laço}$ é a indutância própria do laço. Considerando que inicialmente tanto i_1 quanto i_2 são nulas (i.e., $i_1(0) = i_2(0) = 0$), a expressão (3.7) pode ser simplificada pela expressão mostrada na Fig. 3.12. Essa expressão mostra que a corrente induzida i_2 é idêntica à corrente indutora i_1 , exceto pela sua amplitude, que é reduzida pelo fator $L_m / L_{Laço}$. A Fig. 3.12 também apresenta uma expressão para a indutância própria de um

laço retangular, a qual é necessária para calcular a corrente induzida.

Cabe observar que essa expressão é a base do funcionamento de transformadores de corrente, onde a corrente do secundário (no caso, i_2) reproduz a corrente do primário (no caso, i_1), reduzida pelo fator de transformação. Para um transformador de corrente, a relação entre a indutância própria e a mútua corresponde à relação de espiras.

Considerando o laço da Fig.3.12 e que o raio do fio é 1mm, obtém-se uma indutância própria de $L_p = 17,1\mu\text{H}$. Portanto, a corrente induzida é idêntica à corrente indutora, multiplicada pelo fator $L_m / L_p = 0,073 / 17,1 = 0,00427$. O valor de pico da corrente induzida é $100\text{kA} \times 0,00427 = 427\text{ A}$. Em termos práticos, supondo-se que o laço esteja conectado na porta de um equipamento eletrônico protegida por um DPS, esse DPS deve ser capaz de conduzir a corrente do surto.

A aplicação desta fórmula é ilustrada na Fig.3.13, considerando as dimensões do laço da Fig.3.9. A corrente indutora e a corrente induzida são mostradas na Fig.3.13(A) e Fig.3.13(B), respectivamente. Observa-se que a corrente induzida é uma “miniatura” da corrente indutora.

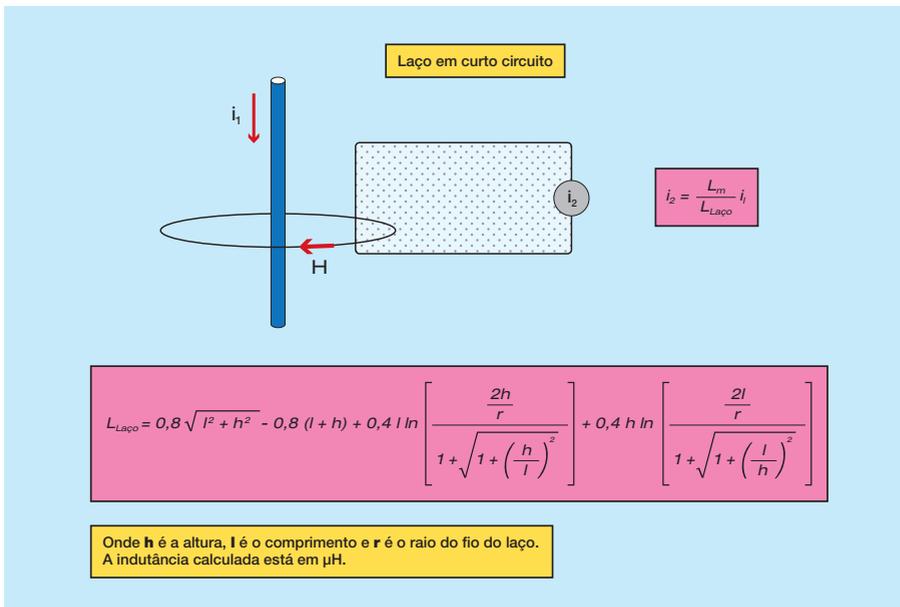


Fig. 3.12
Corrente induzida em um laço em curto-circuito.

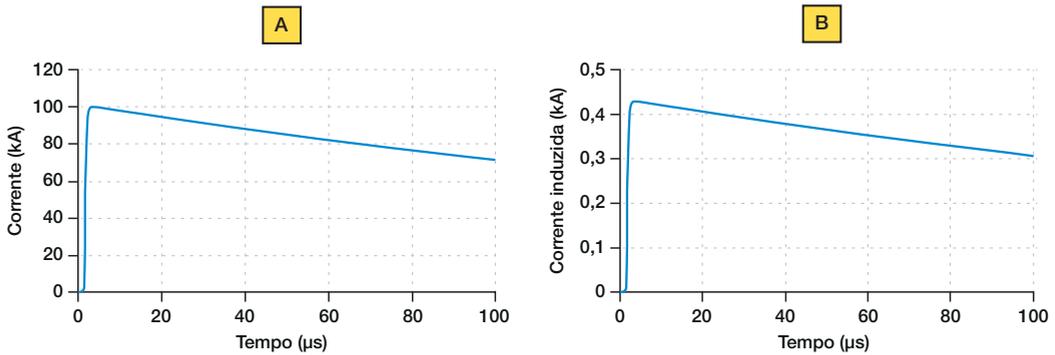


Fig. 3.13 - (A) Corrente de descarga negativa principal segundo IEC62305-1; (B) Corrente induzida no laço da Fig. 3.12.

3.2.4 - TENSÃO E CORRENTE INDUZIDAS EM UM LAÇO COM CARGA

Nas seções anteriores foram analisados os casos de um laço em circuito aberto e em curto-circuito, que são situações extremas que se aproximam de alguns casos encontrados na prática. No entanto, na maioria dos casos práticos há sempre alguma carga no circuito, quer seja a terminação capacitiva da porta de um equipamento, a resistência e a indutância do condutor do laço ou mesmo a impedância não linear apresentada por um DPS. Essa seção analisa esses casos, fazendo uso das expressões desenvolvidas nas seções anteriores.

Considere-se o circuito da Fig.3.14(A), onde a impedância Z_i pode ser uma combinação de cargas resistiva, capacitiva e indutiva. Interessa saber a tensão desenvolvida nesta impedância. Em termos práticos, Z_i pode ser a impedância de entrada de um equipamento eletrônico. Supõe-se, para simplificar, que o outro lado do laço foi curto circuitado por um DPS. O circuito vertical da corrente indutora pode representar uma torre de telefonia celular instalada nas imediações da edificação e o estudo visa saber se um raio atingindo a torre pode danificar o equipamento de comunicação.

Para calcular a tensão em Z_i , é necessário montar um circuito equivalente para o laço, o qual é mostrado na Fig. 3.14(B). Observa-se nessa figura que foi introduzida uma fonte de tensão $V(t)$, a qual é dependente da corrente da descarga atmosférica e das dimensões envolvidas. A tensão fornecida por

essa fonte é calculada pela fórmula apresentada na Fig. 3.9.

Além da fonte de tensão, foi inserida no laço uma indutância correspondente à indutância própria do laço. Para um laço retangular, essa indutância pode ser calculada pela fórmula (3.9). Observa-se que foi também inserida no laço uma resistência, que corresponde à resistência do condutor do laço. Em muitos casos essa resistência é desprezível, especialmente quando há outras resistências no laço. No entanto, não se pode, a priori, desprezar a resistência do condutor do laço, principalmente para condutores finos como os usados em linhas de comunicação. A resistência R_f do fio pode ser obtida pelas expressões dadas na Fig. 3.15, onde r e l são o raio e o comprimento do fio, respectivamente. Dessa forma, o condutor de cobre de 1mm de raio e 12m de comprimento considerado no exemplo anterior apresenta uma resistência de $65\text{m}\Omega$.

Um aspecto a ser considerado na determinação da resistência do condutor é o efeito pelicular, i.e., o aumento na resistência devido à migração da corrente para a periferia do condutor. Esse efeito é difícil de ser modelado com precisão no domínio do tempo. Para tal, propõe-se uma adaptação do modelo aproximado desenvolvido por Al-Asadi et al. [8], que também é mostrado na Fig. 3.15.

Considerando o efeito pelicular e o tempo de frente da corrente indutora de $1\mu\text{s}$, o condutor do exemplo anterior terá sua resistência aumentada de $65\text{m}\Omega$ para $390\text{m}\Omega$. Como visto, o efeito pelicular aumenta significan-

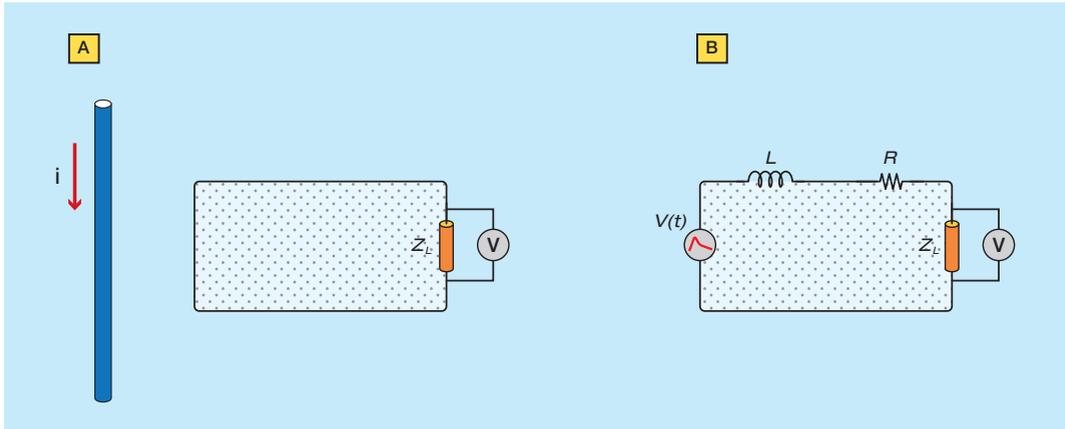


Fig. 3.14 - (A) Laço com carga Z_1 exposto aos efeitos da corrente indutora i ; (B) Circuito equivalente para o cálculo da tensão induzida observada em Z_1 .

Resistência do fio do laço:

$$R_f = \frac{l \rho}{\pi r^2}$$

ρ é a resistividade do material:
 Cobre: $\rho = 1,7 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$
 Alumínio: $\rho = 2,8 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$

Se for considerado o efeito pelicular:

$$R_f = \frac{l \rho}{\pi r^2} \left[r^2 - \left(r - \delta \left(1 - e^{-r/\delta} \right) \right)^2 \right]^{-1}$$

$e = 2,718$ é a base de logaritmos naturais e δ é a profundidade de penetração dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2T_{\text{FRETE}} \rho}{\pi \mu}}$$

T_{FRETE} é o tempo de frente da corrente indutora e μ é a permeabilidade magnética do condutor ($\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ para os metais não-ferrosos).

Fig. 3.15 - Resistência de um condutor cilíndrico.

temente a resistência do condutor para uma corrente impulsiva. Cabe observar que a aproximação expressa em (3.9) é válida para correntes induzidas oscilatórias e para frente de onda de correntes induzidas unipolares, pois a resistência do condutor tende a voltar para o seu valor dado por (3.8) na medida em que a taxa de variação da corrente induzida tende a zero. Caso exista no circuito uma resistência da ordem de algumas dezenas de Ohms, o efeito da resistência do condutor se torna desprezível, o que ocorre na maioria dos casos práticos. Para os exemplos apresentados nesse capítulo, será considerada uma resistência do condutor de 400m Ω .

Uma vez montado o circuito para representar o laço da Fig. 3.14(A) e calculados os valores dos seus parâmetros e da fonte,

cabe calcular a tensão desenvolvida na impedância Z_1 . O cálculo analítico dessa tensão é muito trabalhoso para ser feito manualmente. Felizmente, esse tipo de circuito é facilmente resolvido pelos métodos numéricos incorporados nos softwares de simulação de circuitos. Dessa forma, é altamente recomendável utilizar um desses softwares para resolver o circuito da Fig.3.14(B). São exemplos de softwares de simulação de circuitos o PSpice e o TINA TI. Este último, disponibilizado pela Texas Instruments®, é bastante intuitivo e pode ser obtido gratuitamente através da internet.

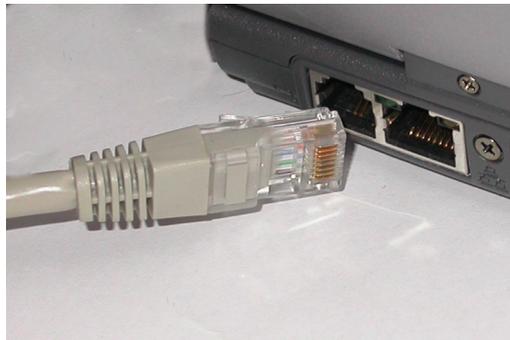
Para efeito de ilustração, considera-se que a impedância Z_1 corresponde a um capacitor de 1 nF em série com um resistor de 19 Ω . Este tipo de impedância representa a termi-

nação de modo comum de uma porta LAN, que é o terminal padrão Ethernet utilizado para acesso à internet por meio metálico (ver Fig. 3.16).

Dessa forma, o circuito simulado representa um cabo de rede (UTP) conectando duas portas LAN (e.g., um roteador com um computador). O fechamento do laço é feito pelo condutor de proteção (PE) da linha de energia elétrica (linha de força), conforme mostrado na Fig.3.17. Caso um ou os dois equipamentos não tenham condutor PE, o fechamento do laço se dá pelos cabos de força.

A representação do circuito da Fig. 3.17 é mostrada na Fig. 3.18, onde as tensões V_1 e V_2 correspondem às tensões de modo comum (i.e., para a massa) desenvolvidas nas portas LAN do roteador e do computador,

respectivamente. Por simetria, conclui-se que $V_1 = V_2$, i.e., as tensões aplicadas às portas LAN são idênticas. Na prática, pequenas diferenças podem ocorrer em função de variações nos valores dos componentes.



Autor: Clemens Pfeiffer - Imagem em domínio público obtida de wikipedia.org - Fig. 3.16 - Cabo UTP e conector RJ45 de uma porta LAN (Ethernet).

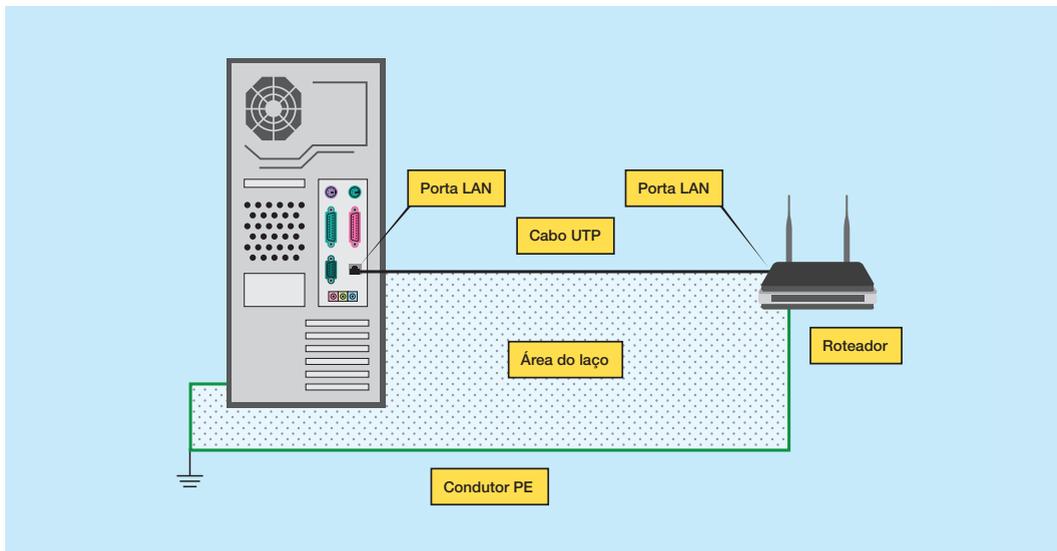


Fig. 3.17 - Possível situação prática de um laço conectando dois equipamentos.

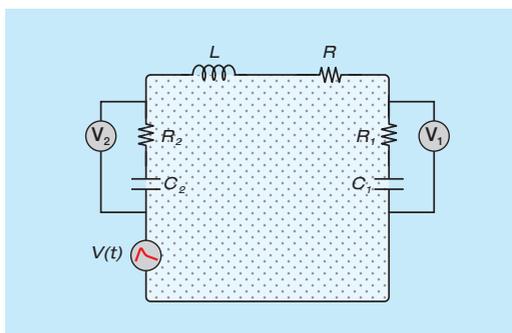


Fig. 3.18 - Circuito equivalente da situação apresentada na Fig. 3.14.

O resultado da simulação é mostrado na Fig. 3.19, onde se observa que a forma de onda da tensão aplicada nas portas LAN é semelhante à tensão de circuito aberto (ver Fig. 3.11(B)), embora apresente algumas oscilações na sua cauda. Essas oscilações são causadas pela indutância do laço e pelas capacitâncias das portas LAN, enquanto sua atenuação é produzida pelas resistências das portas LAN. Observa-se também que o valor de pico é próximo da metade do valor de pico da tensão induzida em circuito aberto, pois a tensão induzida no laço se divide entre as duas portas LAN.

O valor de pico da tensão nas portas LAN é 5,9 kV, o que significa que não haverá danos nesses equipamentos caso eles atendam ao requisito especificado pela ITU-T K.21 [9], conforme indicado na Tabela A1 da NBR 5419-4 [10]. Essa norma inclui um teste que requer que a porta LAN suporte a aplicação de pulsos de 6kV de amplitude, em ambas polaridades.

Para efeito de exemplo, supõe-se que a porta LAN do computador produza um centelhamento para a massa (chassi da placa). Para simplificar a simulação, considera-se que o centelhamento é representado por um curto-circuito do cabo UTP para a massa, na entrada do computador da Fig. 3.17. O circuito equivalente para simulação é mostrado na Fig. 3.20.

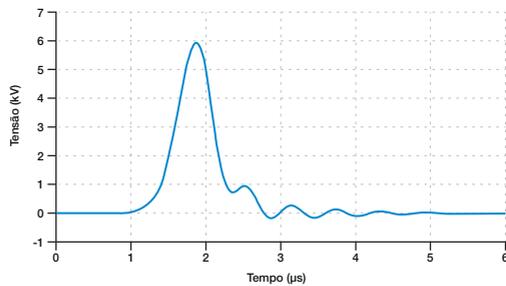


Fig. 3.19 - Tensão desenvolvida na porta LAN do roteador da Fig. 3.14.

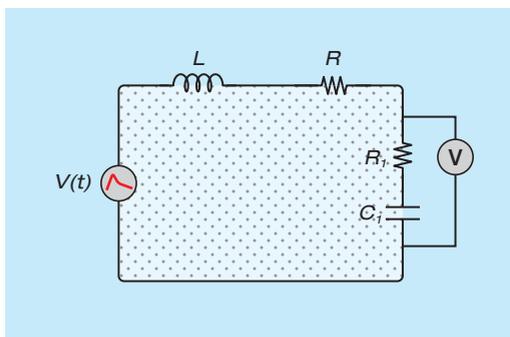


Fig. 3.20 - Circuito equivalente da situação apresentada na Fig. 3.17, supondo centelhamento na porta LAN do computador

O resultado da simulação é mostrado na Fig. 3.21, onde se observa que as oscilações na cauda ficam bem mais nítidas e menos atenuadas. Isso ocorre porque a capacitância do circuito dobrou e a resistência caiu praticamente para a metade, devido ao centelhamento na porta LAN do computador. A capacitância dobra porque antes havia dois capacitores em sé-

rie e agora ficou apenas um. Da mesma forma, antes havia dois resistores em série e agora resta apenas um. Observe-se que a resistência do fio tem efeito desprezível nesse caso.

O valor de pico atingido pela tensão induzida foi de 13,5kV, o qual é superior ao valor de pico da tensão de circuito aberto, que é 10,2kV (ver Fig. 3.10(B)). Esse aumento do valor de pico da tensão aplicada na entrada do equipamento é devido ao efeito da indutância própria do laço e da capacitância de entrada do equipamento. Além disso, esse valor é mais do dobro do valor de pico observado quando não havia centelhamento no computador (5,9kV), pois nesse caso a tensão não mais se divide entre as duas portas LAN. Nesse caso, é provável que ocorra centelhamento também no roteador.

Em termos práticos, a ocorrência de centelhamento pode ou não causar danos no equipamento, dependendo de onde ele ocorre. Por exemplo, um centelhamento do pino do conector RJ45 diretamente para a massa do equipamento provavelmente não causará danos, enquanto um centelhamento deste pino para uma trilha ativa provavelmente causará. Em última análise, a consequência de um centelhamento depende do projeto do equipamento e deve ser avaliada através de ensaios laboratoriais. Preferencialmente, o equipamento deve conter componentes de proteção contra surtos para evitar centelhamentos.

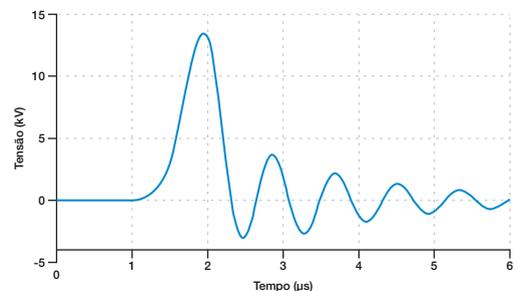


Fig. 3.21 - Tensão desenvolvida na porta LAN do roteador da Fig. 3.17, considerando um centelhamento para a massa do lado do computador.

Supõe-se agora que o equipamento seja dotado de um DPS na sua porta LAN, o qual limita a tensão em níveis seguros. Nesse caso, importa saber a corrente conduzida por esse DPS, visando verificar se ele não será danificado por conduzir uma corrente excessiva. Para simplificar, o DPS é simula-

do por um curto-circuito, conforme mostrado na Fig. 3.22. A representação do DPS por um curto-circuito é válida quando o DPS é baseado na tecnologia de centelhador a gás.

O resultado da simulação é mostrado na Fig. 3.23, onde se verifica que o valor de pico da corrente é bem próximo do valor de pico da corrente induzida no laço em curto-circuito (ver Fig. 3.13.(B)). No entanto, a cauda é bem mais curta, apresentado um tempo de cauda de 25 μ s, enquanto a corrente no laço em curto-circuito apresenta um tempo de cauda de 200 μ s. Essa redução no tempo de cauda é devida à resistência do fio do laço, o que ressalta a sua importância neste caso. A duração da corrente é importante para determinar a energia dissipada no DPS, de forma que, quanto mais longa a corrente, maior a sollicitação feita ao DPS.

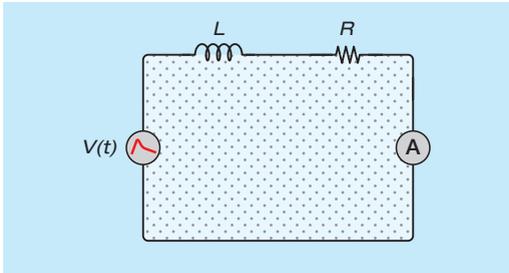


Fig. 3.22 - Circuito equivalente da situação apresentada na Fig. 3.17, supondo a instalação de DPS do tipo centelhador a gás nas portas LAN do computador e do roteador.

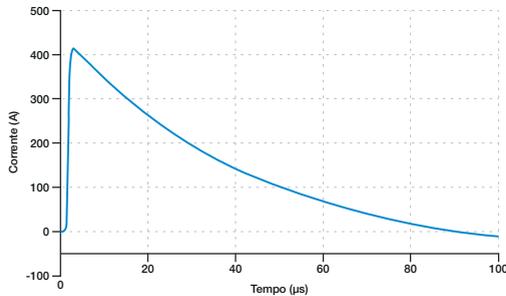


Fig. 3.23 - Corrente através dos DPS baseados em tecnologia de centelhador a gás e instalados nas portas LAN dos equipamentos da Fig. 3.17.

No exemplo anterior, os DPS foram representados como curto-circuito. Essa aproximação é válida para DPS baseados em centelhadores a gás, pois a impedância do arco elétrico normalmente pode ser desprezada. No entanto, DPS baseados em varistores de óxido metálico (MOV) ou em junções semicondutoras apresentam uma tensão residual que exerce

importante influência na forma de onda da corrente que por eles flui. Essa situação é mostrada na Fig. 3.24, onde os DPS são modelados para apresentar uma tensão residual de $V_z = 100V$ cada. A simulação desse componente pode ser feita por dois diodos Zener em série, com polaridades oposta se cujos parâmetros são convenientemente ajustados. Cabe observar que esse tipo de DPS não é normalmente utilizado em portas LAN.

O resultado da simulação é mostrado na Fig. 3.25, onde se observa que a corrente de pico é praticamente a mesma da Fig. 3.20, mas a sua cauda é significativamente mais curta. De fato, o uso de um DPS baseado em tecnologia MOV, ou semicondutor, levou a um tempo de cauda que é cerca da metade do tempo de cauda observado para um DPS baseado em tecnologia de centelhador a gás. Observa-se que o tempo de cauda da corrente é 20 μ s, i.e., coincide com o valor da forma de onda de corrente normalmente utilizada para especificar esse tipo de DPS (onda 8/20 μ s). Outro aspecto interessante a ser observado na onda da Fig.3.25 é que a corrente cai de forma praticamente linear com o tempo e se extingue na passagem por zero.

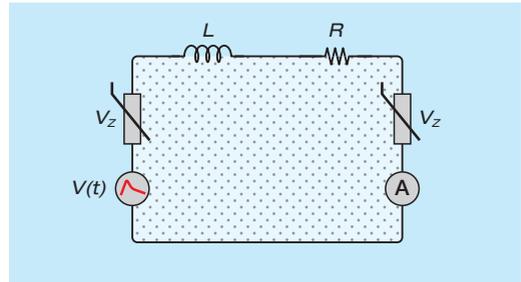


Fig. 3.24 - Circuito equivalente da situação apresentada na Fig. 3.17, supondo instalação de DPS do tipo MOV ou semicondutor nas portas LAN do computador e do roteador.

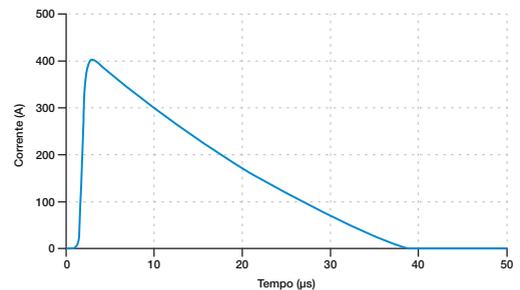


Fig. 3.25 - Corrente através dos DPS baseados em tecnologia MOV ou semicondutor instalado nas portas LAN dos equipamentos da Fig. 3.17.

3.2.5 - METODOLOGIA DA NBR 5419-4

A NBR 5419-4 [10] apresenta no seu Anexo A5 uma metodologia simplificada para o cálculo do valor de pico da tensão ($U_{oc/max}$) induzida em um laço em circuito aberto e da corrente ($I_{sc/max}$) induzida em um laço em curto circuito. As principais simplificações consideradas são:

- ☑ A forma de onda corrente da descarga atmosférica é representada por um trapézio, caracterizado por um tempo de frente (T_f) e um valor de pico (I_0). Nessas condições, a derivada temporal da corrente durante a frente de onda é constante e dada por: $di / dt = I_0 / T_f$;
- ☑ O campo magnético é considerado constante ao longo do laço e representado pelo seu valor no ponto médio do laço;
- ☑ A resistência do condutor do laço é desprezada.

As expressões para a tensão de circuito

aberto ($U_{oc/max}$) e para a corrente de curto circuito ($I_{sc/max}$), de acordo com a NBR 5419-4, são dadas na Fig. 3.26. Nessa figura foram utilizados os mesmos símbolos utilizados na NBR 5419-4 para as variáveis, visando facilitar a identificação das expressões na norma.

A aproximação da forma de onda da corrente por um trapézio leva a um valor ligeiramente menor para a tensão induzida, porque as formas de onda usuais das descargas atmosféricas apresentam valores máximos das derivadas temporais da corrente (di / dt), mais elevados do que o valor correspondente à onda trapezoidal. Já a aproximação do campo magnético pelo seu valor no meio do laço fornece resultados em boa concordância com a formulação mais completa apresentada nas Seções 3.2.2 e 3.2.3, desde que a distância entre a corrente indutora e o laço (d_{w1}) seja muito maior do que a largura do laço (d). Conforme demonstrado anteriormente, não considerar a resistência do condutor do laço tende a aumentar o valor de pico da corrente induzida para a descarga principal positiva.

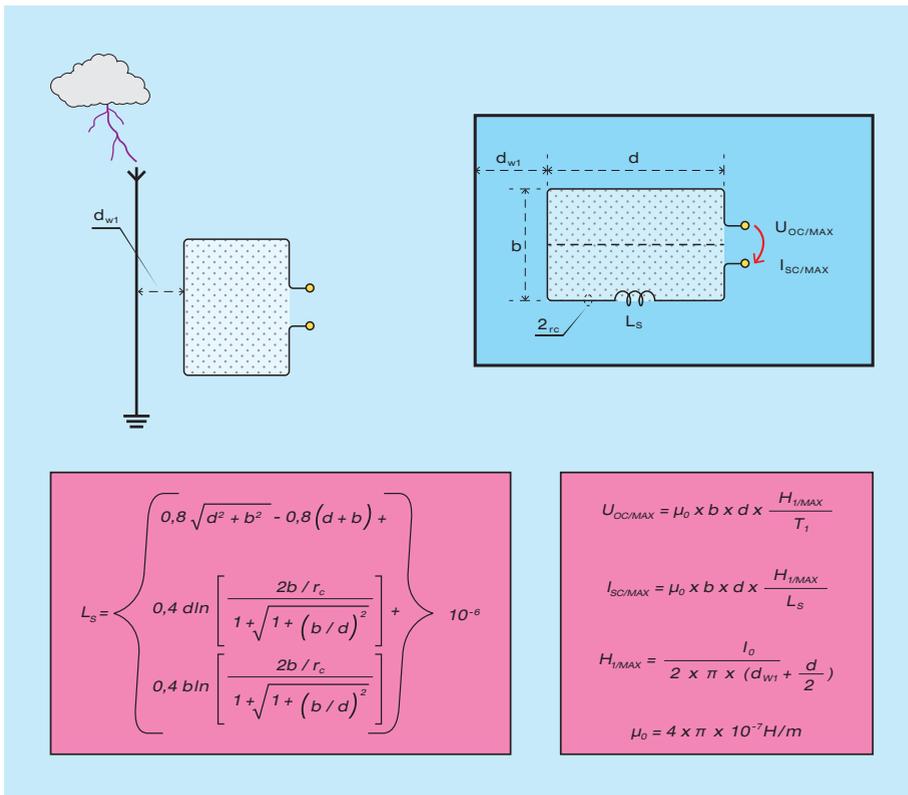


Fig. 3.26 Expressões aproximadas da NBR 5419-4 [10] para o cálculo dos valores de pico das correntes e tensões induzidas em um laço por uma corrente em um condutor vertical longo.

A título de exemplo, é calculada a tensão induzida no laço da Fig. 3.9, segundo as expressões da NBR 5419-4 reproduzidas na Fig. 3.26. Considerando a descarga principal negativa normalizada pela NBR 5419-1 [7], tem-se $I_0 = 100.000$ A e $T_1 = 10^{-6}$ s. O campo magnético no centro do laço é dado por:

$$H_{1/MAX} = \frac{I_0}{2 \times \pi \times (d_{w1} + \frac{a}{2})} = \frac{100000}{2 \times \pi \times (20 + 2)} = 723,4 \text{ A/m}$$

A tensão de circuito aberto no laço é dada por:

$$U_{OC/MAX} = \mu_0 \times b \times l \times \frac{H_{1/MAX}}{T_1} = 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2 \times 4 \times \frac{723,4}{10^{-6}} = 7.273 \text{ V}$$

Esse valor concorda muito bem com o valor calculado na Seção 3.2.2 para uma corrente trapezoidal (7.293V). Nesse caso, a diferença entre os valores decorre da aproximação feita pela NBR 5419-4 ao considerar o campo magnético constante. Essa aproximação se mostra muito boa para a condição considerada, onde a largura do laço (4m) é muito menor do que a distância entre o laço e a corrente indutora (20m).

Por outro lado, ao considerar a forma de onda padronizada pela NBR 5419-1 [7] para a primeira descarga positiva, obtêm-se 10.180 V para o valor de pico da tensão de circuito aberto. Conforme comentado anteriormente, essa diferença decorre do maior valor de pico da derivada temporal da corrente (di/dt) da descarga padronizada.

De maneira análoga, a corrente de curto circuito no laço é calculada pela formulação da NBR 5419-4 como:

$$I_{SC/MAX} = \mu_0 \times b \times l \times \frac{H_{1/MAX}}{L_s} = 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 2 \times 4 \times \frac{723,4}{17,1 \times 10^{-6}} = 425 \text{ A}$$

Esse valor concorda muito bem com a corrente de curto circuito de 427A calculada na Seção 3.2.3. Essa boa concordância se deve ao fato da largura do laço (4m) ser muito menor do que a distância entre o laço e a corrente indutora (20m). Cabe observar que a indutância própria do laço considerado é $L_s = 17,1\mu\text{s}$, calculada com a expressão mostrada na Fig. 3.26.

3.3 - TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM LINHAS QUE ATENDEM EDIFICAÇÕES

Essa seção aborda as tensões e correntes induzidas por descargas atmosféricas nas linhas de energia e de comunicação que chegam a uma edificação. As descargas atmosféricas que incidem nas imediações das

linhas geram tensões e correntes perigosas nos condutores dessas linhas, as quais são conduzidas para o interior da edificação e aplicadas nas portas dos equipamentos elétricos e eletrônicos (ver Fig. 3.27). Caso as tensões e correntes sejam superiores ao nível de resistibilidade de um dado equipamento, o mesmo será danificado. As descargas que incidem diretamente nas linhas também implicam em correntes elevadas que são conduzidas para o interior da edificação e esta situação será analisada no Capítulo 6.

O acoplamento dos campos eletromagnéticos gerados pelas descargas atmosféricas com os condutores das linhas é um assunto complexo, que ainda é objeto de estudos. Dessa forma, esse capítulo apresenta uma

visão geral dos modelos mais utilizados, mostrando amplitudes e formas de onda típicas das tensões e correntes induzidas em linhas. Essas informações serão úteis para a definição de técnicas para mitigar essas tensões e correntes, garantindo assim a integridade dos equipamentos instalados no interior da edificação.

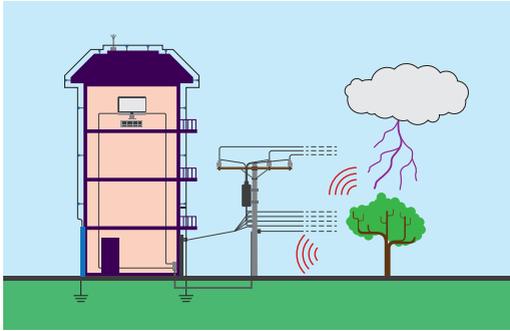


Fig. 3.27 - Tensões e correntes de origem atmosférica conduzidas por linhas para o interior de uma edificação.

3.3.1 - OS CAMPOS INDUTORES

A descarga de retorno (*returnstroke*) é a componente de uma descarga atmosférica que envolve uma corrente elevada, sendo a principal fonte de surtos nas linhas. Essa descarga de retorno é usualmente modelada pelos chamados “modelos de engenharia”, que são simplificações do fenômeno físico que

possibilitam cálculos suficientemente precisos para as aplicações práticas. O modelo mais simples e utilizado é o TL (*Transmission Line*) [11], que modela o canal da descarga atmosférica como uma linha de transmissão retilínea e vertical, por onde a corrente da descarga de retorno viaja sem sofrer atenuação nem distorção. Os efeitos da carga depositada pelo líder descendente são desprezados, pois o processo de deposição dessa carga é relativamente lento.

Neste modelo, a descarga de retorno é iniciada na base do canal e se propaga com uma velocidade v , da ordem de 50% da velocidade da luz no vácuo. Na medida em que se propaga, a descarga de retorno deposita cargas ao longo do canal, conforme ilustrado na Fig. 3.28. Nessas condições, o campo elétrico tem uma componente devida às cargas do canal e outra componente devida à corrente.

A primeira componente é dada pela derivada espacial do potencial escalar φ gerado pelas cargas, enquanto a segunda componente é dada pela derivada temporal do potencial vetor \mathbf{A} gerado pela corrente, conforme mostrado na Fig. 3.28. Os campos eletromagnéticos gerados pela descarga de retorno são mostrados na Fig. 3.29.

A presença de um solo de condutividade

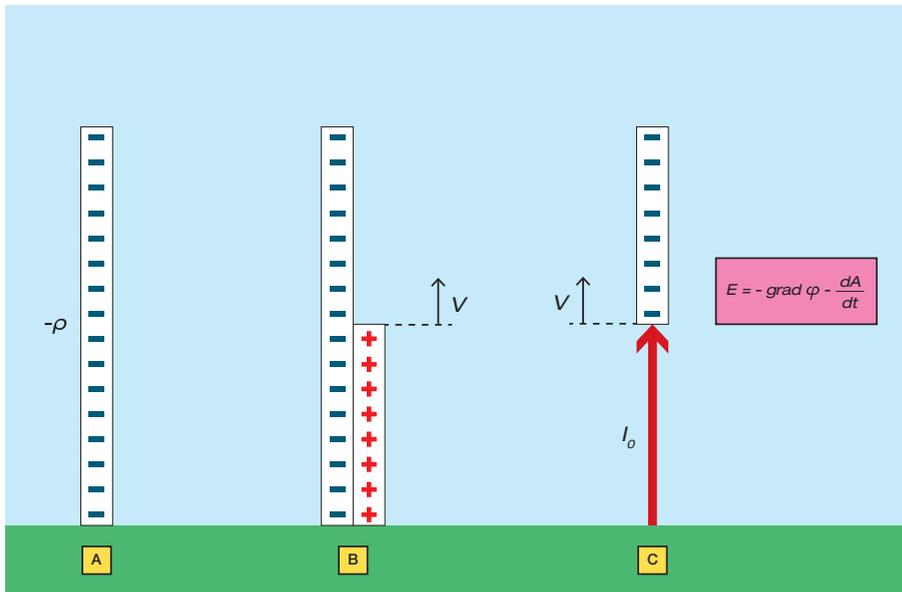


Fig. 3.28
Formação da descarga de retorno segundo o modelo TL: (A) Carga depositada no canal pelo líder; (B) Carga depositada no canal pela descarga de retorno; (C) corrente associada com a descarga de retorno. Adaptado de [12].

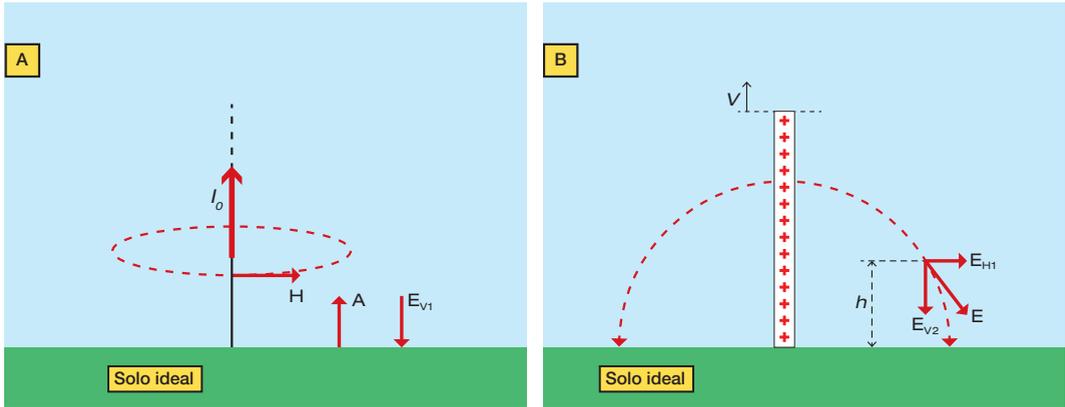


Fig. 3.29(A) Campo magnético e elétrico gerados pela corrente; (B) Campo elétrico gerado pela carga depositada no canal de descarga de retorno.

finita também dá origem a mais duas componentes de campo elétrico: (i) Componente resultante da circulação de correntes induzidas no solo; (ii) Componente resultante do fluxo de corrente pela base do canal da descarga. Essas componentes são ilustradas na Fig. 3.30.

Um trabalho clássico que modela de forma consistente o fenômeno da indução de tensões em uma linha aérea por uma descarga atmosférica foi realizado por S. Rusck [12], onde o solo é modelado como sendo um condutor perfeito. O tratamento do solo como imperfeito (i.e., com condutividade finita) para efeito do cálculo dos campos eletromagnéticos gerados por uma descarga atmosférica foi realizado pela primeira vez por Zeddarn [13], utilizando uma solução numérica das integrais de Sommerfeld [14]. No entanto, as integrais de Sommerfeld apre-

sentam dois inconvenientes: (i) são de difícil convergência; (ii) são expressas no domínio da frequência. Esses inconvenientes fazem com que a sua solução numérica para uma excitação impulsiva (como no caso de descargas atmosféricas) requeira alto recurso computacional, em termos de capacidade e tempo de processamento, o que é crítico mesmo para computadores modernos.

Uma solução aproximada para o problema foi desenvolvida por Rubinstein [15], tendo como base a impedância de superfície modelada por Cooray [16]. A expressão resultante é conhecida como fórmula Cooray-Rubinstein e tem sido amplamente utilizada para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas [17]-[19]. No entanto, a fórmula Cooray-Rubinstein é no domínio da frequência, o que impõe algumas limitações no seu uso. A primeira delas

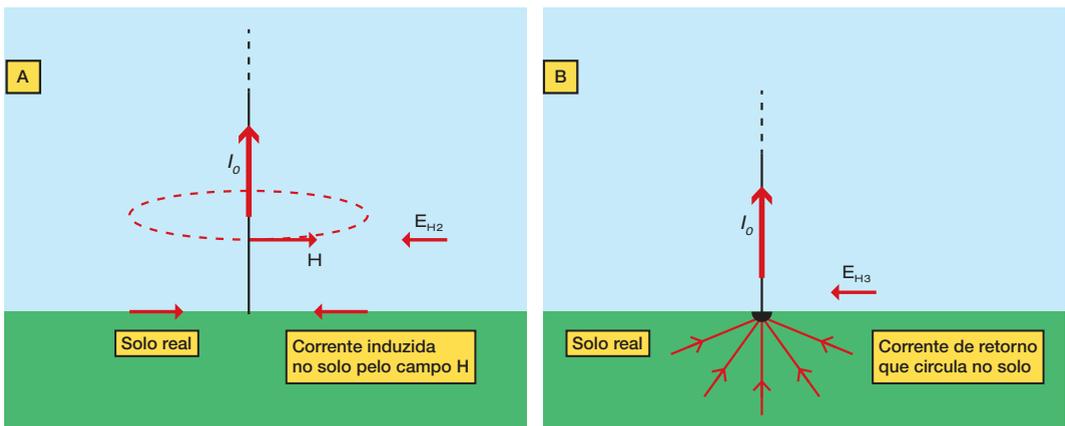


Fig. 3.30- Campos originados no solo. (A) Campo elétrico gerado pelas correntes induzidas no solo; (B) Campo elétrico gerado pela corrente que flui pela base do canal.

é o custo computacional, pois o cálculo deve ser feito em milhares de frequências para possibilitar a aplicação da transformada inversa de Fourier visando expressar o resultado no domínio do tempo. Outra limitação, inerente ao domínio da frequência, é impossibilidade de tratar fenômenos não-lineares, como o chaveamento de circuitos ou a operação de DPS.

Uma solução aproximada para o problema, desenvolvida diretamente no domínio do tempo, foi realizada por Barbosa et al. [20]. Essa solução foi posteriormente complementada para cobrir regiões relativamente próximas do canal da descarga [21], onde a fórmula Cooray-Rubinstein perde a sua validade. O limite de validade dessas expressões foi investigado por Cooray [22], utilizando como referência resultados obtidos a partir das integrais de Sommerfeld.

Trabalhos posteriores desenvolveram versões da fórmula Cooray-Rubinstein no domínio do tempo [24]-[25] sem, no entanto, remover a sua limitação para pontos relativamente próximos do canal da descarga.

Nos últimos anos tem aumentado o uso de técnicas numéricas para o cálculo direto dos campos eletromagnéticos produzidos por descargas atmosféricas, sendo a mais popular a Diferença Finita no Domínio do Tempo (FDTD: *Finite-Difference Time-Domain*). Baba e Rakov apresentam com visão geral dessas técnicas numéricas, com ên-

fase em FDTD [26].

3.3.2 - TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM LINHAS AÉREAS

Como visto anteriormente, a descarga atmosférica gera campos elétricos que possuem componentes horizontais e verticais, as quais interagem com os condutores de uma linha horizontal, conforme mostrado na Fig. 3.31. A componente de campo elétrico paralela ao condutor “empurra” as cargas livres do condutor, dando origem a tensões viajantes na linha (usualmente designadas como *scattered voltages*). Já a componente de campo vertical não afeta as cargas no condutor.

Se, em um dado ponto da linha, esticarmos um fio do condutor até o solo e intercalarmos um voltímetro nesse fio, a tensão medida pelo voltímetro corresponderá à integral do campo elétrico ao longo do fio. Essa tensão tem duas componentes: (i) Componente devida à integral do campo vertical indutor gerado pela descarga; (ii) Componente devida à integral do campo gerado pelas cargas viajantes. Essa última componente é chamada “tensão viajante” ou “*scattered-voltage*” no ponto considerado.

Dependendo da resistividade do solo e da posição ao longo da linha, essas componentes podem ter a mesma polaridade ou polaridades opostas, neste último caso podendo resultar em tensões induzidas bipolares.

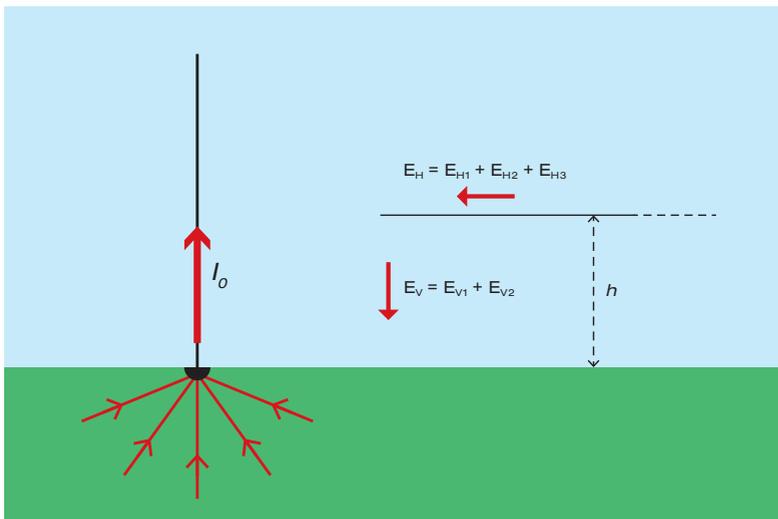


Fig. 3.31- Campos elétricos atuando em um condutor aéreo.

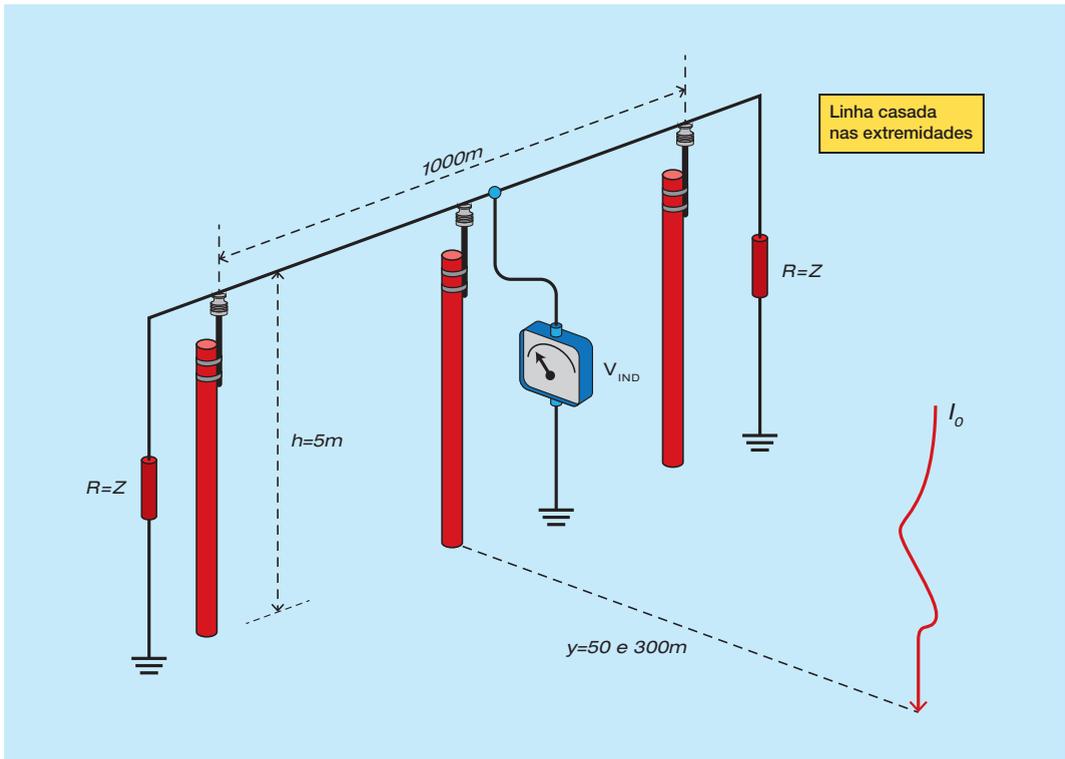


Fig. 3.32- Arranjo para cálculo da tensão induzida em linha de um fio.

Baseado nas equações e na metodologia de cálculo de tensões induzidas descritas em [27]-[28], o grupo de Compatibilidade Eletromagnética e Alta Tensão da UFMG desenvolveu o código computacional TIDA (**T**ensões **I**nduzidas por **D**escargas **A**tmosféricas). O TIDA é uma plataforma computacional que permite o cálculo das tensões induzidas por uma descarga atmosférica em uma linha de dois fios, um deles podendo ser multiaterrado. O solo pode ser modelado como um solo uniforme ou um solo de duas camadas com resistividades diferentes [29]. Utilizando o Programa TIDA, foram simuladas algumas formas de onda da tensão induzida em uma linha aérea de um fio. O arranjo para o cálculo da tensão induzida é mostrado na Fig. 3.32. As simulações foram feitas considerando:

- ⊙ Distâncias descarga-linha iguais a 50 e 300m;
- ⊙ Altura da linha igual a 5m;
- ⊙ Solo ideal ($\rho = 0$) e solos de resistividades

iguais a $\rho = 100\Omega\text{m}$ e $\rho = 1000\Omega\text{m}$;

- ⊙ Formas de onda da corrente padronizadas [7]: descarga principal negativa (100kA – 1x200 μs) e descarga subsequente (50kA – 0,25x100 μs).

As formas de onda das tensões induzidas são mostradas nas Fig. 3.33 e 3.34.

As curvas das Figs. 3.33 e 3.34 mostram que as tensões induzidas atingem valores bem elevados. A influência do valor da resistividade do solo é marcante: quanto maior o valor da resistividade, maior o valor das tensões induzidas. A distância da descarga à linha também é um fator importante: quanto menor a distância descarga-linha, maiores os valores das tensões. As tensões induzidas pela descarga subsequente têm valores da ordem de 50% dos valores das tensões induzidas pelas descargas principais, mostrando que o valor de pico da tensão induzida depende mais do valor de pico da corrente indutora do que do seu tempo de frente. Observe-se que as ondas utiliza-

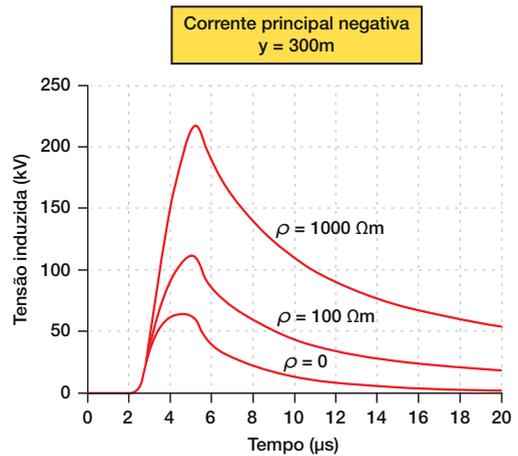
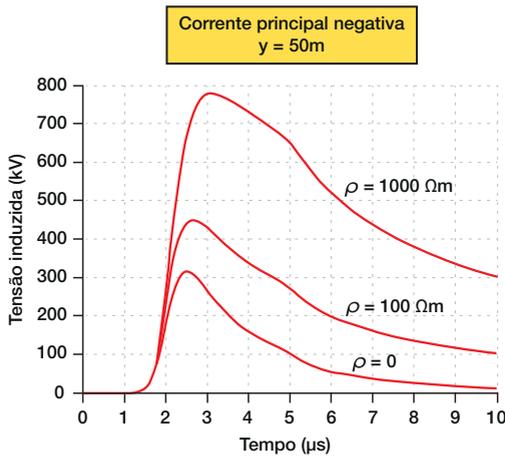


Fig. 3.33 - Tensões induzidas em um condutor a h = 5m de altura; Descarga principal negativa (110kA) incidindo a 50m e 300m, para diferentes valores de resistividade do solo.

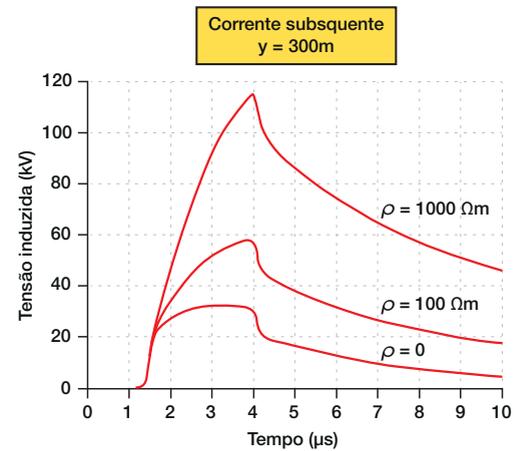
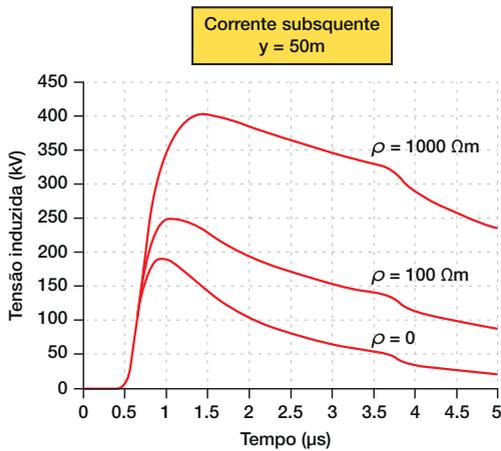


Fig. 3.34 - Tensões induzidas em um condutor a h = 5m de altura; Descarga subsequente (50kA) incidindo a 50m e 300m, para diferentes valores de resistividade do solo.

das são aquelas padronizadas [7], onde a corrente de descarga subsequente tem tempo de frente 4 vezes menor e valor de pico 2 vezes menor do que a descarga principal.

Foram também simuladas algumas formas de onda da corrente induzida em uma linha aérea de um condutor, conforme mostrado na Fig. 3.35. As curvas da Fig. 3.36 mostram que as correntes induzidas atingem valores bem elevados, da ordem de milhares de Ampères, mas com caudas relativamente curtas (da ordem de 10 μ s). Observe-se que uma variação de dez vezes

no valor da resistência de aterramento provocou uma variação de apenas 30% no valor da corrente induzida. A variação relativamente pequena no valor da corrente se deve ao fato de que a impedância de surto da linha, que é da ordem de 500 Ω , limita o valor da corrente.

Portanto, um DPS conectado a uma linha aérea deverá ser capaz de drenar uma corrente impulsiva de alguns milhares de Ampères de pico, com uma forma de onda que pode ser representada pela onda padronizada de 8/20 μ s.

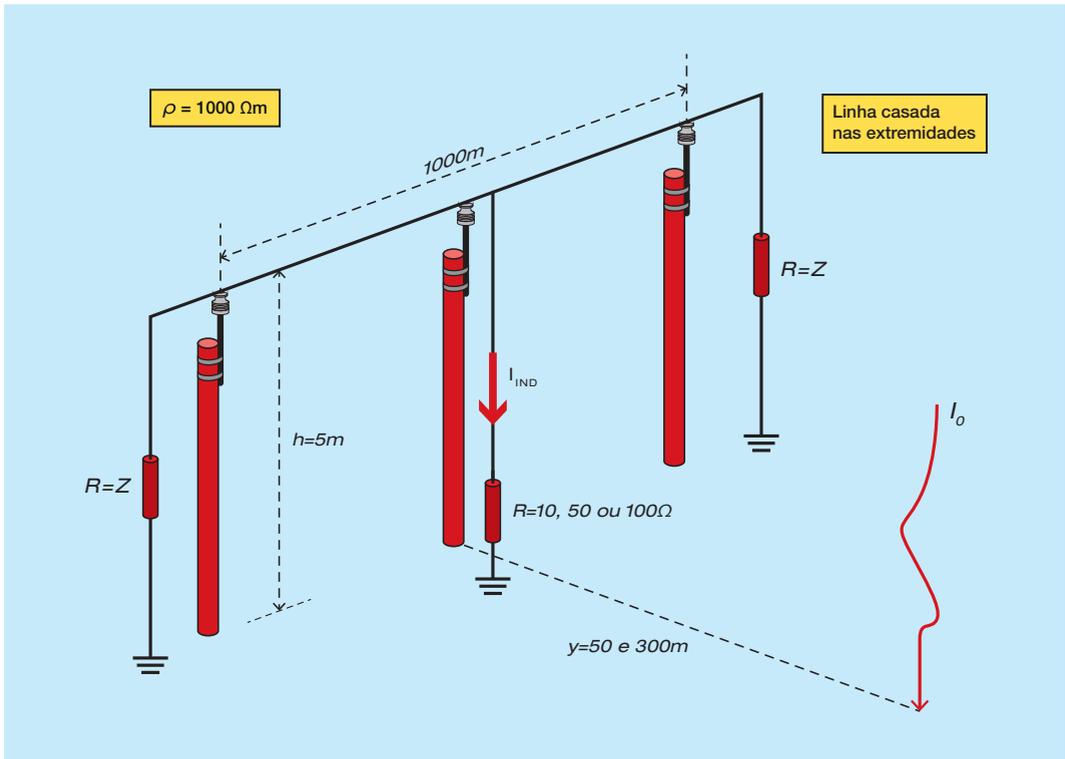


Fig. 3.35- Arranjo para cálculo da corrente induzida em um condutor aéreo aterrado.

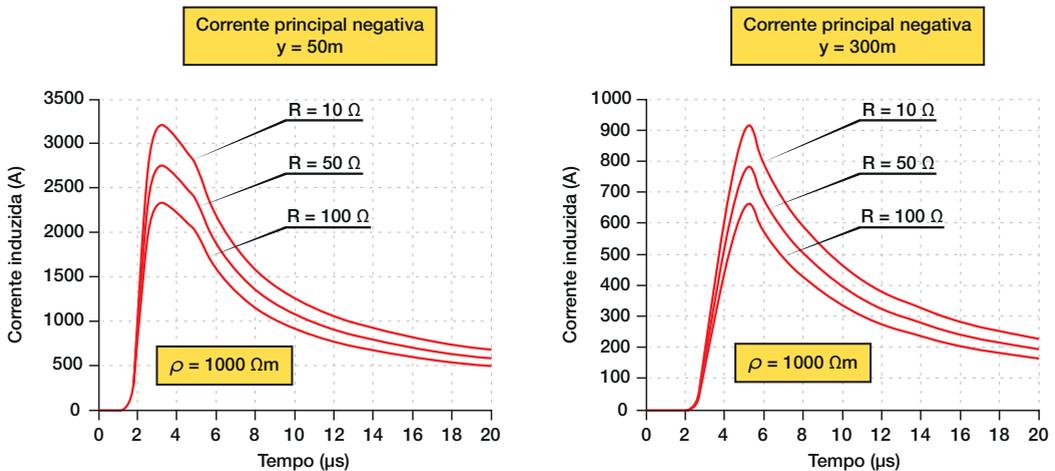


Fig. 3.36- Correntes induzidas em uma linha de um condutor aéreo aterrado. Descarga Principal Negativa (100kA) a 50 ou 300m da linha, $\rho = 1000\Omega\text{m}$ e $R = 10, 50$ ou 100Ω .

3.3.3 - TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM CONDUTORES ENTERRADOS

As descargas atmosféricas também induzem tensões e correntes em condutores isolados enterrados no solo. O processo de indução é semelhante ao descrito para

condutores aéreos, embora nesse caso a contribuição do campo elétrico vertical seja desprezível. Além disso, o campo elétrico horizontal produzido pelas cargas do canal também é desprezível, restando apenas a componente de campo elétrico horizontal gerada no solo de condutividade finita.

Essa componente de campo “empurra” as cargas livres do condutor, gerando tensões viajantes (*scattered voltages*). Essas tensões, e as correntes associadas, podem atingir valores significativos, especialmente para solos de elevada resistividade. A referência [30] apresenta resultados obtidos em medições realizadas em um cabo enterrado.

Utilizando a metodologia descrita na referência [31] é possível o cálculo da corrente induzida no cabo enterrado.

Considerando um solo de resistividade igual a $1000\Omega\text{m}$ e a corrente padronizada para a descarga negativa principal (100kA), o valor de pico da corrente induzida atinge $2,5\text{kA}$ em um ponto de aterramento onde

a resistência vale 10Ω . A Fig. 3.37 mostra a configuração considerada para o cabo enterrado e a posição da descarga atmosférica, enquanto a Fig. 3.38 mostra as correntes induzidas para diferentes valores de resistência de aterramento. Observa-se que essas correntes não são muito diferentes das calculadas para o condutor aéreo (ver Fig. 3.36). Contribui para essa característica o fato da impedância do condutor enterrado ser menor do que a do condutor aéreo.

Portanto, um DPS conectado a uma linha subterrânea deverá ser capaz de drenar uma corrente impulsiva de alguns milhares de Ampères de pico, com uma forma de onda que pode ser representada pela onda padronizada de $8/20\mu\text{s}$.

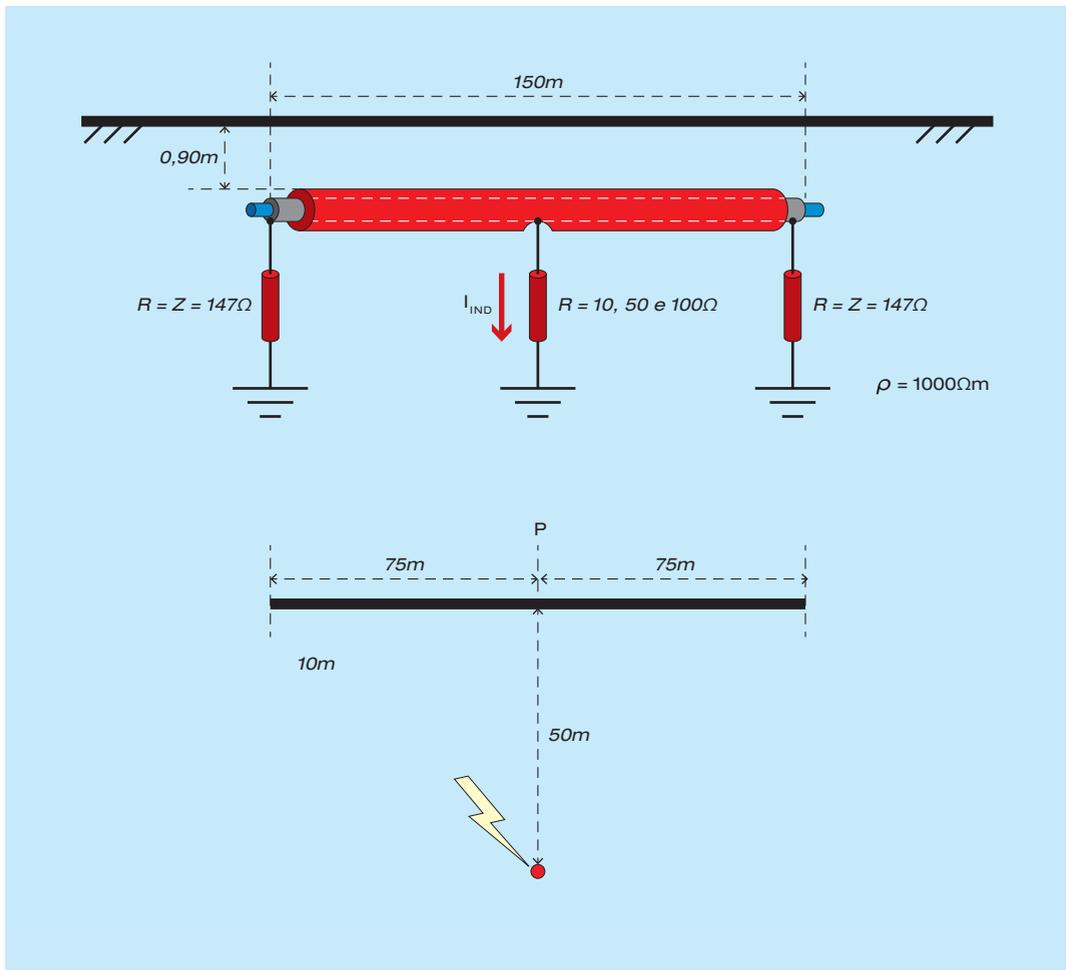


Fig. 3.37- Arranjo para cálculo da corrente induzida em um condutor enterrado aterrado.

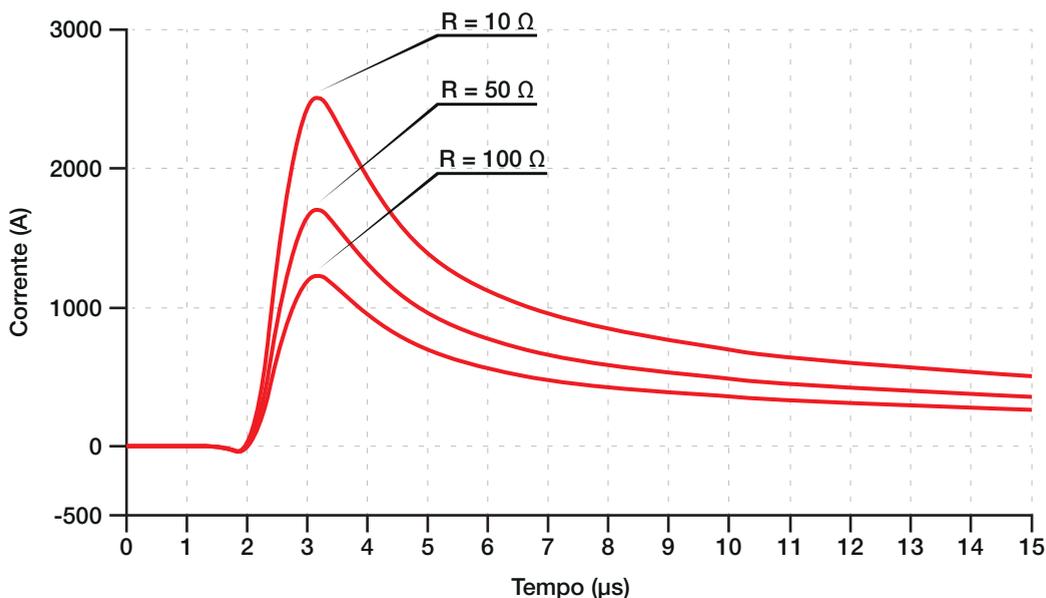


Fig. 3.38 - Correntes induzidas em uma linha de um condutor enterrado aterrado. Descarga Principal Negativa (100kA) a 50 ou 300m da linha, $\rho = 1000\Omega\text{m}$ e $R = 10, 50$ ou 100Ω .

3.3.4 - TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS EM CABOS BLINDADOS

No caso de cabos blindados, a tensão é induzida da blindagem para a terra. A blindagem se comporta como se fosse um condutor e a metodologia anteriormente apresentada para o cálculo das correntes e tensões induzidas pode ser aplicada, inclusive nos casos onde a blindagem é aterrada.

As correntes que circulam na blindagem dos cabos induzem tensões nos condutores internos do cabo. Em geral, os valores dessas tensões não são elevados, mas dependem das características (e.g., impedância

de transferência) e também do comprimento da blindagem. A Fig. 3.39 ilustra as tensões que aparecem entre os condutores internos, para um cabo blindado contendo um par de fios, onde podem ser identificadas as tensões: (i) entre o fio 1 e a blindagem (V_{1b}); (ii) entre o fio 2 e a blindagem (V_{2b}); (iii) e entre os fios 1 e 2. Esse assunto será tratado em detalhes no Capítulo 5.

3.3.5 - SURTOS ESPERADAS NO INTERIOR DE EDIFICAÇÕES

Nas seções anteriores foi visto como as descargas atmosféricas induzem tensões e correntes nas linhas que atendem uma

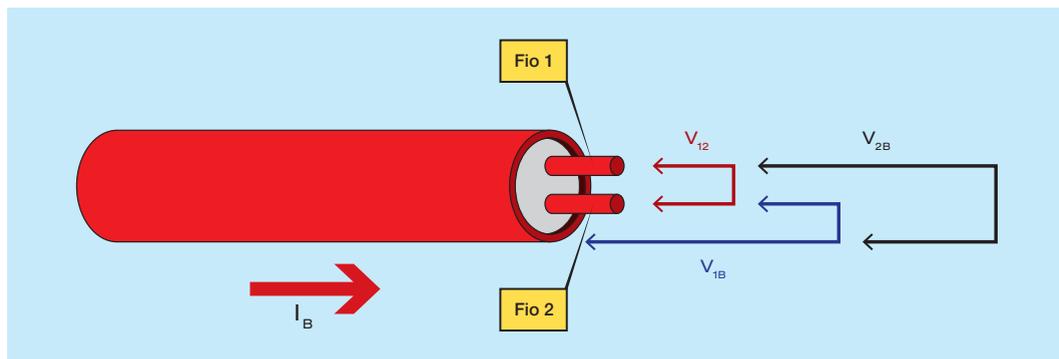


Fig. 3.39 - Tensões que aparecem nos fios internos devido a circulação de corrente pela blindagem de um cabo blindado.

edificação, que podem ser calculadas com boa precisão pelo software TIDA. Foi visto também que essas tensões e correntes dependem das características das descargas atmosféricas, as quais têm natureza probabilística: distância da linha, intensidade e forma de onda da corrente, velocidade da descarga, etc. Além disso, as características do solo e os parâmetros da linha também afetam as tensões induzidas: resistividade e permissividade do solo, altura e topologia da linha, aterramentos, centelhamentos, etc. Dessa forma, as normas técnicas se baseiam em resultados de medições que representam estatisticamente o fenômeno considerado. Essa seção apresenta uma metodologia para estimar a intensidade dos surtos conduzidos para o interior de edificações, com base nas diretrizes propostas por normas técnicas.

3.3.5.1 - ESTIMATIVA DE SURTOS EM LINHAS DE BAIXA TENSÃO

A metodologia apresentada nesta seção se baseia nas normas técnicas publicadas pelo

Institute of Electrical and Electronic Engineers - Surge Protective Devices Committee (IEEE SPDC), as quais tratam dos surtos em redes elétricas de baixa tensão [32]-[34]. Essas normas propõem o uso do gerador de onda combinada para representar a fonte dos surtos. Esse gerador apresenta uma tensão de circuito aberto com forma de onda $1,2/50\mu\text{s}$ e uma corrente de curto circuito com forma de onda de $8/20\mu\text{s}$. As formas de onda de tensão e corrente são mostradas nas Figs. 3.40(A) e 3.40(B), respectivamente. O gerador de onda combinada pode ser simulado em software de simulação de circuitos, com base no circuito da Fig. 3.41.

Segundo o IEEE SPDC, a amplitude da tensão na entrada da edificação normalmente fica limitada em 6kV, devido aos centelhamentos que ocorrem nas instalações elétricas de baixa tensão a partir do ramal de entrada. Como o gerador de onda combinada tem uma impedância interna de 2Ω , a corrente de curto-circuito fica limitada em 3kA. Observe-se que esse valor de corrente é compatível com aqueles calculados na Seção 3.3.

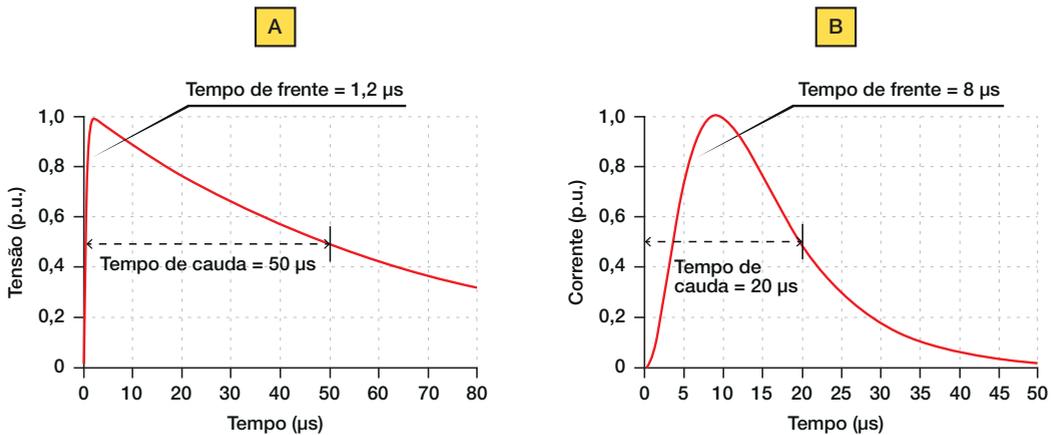


Fig. 3.40 - Formas de onda do Gerador de Onda Combinada para linhas de energia. (A) Tensão de circuito aberto; (B) Corrente de curto-circuito.

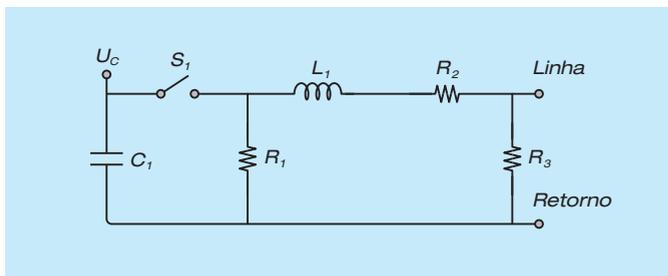


Fig. 3.41 - Exemplo de circuito para o Gerador de Onda Combinada $1,2/50\mu\text{s}$.
 $C_1 = 5,93\mu\text{F}$; $L_1 = 10,9\mu\text{H}$;
 $R_1 = 20,2\Omega$;
 $R_2 = 0,841\Omega$; $R_3 = 26,1\Omega$.
 Tensão de pico (U_p) / Tensão de carga (U_c) = 0,943. Adaptado de [35].

Como exemplo de aplicação, considere-se um equipamento conectado a uma tomada de força no interior da edificação, conforme mostrado na Fig. 3.42. O circuito equivalente para a avaliação da tensão aplicada nesse equipamento é mostrado na Fig.3.43(A). Nesse circuito, o gerador de onda combinada é representado por um bloco, cujos componentes são mostrados na Fig. 3.41, enquanto o indutor L representa a indutância da fiação entre a entrada de força e a tomada. Essa indutância é proporcional ao comprimento da fiação e pode ser considerada como igual a $1,5\mu\text{H}/\text{m}$. Para este exemplo, considera-se 10m de fiação, resultando em $15\mu\text{H}$. A resistência do condutor é considerada como $400\text{m}\Omega$.

A impedância de entrada do equipamento, conforme mostrado na Fig. 3.43(A), é representada pela indutância L_i em série com o capacitor C_i . Esses componentes são usualmente instalados na entrada de força de

equipamentos visando reduzir as emissões de ruído pela porta de energia elétrica e, dessa forma, atender às normas de compatibilidade eletromagnética. A título de exemplo, supõe-se que tanto a fase quanto o neutro estão providos de um capacitor de $2,2\text{nF}$, resultando em um capacitor equivalente de $4,4\text{nF}$ para o circuito equivalente em modo-comum. Já o indutor deve ter seu núcleo saturado durante a passagem do surto, restando uma indutância equivalente de $20\mu\text{H}$ para os dois indutores em paralelo. Considera-se que o retorno do circuito é feito pelo condutor de proteção (PE).

A Fig.3.44 mostra a forma de onda de tensão resultante na entrada do equipamento. Conforme esperado, essa forma de onda é próxima da tensão de circuito aberto do gerador, à qual são superpostas as oscilações inerentes do circuito. O valor de pico chega perto de 7kV , em função do efeito das indutâncias e capacitâncias do circuito.

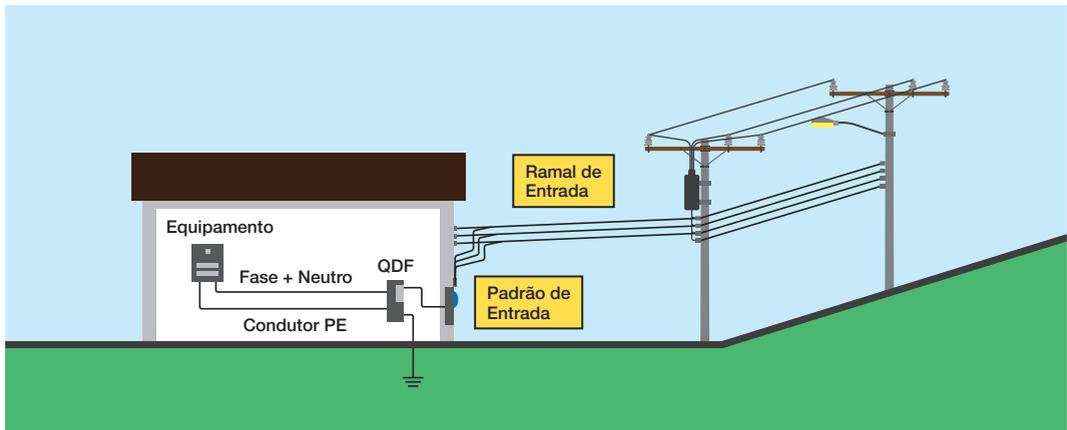


Fig. 3.42 - Exemplo para cálculo da sobretensão aplicada pela rede elétrica de baixa tensão em um equipamento no interior da edificação.

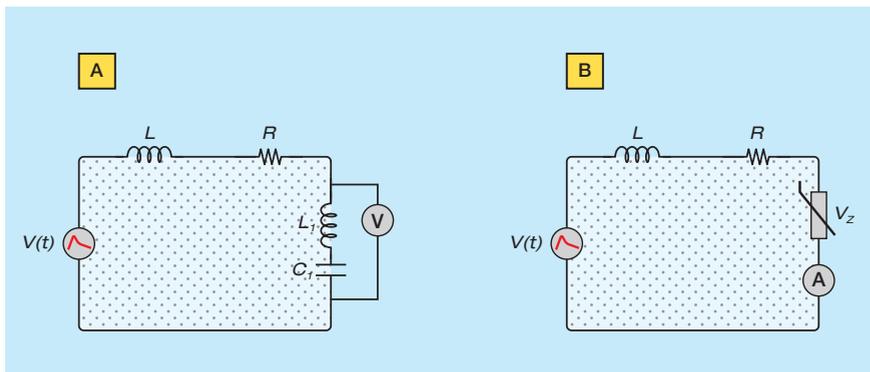


Fig. 3.43 - Circuito para representar um surto conduzido pela rede externa de baixa-tensão. (A) Equipamento sem proteção. (B) Equipamento protegido com DPS (varistor).
 $U_p = 6\text{kV}$;
 $L = 15\mu\text{H}$;
 $R = 400\text{m}\Omega$;
 $L_i = 20\mu\text{H}$;
 $C_i = 4,4\text{nF}$;
 $V_z = 1200\text{V}$.

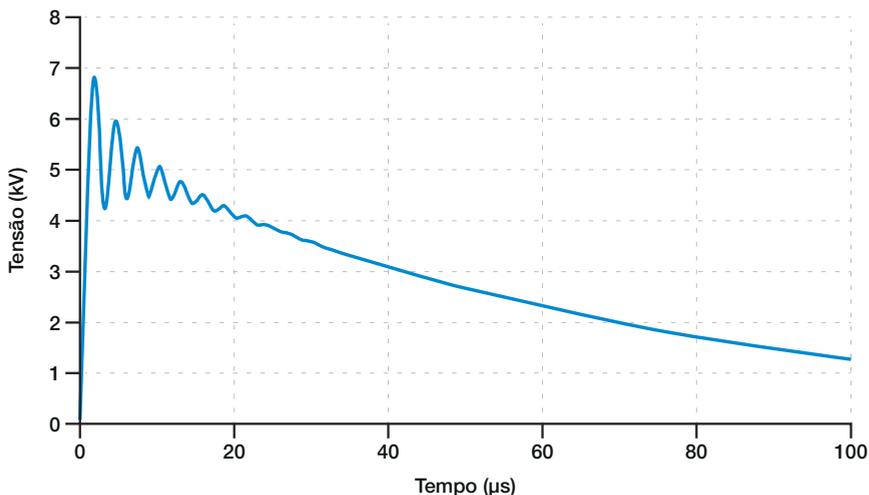


Fig. 3.44
Tensão na
entrada do
equipamento
representado na
Fig. 3.41.

Caso um DPS seja instalado na entrada do equipamento, cabe avaliar a corrente que circulará por ele. Nesse caso, o capacitor C_1 e o indutor L_1 da Fig.3.43(A) são substituídos por um varistor (MOV) com tensão residual $V_z = 1200V$, conforme a Fig.3.43(B). A Fig. 3.45 mostra a forma de onda da corrente através do DPS, onde se observa que ela atinge um valor de pico próximo de 1 kA, o qual é bem inferior à corrente de curto-circuito do gerador (3kA). Essa redução no valor de pico da corrente é consequência da indutância da fiação e da impedância do DPS. Caso o DPS seja instalado próximo da entrada de força da edificação, a corrente drenada pelo mesmo se aproxima da corrente de curto-circuito do gerador.

3.3.5.2 - ESTIMATIVA DE SURTOS EM LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES

A metodologia apresentada nesta seção se baseia nas normas técnicas publicadas pela International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector (ITU-T), as quais apresentam uma compilação de medições de surtos em linhas de telecomunicações realizadas em diversas partes do mundo [36]-[37], assim como requisitos para ensaios de equipamentos visando avaliar sua suportabilidade aos surtos [9], [38]-[40]. Essas normas propõem o uso de um gerador de onda combinada para representar a fonte dos surtos, o qual apresenta uma tensão de cir-

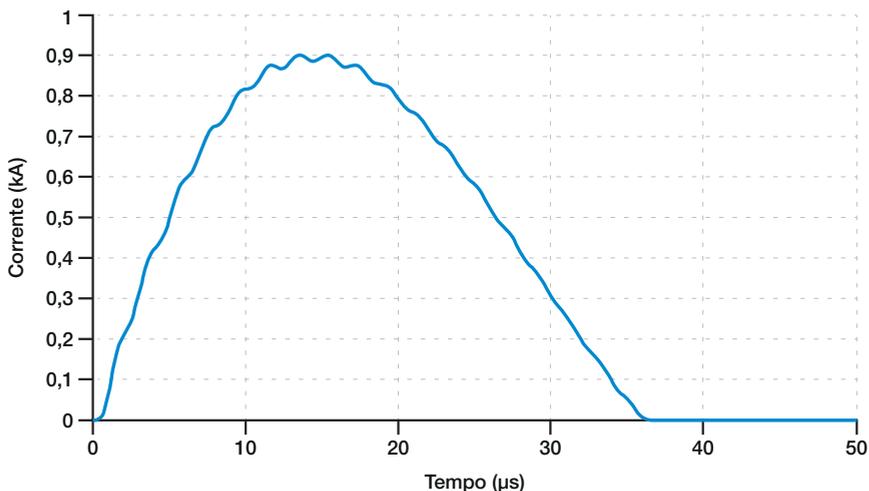


Fig. 3.45
Corrente
através do
DPS instalado
na entrada
de força do
equipamento
(Fig. 3.42).

cuito aberto com forma de onda 10/700 μ s e uma corrente de curto circuito com forma de onda de 5/320 μ s. As formas de onda de tensão e corrente são mostradas nas Figs. 3.46(A) e 3.46(B), respectivamente. O gerador de onda combinada pode ser simulado em software de simulação de circuitos, tomando-se como base o circuito mostrado na Fig.3.47.

A amplitude da tensão de circuito aberto depende da exposição da linha às descargas atmosféricas. Esses valores são mostrados na Tabela 3.1, onde o nível básico se refere a locais com baixa exposição às descargas

atmosféricas (e.g., baixa densidade de descargas atmosféricas, linhas subterrâneas e relativamente curtas), enquanto o nível reforçado se refere a locais com elevada exposição às descargas atmosféricas (e.g., alta densidade de descargas atmosféricas, linhas aéreas e relativamente longas).

Como exemplo de aplicação, considera-se uma linha de telecomunicações composta por um cabo de pares metálicos, que atende a uma instalação. A região é exposta às descargas atmosféricas, de forma que será utilizado o nível reforçado para a simulação. Dentro da edificação, a linha telefônica segue

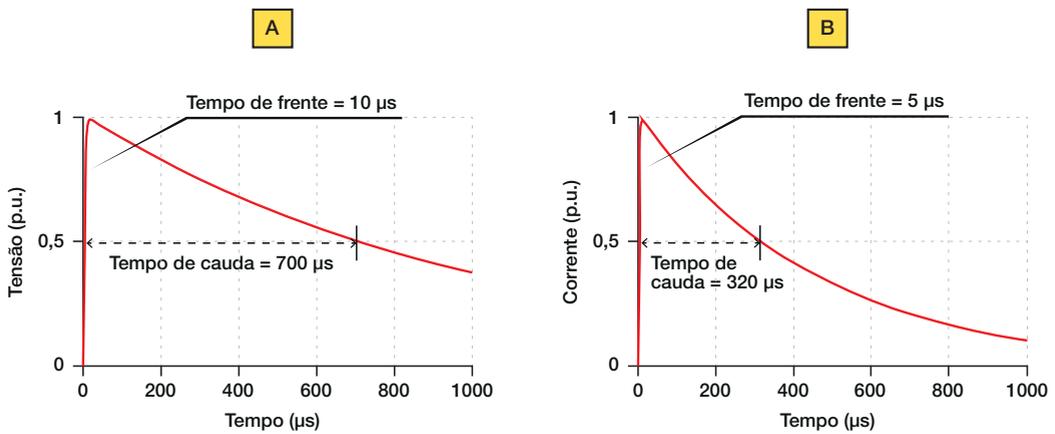


Fig. 3.46 - Formas de onda do Gerador de Onda Combinada para linhas de telecomunicações.(A) Tensão de circuito aberto; (B) Corrente de curto-circuito.

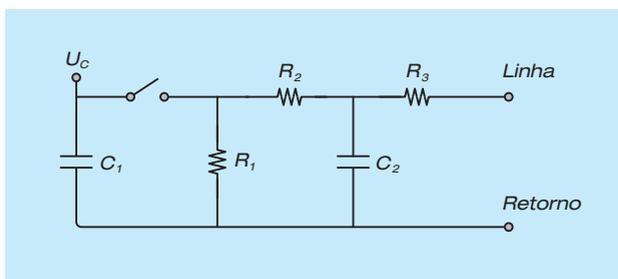


Fig. 3.47 - Exemplo de circuito para o Gerador de Onda Combinada 10/700 μ s.

$C_1 = 20\mu\text{F}$; $C_2 = 0,2\mu\text{F}$; $R_1 = 50\Omega$;
 $R_2 = 15\Omega$; $R_3 = 25\Omega$.

Tensão de pico (U_p) / Tensão de carga (U_c) = 0,882. Adaptado de [40].

TABELA 3.1
Amplitude dos Surtos nas Linhas de Telecomunicações

NÍVEL	VALOR DE PICO		IMPEDÂNCIA (Ω)
	Tensão (kV)	Corrente (A)	
BÁSICO	1,5	37,5	40
REFORÇADO	6	150	40

por 20m até um modem ADSL, conforme mostrado na Fig. 3.48. O objetivo da simulação é determinar o nível de tensão em modo comum (i.e., entre o par telefônico e a terra) que chega nesse modem, considerando que não há DPS na linha.

O circuito para a simulação desse caso é mostrado na Fig. 3.49(A), onde o modem ADSL é representado por uma capacitância de 2nF, correspondente ao capacitor de *bypass* de sua fonte de alimentação. O indutor de 30μH representa a indutância do fio telefônico dentro da instalação, enquanto o gerador de surtos é representado pelo circuito da Fig. 3.47. A forma de onda de ten-

são é mostrada na Fig. 3.50, onde se observa que ela é bem próxima da tensão de circuito aberto do gerador (6kV). Dessa forma, a isolação deste equipamento deve ser suficiente para suportar esta tensão impulsiva.

Considera-se agora que um DPS do tipo centelhador a gás é instalado junto ao equipamento. O circuito equivalente é mostrado na Fig. 3.49(B), onde o centelhador a gás é representado por um curto-circuito. O resultado da simulação é mostrado na Fig. 3.51, onde observa-se que a corrente através do DPS é bem próxima da corrente de curto-circuito do gerador (150A), a qual pode ser drenada com folga por um centelhador a gás.

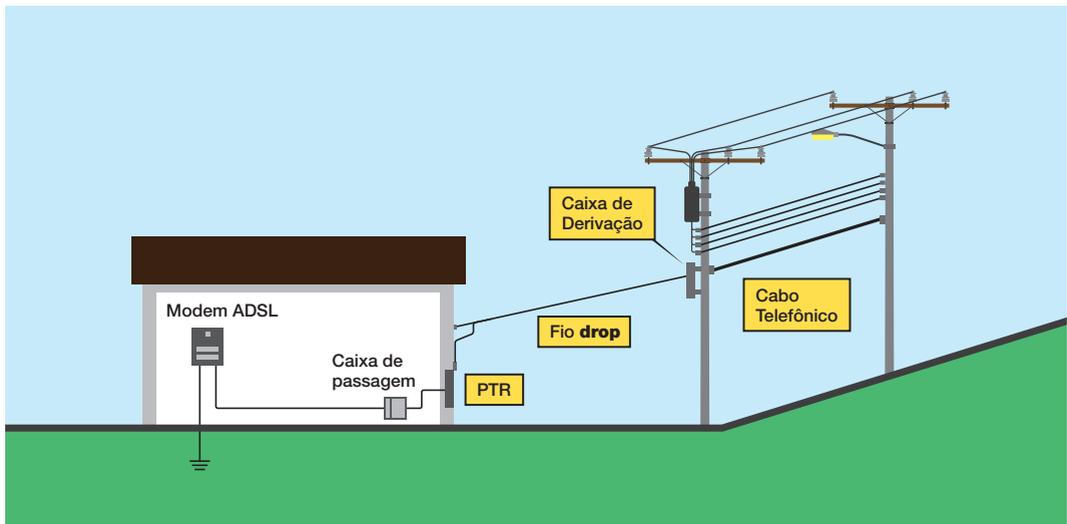


Fig. 3.48 - Exemplo para cálculo da sobretensão aplicada pela rede de telecomunicações em um equipamento no interior da edificação.

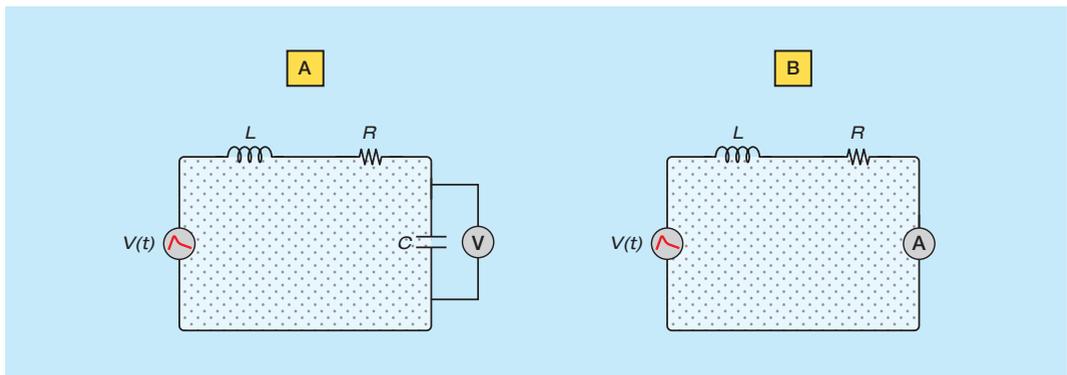


Fig. 3.49 - Circuito para representar um surto conduzido pela rede externa de telecomunicações. (A) Equipamento sem proteção. (B) Equipamento protegido com DPS (centelhador a gás).

$U_p = 6\text{kV}$; $L = 30\mu\text{H}$; $R = 800\text{m}\Omega$; $C = 2\text{nF}$.

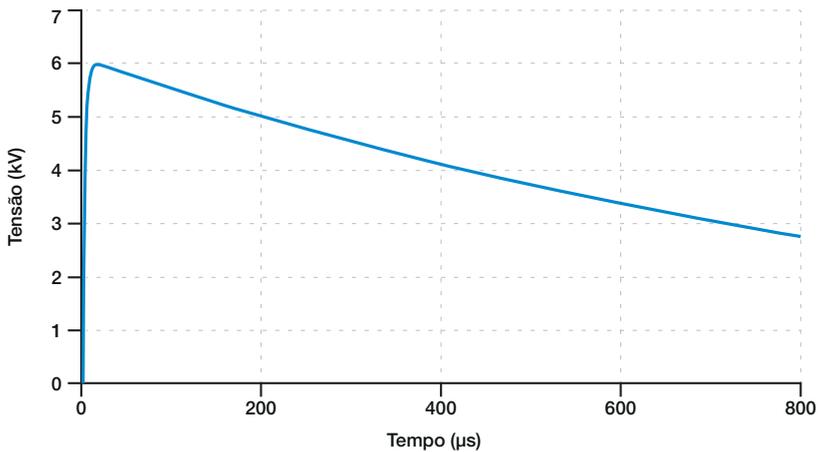


Fig. 3.50 - Tensão na entrada do modem ADSL representado na Fig. 3.49.

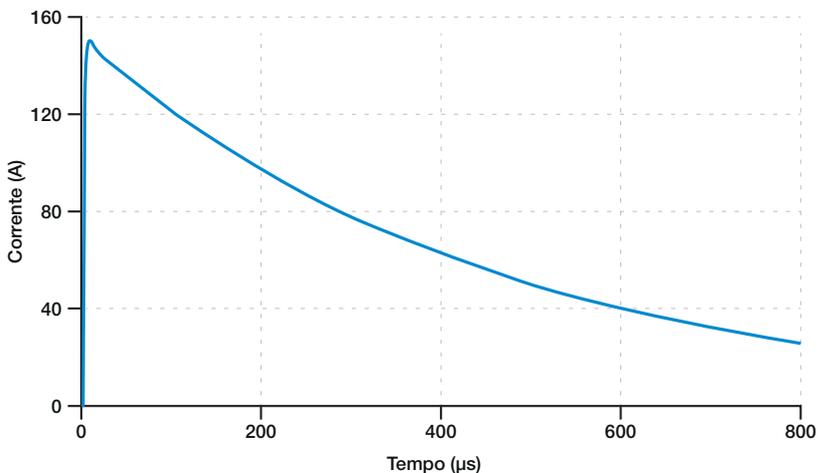


Fig. 3.51 - Corrente através do DPS instalado na entrada do modem da Fig. 3.49.

3.4 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo desse capítulo:

- ⊙ As descargas atmosféricas induzem surtos significativos nos laços internos e nas linhas que atendem as edificações. Esses surtos podem danificar equipamentos elétricos e eletrônicos conectados aos laços e/ou linhas, caso a intensidade do surto (tensão / corrente) ultrapasse o nível de suportabilidade do equipamento.
- ⊙ Um circuito metálico pode ser classificado como laço ou linha em função de seu comprimento elétrico. Como regra geral, pode-se considerar que um circuito cujo comprimento elétrico é menor que 0,1 pode ser considerado como laço, enquanto um circuito cujo comprimento elétrico é maior que 0,5 deve ser considerado como linha.
- ⊙ O cálculo de surtos induzidos em laços é realizado de forma mais conveniente a partir do campo magnético gerado pela descarga atmosférica, enquanto o cálculo de surtos induzidos em linhas é realizado de forma mais conveniente a partir do campo elétrico.
- ⊙ Tensões induzidas em laços abertos e correntes induzidas em laços fechados

podem ser calculadas com boa precisão a partir de fórmulas relativamente simples. Já para o cálculo de tensões e correntes em um laço com carga finita e diferente de zero (caso mais geral) é necessário utilizar um software de simulação de circuitos. Existem diversos softwares de simulação de circuitos que podem ser utilizados para esse cálculo, alguns deles disponíveis gratuitamente.

- ☑ Para o cálculo de tensões e correntes induzidas em linhas, em geral é necessário utilizar um software específico (por exemplo, TIDA). Fórmulas aproximadas podem ser utilizadas apenas em algumas situações específicas.

- ☑ Valores típicos das tensões e correntes induzidas em laços e em linhas são apresentados no Capítulo 6, os quais foram calculados com a metodologia apresentada nesse capítulo. No Capítulo 6 são também apresentados os valores típicos fornecidos pelas normas aplicáveis.

- ☑ As normas técnicas especificam geradores que visam simular os surtos induzidos por descargas atmosféricas nos laços e linhas. Esses geradores são normalmente utilizados para ensaiar equipamentos elétricos e eletrônicos, visando determinar o seu nível de suportabilidade aos surtos.

ATERRAMENTO, EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAIS E ISOLAMENTO

Para controlar os valores dos campos eletromagnéticos e das tensões e correntes originadas na descarga atmosférica, várias técnicas devem ser utilizadas de forma integrada. O SPDA é encarregado de interceptar a descarga e conduzir a corrente para a terra. Entretanto, mesmo que ele opere de forma satisfatória, parcelas da corrente de descarga circulam em componentes internos e induções ocorrem na fiação interna e nos cabos que alimentam a edificação.

Para reduzir os valores dessas tensões e correntes é utilizado um SPDA interno [1] associado a um conjunto de MPS (medidas de proteção contra surtos) [2]. O SPDA interno consiste em ligações equipotenciais ou isolação elétrica entre os sistemas internos da edificação e o SPDA externo. As MPS são as técnicas aplicadas no interior da edificação, que envolvem aterramento, equalização de potenciais, blindagem, roteamento de linhas, instalação coordenada de DPS e utilização de interfaces isolantes. Neste capítulo são analisadas as seguintes técnicas:

- ☑ Aterramento;
- ☑ Equalização de potenciais;
- ☑ Isolamento entre partes internas da edificação e o SPDA;
- ☑ Instalação de interfaces de isolamento.

No próximo capítulo serão analisadas as demais técnicas.

Neste capítulo também são apresentadas as configurações de aterramento de sistemas elétricos, conforme a NBR 5410 [3]. Essas configurações incluem o tratamento do

cabo neutro e do condutor de proteção (PE). Cabe observar que a configuração do aterramento do neutro e do condutor de proteção também são importantes para a definição da forma de instalação dos dispositivos de proteção contra surtos, como será visto no Capítulo 7.

O aterramento de uma edificação tem diversas funções como segurança pessoal, segurança da edificação, proteção contra descargas atmosféricas, controle de sobretensões, controle do valor da corrente de curto-circuito fase-terra e controle da formação de arcos elétricos. Para garantir a segurança pessoal, quase sempre é necessário utilizar um condutor de proteção (PE). Além disso, é mandatório interligar todas as partes metálicas e utilizar uma malha de aterramento única. Estes princípios são atualmente adotados na maioria dos países, incluindo o Brasil. Partindo-se deles, é possível definir toda uma filosofia de aterramento que engloba o aterramento do sistema elétrico (neutro dos transformadores), das carcaças dos equipamentos, dos cabos e captos do SPDA, das blindagens dos cabos e da eletrônica analógica e digital. Esses aspectos são analisados nesse capítulo.

4.1 - ATERRAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

4.1.1 - ATERRAMENTO PARA A SEGURANÇA PESSOAL

Para evitar que tensões perigosas sejam aplicadas em pessoas, a regra de ouro é interligar eletricamente todas as partes que a pessoa possa tocar, pisar ou encostar. Uma forma eficiente para garantir esta interligação é a utilização de um cabo específico

para fazer a interligação entre as carcaças dos equipamentos e a terra, chamado de condutor de proteção ou simplesmente PE (*Protective Earth*).

Componentes da infraestrutura (e.g., eletrodutos metálicos, eletrocalhas, malhas de equalização e leitos de cabos) podem ser utilizados para desempenhar a função do condutor PE em condições especiais, desde que seja garantida a continuidade elétrica ao longo desta infraestrutura e que ela tenha seção transversal compatível com as correntes de falta e de surto previstas. Entretanto, em muitos casos é mais seguro utilizar um condutor específico para essa função (condutor PE), pois, serviços de manutenção ou modificação das instalações podem interromper a continuidade elétrica da infraestrutura.

O cabo neutro, nas instalações de baixa tensão, é um cabo no qual circula corrente e somente nos circuitos trifásicos equilibrados e sem componentes de correntes harmônicas de terceira ordem e de seus múltiplos ímpares é que a corrente no cabo neutro é zero. Além disso, a possível perda de continuidade do neutro não recomenda a sua utilização como cabo de equalização de potenciais. A Fig. 4.1 ilustra a situação que se quer evitar. Devido a uma falha de isolamento, a fase toca na carcaça metálica e uma pessoa que toca na carcaça pode levar um choque.

A Fig. 4.2(A) mostra a utilização do cabo neu-

tro como condutor de proteção. O neutro, que está aterrado, fica em paralelo com a pessoa, minimizando os valores de corrente que eventualmente poderiam circular por ela. Entretanto, se houver o rompimento do cabo neutro, a fase será ligada na carcaça via impedância da carga. Nesta situação, mesmo se não houver contato acidental, a carcaça ficará energizada e a pessoa poderá levar um choque, conforme mostrado na Fig. 4.2(B).

A Fig. 4.3 mostra a utilização do condutor de proteção. O condutor de proteção fica em paralelo com o corpo da pessoa, evitando a circulação de correntes perigosas. Se houver o rompimento do neutro, a carcaça não ficará em contato com a fase, como no caso anterior.

A utilização do condutor de proteção pode ser conjugada com a interligação das carcaças via infraestrutura (Fig. 4.4).

O condutor de proteção deve ser isolado e para cada circuito de alimentação deve existir um condutor de proteção que deve ser instalado seguindo a mesma rota física da fase e do neutro. Devido à elevada sensibilidade dos seres humanos à circulação de correntes elétricas, a NBR 5410 [3] recomenda que, além do condutor de proteção, sejam também utilizados dispositivos de proteção diferencial-residual (DR) que desligam o circuito se o valor da corrente de fuga ultrapassar o patamar ajustado.

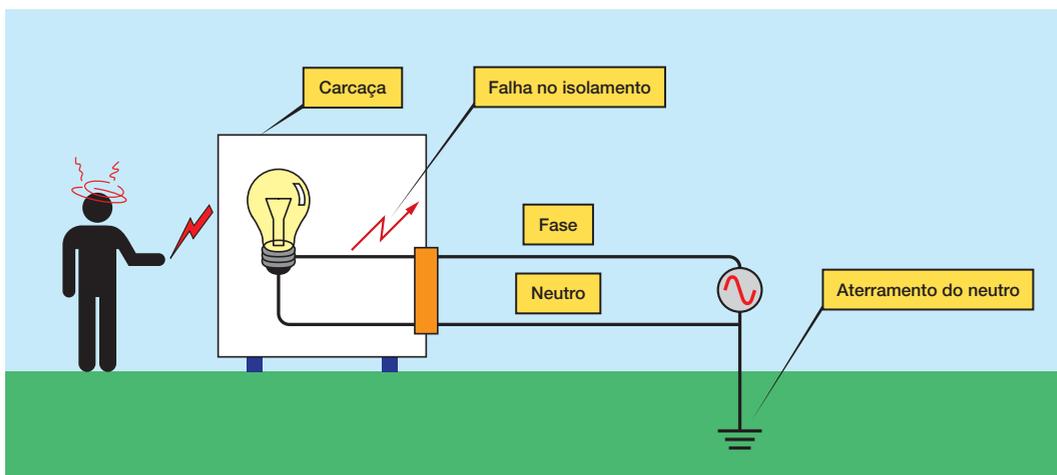


Fig. 4.1 – Situação que se quer evitar com o condutor de proteção.

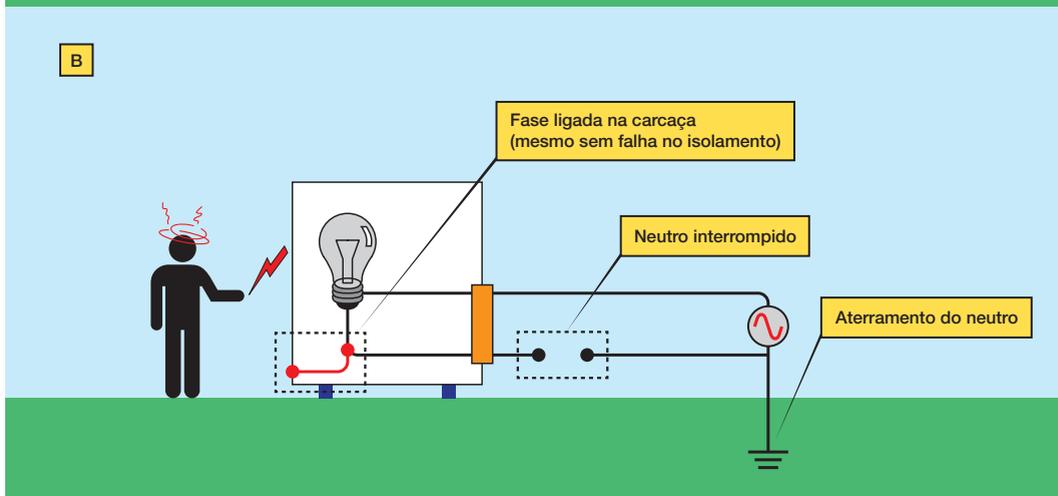
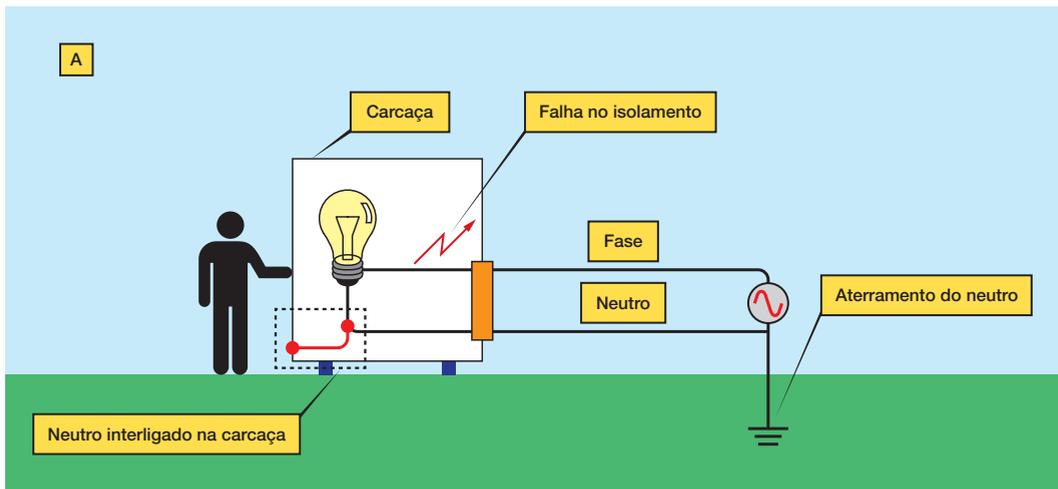


Fig. 4.2 – Utilização do neutro como cabo de proteção. Se o cabo neutro for interrompido, a carça fica energizada, mesmo se não houver contato acidental.

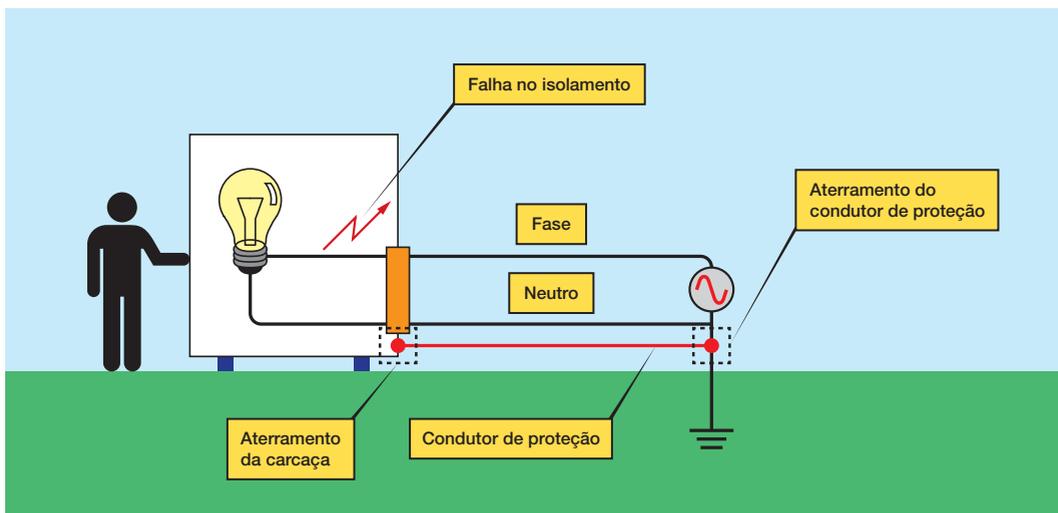


Fig. 4.3 – Utilização do condutor de proteção.

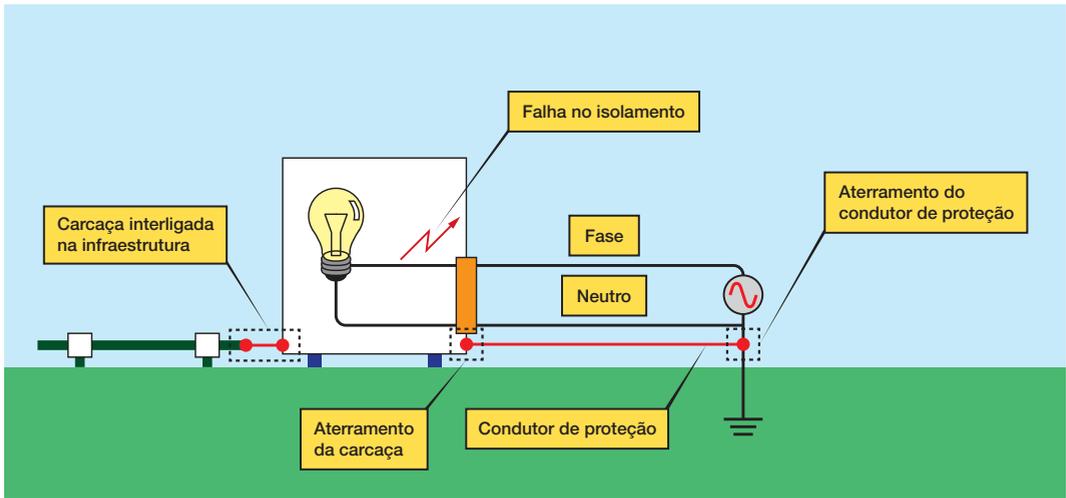


Fig. 4.4 – Utilização do condutor de proteção e também da interligação das carcaças via infraestrutura.

4.1.2 - ATERRAMENTO DO NEUTRO DE TRANSFORMADORES

A forma de aterramento do neutro dos transformadores trifásicos é importante, pois ela determina:

- ☑ O valor da corrente de curto circuito fase-terra;
- ☑ O valor da sobretensão nas fases não envolvidas no curto circuito (fases sãs);
- ☑ A existência de arco no ponto de curto circuito.

Existem basicamente quatro opções de

aterramento do neutro das fontes e dos transformadores trifásicos:

- ☑ Sistema com neutro isolado (não aterrado);
- ☑ Sistema com neutro solidamente aterrado;
- ☑ Sistema com neutro aterrado através de resistência;
- ☑ Sistema com neutro aterrado através de reatância sintonizada.

A Fig. 4.5 mostra as opções de aterramento do neutro.

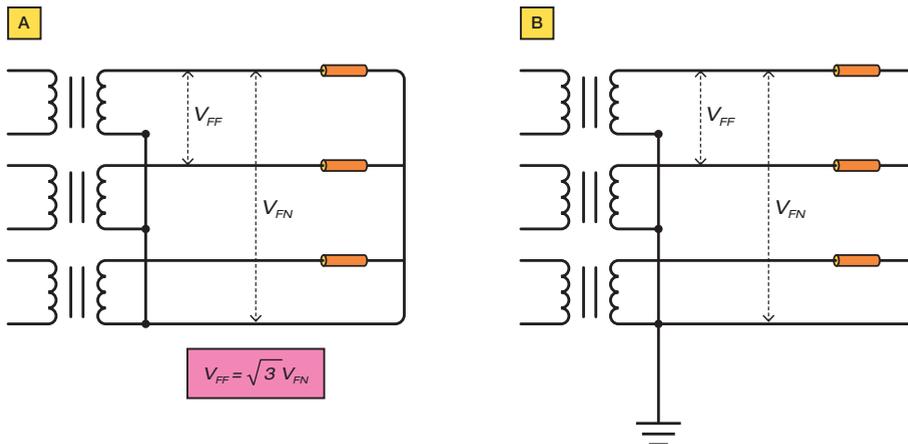


Fig. 4.5 Formas de aterramento do neutro, a) isolado, b) solidamente aterrado, c) aterrado via resistor e d) aterrado via indutor. V_{FF} é tensão fase-fase e V_{FN} é a tensão fase-neutro.

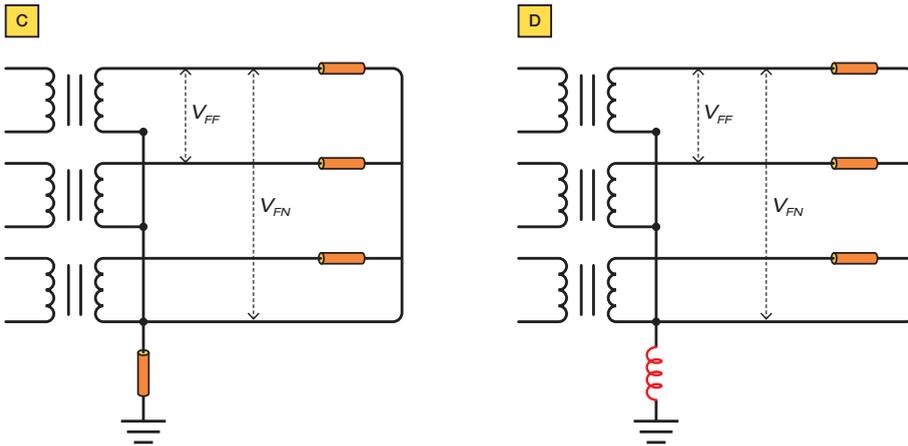


Fig. 4.5
Continuação.

A Fig. 4.6 mostra um curto circuito fase-terra nos quatro sistemas mostrados na Fig. 4.5. A tabela 4.1 mostra os valores das correntes e as condições de curto circuito fase-terra.

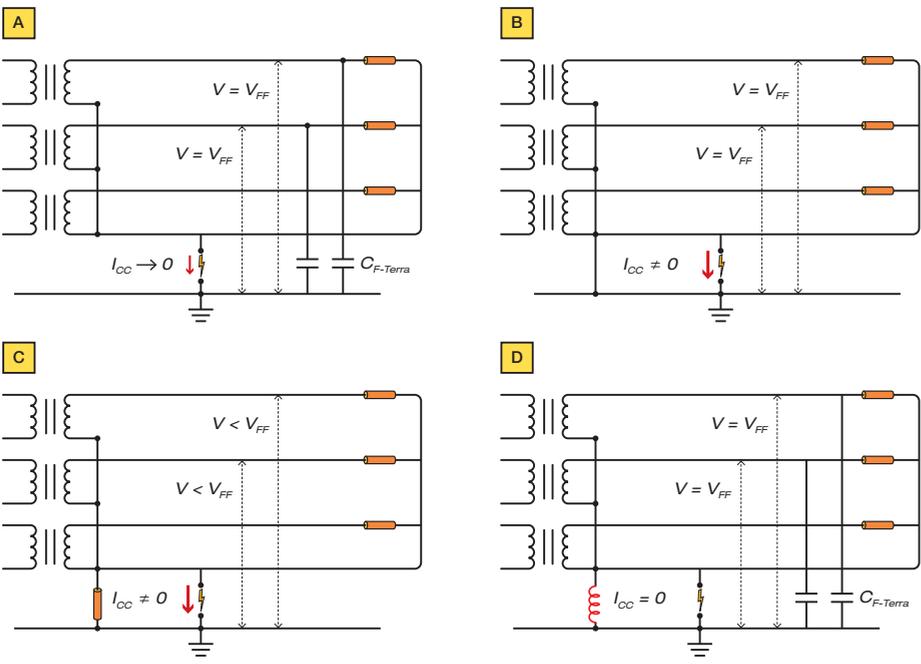


Fig. 4.6
Curto circuito fase-terra em sistemas com neutro: (a) isolado, (b) solidamente aterrado, (c) aterrado via resistor e (d) aterrado via indutor.

TABELA 4.1 - Condições de curto circuito			
CASO	CORRENTE DE CURTO CIRCUITO	VALORES DAS SOBRETENSÕES NAS FASES SÁS (V É ATENÇÃO DA FASE PARA A TERRA)	EXISTÊNCIA DE ARCO NO PONTO DE CURTO
A	Valor baixo	$V = V_{FF}$	Sim
B	Valor elevado	$V \approx V_{FN}$	Sim
C	Depende do valor do resistor de aterramento	$V < V_{FF}$	Sim
D	Próxima de zero	$V = V_{FF}$	Não

O sistema com neutro isolado (Fig. 4.6 (A)) é pouco utilizado no Brasil. Nele a corrente de curto circuito fase-terra é baixa, as sobretensões nas fases sãs são elevadas e a possibilidade de arco elétrico no ponto de curto circuito é grande. Os sistemas mais utilizados no Brasil são o solidamente aterrado (B), utilizado pela maioria das concessionárias de energia elétrica e os sistemas aterrados através de resistor (C), bastante utilizados nas plantas industriais.

Nos sistemas com neutro aterrado através de resistor (C) o valor da corrente de curto circuito fase-terra e o valor das sobretensões nas fases sãs podem ser controlados a partir da escolha adequada do valor do resistor de aterramento. No sistema com neutro aterrado através de indutor (D), se o valor do indutor for tal que o mesmo entre em ressonância com as capacitâncias fase-terra das fases sãs (fases sem curto-circuito), a corrente capacitiva anula a corrente indutiva e a tensão no ponto de curto tende a zero. Este sistema é conhecido como sistema ressonante ou sistema com Bobina de Petersen [4]. A grande vantagem desse sistema é que um curto-circuito fase-terra não obriga a um desligamento imediato do sistema. Como os curtos-circuitos fase-terra são os mais usuais, as redes aterradas com Bobina de Petersen têm um índice de desligamento muito baixo.

Ambientes industriais geralmente apresentam sistema elétrico com diferentes configurações de aterramento do neutro, dependendo do nível de tensão. A Fig. 4.7 mostra um exemplo onde a concessionária entrega energia em alta tensão (138kV) e utiliza sistema com neutro solidamente aterrado. Na subestação da indústria a tensão é reduzida para 13,8kV e o sistema é aterrado via resistor que limita a corrente fase-terra em, por exemplo, 400A. Nas unidades consumidoras de pequeno porte (escritórios, casas de controle e comando), a tensão é reduzida para 220/127 e o neutro é solidamente aterrado.

4.1.3 - CONFIGURAÇÕES DE ATERRAMENTO CONFORME A NBR 5410

Baseado nos conceitos anteriormente discutidos, a norma NBR 5410 [3] que trata das instalações elétricas de baixa tensão apresenta algumas configurações de aterramento que são mostradas nas Figs. 4.8 a 4.11. As principais características de cada configuração também são relacionadas nas figuras.

Nas figuras as letras R, S e T identificam as três fases, a letra N o cabo neutro, a sigla PE o condutor de proteção e a sigla PEN o cabo que acumula as funções de neutro e condutor de proteção.

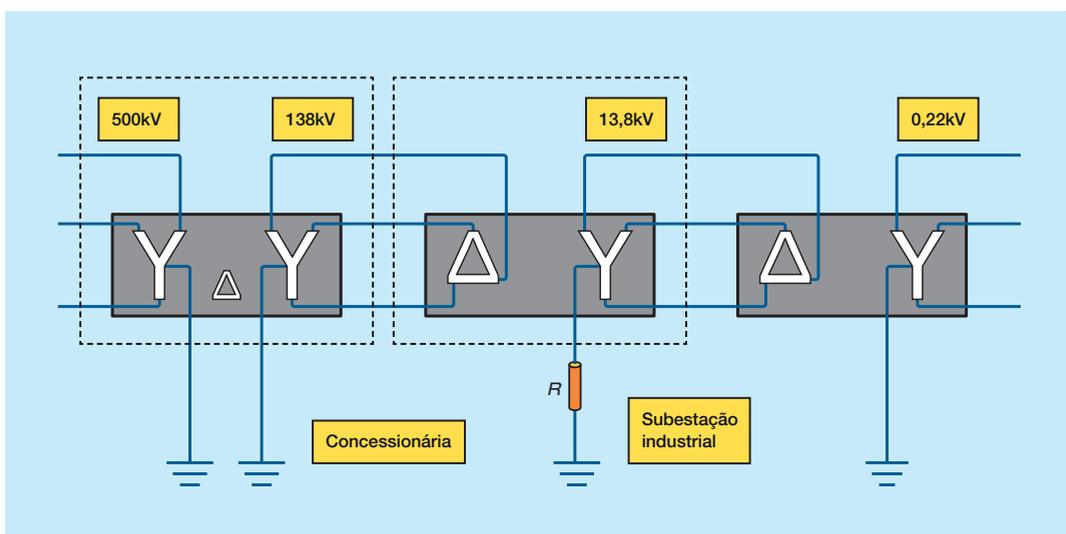


Fig. 4.7 - Aterramento do neutro dos transformadores.

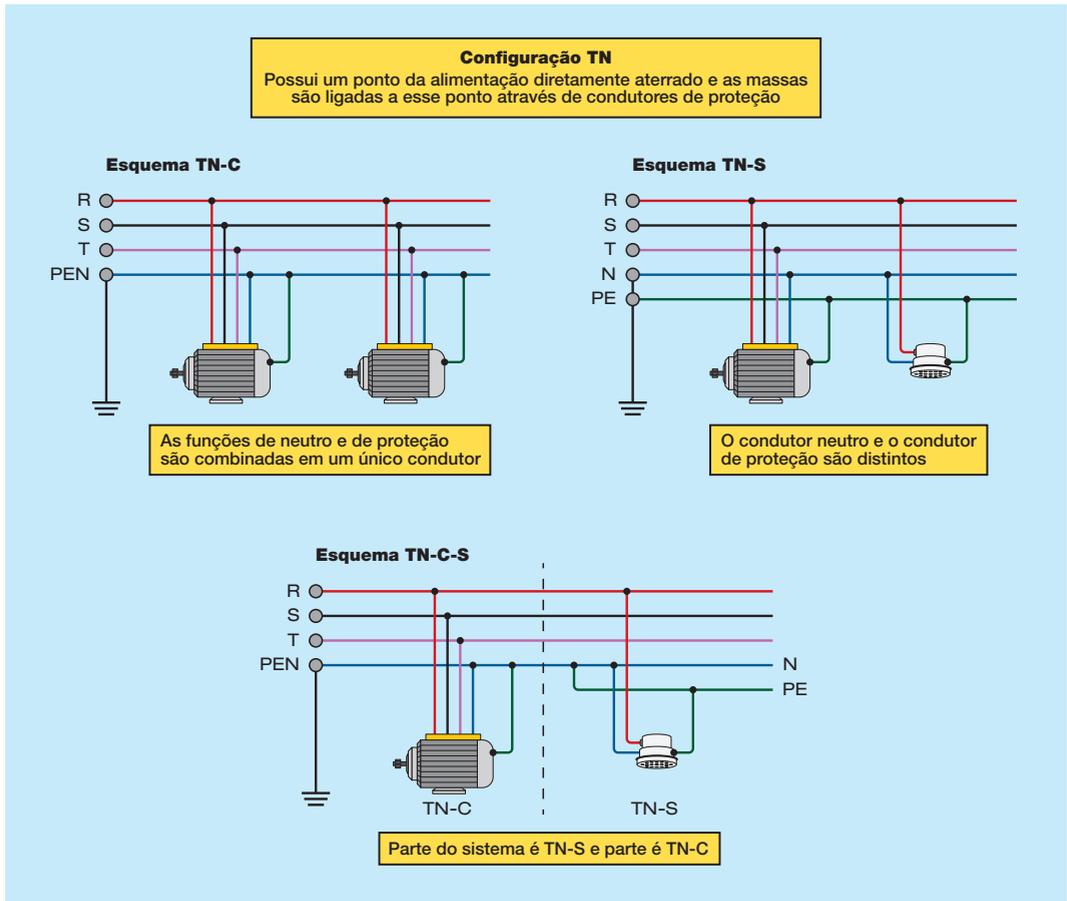


Fig. 4.8 – Configuração TN e suas variantes: TN-C, TN-S e TN-C-S. Adaptado de [3].

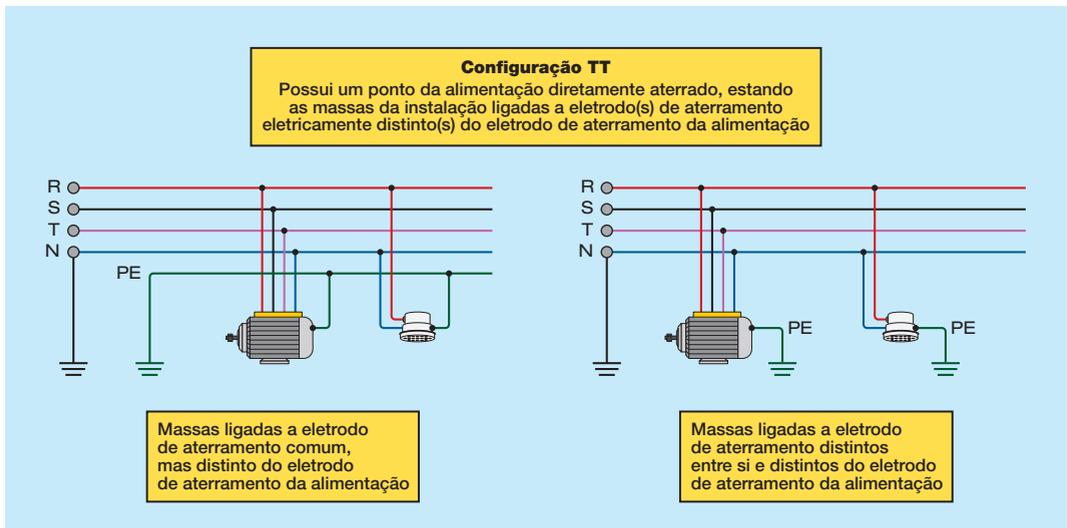


Fig. 4.9 – Configuração TT. Adaptado de [3].

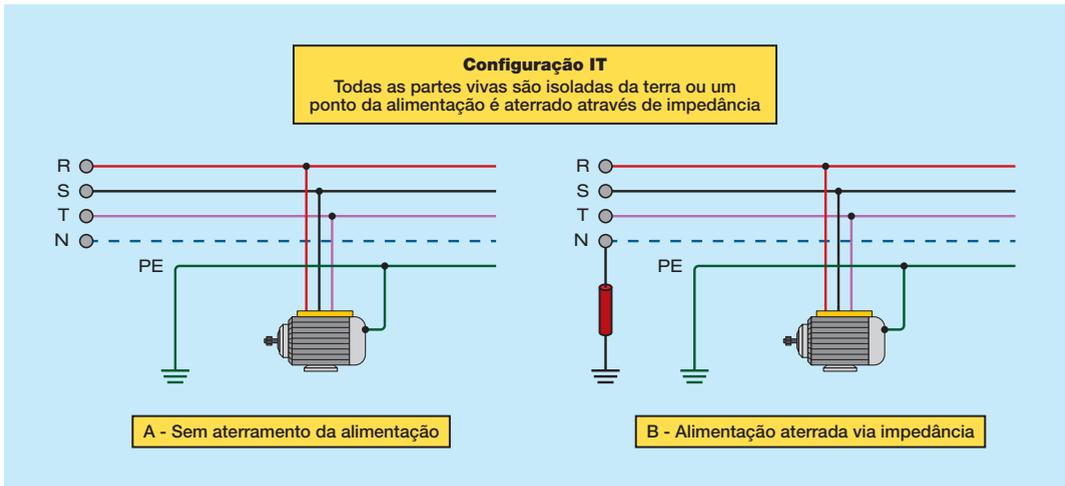


Fig. 4.10 – Configuração IT. Adaptado de [3].

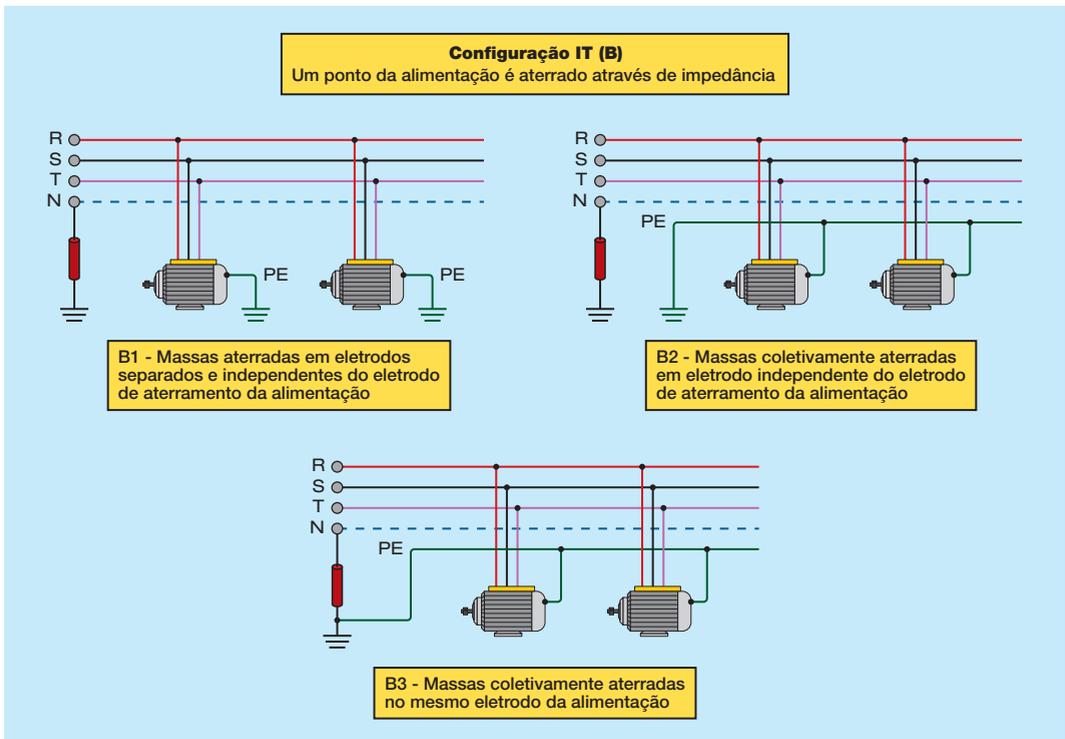


Fig. 4.11 – Configuração IT e suas variantes: IT-B1, IT-B2 e IT-B3. Adaptado de [3].

A configuração que é a recomendada para os consumidores residenciais e comerciais alimentados por uma concessionária de distribuição de energia elétrica é o TN-C-S, sendo o esquema TN-C adotado na rede da empresa e o TN-S na edificação consumidora. O arranjo é mostrado na Fig. 4.12.

Como informado anteriormente, uma configuração que é muito utilizada nas indústrias brasileiras é a IT (B) mostrada na Fig. 4.13. O neutro do transformador da subestação da planta industrial é aterrado via um resistor de aterramento e esse resistor irá limitar o valor da corrente de curto-cir-

cuito fase terra, que é o tipo de curto circuito de maior ocorrência.

O valor do resistor é escolhido de maneira que a corrente de curto circuito fase-terra seja suficientemente alta para permitir a

coordenação e a seletividade da proteção de sobrecorrente e suficientemente baixa para não provocar estresse nos equipamentos. Além disto, a redução no valor da corrente de curto limita os valores das tensões de passo e toque.

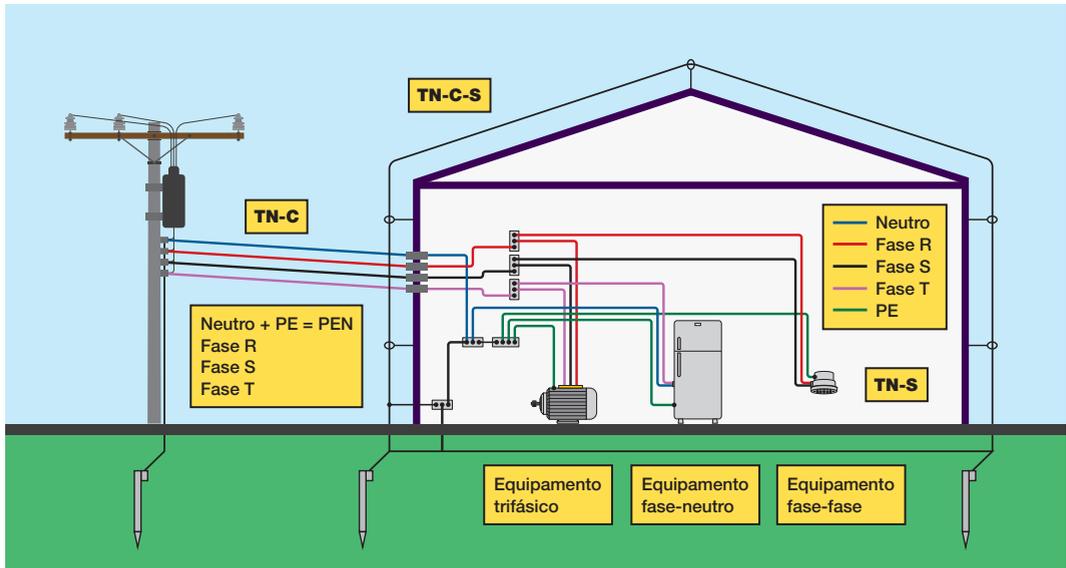


Fig. 4.12 – Configuração TN-C-S. Configuração TN-C no circuito da concessionária de energia e TN-S na rede interna do consumidor.

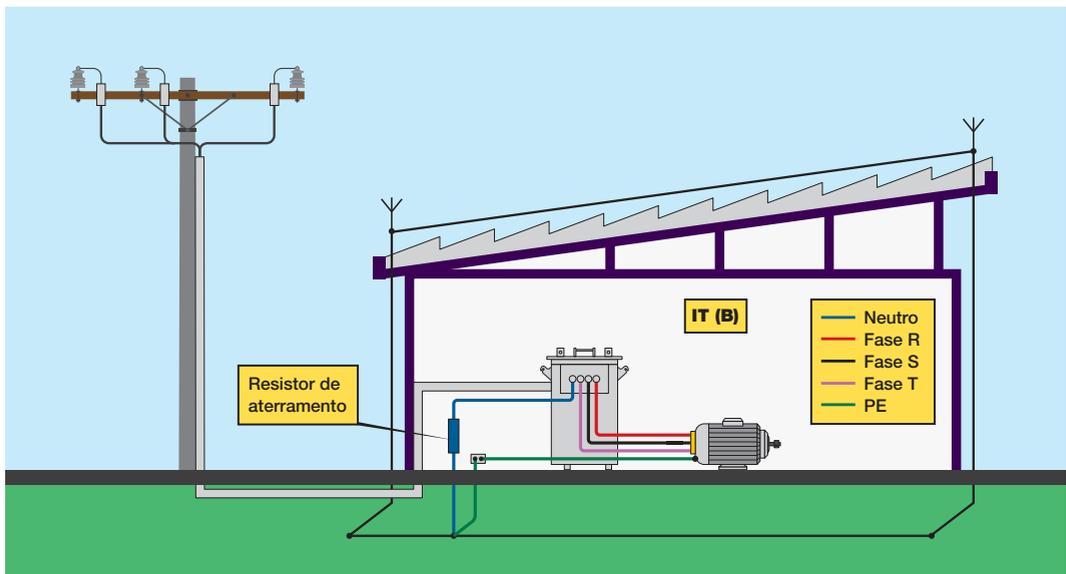


Fig. 4.13 – Configuração IT com neutro aterrado via resistor de aterramento. Arranjo muito utilizado na área industrial no Brasil.

4.2 - ATERRAMENTO PARA PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O aterramento do sistema de proteção contra descargas atmosféricas deve ser integrado ao sistema de aterramento geral e os detalhes da malha de aterramento recomendada na NBR 5419-3 [1] são apresentados nos próximos itens.

4.2.1 - PRESCRIÇÕES DA NBR 5419

Conforme a NBR 5419-3, a malha de aterramento deve ser constituída de um anel formado por um condutor nu (cabo ou cordoalha) de cobre, aço cobreado ou aço zincado (galvanizado), envolvendo a edificação. O anel deve ser enterrado no mínimo a 0,5m de profundidade e ficar afastado de 1m da edificação.

No caso de anel embutido em fundação de concreto armado, deve ser utilizado o próprio ferro de construção utilizado pelo engenheiro civil na ferragem estrutural, compondo as vigas de cintamento ou baldrame. Não se deve embutir no concreto condutor de cobre ou aço cobreado, para evitar corrosão, devido ao contato com a ferragem estrutural.

A Fig.4.14 mostra três situações: (A) o anel é a própria ferragem do alicerce da edificação; (B) o anel está afastado da edificação (1m); (C) o anel está afastado de edificação (1m) e foi complementado por um reticulado de cabos que envolve a edificação e se estende até pontos mais distantes.

A melhor opção é a A, que mostra a uti-

lização da própria ferragem estrutural da fundação como anel de aterramento, pois garante a melhor equipotencialização da estrutura e dos serviços que atendem à edificação, entretanto, para ser eficiente, ela deve ser concebida juntamente com o projeto das fundações.

A opção B é similar à opção A e deve ser adotada quando não for possível adotar a opção A.

A opção C melhora a equalização proporcionada pela malha e controla-se os potenciais perigosos, melhorando a segurança no entorno da estrutura. Pode ser implementada em casos especiais.

A NBR 5419-3 sugere que o valor da resistência de aterramento da malha seja o menor possível, mas não recomenda nenhum valor. A norma estabelece que o raio equivalente ($r_{equivalente}$) da malha deve ser igual ou superior ao comprimento mínimo (L_1) que é função da resistividade do solo e do nível de proteção da edificação. O raio equivalente corresponde ao raio da circunferência que tenha a mesma área da malha de aterramento, conforme ilustrado na Fig. 4.15.

A Fig. 4.16 fornece o valor do comprimento mínimo (L_1), para cada um dos quatro níveis de proteção sugeridos na norma, em função da resistividade do solo.

Algumas vezes não se dispõe da área necessária para a construção da malha e o anel terá que ser suplementado com eletrodos horizontais e verticais. O comprimento dos eletrodos suplementares deve ser calcu-

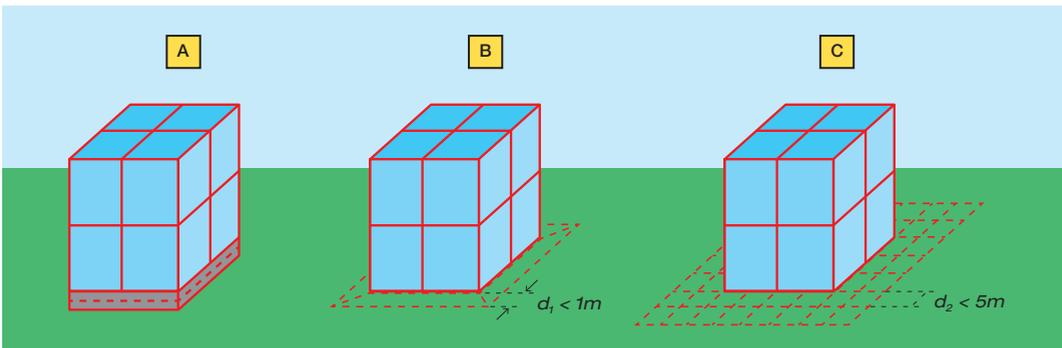


Fig. 4.14 – Malha de aterramento da edificação. (A) Malha em anel embutida no alicerce; (B) Malha em anel ao redor da edificação; (C) Malha em anel complementada por um reticulado.

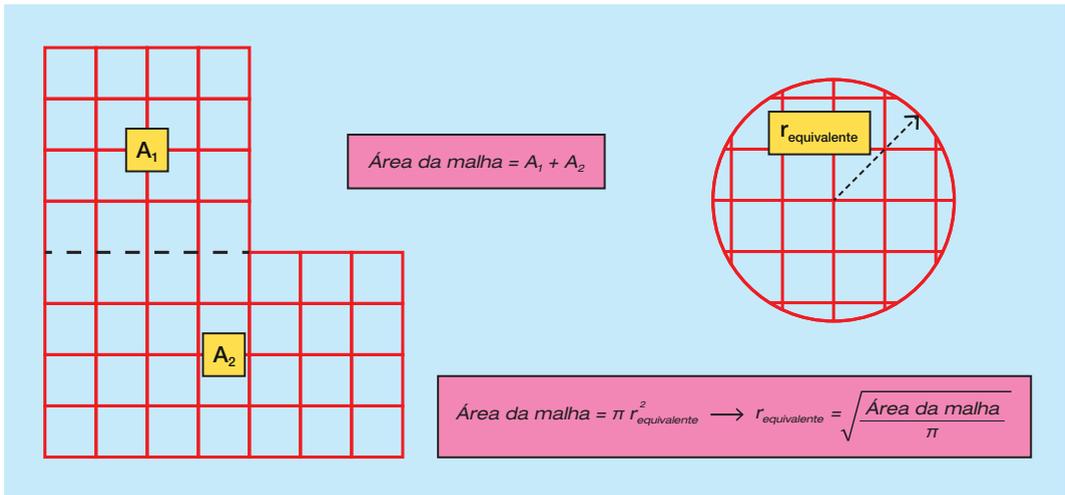


Fig. 4.15 – Raio equivalente da malha de aterramento.

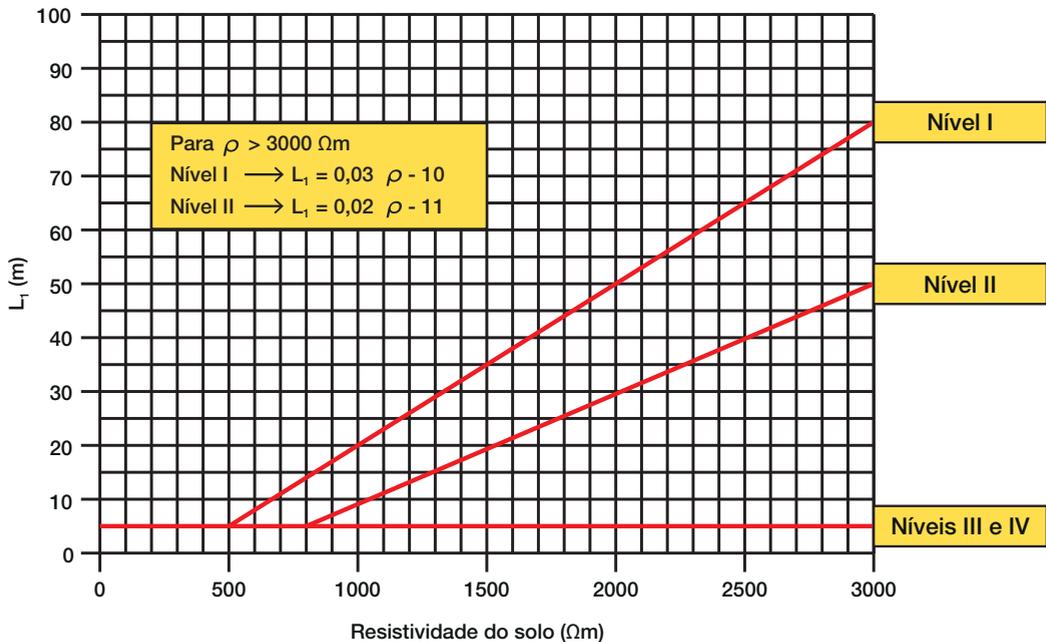


Fig. 4.16 – Comprimento mínimo L_1 . O raio equivalente da malha deve ser igual ou superior ao comprimento mínimo. Adaptado de [1].

lado conforme mostrado nas Figs. 4.17 e 4.18, para eletrodos verticais e horizontais. Os comprimentos L_V e L_H mostrados nessas figuras são referentes a cada um dos eletrodos suplementares. É interessante observar que o comprimento necessário de eletrodos verticais corresponde à metade do comprimento de eletrodos horizontais. É importante ressaltar que, no caso da uti-

lização de eletrodos suplementares, eles devem ser instalados o mais próximo possível dos pontos onde os condutores de descida forem conectados ao anel.

A norma também estabelece que apenas 20% do valor do comprimento mínimo pode aflorar, ou seja, não estar enterrado, como mostrado na Fig. 4.19.

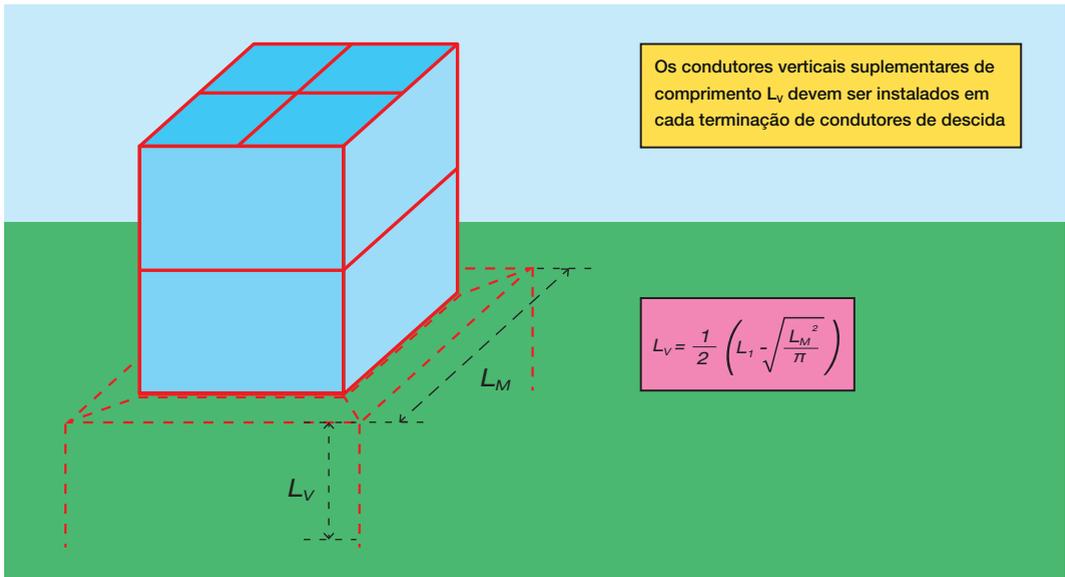


Fig. 4.17 – Utilização de condutores suplementares verticais. O valor L_I é dado na Fig. 4.22.

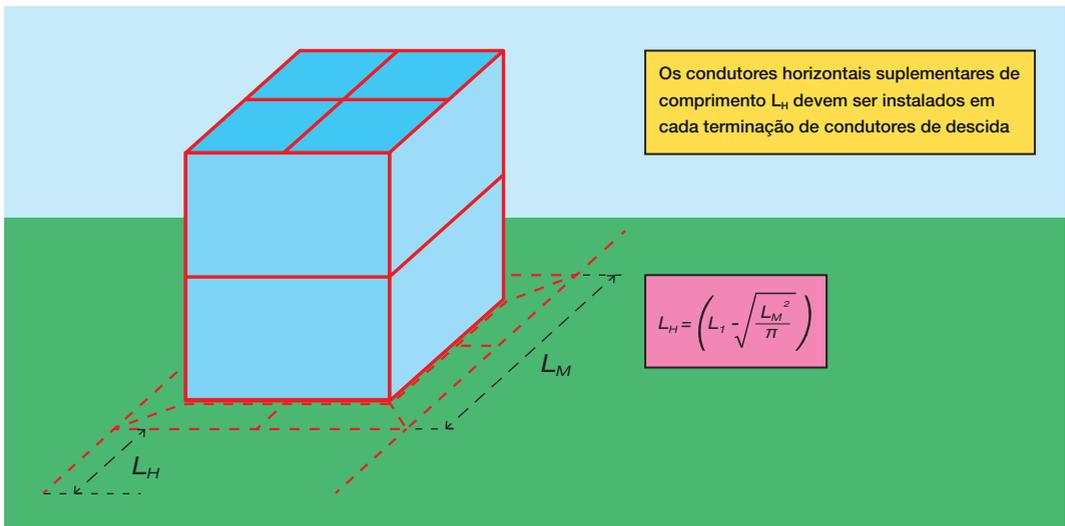


Fig. 4.18 – Utilização de condutores suplementares horizontais. O valor de L_I é dado na Fig. 4.22.

É interessante observar que a NBR 5419-3 [1] é totalmente baseada na Norma IEC-62305-3 [5] e uma das poucas diferenças é que a norma IEC permite a utilização de dois tipos de malhas de aterramento: Tipo A, que utiliza eletrodos verticais e horizontais sem formar um anel; e Tipo B, que utiliza eletrodos em anel e é adotada pela NBR 5419.

Como dito anteriormente as ferragens estruturais podem e devem ser utilizadas como parte do sistema de aterramento, pois

a resistividade do concreto úmido é baixa (< 200 Ωm) [1]. Uma característica do concreto é que, mesmo na época seca, ele retém a umidade por um longo período. A Fig. 4.20 mostra que a utilização das fundações contribui bastante para a redução do valor da resistência de aterramento da malha.

Para que não haja danos na estrutura da fundação, recomenda-se que sejam feitas boas conexões elétricas entre suas ferragens. Ressalta-se que existem restrições

para a utilização das ferragens estruturais como parte do SPDA nos casos onde elas trabalham tensionadas (concreto protendido) [1].

Em edificações onde a circulação de pessoas na área externa próxima da edificação é grande, é importante aumentar a segurança nesta região. Em área externa, o maior risco para as pessoas são as tensões de passo e toque, que surgem devido à circulação da corrente de descarga pelo solo na região onde termina a malha equalizada, conforme mostrado nas Figs. 4.21 e 4.22.

A corrente que flui pela malha de aterramento é dissipada no solo e provoca uma elevação do potencial do solo que teoricamente se estende da periferia da malha até o infinito. Na prática, para uma malha de aterramento constituída de uma haste vertical de 3m de comprimento, a 10m de distância o potencial do solo é apenas 4% do potencial da haste.

Uma forma de estender a equalização da malha da edificação para a área externa é utilizar anéis de equalização concêntricos. A Fig. 4.23 ilustra um arranjo de anéis concêntricos que envolvem a edificação.

Outra forma de aumentar a segurança é o recobrimento da área no entorno da edificação com materiais de alta resistividade (alfalto ou brita) como mostrado na Fig. 4.24. Nesse caso, a cobertura de alta resistividade limita a corrente que pode passar pela pessoa.

4.2.2 - IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO

Nos problemas envolvendo sistemas elétricos operando em regime permanente, a frequência envolvida é relativamente baixa (60 Hz no Brasil). Nesse caso, um aterramento pode ser caracterizado pela sua resistência. No entanto, no caso das descargas atmosféricas as frequências envolvidas são relativamente elevadas (variando de 25 kHz a 1 MHz) e,

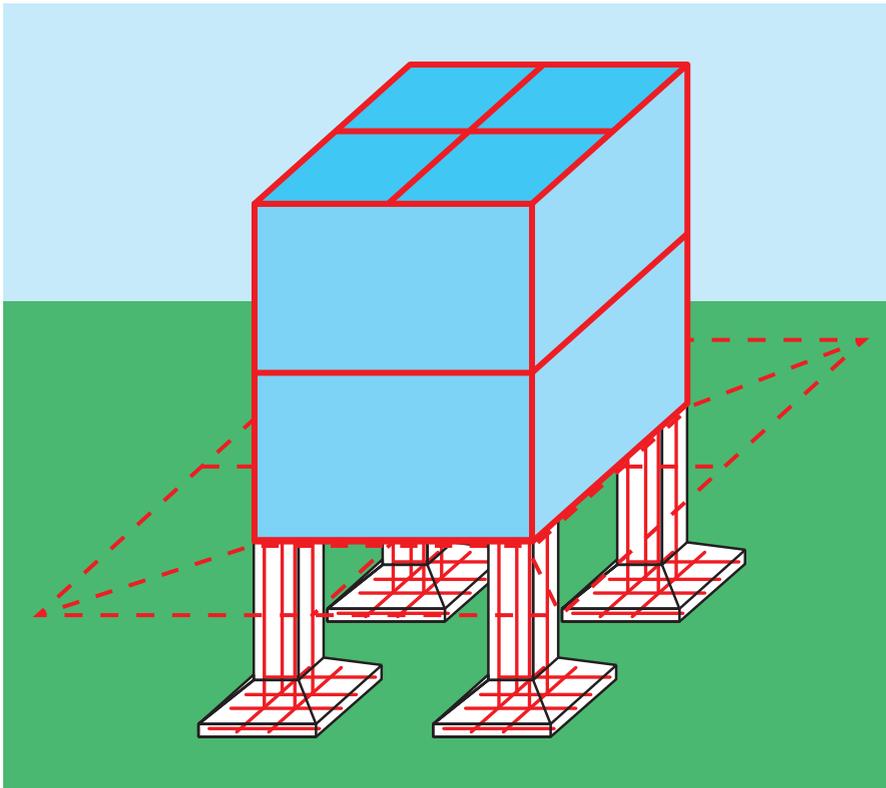


Fig. 4.20
Utilização da ferragem estrutural como parte da malha de aterramento.

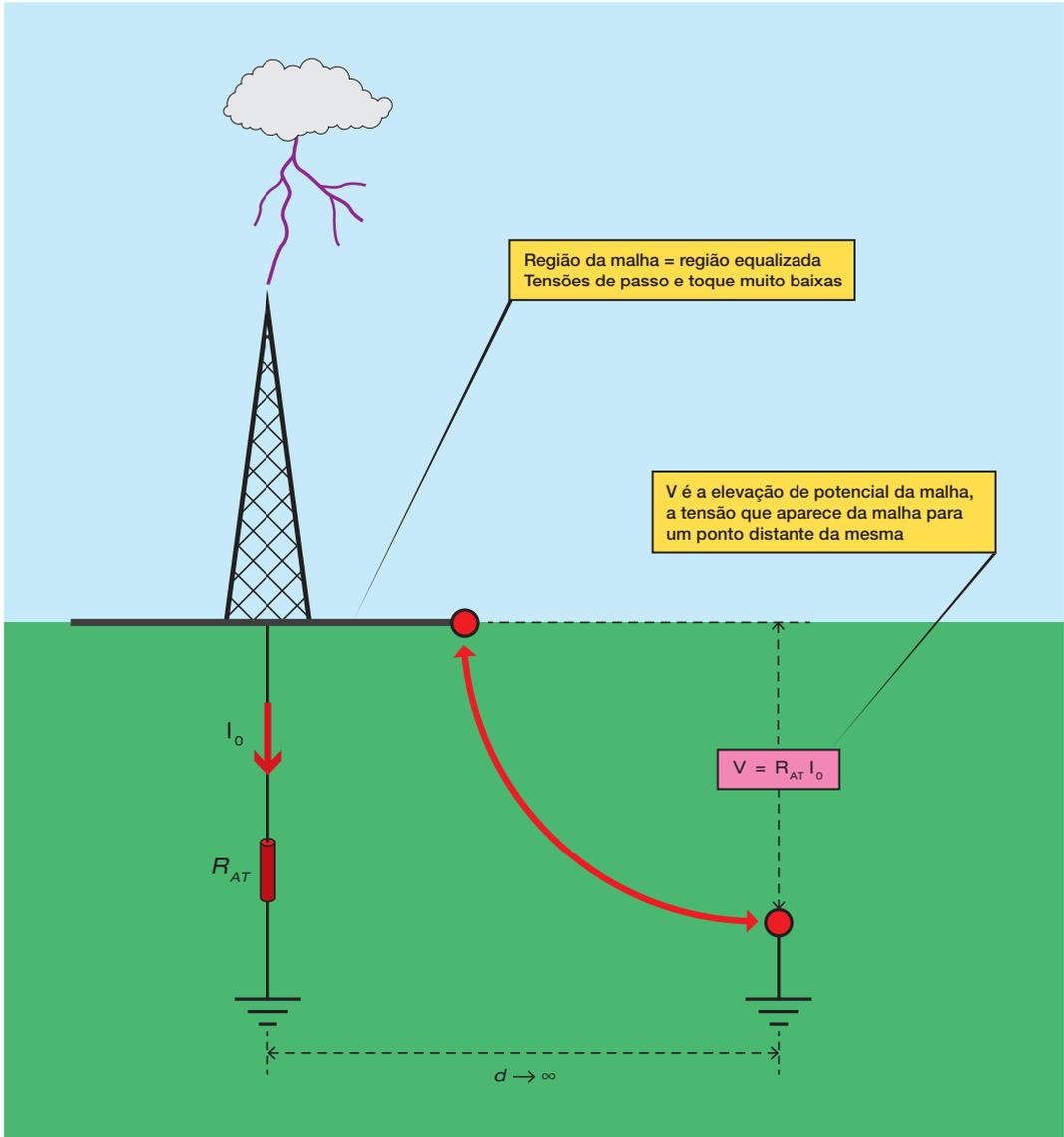


Fig. 4.21 – Elevação de potencial em uma malha de aterramento.

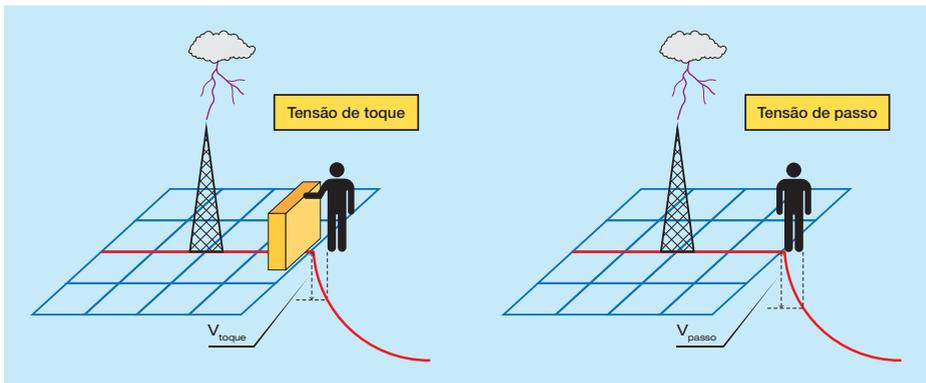


Fig. 4.22
Tensões de
passo e toque
nas imediações
da malha de
aterramento.

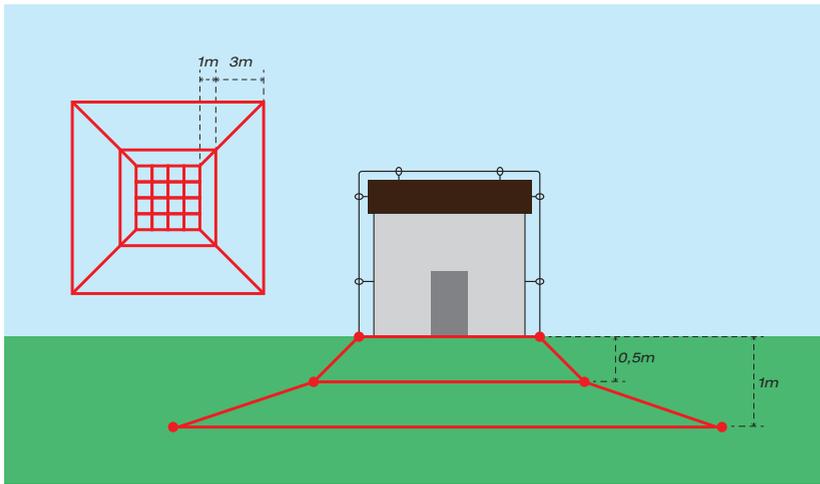


Fig. 4.23 Utilização de anéis concêntricos que envolvem a edificação como forma de estender a equalização proporcionada pela malha para a área externa.

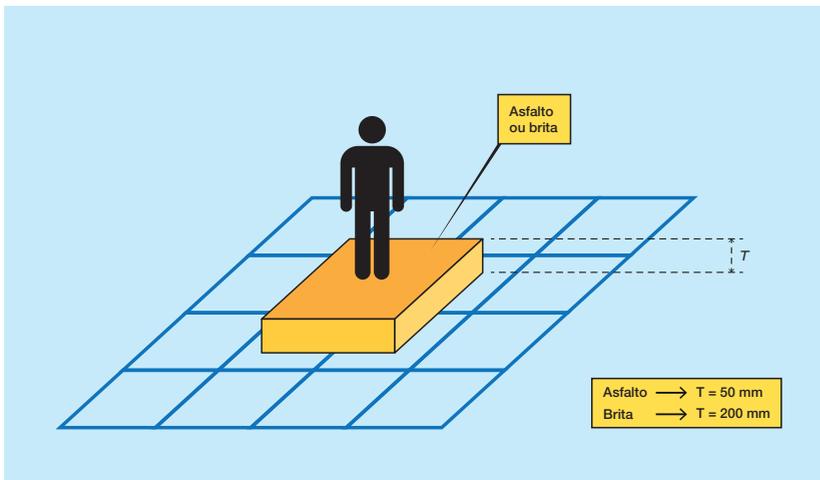


Fig. 4.24 Recobrimento da área externa da edificação com material de alta resistividade [5].

nesta situação, o aterramento se comporta como uma impedância, tendo elementos capacitivos, indutivos e resistivos. No caso de aterramentos compostos por eletrodos longos, uma boa representação é o circuito mostrado na Fig. 4.25, relativo a uma linha de transmissão com perdas transversais elevadas [6].

Se uma corrente impulsiva for aplicada em um cabo nu enterrado, a corrente vai se dispersando no solo e, após se propagar em um certo comprimento de cabo (denominado comprimento crítico) a maior parte da corrente já terá sido dispersada no solo. Nesta situação, não adianta utilizar cabos de grande comprimento na malha, pois apenas o trecho de cabo de comprimento in-

ferior ao valor do comprimento crítico irá ajudar na dispersão da corrente. O valor do comprimento crítico depende do valor da resistividade do solo (ρ) e da forma de onda da corrente (notadamente do tempo de frente). Nessa situação, a caracterização da malha é feita por meio de sua impedância.

A medição da impedância da malha pode ser feita com um circuito similar ao utilizado para medir a resistência, só que fazendo uso de ondas de corrente impulsivas ou de alta frequência. A impedância medida com ondas impulsivas é denominada impedância transitória. O cálculo da impedância pode ser feito com o modelo mostrado na Fig. 4.25.

A Fig. 4.26 mostra uma série de curvas com

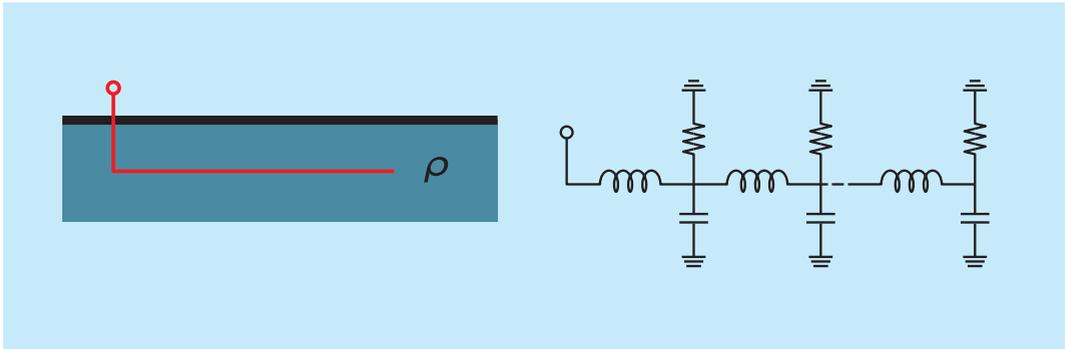


Fig. 4.25 – Representação da malha de aterramento por um circuito RLC distribuído.

os valores das impedâncias transitórias de uma malha de aterramento constituída de um cabo horizontal com comprimento variando de 20 a 120m. Foi utilizada para os cálculos uma corrente com forma de onda impulsiva 1,2/20 μ s. É importante ressaltar que o valor do comprimento crítico depende do valor do tempo de frente da onda de corrente. Quanto maior o tempo de frente, maior o valor do comprimento crítico.

primeira camada do solo e ao valor médio da resistividade aparente, respectivamente, dos solos de Minas Gerais [8].

Pode se ver na Fig.4.26 que não é efetivo aumentar o valor do comprimento do cabo da malha acima do valor do comprimento crítico. Entretanto, para o valor da resistência de aterramento, quanto maior o comprimento do cabo, menor será o valor da resistência.

As impedâncias transitórias foram calculadas com a metodologia descrita em [7]. Foram calculados os valores para solos de resistividade iguais 1000, 2400, 3500 e 5000 Ω m. A permissividade relativa do solo foi considerada como sendo igual a 10. Foram utilizados os valores de 3500 e 2400 Ω m porque são os valores correspondentes à resistividade aparente média da

Outro fenômeno que ocorre no caso das descargas atmosféricas é a ionização do solo que ocorre nas proximidades dos condutores devido aos elevados valores de campo elétrico no solo. O campo elétrico no solo é função do valor da corrente é da resistividade do solo. Como as correntes são muito elevadas, em solos de alta resistividade ocorrerá uma ionização intensa, levando a

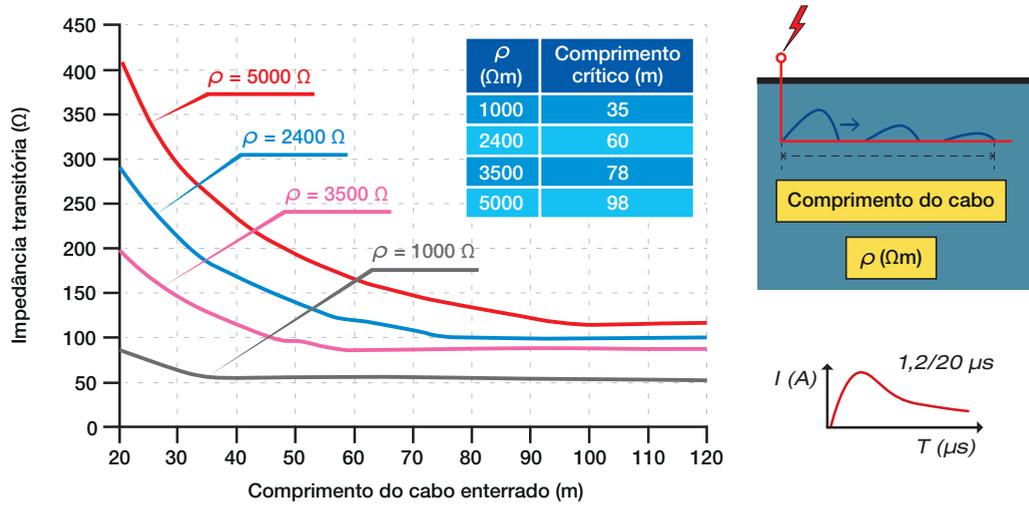


Fig. 4.26 – Comprimento crítico de malha de aterramento constituída de um cabo horizontal enterrado em solos de 1000, 2400, 3500 e 5000 Ω m. Adaptado de [7].

uma redução do valor da resistência e também da impedância transitória do aterramento. Esse fenômeno não é detectado nas medições usuais, pois as mesmas são feitas com correntes de baixa intensidade.

As curvas da Fig. 4.27 mostram resultados de medição realizados no campo de testes do Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG pelos autores [9], onde foram utilizadas ondas de corrente impulsiva com valores de até 5 kA. Nessa medição, o parâmetro denominado impedância (Z) é a relação entre o valor de pico da tensão medida pelo valor de pico da corrente. São mostrados os resultados obtidos para duas malhas constituídas de hastes verticais. Pode-se ver nas curvas que o valor da impedância diminui com o aumento do valor de pico da corrente. No caso de descargas atmosféricas reais, os valores das correntes nas hastes podem ser mais elevados, causando uma maior redução da impedância em relação à resistência.

Outro fator que dificulta o cálculo das impedâncias de malhas de aterramento é que os parâmetros elétricos do solo (resistividade e permissividade) variam com a frequência. Isto significa que, para cada forma de onda da corrente de descarga, a malha apresenta um valor diferente de impedância. As curvas mostradas na Fig. 4.28 foram obtidas utilizando dois modelos que descrevem a variação dos parâmetros do solo com a frequência [10, 11]. Os cálculos foram feitos com a metodologia descrita em [12].

Os efeitos da variação dos parâmetros do solo com a frequência são mais pronunciados em solos de resistividade acima de $1000 \Omega\text{m}$. As curvas da Fig. 4.28 mostram os valores das impedâncias de uma malha constituída de um cabo horizontal de 30m de comprimento, enterrado em um solo de $4000 \Omega\text{m}$. Pode se ver nessa figura que os valores das impedâncias transitórias são muito influenciados pela variação dos parâmetros do solo.

Portanto, conclui-se que a impedância apresentada por um sistema de aterramento frente à corrente de uma descarga atmosférica é bem diferente da resistência medida em baixa frequência. Além disso, a impedância depende de diversos fatores difíceis de determinar.

Devido aos fatos anteriormente mencionados e conforme visto na seção anterior, os requisitos para um sistema de aterramento prescritos pela NBR 5419-3 não especificam valores nem para a resistência nem para a impedância de aterramento.

4.3 - EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAIS

A NBR 5419-4 [2] define equalização de potenciais como um conjunto de medidas que visa a redução dos valores das tensões causadas por descargas atmosféricas. As equalizações devem ser realizadas tanto no exterior quanto no interior das edificações.

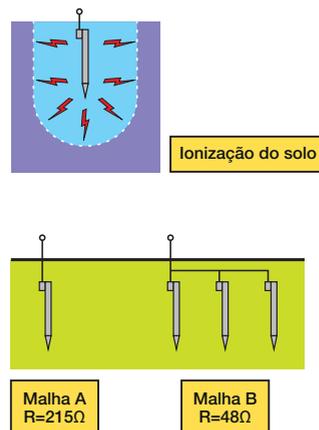
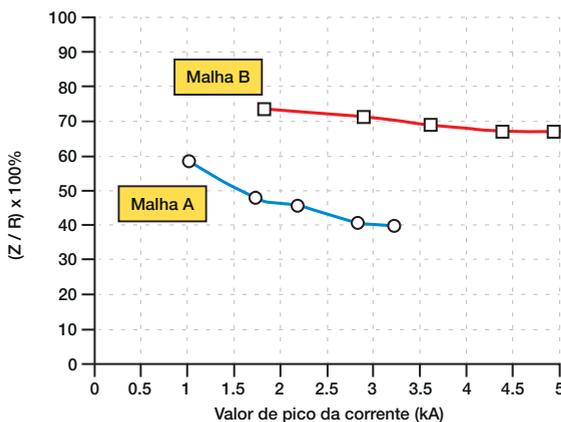


Fig. 4.27 Impedância de hastes verticais de aterramento normalizada pela resistência.

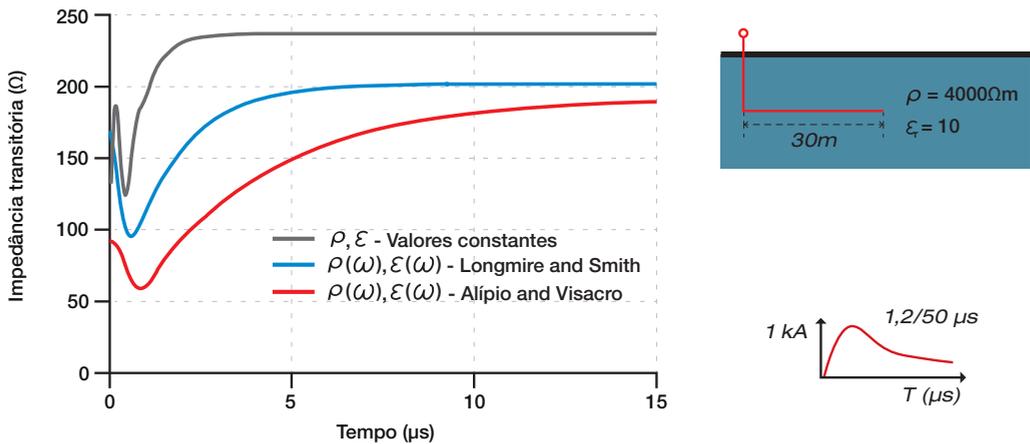


Fig. 4.28 – Impedâncias transitórias de um eletrodo horizontal de 30m de comprimento enterrado em solo de 4000 Ωm. Impedâncias calculadas considerando os parâmetros do solo fixos e também variáveis na frequência conforme os modelos propostos em [10 e 11].

4.3.1 - EQUALIZAÇÕES NO EXTERIOR DE EDIFICAÇÕES

De maneira análoga ao procedimento recomendado para a segurança pessoal, a regra de ouro para a segurança das edificações é a equalização entre as suas diversas partes metálicas:

- ⊙ Infraestrutura elétrica (eletrodutos, eletrocalhas e bandejas);
- ⊙ Ferragem das estruturas de aço e de concreto armado;
- ⊙ Telhas metálicas;
- ⊙ Tubulações metálicas (água, gás, esgoto, ar comprimido, ar condicionado, etc.);
- ⊙ Condutores dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA);
- ⊙ Blindagens dos cabos de força e de sinais;
- ⊙ Condutores de proteção (PE);
- ⊙ Condutor neutro (nos casos pertinentes), etc.

A equalização (interligação) das partes metálicas de um sistema irá garantir que, no caso da incidência de descargas atmosféricas, não irão ocorrer centelhamentos entre essas partes. Esse aspecto é ilustrado na Fig. 4.29.

Os centelhamentos mostrados na Fig. 4.29 ocorrem porque, além de elevados valores,

as correntes de descarga atmosférica possuem uma elevada taxa de variação temporal (elevado valor de di/dt). Essa característica implica no aparecimento de elevadas tensões indutivas entre os cabos e a edificação, conforme ilustrado na Fig. 4.30.

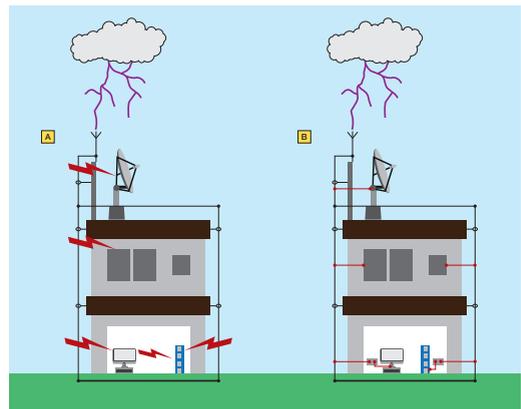


Fig. 4.29 – (A) Sistema com as partes metálicas não equalizadas. (B) Sistema com as partes metálicas equalizadas. A interligação entre as partes evita a ocorrência de centelhamentos.

As tensões desenvolvidas nos cabos de aterramento explicam porque os SPDA do tipo “gaiola”, que utilizam vários condutores de descida interligados envolvendo a edificação, têm um desempenho superior aos SPDA constituídos apenas por um ou dois condutores de descida. Esse aspecto é ilustrado na Fig. 4.31, onde os vários condutores de descida em paralelo do Caso (B) diminuem consideravelmente o valor da indutância e, conseqüentemente, das tensões desenvolvidas nesses condutores.

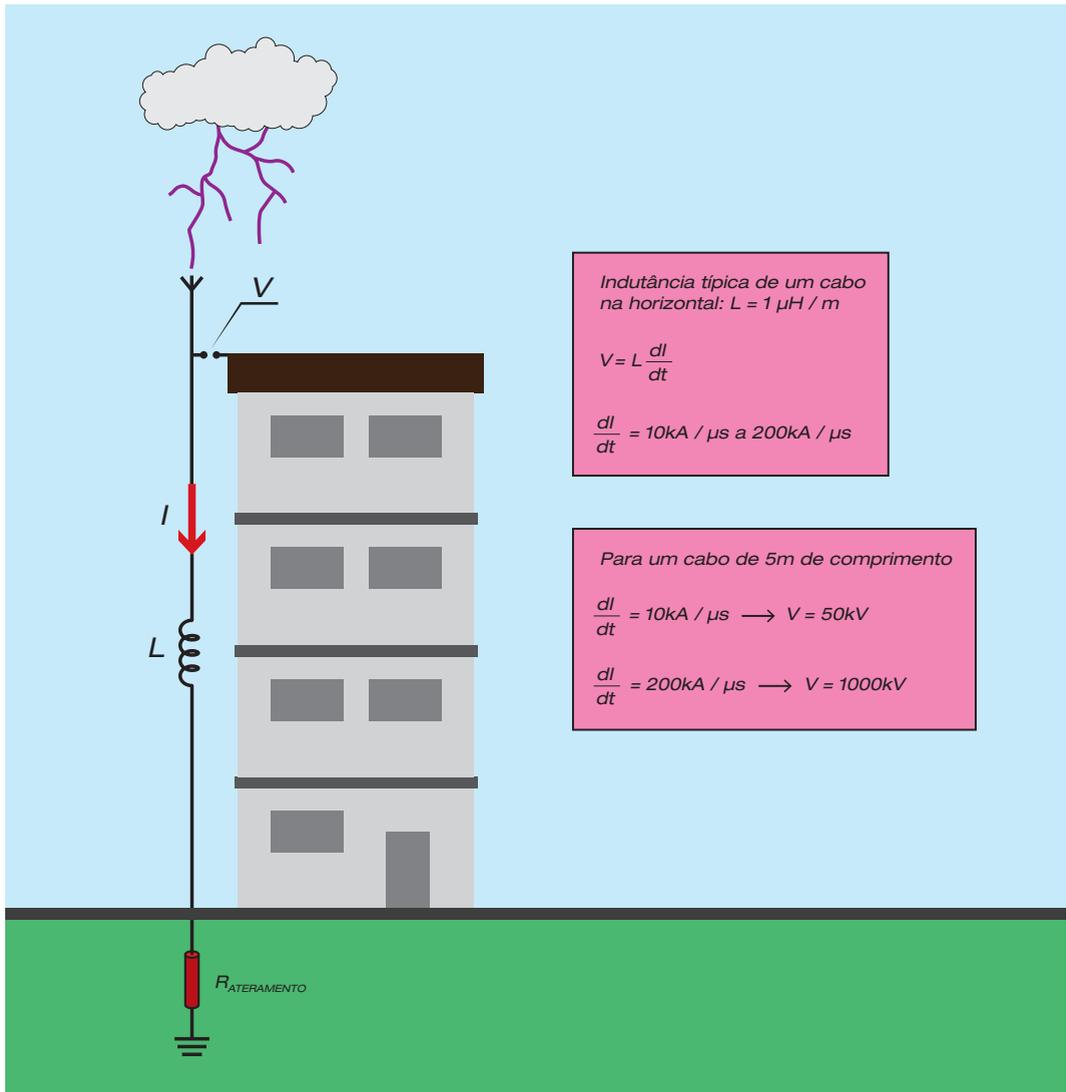


Fig. 4.30 – Tensões desenvolvidas em um condutor de descida de um SPDA.

Além da redução das tensões entre o SPDA e a estrutura, a gaiola também contribui para a redução dos campos magnéticos dentro da edificação, devido à divisão da corrente de descarga entre os vários condutores da gaiola. Se os condutores da gaiola forem interligados à ferragem estrutural da edificação, as tensões entre o SPDA e a estrutura tendem a valores muito baixos. A NBR 5419 recomenda a utilização da ferragem de estruturas metálicas ou de estruturas de concreto armado como parte do SPDA.

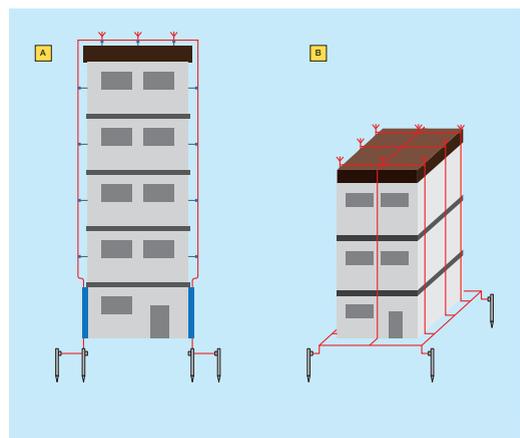


Fig. 4.31 – (A) SPDA com dois condutores de descida; (B) SPDA formando uma gaiola.

A própria fundação da estrutura também pode e deve ser utilizada como parte do sistema de aterramento.

Outro procedimento importante é a equalização entre os condutores e tubulações metálicas que adentram a edificação. A Fig. 4.32 ilustra essa equalização, que deve ser feita na interface entre o ambiente externo e o interior da edificação. Para tal, deve ser instalada nessa interface uma barra de equalização de potenciais (BEP – **B**arramento de **E**qualização **P**ricipal). Sempre que possível, as tubulações metálicas e os condutores devem penetrar na edificação em um local próximo da BEP.

No caso de tubulação metálica de gás, com proteção galvânica utilizando retificadores, pode ser necessário instalar uma luva isolante para evitar problemas de corrosão.

Nesse caso, a norma NBR 5410[3] recomenda instalar um centelhador em paralelo com a luva.

Nessa barra também devem ser interligadas as demais massas metálicas da edificação, assim como os condutores de aterramento do sistema elétrico. A Fig. 4.33 mostra o detalhe da interligação da BEP com os barramentos do neutro e do condutor de proteção localizados no quadro de distribuição, para as configurações TN e TT.

Em alguns casos não é possível que todos os serviços metálicos entrem na edificação em um mesmo ponto. Nessa situação, a NBR 5410 recomenda a que equalização entre os elementos metálicos e o sistema de aterramento seja feita nas proximidades do ponto de entrada na edificação, conforme ilustrado na Fig. 4.34.

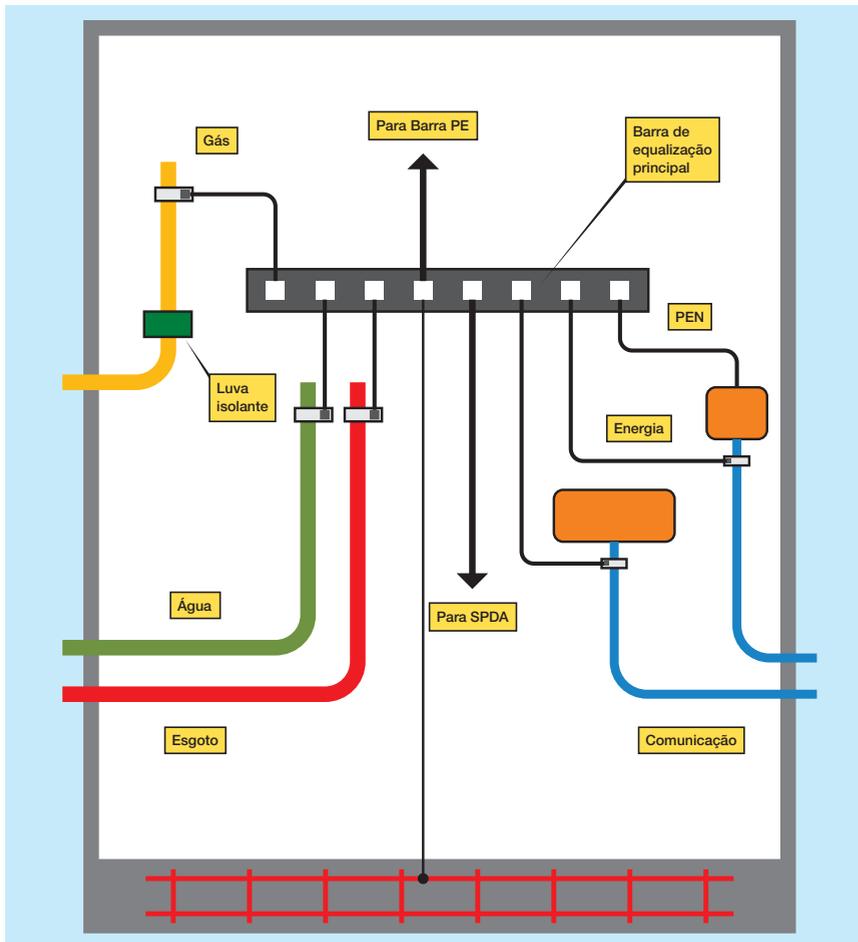


Fig. 4.32 Interligação das tubulações metálicas que adentram a edificação através da utilização de uma barra de equalização (BEP). Adaptado de [3].

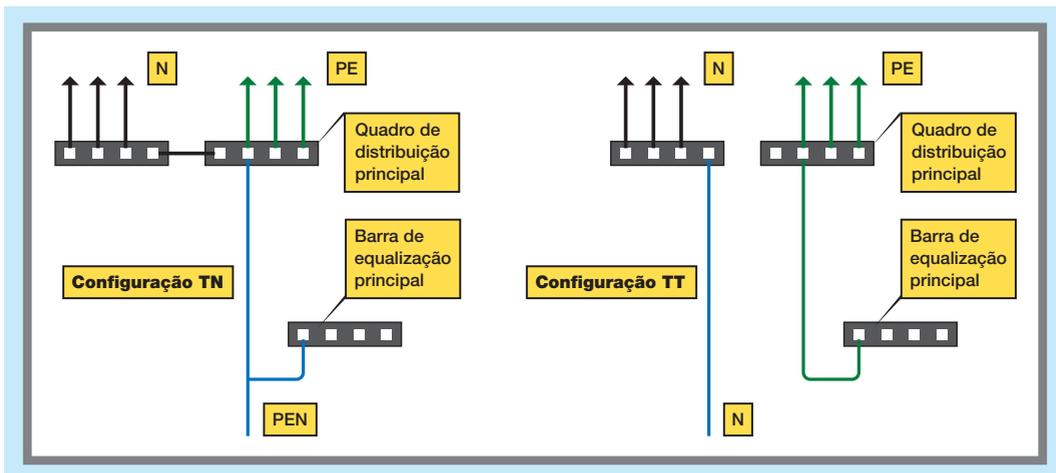


Fig. 4.33 – Detalhe da interligação do barramento de equalização principal com os barramentos do neutro e do condutor de proteção localizados no quadro de distribuição. Adaptado de [3].

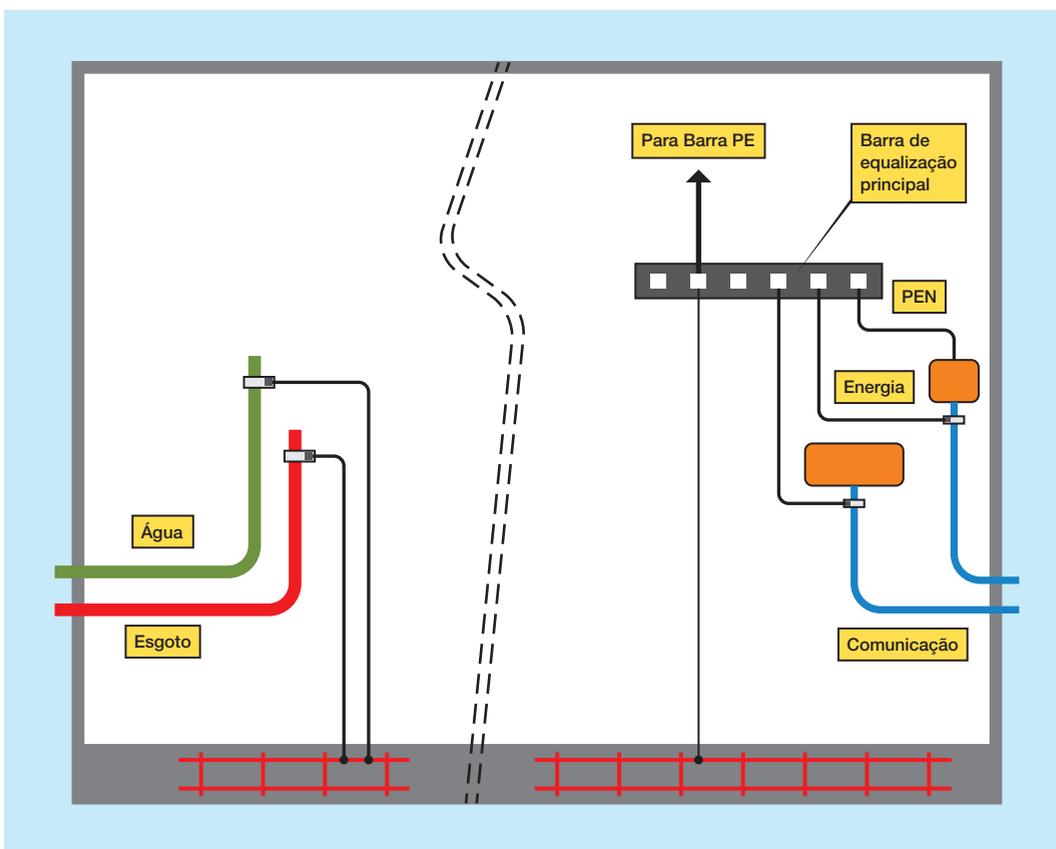


Fig. 4.34 – Procedimento para equalização de tubulações metálicas que adentram a edificação em local afastado da BEP. Adaptado de [3].

No passado, muitas instalações utilizavam uma malha de aterramento separada (isolada) para os sistemas eletrônicos. Atualmente é consenso entre as diversas entidades normativas que esse procedimento é perigoso e contra-indicado. A Fig.4.35

almente é consenso entre as diversas entidades normativas que esse procedimento é perigoso e contra-indicado. A Fig.4.35

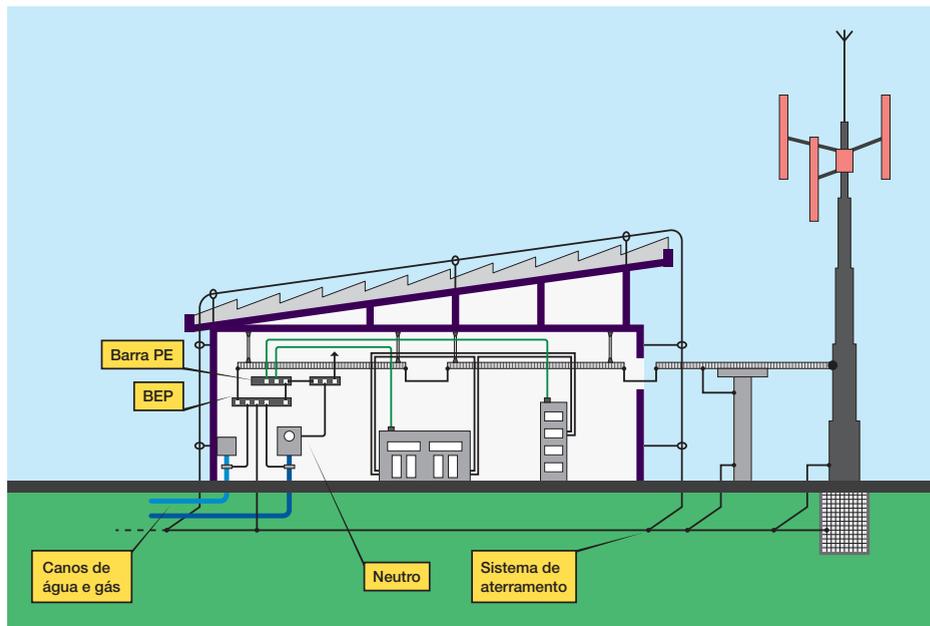


Fig. 4.35 Interligação das partes metálicas em uma estação rádio-base.

mostra em detalhes as interligações recomendadas pelas normas atuais, tomando-se como exemplo uma estação rádio-base.

Partes metálicas de pequenas dimensões não precisam ser vinculadas à BEP. Segundo a NBR 5410 [3] são exemplos dessas partes:

- ⊙ Suportes metálicos de isoladores de linhas aéreas fixados à edificação que estiverem fora da zona de alcance normal;
- ⊙ Postes de concreto armado em que a armadura não é acessível;
- ⊙ Massas que, por suas reduzidas dimensões (até aproximadamente 50mm x 50mm) ou por sua disposição, não possam ser agarradas ou estabelecer contato significativo com parte do corpo humano, desde que a ligação a um condutor de proteção seja difícil ou pouco confiável (isto se aplica a parafusos, pinos, placas de identificação e grampos de fixação de condutores).

4.3.2 - EQUALIZAÇÕES NO INTERIOR DE EDIFICAÇÕES

As partes condutoras internas de uma edificação também devem ser vinculadas à

BEP. São exemplos dessas partes: carcaças metálicas de equipamentos, gabinetes metálicos, armários, etc. A interligação dessas partes metálicas com a BEP deve ser feita também pelo condutor de proteção (PE). O condutor de proteção (PE) deve ser isolado e cada circuito de alimentação deve ter o seu PE, conforme mostrado na Fig. 4.36.

Ressalta-se que o SPDA e o condutor neutro do sistema elétrico também devem ser vinculados na BEP. As normas geralmente permitem que, além da vinculação da carcaça ao PE, tanto a carcaça quanto o PE podem ser ligados a outros pontos aterrados, tais como infraestrutura e malhas de equalização de sinais. Esse aspecto é mostrado na Fig. 4.37. É importante ressaltar que a interligação entre as partes não elimina a necessidade de utilização do condutor de proteção (PE).

As configurações mostradas nas Figs. 4.36 e 4.37 designadas pela NBR 5419-4 como Configuração Estrela (S) e Configuração em Malha (M), são ilustradas de forma esquemática na Fig. 4.38.

A Configuração Estrela (S) é indicada para sistemas de pequeno porte, nos quais os condutores normalmente adentram a edificação em um único ponto. Nessa configuração

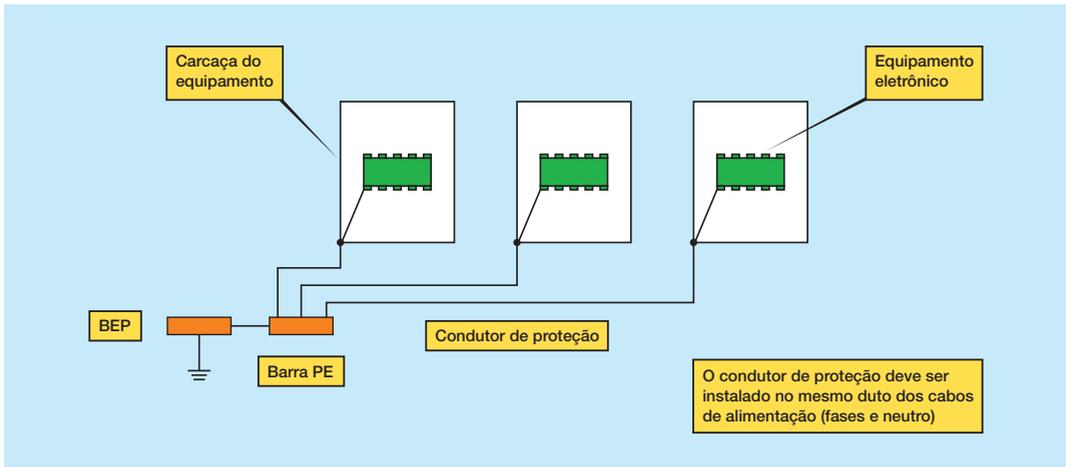


Fig. 4.36 – Aterramento das carcaças via condutor de proteção. Adaptado de [13].

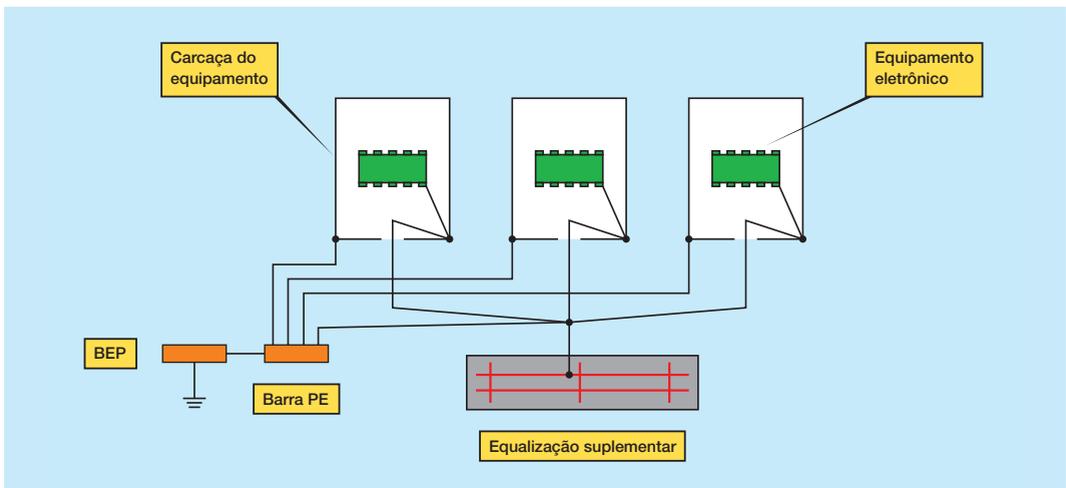


Fig. 4.37 – Interligação da carcaça ao condutor de proteção e à infraestrutura. Adaptado de [13].

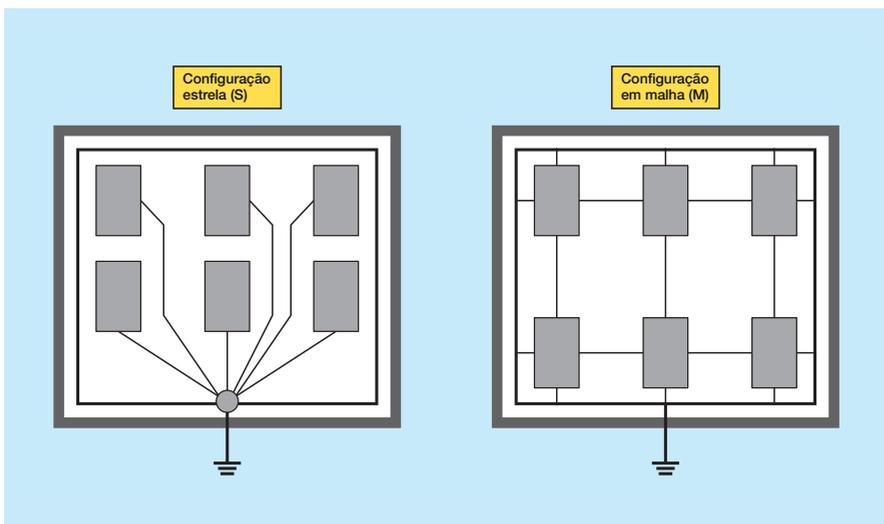


Fig. 4.38
Configurações recomendadas pela NBR 5419 para interligação das partes metálicas internas da edificação. Adaptado de [2].

ração todos os componentes metálicos (por exemplo, gabinetes, caixas, armários) dos sistemas internos devem ser integradas ao sistema de aterramento em uma única barra de equipotencialização atuando como ponto de referência do aterramento. Além disso, todos os cabos entre os equipamentos individuais devem correr paralelamente entre si e próximos aos condutores de equalização. Isto dificulta muito a utilização desta configuração em sistema de grandes dimensões, instalados em ambientes amplos.

A Configuração em Malha (M) é mais indicada para sistemas de grande porte, com vários cabos interligando equipamentos e cabos adentrando a edificação em mais de

um ponto. Nesse arranjo, os componentes metálicos dos sistemas internos devem ser integrados ao sistema de equalização através de múltiplos pontos de interligação.

Uma prática adotada em ambientes com muitos equipamentos eletrônicos é a utilização de uma malha de referência de sinais. Esta malha proporciona uma melhor equalização de potenciais garantindo um melhor desempenho do sistema frente a ruídos de alta frequência. A Fig. 4.39 ilustra a utilização de uma malha de referência de sinais.

A Fig. 4.40 mostra uma visão detalhada da utilização de uma malha de referência de sinais, incluindo o condutor de proteção

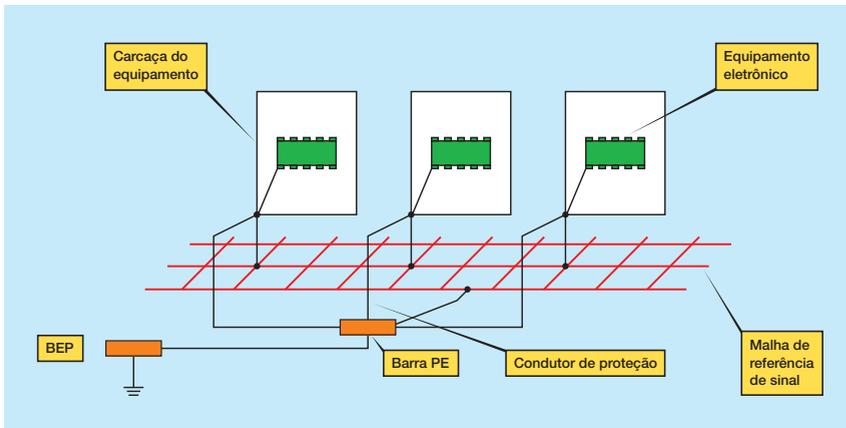


Fig. 4.39 – Utilização de uma malha de referência de sinais. Adaptado de [14].

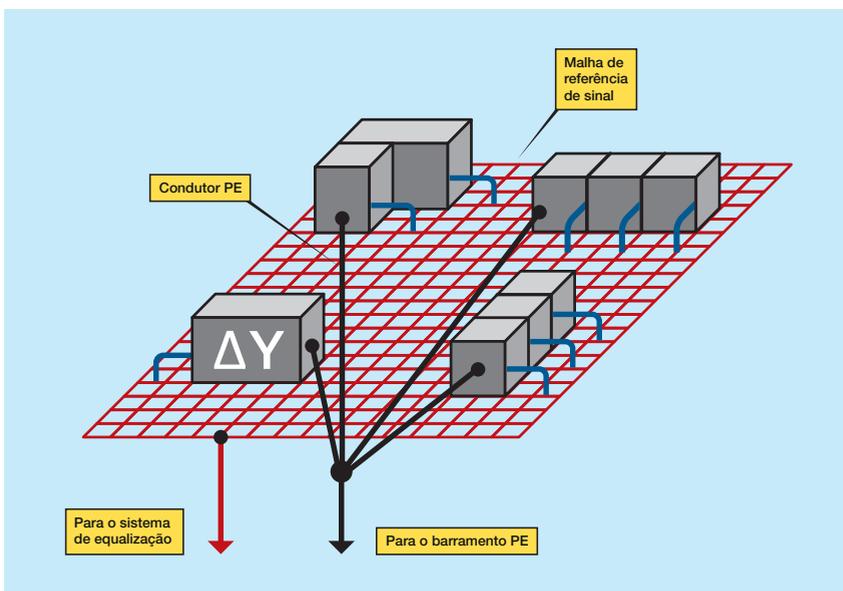


Fig. 4.40 - Instalação com o aterramento dos equipamentos na malha de referência e a utilização conjunta do condutor de proteção. Adaptado de [14].

(PE). Em edificações com regiões de alta concentração de equipamentos eletrônicos sensíveis, a utilização de várias malhas de referência de sinal é uma boa alternativa, conforme ilustrado na Fig. 4.41.

Para edificações cujos equipamentos já estejam instalados, uma alternativa é instalar uma malha de referência de sinais no teto, conforme mostrado Fig. 4.56.

Os eletrodutos e leitos de cabos (canaletas, eletrocalhas e bandejas) metálicos também podem ajudar na equalização interna. Caso esses eletrodutos e leitos não possuam uma boa interligação elétrica entre as partes, a utilização de cordoalha de cobre interligando as várias partes é uma boa alternativa, conforme ilustrado na Fig. 4.43. Além da equalização, as bandejas irão proporcionar uma blindagem para os cabos nela instalados.

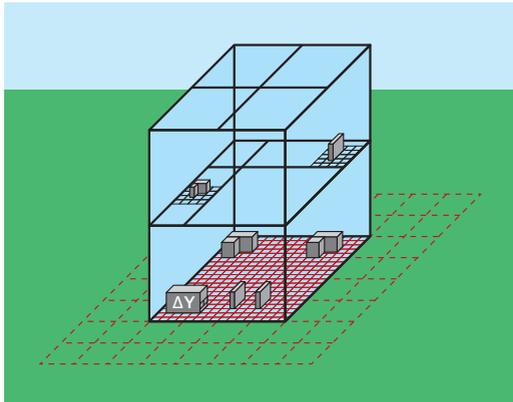


Fig. 4.41 – Malhas de referência de sinal em instalação de grande porte.

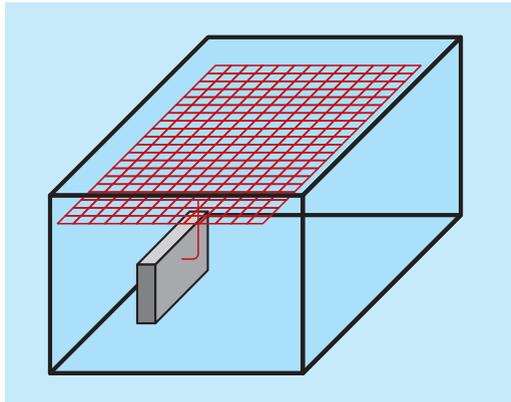


Fig. 4.42 – Malha de referência de sinal instalada no teto da sala.

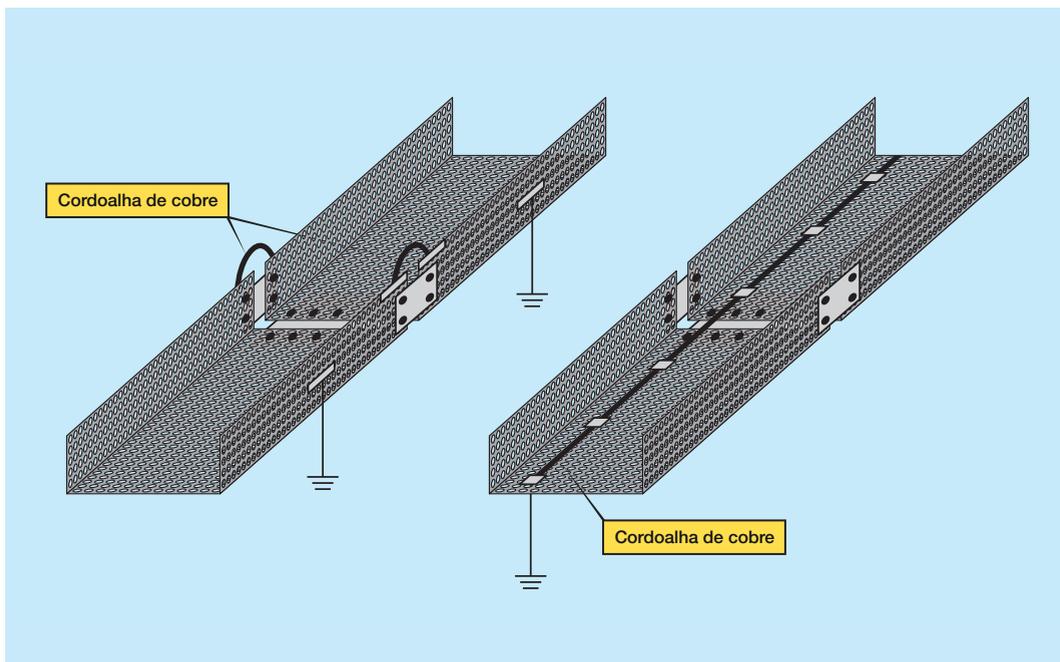


Fig. 4.43 – Bandejas eletricamente bem conectadas que podem integrar o sistema de equalização interno.

4.3.3 - ATERRAMENTO DAS BLINDAGENS DE CABOS QUE INTERLIGAM EDIFICAÇÕES

Um caso que merece atenção particular é o aterramento de blindagens de cabos na barra de equalização de potenciais (BEP). Esse caso se aplica aos cabos de força e de sinais que interligam duas edificações distintas. Como cada edificação tem sua própria malha de aterramento, alguns cuidados devem ser tomados nessas equalizações, conforme discutido nesta seção.

Quando existe um conjunto de edificações próximas, é importante avaliar a necessidade de interligação das malhas das edificações. A utilização de malhas indepen-

dentes pode levar à circulação de corrente pelas blindagens de cabos que por ventura estejam ligados entre as edificações, conforme ilustrado na Fig. 4.44. Dependendo da amplitude e da duração da corrente, o cabo poderá ser danificado.

A interligação das duas malhas através de condutores nus diretamente enterrados no solo diminui significativamente a corrente que circula pela blindagem do cabo, conforme mostrado na Fig. 4.45. A NBR 5410 [2] estabelece que todo cabo de sinal que interliga duas edificações deve ser acompanhado de um condutor de equalização ao longo de todo o seu comprimento, o qual deve ser conectado aos sistemas de aterramento das duas edificações.

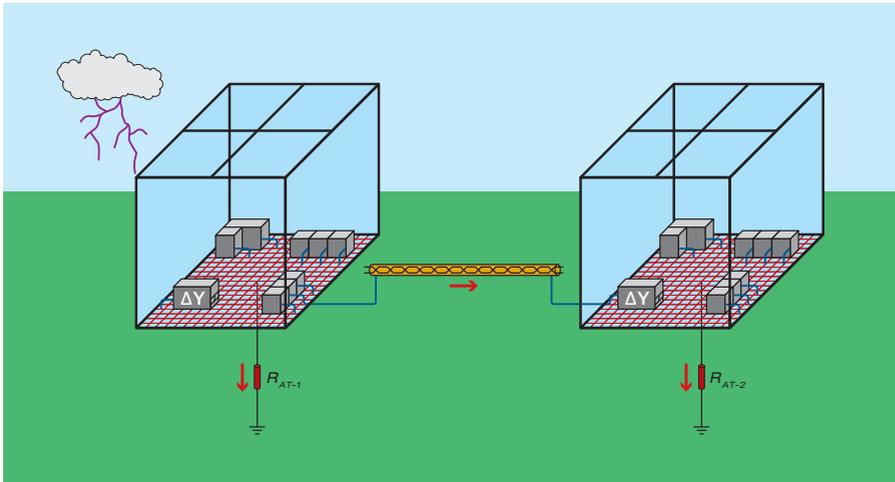


Fig. 4.44
Circulação de corrente pela blindagem de um cabo que interliga duas edificações.

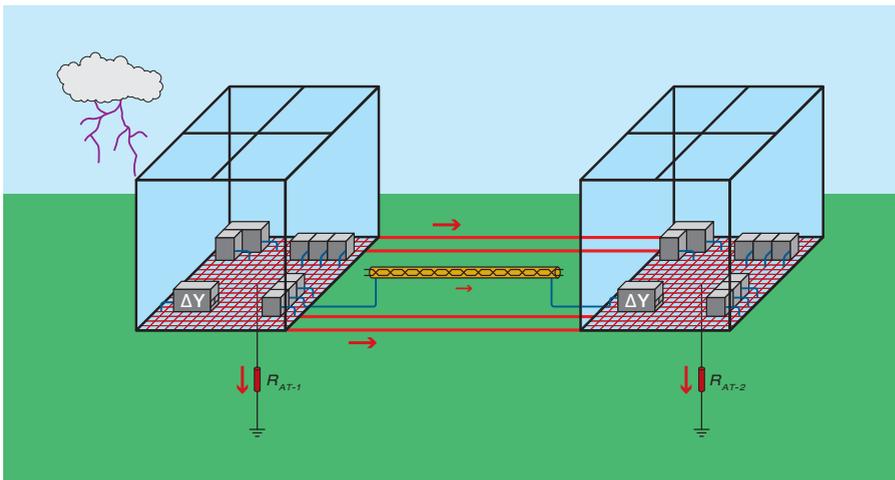


Fig. 4.45
Redução da corrente que circula pela blindagem de um cabo de comunicação devido à interligação das malhas por condutores enterrados.

Mesmo em malhas interligadas, se a corrente de curto-circuito para a terra for muito elevada, valores consideráveis de corrente de frequência industrial (60 Hz), além da parcela da corrente da descarga, podem circular pela blindagem do cabo, conforme ilustrado na Fig.4.46. Nessas condições, as parcelas de corrente que circularão pelos condutores da malha e pela blindagem do cabo serão inversamente proporcionais às suas resistências. A blindagem do cabo poderá ser danificada dependendo da amplitude e da duração da corrente que flui pela mesma.

Uma alternativa para impedir o fluxo de corrente de frequência industrial pela blindagem do cabo e, ao mesmo tempo garantir a equalização da blindagem no caso de uma sobretensão atmosférica, é utilizar um DPS

para conectar uma das pontas da blindagem na BEP. O DPS deve ter uma tensão de operação contínua (U_c) igual ou superior à tensão fase-terra do sistema elétrico, de forma a não atuar para as tensões resultantes do curto-circuito. A NBR 5419-4 sugere a utilização de DPS tipo comutador (centelhador a gás) para essa aplicação.

Outra possibilidade é a utilização de um cabo com dupla blindagem, onde a segunda blindagem deve ser dimensionada para suportar elevadas correntes resultantes dos curto-circuitos. Em muitos casos, um eletroduto metálico contínuo e corretamente dimensionado poderá fazer o papel dessa segunda blindagem. A Fig. 4.47 mostra as alternativas para a equalização da blindagem nessas situações.

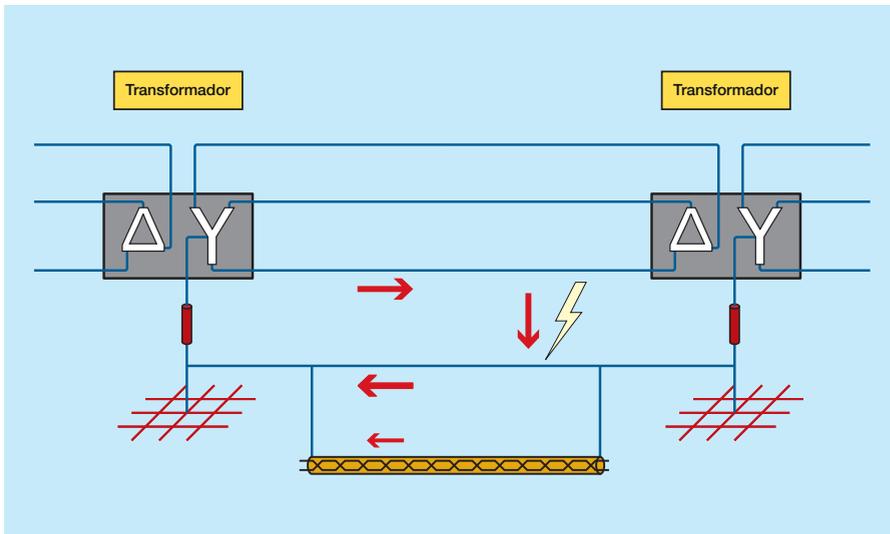


Fig. 4.46
Corrente de curto circuito circulando pela blindagem do cabo.

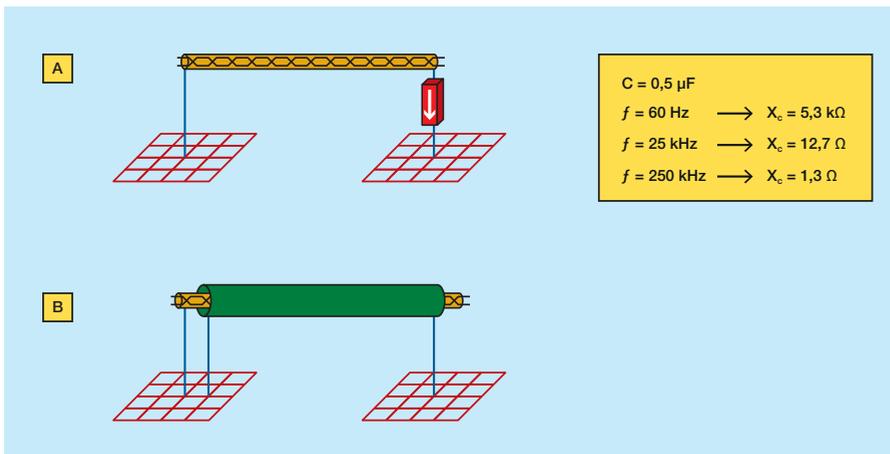


Fig. 4.47
Alternativas para o aterramento da blindagem de um cabo que interliga duas edificações (A) utilizando DPS; (B) utilizando uma segunda blindagem ou um eletroduto metálico.

4.4 - ISOLAMENTO

4.4.1 - ISOLAMENTO ENTRE PARTES INTERNAS E O SPDA

Em situações onde partes metálicas internas das edificações estão próximas de captadores e de condutores de descida do SPDA e uma ligação equipotencial não puder ser realizada, é necessário manter uma distância de segurança para que não haja centelhamento. O laço formado pelos elementos do sistema de captação externo e os objetos e cabos internos é responsável pelo aparecimento de tensões induzidas. A Fig. 4.48 mostra a situação de um laço formado em parte pelo próprio condutor onde circula a corrente, que é similar à situação que ocorre nas edificações.

A Fig. 4.49 mostra duas situações onde equipamentos internos e o cabo de descida formam laços. A norma sugere uma expressão simplificada, mostrada na mesma figura, para a determinação da distância de segurança. Pode se ver na Fig. 4.49 que, para a mesma edificação, os valores das distâncias podem ser diferentes, dependendo da área do laço formado.

Estão relacionados na Fig. 4.50 os fatores a serem utilizados na expressão para o cálculo da distância de segurança S , conforme NBR 5419-3 [1]. O fator k_i é definido em função do Nível de Proteção desejado. O fator k_m depende do material existente entre o condutor externo e a parte interna, e o fator k_c depende da divisão da corrente de descarga entre os cabos do SPDA externo.

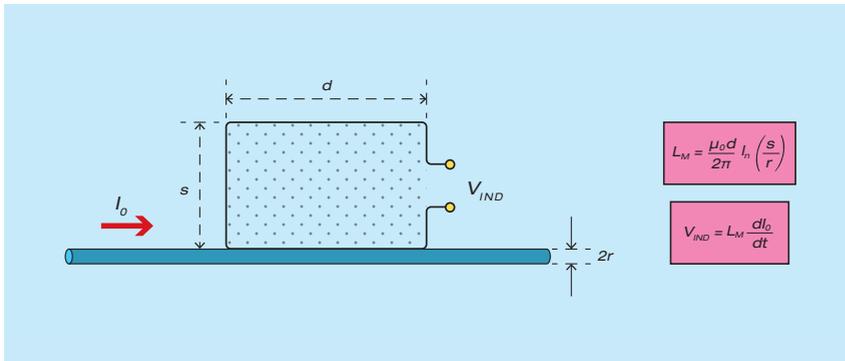


Fig. 4.48 – Tensão induzida em um laço formado em parte pelo condutor que conduz a corrente.

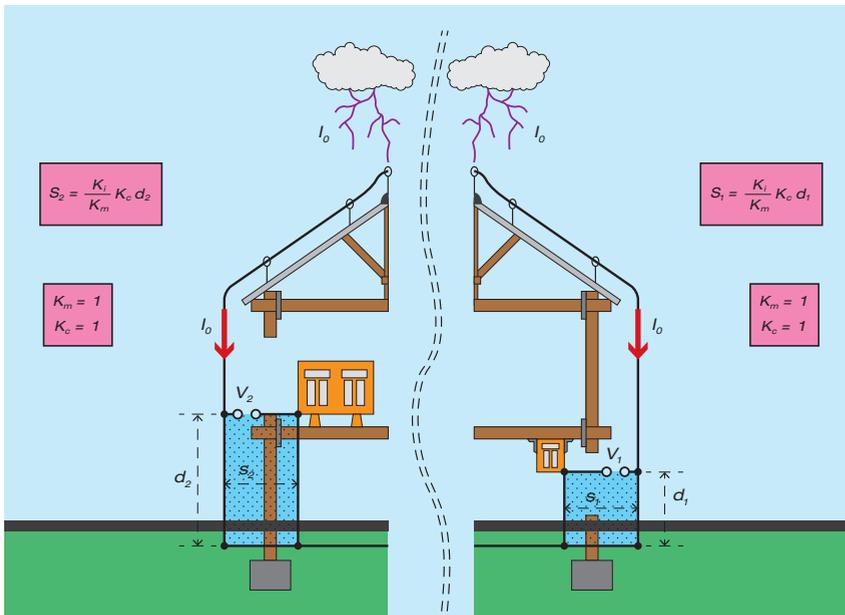


Fig. 4.49 – Tensões induzidas (V_1 e V_2) em laços formados pelos condutores de descida do SPDA e por equipamentos da edificação. Estrutura com apenas um condutor de descida e isolamento de ar [1].

$$S = \frac{K_i}{K_m} K_c d$$

Nível de proteção	k_i
I	0,08
II	0,06
III e IV	0,04

Material	k_m
Ar	1
Concreto, tijolo e madeira	0,5

Nº de cabos de descida	k_c
1 (SPDA isolado)	1
2	0,66
3 ou mais	0,44

Fig. 4.50 – Cálculo da distância de segurança S a ser observada entre partes metálicas internas da edificação e os condutores do SPDA. Adaptado de [1].

Quando são utilizados mais de um tipo de material (em série) nas paredes, com valores de k_m diferentes, a norma sugere a adoção do menor valor para o fator k_m . Quando forem utilizados materiais diferentes dos listados na Fig. 4.50 o fabricante deve ser consultado sobre a capacidade de isolamento do material para a definição do fator k_m . Os valores do fator k_c mostrados na Fig. 4.50 são válidos para uma edificação com malha de aterramento em forma de anel envolvente. A Fig. 4.51 mostra uma

estrutura de concreto armado onde a ferragem não está integrada ao SPDA externo, que possui dois cabos de descida. São mostrados os fatores k_m e k_c .

A Fig. 4.52 mostra uma situação onde o equipamento interno é ligado no sistema de equalização, mas devido ao seu porte, um laço é formado e a distância de segurança precisa ser adotada. Já para uma edificação com mais de dois cabos de descida, a norma sugere $k_c = 0,44$, como mostrado na Fig. 4.53.

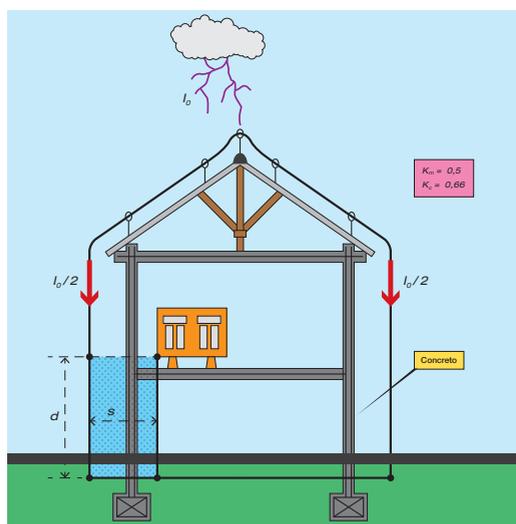


Fig. 4.51 – Distância de segurança considerando dois cabos de descida, edificação com estrutura de concreto armado e cuja ferragem não está interligada ao SPDA.

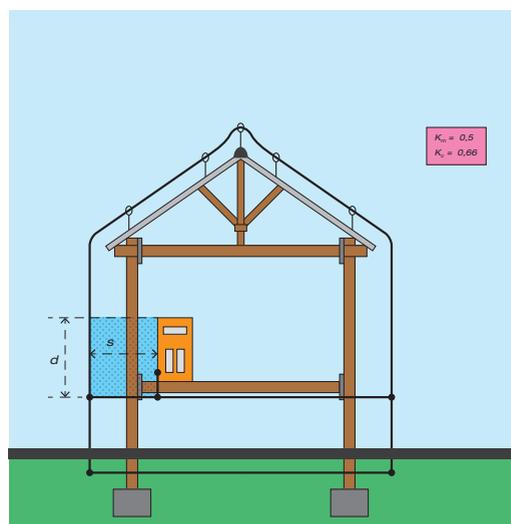


Fig. 4.52 – Distância de segurança para um equipamento vinculado no SPDA pela sua base. Devido às dimensões do equipamento, um laço é formado com o cabo de descida do SPDA.

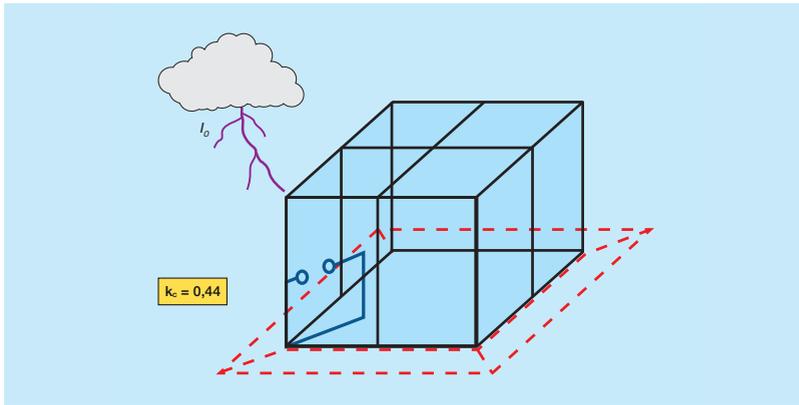


Fig. 4.53- Fator k_c para edificação com mais de dois cabos de descida.

Para uma determinação mais precisa do valor de k_c a NBR 5419-3, apresenta uma metodologia mais elaborada em seu Anexo C. Para edificações de estrutura metálica ou de concreto armado, desde que a ferragem do concreto esteja conectada ao sistema de equalização, não é necessário a adoção de uma distância de segurança. Essa situação é mostrada na Fig. 4.54.

O cálculo das distâncias de segurança pela expressão simplificada proposta na NBR 5419 tem sido questionada e a referência [14] apresenta uma boa discussão sobre o assunto. No caso de edificações de estrutura de concreto armado cuja ferragem não está integrada ao SPDA, podem ocorrer centelhamentos perigosos entre os condutores do SPDA e a ferragem da estrutura, como mostrado na referência [15].

4.4.2 - INTERFACES DE ISOLAMENTO

Interfaces de isolamento são dispositivos instalados em cabos que vem de áreas externas ou de regiões onde estejam sujeitos a induções eletromagnéticas intensas. As interfaces devem propiciar isolamento elétrico entre a parte externa (ou exposta) do cabo e a parte interna e devem ser instaladas na fronteira dos ambientes. Essas interfaces são geralmente utilizadas em cabos que interligam edificações com malhas de aterramento distintas.

Uma alternativa muito utilizada em ambientes industriais é o transformador de isolamento para a alimentação de cargas eletrônicas sensíveis. O transformador evita a penetração de surtos na região onde as cargas estão instaladas. Ele deve ser insta-



Fig. 4.54 - Em edificações com estrutura metálica ou de concreto armado com ferragem interligada ao SPDA não é necessário observar uma distância de segurança.

lado junto às cargas e ter uma blindagem eletrostática. O transformador atenua as induções de modo comum e a blindagem eletrostática diminui consideravelmente a chegada de ruídos de alta frequência nas cargas, uma vez que a blindagem elimina a capacitância entre os enrolamentos primário e secundário. Para ser efetiva, a blindagem eletrostática deve ser vinculada ao sistema de equalização de potenciais da

instalação. A Fig.4.55 ilustra essa situação.

Duas alternativas para estabelecer um enlace de telecomunicações entre duas edificações, sem utilizar cabos metálicos, são mostradas na Fig. 4.56. Essas alternativas utilizam fibra ótica ou enlace de rádio. No caso de cabos de fibra ótica é importante que eles não tenham condutores auxiliares metálicos, comumente utilizados para tra-

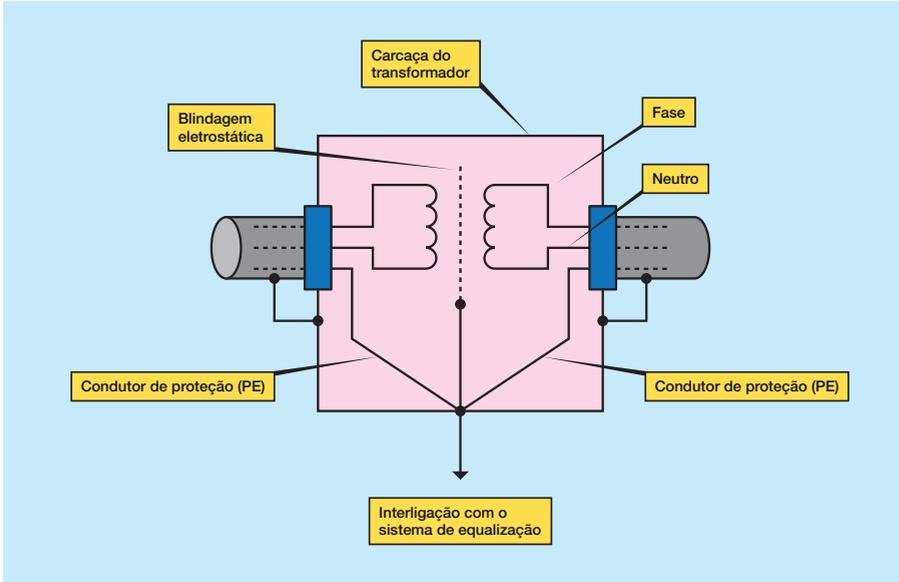


Fig. 4.55
Transformador com blindagem eletrostática.
Adaptado de [14].

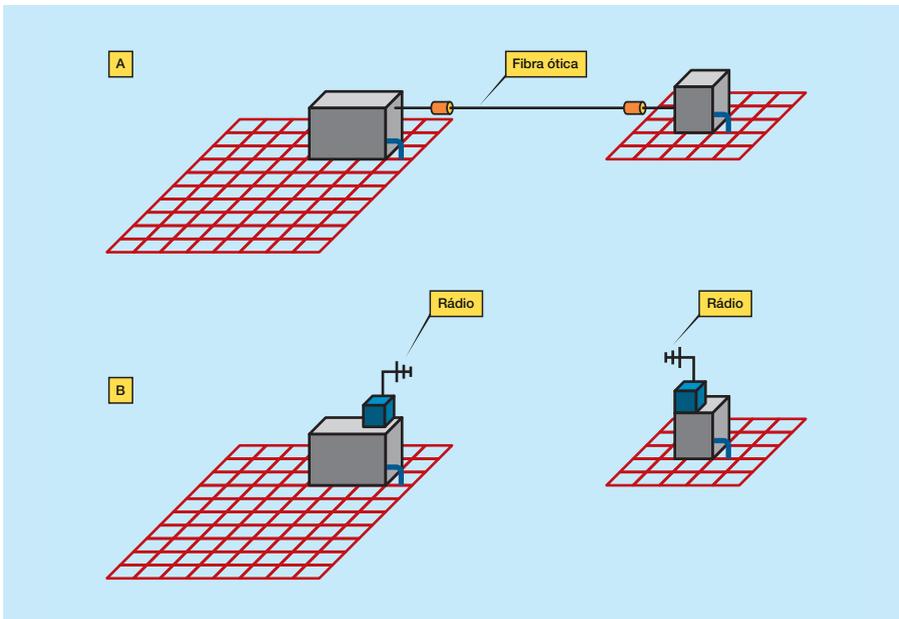


Fig. 4.56
Metodologias para o estabelecimento de enlace de comunicação entre edificações com malhas de aterramento distintas.

ção ou para proteção mecânica.

4.5 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo deste capítulo:

- ⊙ É possível adotar uma filosofia de aterramento que englobe o aterramento do sistema elétrico (neutro dos transformadores), das carcaças dos equipamentos, dos cabos e captos do SPDA, das blindagens dos cabos e dos equipamentos eletrônicos com o objetivo de garantir a segurança do pessoal, da edificação e dos equipamentos;
- ⊙ É altamente recomendável (e até obrigatório na maioria dos casos), utilizar o condutor de proteção (PE) nas edificações;
- ⊙ É recomendável a utilização de uma única malha de aterramento. No caso de mais de uma malha, elas devem ser interligadas;
- ⊙ Todas as partes metálicas da instalação devem ser interligadas (condutores do SPDA, canos metálicos, estruturas metálicas, etc.). Se a interligação não puder ser feita diretamente, ela pode ser feita através de um DPS;
- ⊙ A interligação entre as partes metálicas do sistema promove uma equalização de potenciais, ou seja, minimiza os valores das diferenças de potencial entre as partes. Isto irá evitar o centelhamento entre partes, aumentar a segurança pessoal e melhorar o desempenho do sistema frente a surtos e transitórios. Na impossibilidade de interligação, deve ser adotada uma distância de segurança entre as partes não interligadas;
- ⊙ Utilizar transformador de isolamento com blindagem eletrostática para alimentação dos equipamentos eletrônicos e utilizar malha de referência de sinal são práticas recomendáveis.

BLINDAGEM DA EDIFICAÇÃO, CABOS BLINDADOS E REDUÇÃO DE LAÇOS

Neste capítulo são analisados a blindagem eletromagnética proporcionada pela própria estrutura da edificação e pelo SPDA, a utilização de cabos blindados e o arranjo otimizado da fiação interna visando a redução de laços. Essas Medidas de Proteção contra Surtos (MPS) contribuem para a redução dos campos eletromagnéticos e das tensões induzidas que atingem os equipamentos eletrônicos.

5.1 - CONCEITOS BÁSICOS DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Os princípios físicos da blindagem eletromagnética são simples, mas o seu cálculo é relativamente complexo. Visando simplificar o cálculo, é comum dividir o problema

em duas aproximações [1, 2]:

- ☉ Blindagem na região de campo próximo;
- ☉ Blindagem na região de campo distante.

A região de campo próximo é uma região no entorno da fonte de campo onde a relação entre o campo elétrico e o campo magnético é complexa. Nessa região, os dois campos são tratados como se fossem independentes e a blindagem é calculada para cada um deles. Na região de campo próximo os campos são muito influenciados pela presença da fonte de campo. É o caso dos problemas envolvendo as frequências e os circuitos utilizados na geração e distribuição de energia elétrica (60Hz).

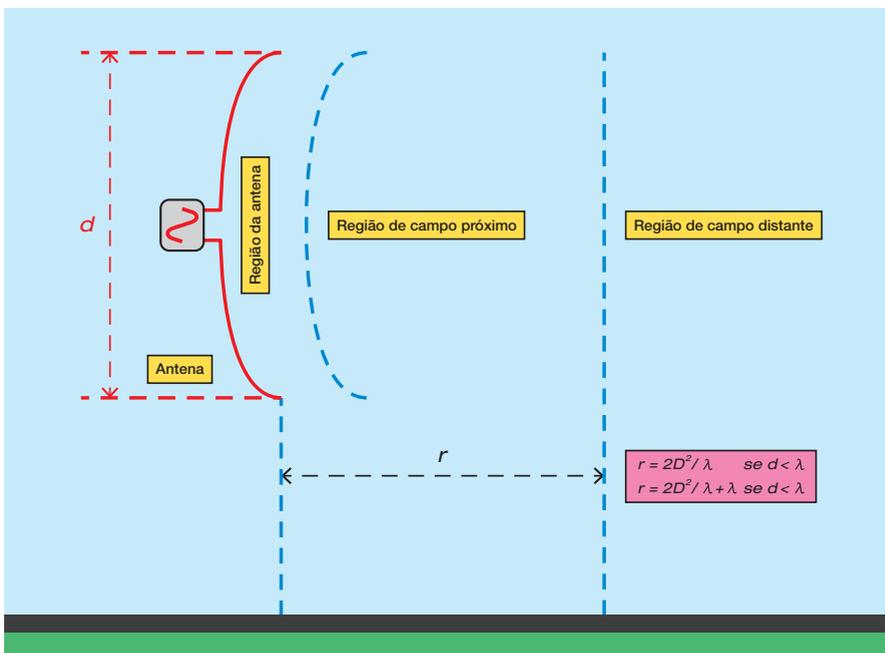


Fig. 5.1
Regiões de
campo próximo e
campo distante.

A região de campo distante é mais afastada da fonte, onde a relação entre o campo elétrico e o campo magnético é dada pela impedância do meio. Nessa região os dois campos são tratados conjuntamente, conforme mostrado na Fig. 5.2. Na região de campo distante a fonte de campo influencia pouco o comportamento dos campos, que dependem mais das características do meio onde ocorre a propagação. Nessa região, o campo eletromagnético pode ser aproximado por uma onda transversal plana, onde o campo elétrico e o campo magnético estão defasados no espaço de 90° e em fase no tempo, conforme mostrado na Fig. 5.2. A blindagem precisa ser calculada para apenas um dos dois campos. Este é o caso dos problemas envolvendo ondas de rádio, para locais afastados do transmissor.

Na região de campo distante os campos se comportam como uma onda plana. Nessa

região os princípios básicos de blindagem são facilmente entendidos considerando-se um ambiente blindado contra a entrada de luz (que é uma radiação eletromagnética de frequência muito alta). Se forem utilizadas paredes de espelhos, toda a luz incidente será refletida e não haverá penetração de luz dentro da área interna. Por outro lado, se as paredes forem feitas de material opaco, por exemplo, um pano preto, a luz incidente será totalmente absorvida (a energia luminosa é transformada em calor). Esses dois efeitos, a reflexão e a absorção, são os dois princípios básicos da blindagem eletromagnética, conforme mostrado na Fig.5.3.

Muitas vezes os dois efeitos ocorrem simultaneamente. Por exemplo, a luz que incide num vidro escuro será parcialmente refletida, parte será absorvida ao atravessar o vidro e parte irá atravessar o vidro, saindo mais fraca do outro lado.

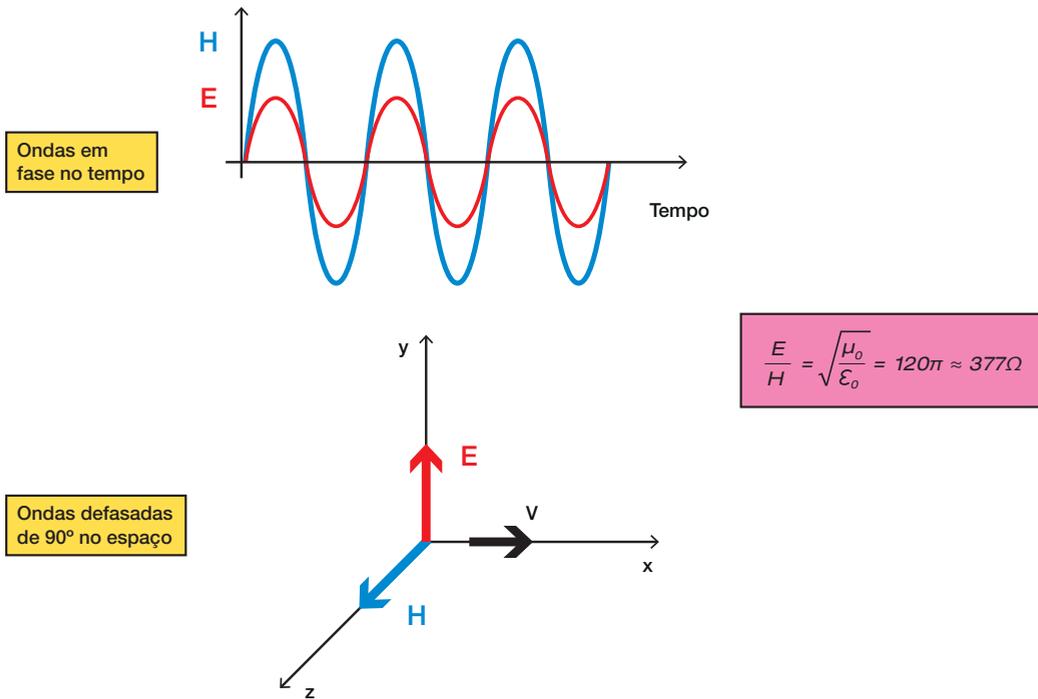


Fig.5.2 – Região de campo distante onde os campos se comportam como uma onda plana. E: campo elétrico; H: campo magnético; v: direção da propagação

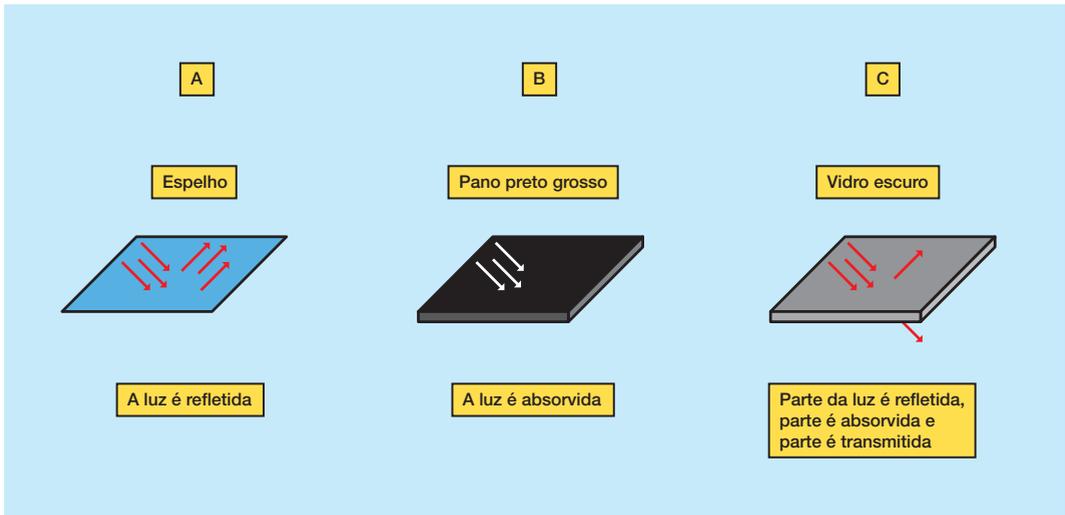


Fig.5.3 – Princípios básicos da blindagem eletromagnética.

Os mesmos efeitos ocorrem no caso de uma onda de campo eletromagnético de frequência mais baixa do que a da luz e que atinge uma chapa metálica. A onda é parcialmente refletida na superfície (esse efeito é chamado de perda por reflexão) e a porção transmitida é atenuada quando se propaga através do meio. Este último efeito é chamado de perda de absorção ou penetração. Essa atenuação ocorre porque são induzidas correntes na chapa metálica que aquecem o material. É interessante notar que nesse processo ocorrem reflexões dentro da própria chapa, conforme mostrado na Fig. 5.4.

É interessante observar na Fig.5.4 que, mesmo no caso de chapas com perfurações,

o campo incidente será atenuado. Se o diâmetro dos furos for muito menor do que o comprimento de onda do campo incidente, a blindagem será bastante eficiente. O mesmo vale para telas metálicas.

Em geral, a literatura sobre blindagem trabalha no domínio da frequência utilizando ondas senoidais para representar os campos eletromagnéticos. A análise da blindagem eletromagnética para campos em forma de impulso, que é o caso da descarga atmosférica, é tarefa difícil e somente recentemente têm sido apresentadas algumas modelagens no domínio do tempo [3]. Devido à complexidade do problema, a utilização de programas de cálculo de campo é uma alter-

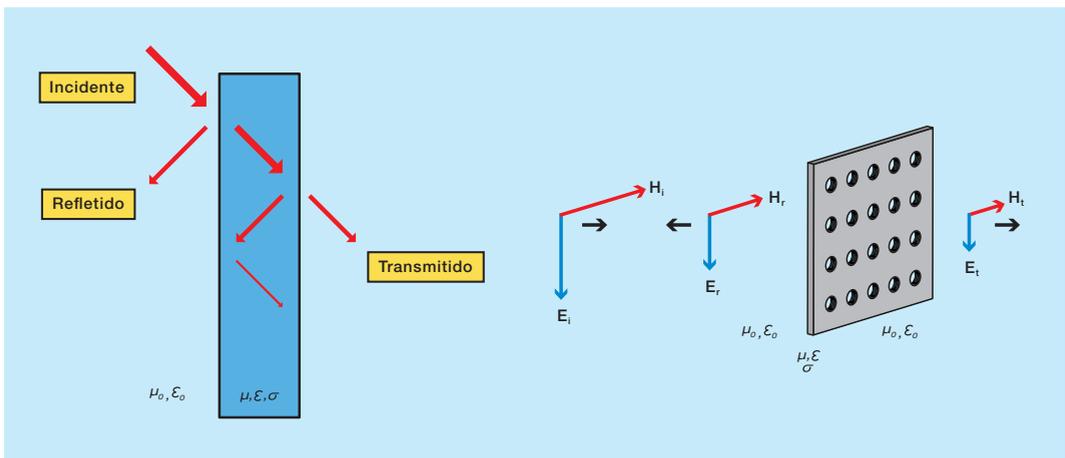


Fig.5.4 – Princípios básicos da blindagem eletromagnética.

nativa interessante para a determinação da blindagem fornecida pela própria estrutura da edificação. Os programas não demandam as aproximações de campo próximo ou de campo distante, porque trabalham com as equações de campo completas.

Como visto no Capítulo 3, as tensões induzidas em laços de pequenas dimensões são devidas ao campo magnético. Dessa forma, a análise feita na NBR 5419-4 [4] é baseada apenas no campo magnético. No caso de grandes laços dentro das edificações essa simplificação pode levar a erros, conforme pode ser visto nas referências [5] e [6].

5.2 - BLINDAGEM DA EDIFICAÇÃO

5.2.1 - PREMISSAS CONSIDERADAS

Para uma descarga atmosférica não é trivial definir as regiões de campo próximo e campo distante. Em geral, essa definição é feita em função do comprimento da antena (fonte de campo) e da frequência (Fig. 5.1). No caso da descarga atmosférica o canal ionizado tem um grande comprimento, da ordem de 1000 a 2000m e, ao invés de uma onda de corrente senoidal estacionária como em uma antena, tem-se uma onda impulsiva de corrente que se propaga pelo canal.

As normas técnicas geralmente consideram que a aproximação de campo próximo é a mais adequada para o estudo das induções de uma descarga atmosférica na fiação de uma edificação. Em geral, é utilizada a modelagem clássica proposta em [7], que parte de uma aproximação que considera que os campos gerados pela descarga, mesmo na região de campo próximo, podem ser tratados como uma onda plana. Esta aproximação é válida se as impedâncias das fontes de campo forem devidamente caracterizadas e, para isso, as fontes de campo magnético devem ser tratadas como fontes de baixa impedância e as fontes de campo elétrico como fontes de alta impedância. Apesar desse processo ser uma aproximação do fenômeno real, a comparação com resultados obtidos em modelagens mais precisas valida a metodologia aproximada [1].

Como as expressões para o cálculo da blindagem são deduzidas no domínio da frequência, a sua aplicação no caso de descargas atmosféricas requer a definição de frequências representativas. A definição de uma frequência representativa a partir do valor do tempo de frente de onda da corrente é conhecida como aproximação de Vance [8]. Na Fig. 5.5 são mostradas as frequências representativas das ondas de corrente sugeridas na NBR 5419.

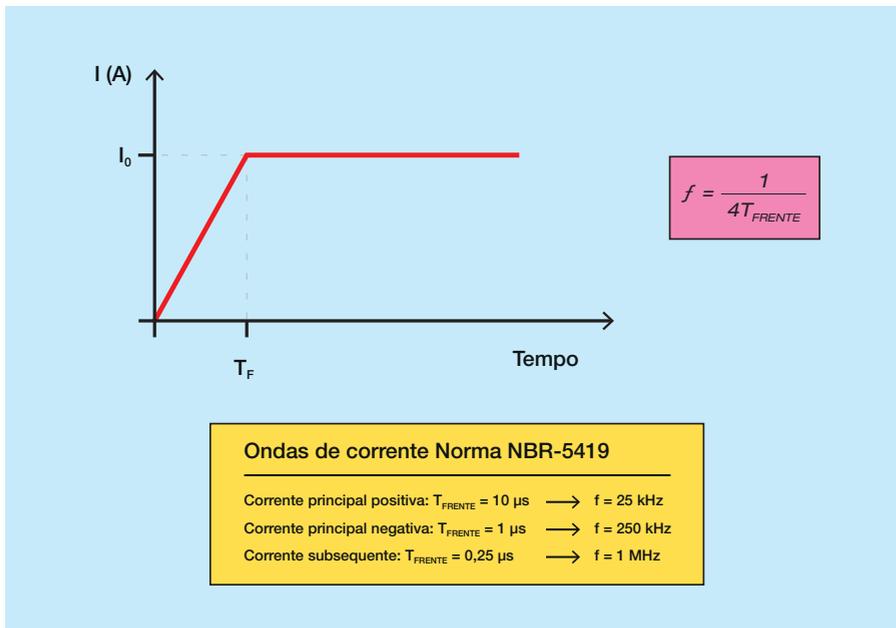


Fig. 5.5
Frequências representativas das ondas de corrente de descarga atmosférica.

A blindagem proporcionada pelos cabos do SPDA e pela ferragem da estrutura da edificação reduz os valores dos campos magnéticos que são originados nas descargas atmosféricas que incidem diretamente na edificação ou nas suas vizinhanças. A norma analisa a blindagem para duas situações distintas: (i) uma descarga que atinge um ponto nas vizinhanças da edificação, denominada fonte de danos S2 pela NBR 5419 e mostrada na Fig. 5.6(A); (ii) e uma descarga que atinge diretamente o SPDA, denominada fonte de danos S1 e mostrada na Fig. 5.6(B).

denominada fonte de danos S1 e mostrada na Fig. 5.6(B).

5.2.2 - DESCARGAS QUE ATINGEM PONTOS PRÓXIMOS DA EDIFICAÇÃO

O fator de blindagem da edificação é definido conforme mostrado na Fig.5.7 [4]. Para o cálculo do fator de blindagem são utilizadas equações clássicas, deduzidas para ondas planas e válidas para telas, conforme mostrado na Fig.5.8.

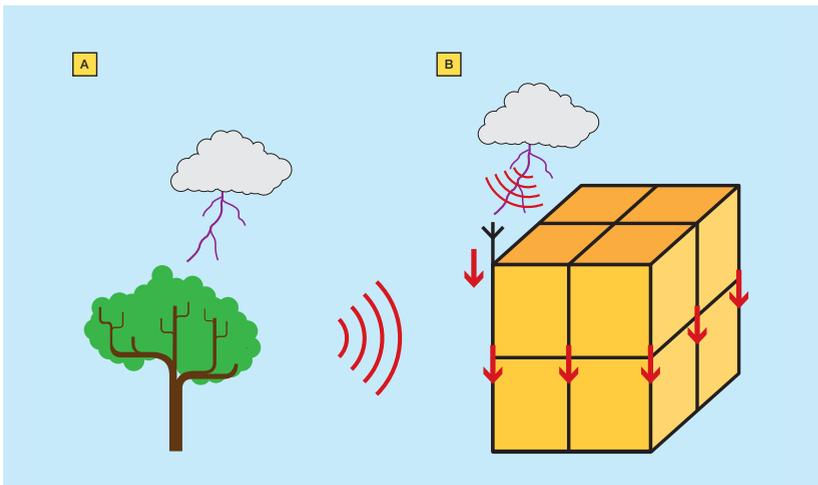


Fig. 5.6 – Campos oriundos de uma descarga. (A) Descarga que atinge um ponto nas proximidades da edificação (S2); (B) Descarga que atinge o SPDA da edificação (S1).

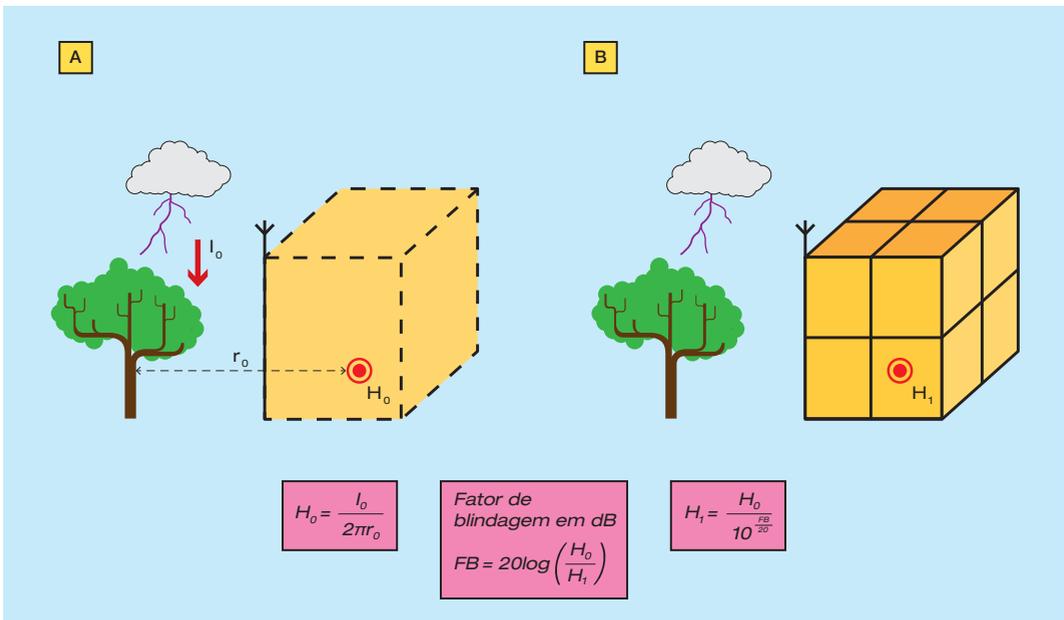


Fig.5.7 – Definição do fator de blindagem (em dB) provido pelo SPDA. H_0 é o campo calculado sem considerar a blindagem e H_1 é o campo calculado considerando a blindagem.

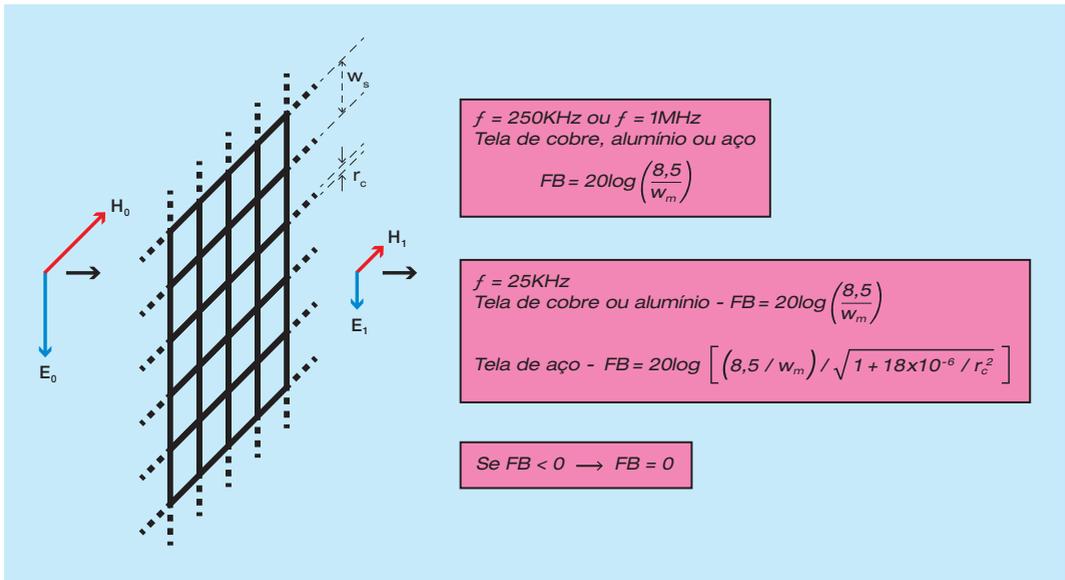


Fig.5.8 – Fatores de blindagem (em dB) para uma tela de grandes dimensões. Campo magnético modelado como uma onda plana. Adaptado de [4].

Na Fig.5.8 os fatores de blindagem para o aço e o cobre/alumínio são diferentes para baixas frequências (25 kHz) devido ao fato da permeabilidade magnética relativa do cobre/alumínio ser igual a 1 e a do aço ser maior que 1. No caso, a permeabilidade relativa do aço foi considerada como sendo igual a 200.

Se na edificação for adotado um sistema de aterramento com um anel que envolve o perímetro do edifício e o mesmo for malhado, conforme mostrado na Fig.5.9, devem ser acrescidos 6 dB aos valores calculados para

o fator de blindagem [4].

A blindagem proporcionada pela tela formada pelos cabos do SPDA e da estrutura só será efetiva se o reticulado for pequeno. Para uma tela com reticulado de 10m, a atenuação do campo magnético é desprezível. Já para um reticulado de 1m o campo é reduzido para 15% do valor sem a blindagem, para a frequência de 25kHz. A Tabela 5.1 mostra alguns valores do fator de blindagem calculados para telas de aço de diferentes malhas.

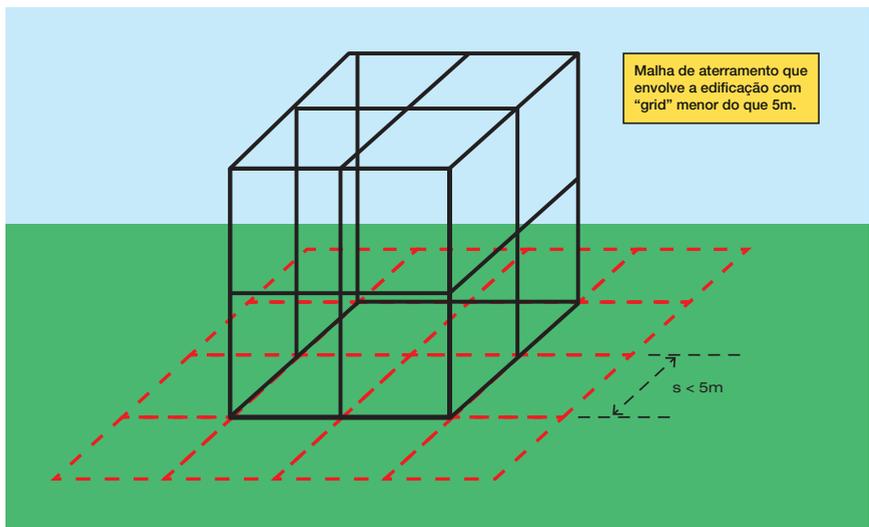


Fig.5.9 – Sistema de aterramento com um anel malhado que envolve o perímetro do edifício.

TABELA 5.1
Fatores de blindagem para o caso de uma descarga que incide próximo da edificação.
Blindagem formada pelos vergalhões de aço da estrutura

CABO DE AÇO - $r_c = 5 \text{ mm}$				
$W_m \text{ (m)}$	FB (dB) - 25 kHz	H_1/H_0 - 25 kHz	FB(dB) - 1 MHz	H_1/H_0 - 1 MHz
10	0	1	0	1
5	2,3	0,76	4,6	0,59
2	10,2	0,31	12,6	0,23
1	16,3	0,15	18,6	0,12
0,5	22,3	0,08	24,6	0,06

5.2.3 - DESCARGAS QUE ATINGEM DIRETAMENTE A EDIFICAÇÃO

No caso da descarga que atinge diretamente a edificação, a NBR 5419 utiliza resultados obtidos em simulações numéricas para a dedução de uma expressão que permite o cálculo do campo magnético que atinge os equipamentos e cabos instalados internamente. Foram realizadas simulações em

três modelos de edificações, como mostrado na Fig. 5.10. O canal de descarga foi modelado como sendo um condutor vertical de 100m de comprimento. O solo foi modelado como sendo uma placa metálica.

A partir da análise dos resultados obtidos nas simulações computacionais foi proposta a expressão mostrada na Fig.5.11 para o cálculo do campo dentro da edificação.

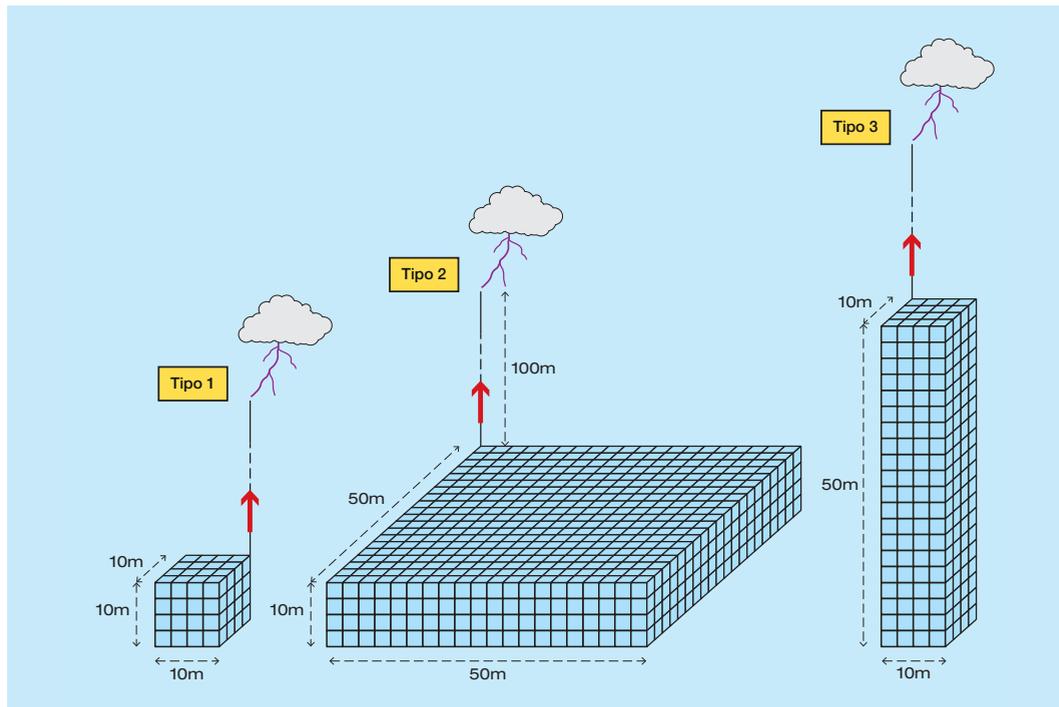


Fig.5.10 – Modelos de edificações utilizados para o cálculo do fator de blindagem de uma edificação atingida diretamente por uma descarga atmosférica. O canal de descarga foi modelado como sendo um condutor vertical de 100m de comprimento. Adaptado de [4].

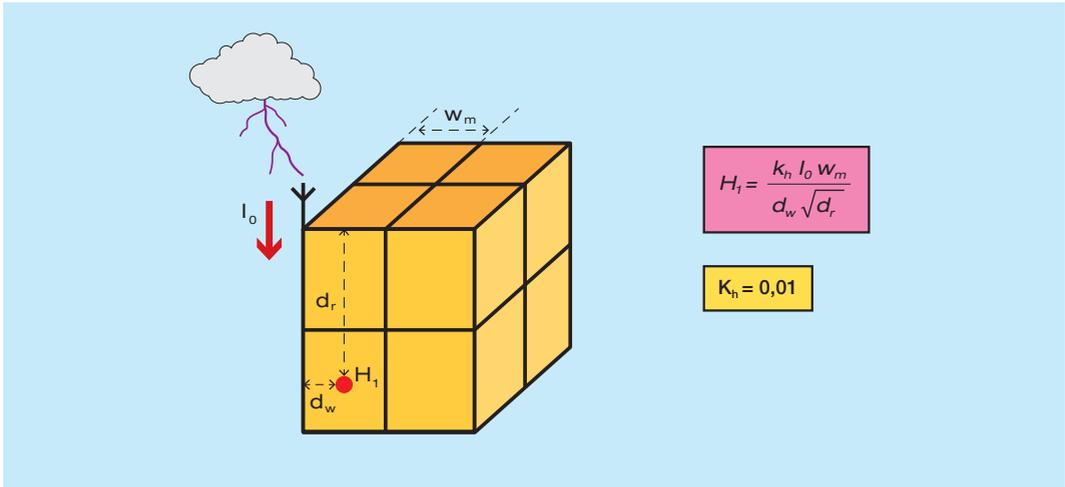


Fig.5.11 – Cálculo do campo magnético dentro da edificação atingida diretamente por uma descarga atmosférica. Adaptado de [4].

De maneira análoga ao caso da descarga indireta, se na edificação for adotado um sistema de aterramento com um anel que envolve o seu perímetro e o mesmo for malhado, conforme mostrado na Fig. 5.9, os valores de campo devem ser reduzidos à metade [4].

Os valores de campo magnético calculados devem ser confrontados com os valores suportáveis pelos equipamentos. Se os valores suportáveis forem inferiores aos calculados

medidas adicionais de proteção precisam ser tomadas.

Para avaliar o efeito de blindagem proporcionado pelos condutores do SPDA e pela ferragem da edificação alguns dos valores do campo magnético dentro da estrutura e esses valores serão confrontados com os calculados supondo a inexistência de SPDA na estrutura, conforme ilustrado na Fig.5.12. Os valores calculados estão relacionados na Tabela 5.2.

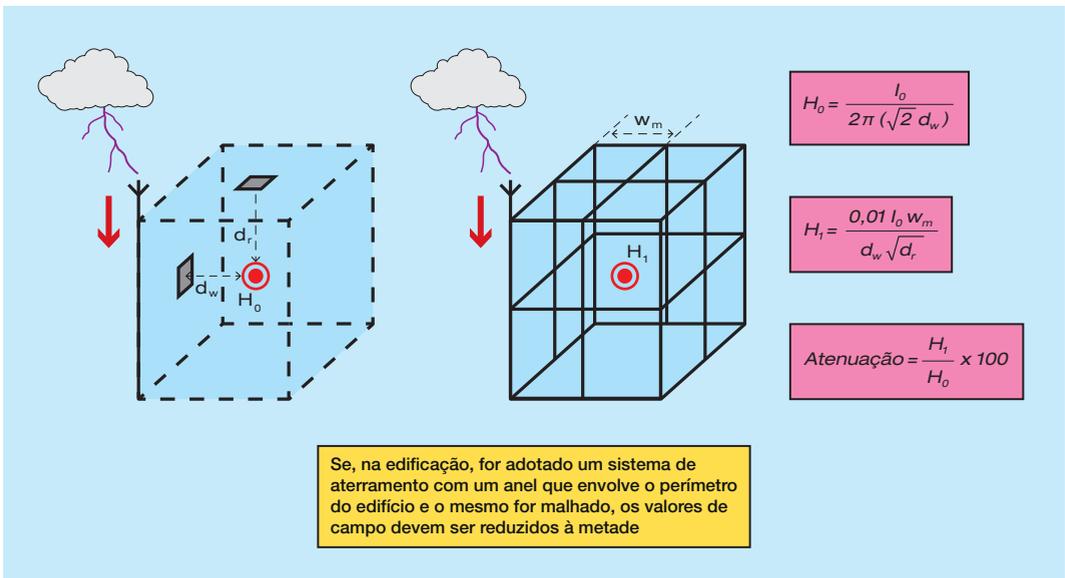


Fig. 5.12 - Efeito de blindagem proporcionado pelos condutores do SPDA e pela ferragem da edificação no caso de incidência de uma descarga direta. Adaptado de [4].

TABELA 5.2

Valores de campo dentro de uma edificação atingida por uma descarga direta comparados com os valores calculados sem a presença do SPDA

$I_0 = 100\text{kA} - D_w = 10\text{m} - D_r = 10\text{m}$			
W_m (m)	H_0 (A/M)	H_1 (A/M)	ATENUAÇÃO (%)
8	1126	253	22
5	1126	158	14
2	1126	63	5,6
0,5	1126	16	1,4

É interessante observar que, no caso da descarga direta na edificação, a redução do campo magnético é significativa mesmo para a malha de grande dimensão formada pelos condutores do SPDA ($W_m = 8\text{m}$). Nesse caso, o campo magnético é reduzido para 22% do valor calculado sem a presença do SPDA e da ferragem. Esse resultado é bem diferente do caso da descarga indireta, onde o SPDA e a ferragem só irão proporcionar alguma blindagem para reticulados relativamente pequenos (inferiores a 5m).

Entretanto, é preciso ressaltar que os valores calculados de campo só são válidos para regiões dentro do volume de segurança que será definido no Item 5.2.4. No caso de um reticulado de 8m de largura, os valores calculados só serão válidos para pontos afastados do reticulado de no mínimo 8m. Para pontos mais próximos do reticulado, os valores de campo poderão ser diferentes dos calculados na Tabela 5.2.

A redução dos valores dos campos dentro da edificação leva a uma redução dos valores das tensões e correntes induzidas nos cabos internos. Além disso, é importante controlar o valor do campo magnético que atinge diretamente os equipamentos, pois

eles podem ser suscetíveis a esses campos.

Como visto anteriormente, existem frequências representativas das formas de onda de corrente das descargas atmosféricas. Essas mesmas frequências podem ser utilizadas para caracterizar os campos magnéticos que incidem nos equipamentos. A norma NBR 5419 remete essa questão para as normas IEC 61000-4-9 [9] e IEC 61000-4-10 [10] que sugerem a realização de ensaios nos equipamentos visando avaliar a sua imunidade ao campo magnético incidente. São prescritos dois ensaios, relativos à descarga principal positiva e à descarga subsequente negativa, conforme descrito a seguir:

- ⊙ Descarga principal positiva: o campo magnético deve ter forma de onda senoidal amortecida com frequência de 25kHz e amplitudes de 100, 300 e 1000A/m;
- ⊙ Descarga subsequente negativa: o campo magnético deve ter forma de onda senoidal amortecida com frequência de 1MHz e amplitudes de 10, 30 e 100A/m.

As formas de onda recomendadas são mostradas na Fig. 5.13.

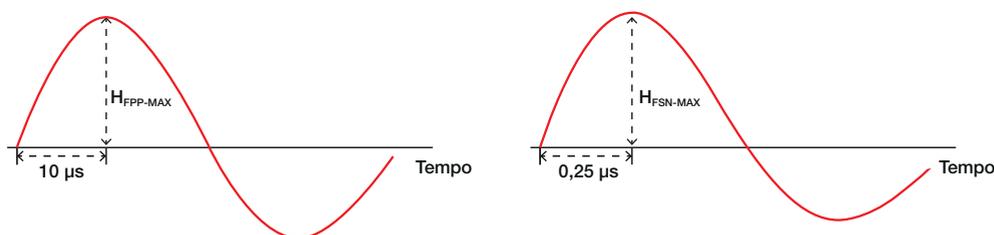


Fig. 5.13 – Formas de ondas dos campos magnéticos utilizadas em ensaios de suportabilidade de equipamentos. Adaptado da NBR-5419.

Como visto no Capítulo 3, outro fator relacionado com os campos magnéticos dentro da estrutura são as correntes e tensões induzidas nos laços formados pela fiação interna das edificações. A Fig. 5.14 mostra as expressões para a tensão e a corrente induzida, considerando o fator de blindagem proporcionado por um SPDA constituído de cabos espaçados de uma distância W_m , conforme mostrado na figura.

A título de exemplo, são calculados a seguir alguns valores de tensões e correntes induzidas em um laço de $50m^2$ instalado dentro de uma edificação, considerando o efeito de blindagem proporcionado pelos condutores do SPDA

mostrados na Fig. 5.14. Foi considerada a corrente principal positiva com valor de pico igual a $100kA$ e tempo de frente de $10\mu s$.

Os valores calculados com a presença do SPDA podem ser comparados com valores calculados para um SPDA constituído de apenas um condutor de descida, ou seja, sem efeito de blindagem. Para o caso de apenas um condutor de descida os valores foram calculados com as expressões mostradas nas Figs. 3.9 e 3.12 do Capítulo 3, considerando uma corrente de forma de onda trapezoidal com taxa de variação da corrente igual a $10kA/\mu s$. A comparação é mostrada na Tabela 5.3.

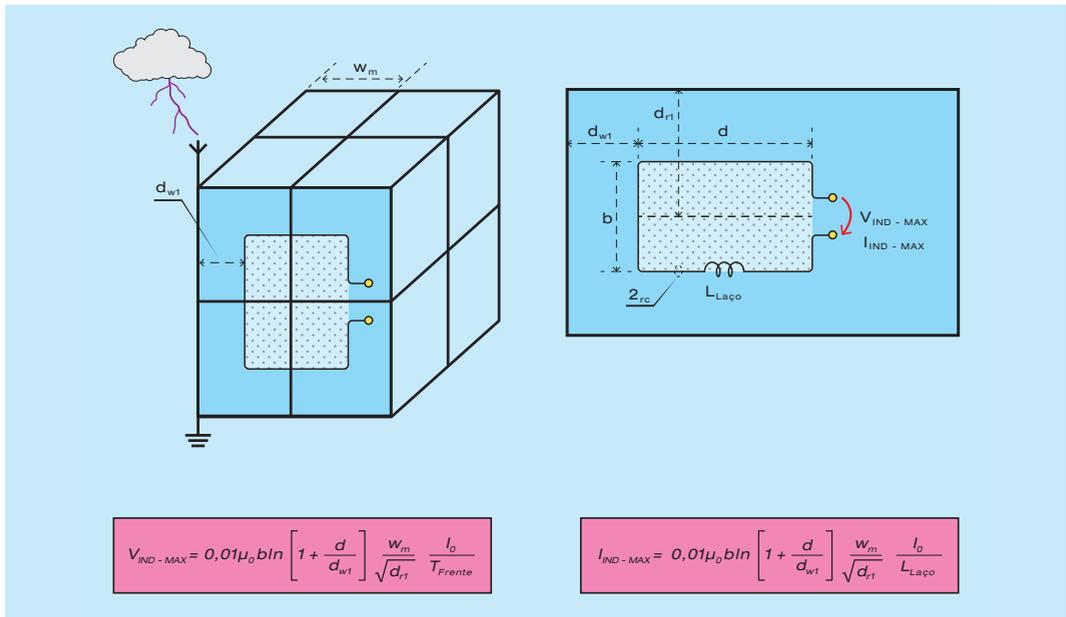


Fig. 5.14 - Cálculo das correntes e tensões induzidas em um laço formado pela fiação interna de uma edificação considerando o efeito de blindagem do SPDA. Adaptado de [4].

TABELA 5.3

Tensões e correntes induzidas em um laço de $50m^2$ dentro de uma edificação com SPDA malhado atingida por uma descarga direta comparados com os valores calculados para uma edificação com SPDA de apenas um cabo de descida

W_m (m)	$I_0 = 100kA - T_{Frente} = 10\mu s - b = 10m - d = 5m - d_{w1} = 1m - d_{r1} = 6m$			
	V_{01} cabo de descida (kV)	V_{SPDA} com reticulado (kV)	I_{01} cabo de descida (kA)	I_{SPDA} com reticulado (kA)
5	36	4,6	9	1,2
2	36	1,8	9	0,48
1	36	0,9	9	0,24

5.2.4 - VOLUME SEGURO PARA A INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

As expressões anteriormente apresentadas para o cálculo do campo magnético dentro de uma edificação são válidas para um volume interno, denominado volume seguro para a instalação de equipamentos ou volume para sistemas eletrônicos. A definição deste volume é mostrada na Fig.5.15. A necessidade de uma separação entre as paredes do volume seguro e as paredes da edificação é devido ao fato de que os campos em pontos muito próximos dos cabos e ferragens da edificação diferem dos valores fornecidos pelas expressões aproximadas da NBR 5419. Dentro do volume seguro os valores calculados são válidos. Os fatores de blindagem (FB) utilizados na definição das distâncias d_{s1} e d_{s2} são os mostrados na Fig.5.8.

5.3 - USO DE CABOS BLINDADOS

5.3.1 - MODO COMUM E MODO DIFERENCIAL

A utilização dentro da edificação de cabos blindados ou de cabos instalados dentro de dutos metálicos reduz os valores das tensões e correntes induzidas pelos campos magnéticos. A utilização de cabos blindados

ou dentro de dutos metálicos também nas redes que alimentam a edificação reduz os valores das correntes e tensões conduzidas para dentro da edificação. A análise feita a seguir é válida para cabos blindados cujo comprimento é inferior ao comprimento de onda do campo incidente e a blindagem é feita de material não magnético.

Como visto no Capítulo 3, a circulação de corrente em um condutor perto de uma espira (laço) induz uma corrente se a espira estiver fechada e uma tensão se a espira estiver aberta. Também foi visto que a amplitude da corrente e da tensão induzida depende da área da espira e da intensidade do campo magnético incidente.

Se vários laços forem conectados em série, a tensão induzida poderá ser a soma ou a subtração das tensões induzidas nos vários laços, dependendo da forma de ligação dos mesmos. Essa característica é mostrada na Fig.5.16.

A Fig.5.17 mostra o princípio de funcionamento de um cabo de par trançado. A indução entre os dois condutores é anulada pela transposição dos condutores do par (trança). Entretanto, a tensão dos condutores para a terra não é anulada.

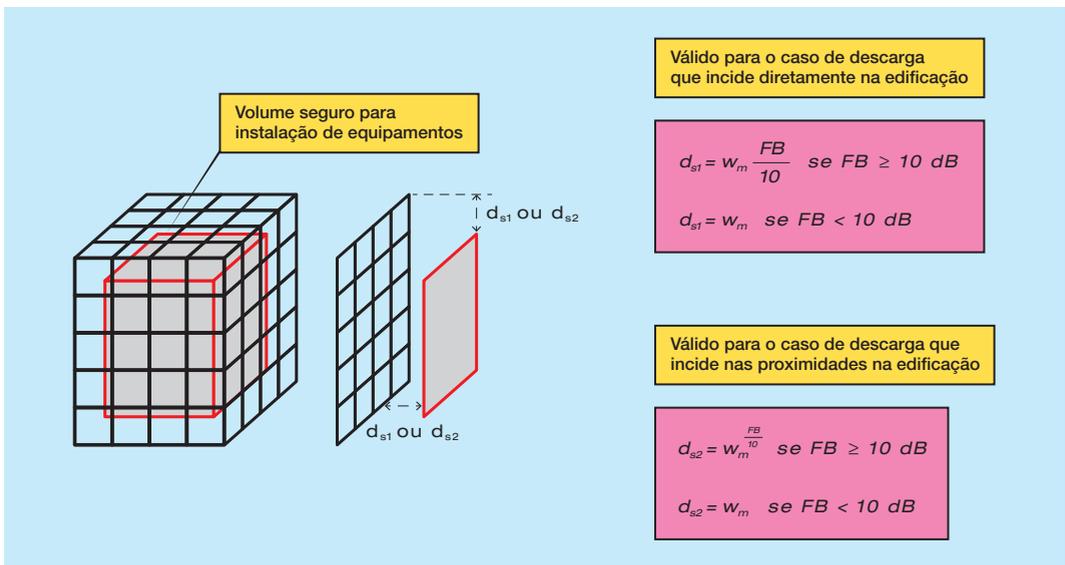


Fig.5.15 – Volume de segurança para instalação de equipamentos dentro de uma edificação. FB é fornecido na Fig.5.8. Adaptado de [4].

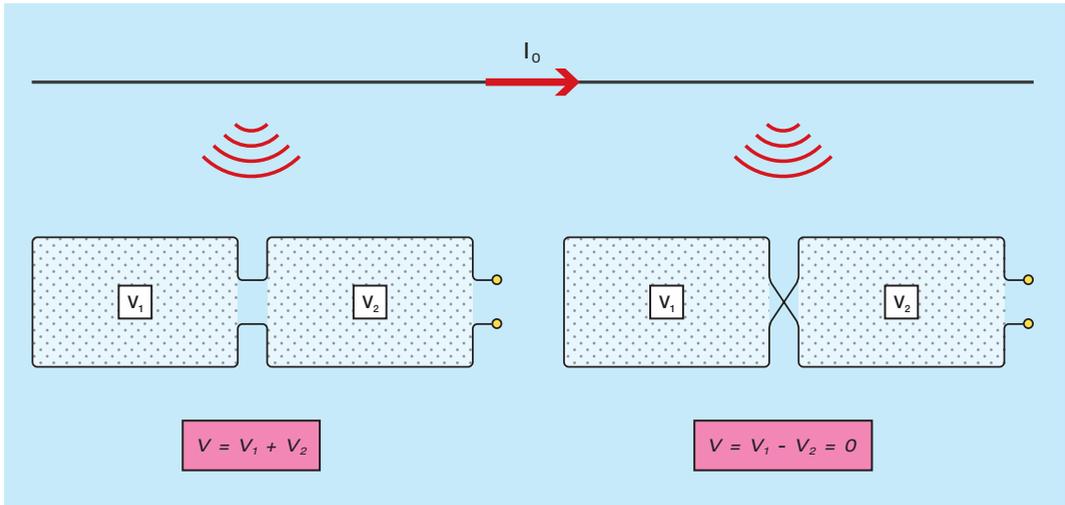


Fig.5.16 – Princípio de funcionamento do par trançado.

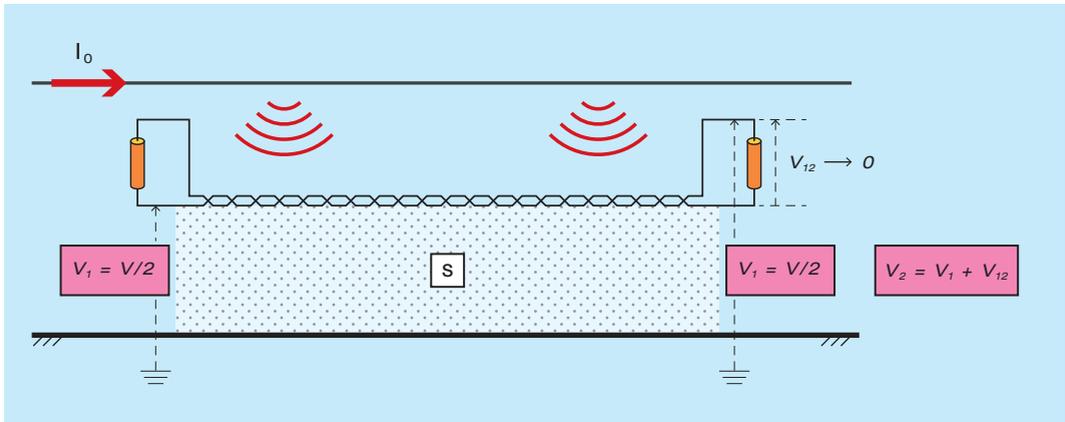


Fig.5.17 – Tensões de modo comum em um cabo de par trançado.

As tensões induzidas dos dois condutores para a terra (V_1 do condutor 1 para a terra e V_2 do condutor 2 para a terra) são denominadas tensões de modo comum ou modo longitudinal. A relação entre as tensões é dada pela expressão mostrada na Fig.5.26. A diferença de tensão entre os condutores (V_{12}) é chamada de tensão de modo diferencial ou tensão transversal. Uma forma de controlar o valor da tensão de modo comum é utilizar um cabo blindado contendo pares trançados, com a blindagem aterrada conforme mostrado na Fig.5.18.

O valor da tensão de modo comum depende diretamente do valor da área S . A corrente I_b que circula na blindagem é dada pela expressão mostrada na Fig.5.18, onde V é a

tensão de circuito aberto induzida na área S . É interessante observar que, além da tensão da blindagem para a terra, aparecem tensões dos condutores internos para a blindagem, designadas como tensões V_{1b} e V_{2b} na Fig.5.19.

5.3.2 - IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA

A simetria de um cabo com blindagem tubular faz com que a corrente que circula na blindagem não crie campo magnético no interior da blindagem. Esse aspecto é mostrado na Fig. 5.20, onde se observa que cada filete de corrente tem o seu correspondente na borda oposta da blindagem, de forma a cancelar o campo magnético no interior da blindagem. Observe-se que, embora

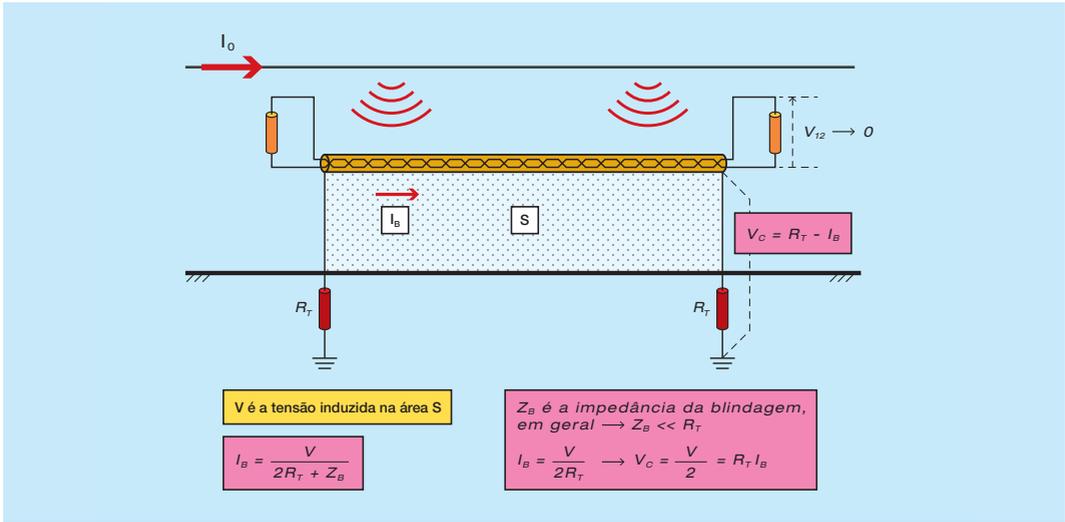


Fig.5.18 – Tensões de modo comum e de modo diferencial em um cabo blindado de par trançado.

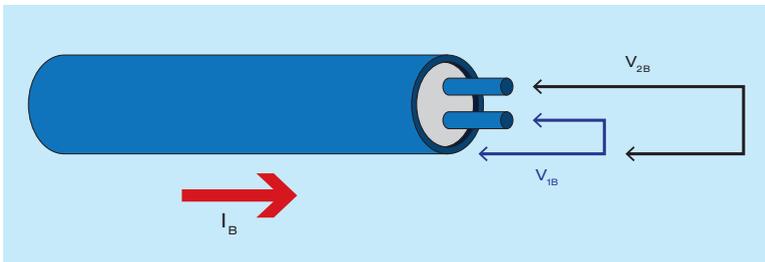


Fig.5.19 – Tensões induzidas entre os condutores internos e a blindagem.

seja intuitivo concluir que o campo magnético é nulo no centro da blindagem, pode-se demonstrar que ele também é nulo em qualquer ponto no interior da blindagem. Essa demonstração é obtida pela aplicação direta da Lei de Ampère.

ferência Z_t [1]-[2], que em baixa frequência é igual à resistência da blindagem. Nesse caso, o valor da impedância de transferência cai com o aumento da frequência, pois a corrente passa a fluir pela periferia da blindagem, devido ao Efeito Pelicular.

Ainda considerando um cabo com blindagem tubular, a tensão que aparece da blindagem para os condutores internos depende do valor de sua impedância de trans-

A Fig.5.21 mostra o aparecimento da tensão entre a blindagem e o condutor interno em um cabo blindado em cuja blindagem tubular circula uma corrente I .

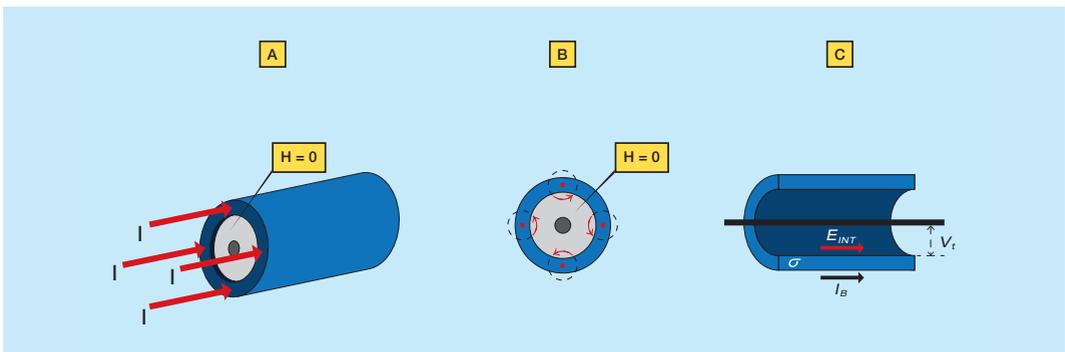


Fig.5.20– Campo magnético dentro de um cabo blindado. Aparecimento de um campo elétrico interno devido à circulação de corrente na blindagem.

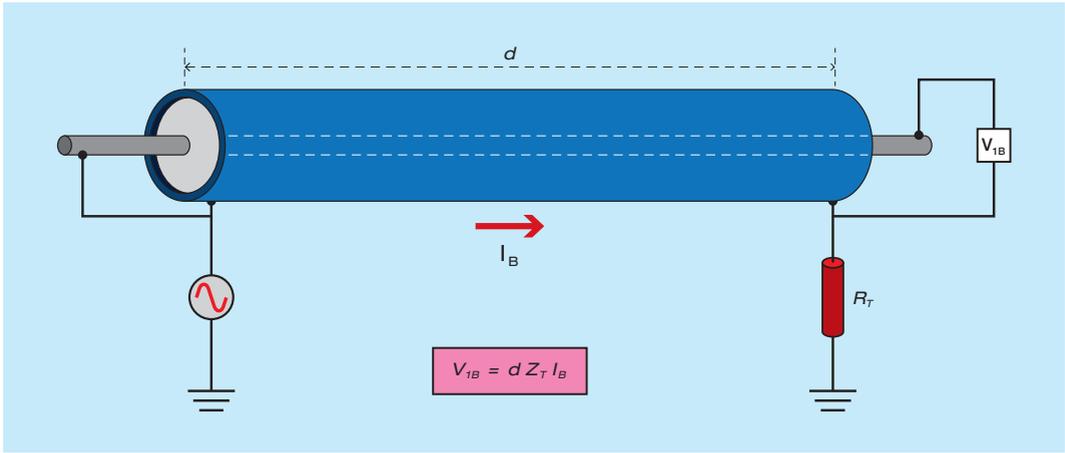


Fig.5.21- Tensão induzida dentro de um cabo blindado.

A Fig. 5.22 mostra um detalhe de uma blindagem tubular e as expressões aproximadas para o cálculo da impedância de transferência Z_t [1]-[12]. Nessas expressões, δ é a profundidade de penetração da corrente na blindagem, f é a frequência, σ é a condutividade e μ é a permeabilidade do material da blindagem. Em geral, Z_t é dada em (Ω/m).

Para os cabos usuais de blindagem tubular e frequências até algumas centenas de kHz a espessura da blindagem T é muito menor que a profundidade de penetração e a impedância de transferência se iguala à resistência em corrente contínua da blindagem R_b .

Muitos cabos blindados utilizados na prática apresentam blindagem não-tubular. São exemplos as blindagens feitas com lâminas metálicas longitudinais, com lâminas

espiraladas e com cordoalhas trançadas (*braided shield*). Nesses casos, uma parte do campo magnético penetra no interior da blindagem e a tensão entre condutor e blindagem passa a ter uma componente indutiva. O conceito de impedância de transferência continua válido, mas as equações dadas na Fig. 5.22 não são mais válidas.

A Fig. 5.23 mostra o detalhe de uma cordoalha trançada comumente utilizada como blindagem, com destaque para regiões sem recobrimento que facilitam a entrada do campo magnético. Para minimizar esse efeito, é comum se utilizar diversas camadas de cordoalhas sobrepostas, visando aproximar o desempenho da blindagem daquele propiciado por uma blindagem tubular. A vantagem do uso de blindagem com cordoalha em lugar de blindagem tubular é sua flexibilidade mecânica.

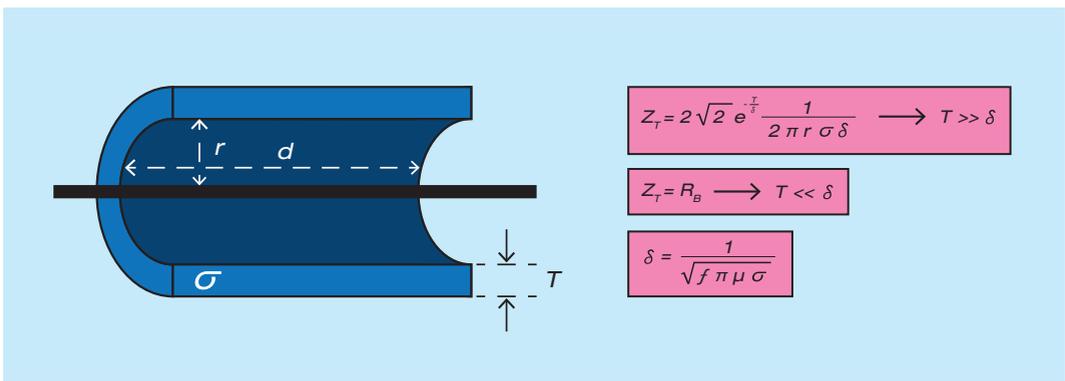


Fig.5.22 - Detalhe da blindagem tubular para o cálculo da impedância de transferência [1]-[12].

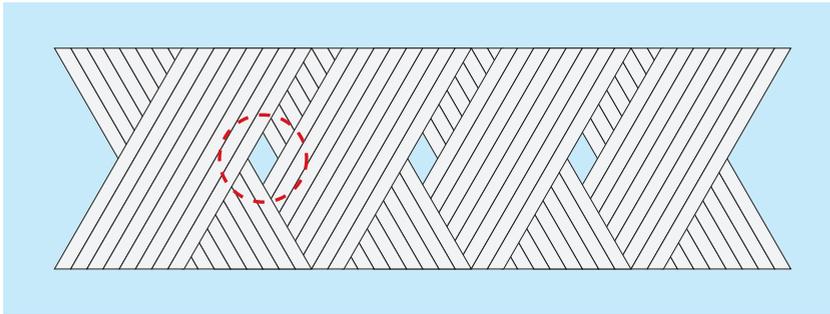


Fig. 5.23
Cordoalhas
sobrepostas
utilizadas como
blindagem, com
destaque para
a região sem
recobrimento.
Adaptado de [11].

A Fig.5.24 mostra a variação do valor da impedância de transferência para algumas blindagens em função da frequência. Observe-se que para blindagens tubulares (tubo sólido de cobre e tubo sólido de aço) a impedância de transferência cai fortemente com a frequência. Já para blindagens não-tubulares (espiral, lâmina ou cordoalha trançada) a impedância de transferência aumenta com a frequência, devido à componente indutiva. Em todos os casos, a impedância de transferência para baixa frequência ($f \approx 0$) corresponde à resistência em corrente contínua da blindagem (em Ω/m).

O gráfico da Fig.5.24 mostra que o valor da impedância de transferência para um tubo sólido de aço é limitada pelo valor da sua resistência em corrente contínua e cai fortemente com a frequência. Isso mostra que eletrodutos metálicos podem atuar como

uma boa blindagem.

5.3.3 - TERMINAÇÕES DA BLINDAGEM

Um grande cuidado com cabos blindados é o controle das suas terminações, necessárias para conectar o cabo com os equipamentos terminais ou em junções/emendas. A Fig.5.25 mostra a tensão em modo diferencial de um cabo em cuja blindagem circula a corrente $I_b = 200A$ induzida por uma descarga atmosférica que incide perto do cabo. Considera-se que a blindagem é tubular e suficientemente fina para que a sua impedância de transferência seja igual à sua resistência em corrente contínua ($Z_t = 5m\Omega/m$). Para uma blindagem de 100m, a impedância de transferência total é 0,5 Ω . Supondo que o cabo seja terminado em ambos os lados com o mesmo valor de resistência e que esse valor seja muito supe-

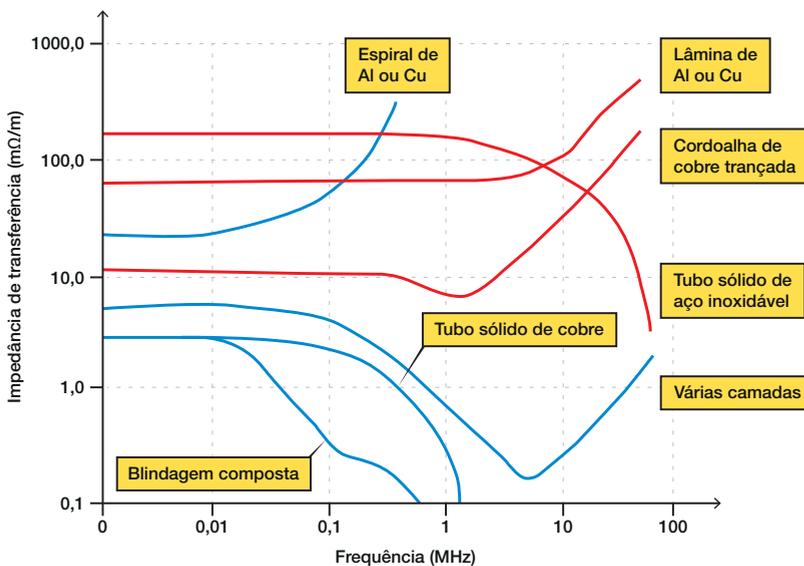


Fig.5.24
Impedância de
transferência
para blindagens,
adaptado de [11].

rior a $0,5\Omega$, então a tensão desenvolvida em cada uma das extremidades do cabo será igual à metade do produto da impedância de transferência pela corrente: $V_b = 0,5 \times 0,5 \times 200 = 50V$.

Se houver uma interrupção da blindagem, a corrente irá induzir uma tensão no laço formado pelo condutor interno e o condutor que faz a continuidade da blindagem, conforme mostrado na Fig.5.26.

Pode se ver na Fig.5.26 que uma abertura de $0,5m$ de comprimento em uma blindagem de $100m$ de comprimento implicou na indução de uma tensão 5 vezes maior do que a que seria induzida se não houvesse a abertura.

É importante ressaltar que nos cálculos foi utilizada uma corrente com uma taxa de variação pequena ($1kA/\mu s$). Se a taxa de variação for maior, a tensão induzida será maior.

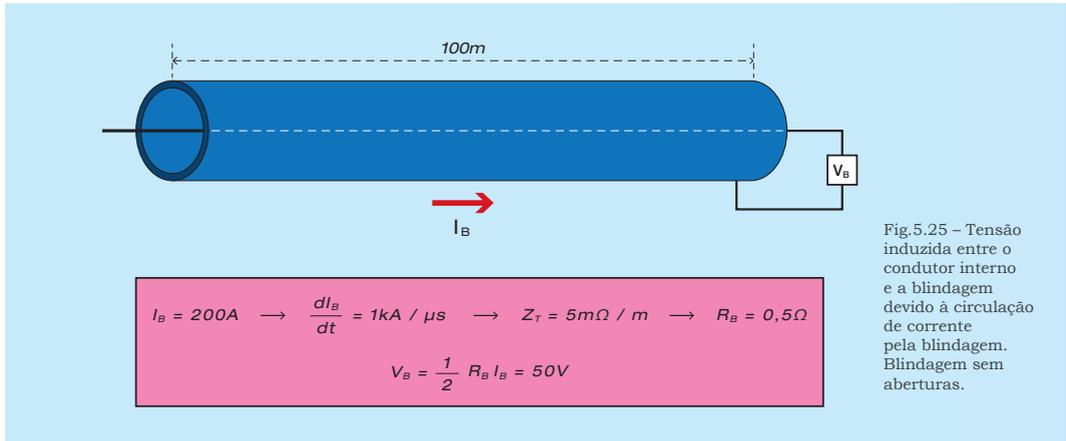


Fig.5.25 – Tensão induzida entre o condutor interno e a blindagem devido à circulação de corrente pela blindagem. Blindagem sem aberturas.

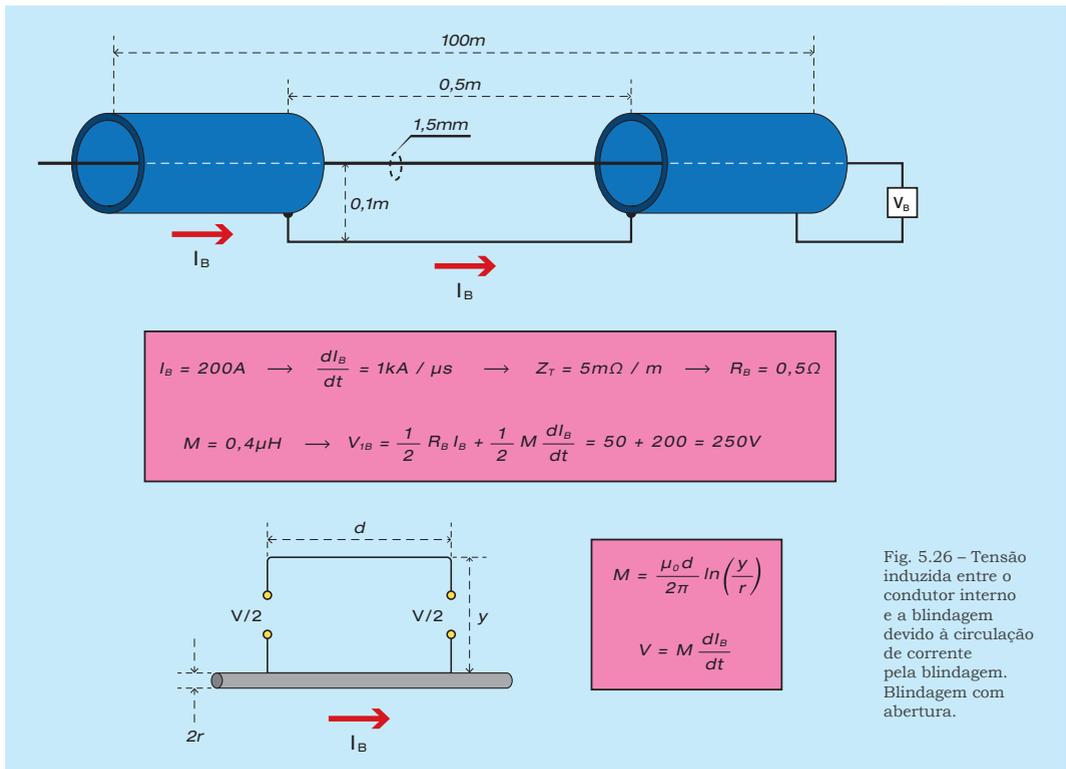


Fig. 5.26 – Tensão induzida entre o condutor interno e a blindagem devido à circulação de corrente pela blindagem. Blindagem com abertura.

O mesmo fenômeno ocorre nas terminações de cabos blindados. Se a blindagem não for adequadamente conectada ao gabinete ou painel metálico, ela perde muito da sua eficiência. A Fig. 5.27 ilustra essa situação, onde o lado esquerdo do cabo tem um conector apropriado para a blindagem, mas do lado esquerdo tem uma conexão inadequada que usa um condutor. Esse condutor é usu-

almente designado pelo termo inglês *pig tail* (rabo de porco), pois algumas vezes o instalador faz uma espiral com a sobra de condutor, o que aumenta ainda mais a indutância de transferência. Esse tipo de instalação (inadequada) é mostrado na Fig. 5.28, onde o fio espiralado (*pig tail*) acrescenta uma indutância que prejudica significativamente o efeito da blindagem frente a surtos.

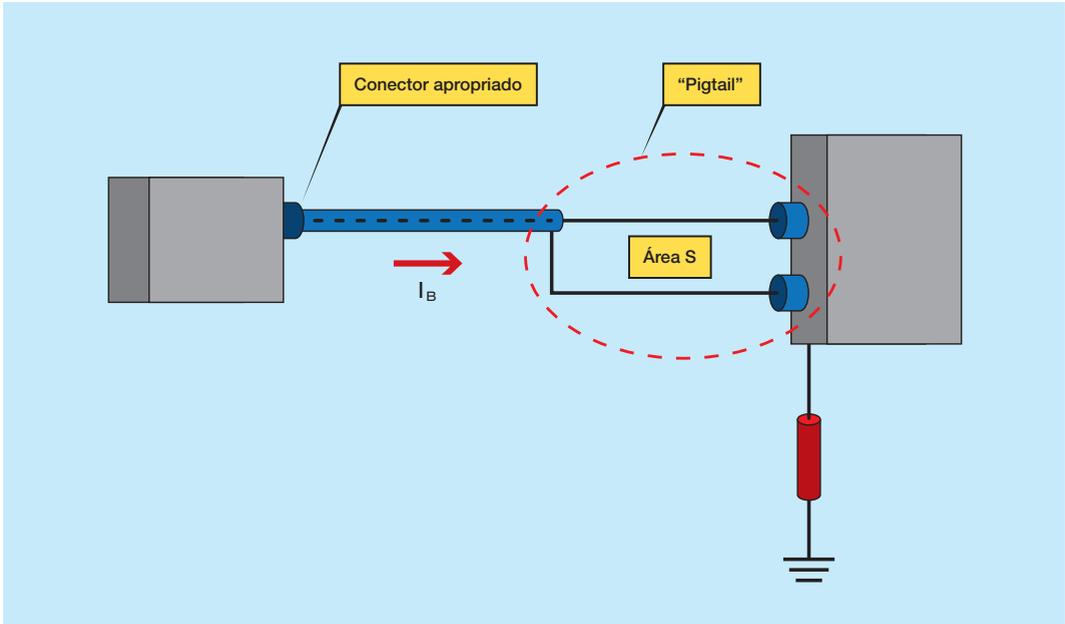


Fig.5.27 – Terminação malfeita de um cabo blindado, deixando uma abertura denominada *pig tail*.

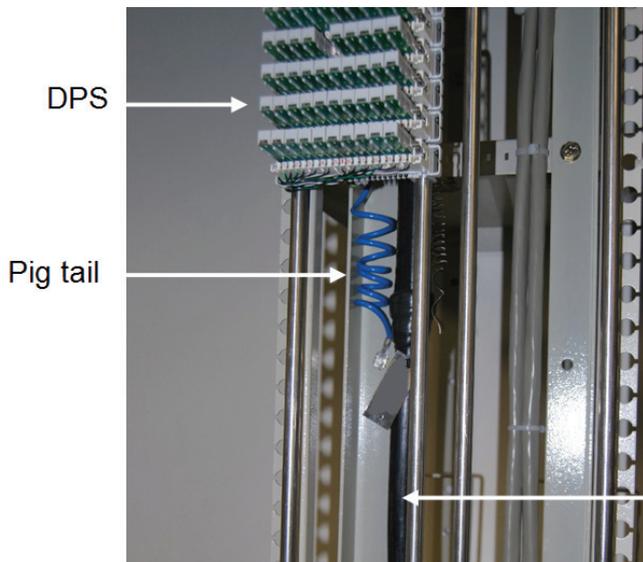


Fig. 5.28 - Blindagem de cabo de telecomunicações terminada em "pig tail" para a estrutura do painel. A indutância desta conexão prejudica o efeito da blindagem frente a surtos.

Outra situação que compromete a eficiência dos cabos blindados é a terminação de um cabo que é vinculado ao gabinete/painel do lado de dentro. Essa situação é mostrada na Fig. 5.29(A), onde a corrente que circula na blindagem e no condutor de vinculação provoca induções nos cabos e componentes instalados no interior do gabinete/painel.

Uma solução bem melhor é mostrada na Fig. 5.29(B), onde a terminação da blindagem é feita do lado de fora. Mesmo nessa situação, ainda entra um pouco de campo magnético através da abertura para passar o cabo. Além disso, para frequências muito altas haverá correntes capacitivas fluindo dentro do gabinete, o que pode causar interferência.

A solução ideal é mostrada na Fig. 5.29(C), onde o uso de um conector apropriado que vincula a blindagem com o gabinete/painel em toda a extensão radial da blindagem (360°) garante que não entra nenhuma tensão ou corrente espúria no gabinete/painel.

De forma similar ao caso anterior, se as correntes induzidas nas blindagens de cabos que adentram edificações não forem barradas no ponto de entrada, elas circularão na área interna e poderão provocar induções perigosas na fiação do edifício e nos próprios equipamentos. A Fig. 5.30 ilustra essa situação para um cabo enterrado, embora a mesma situação se aplica a um cabo aéreo.

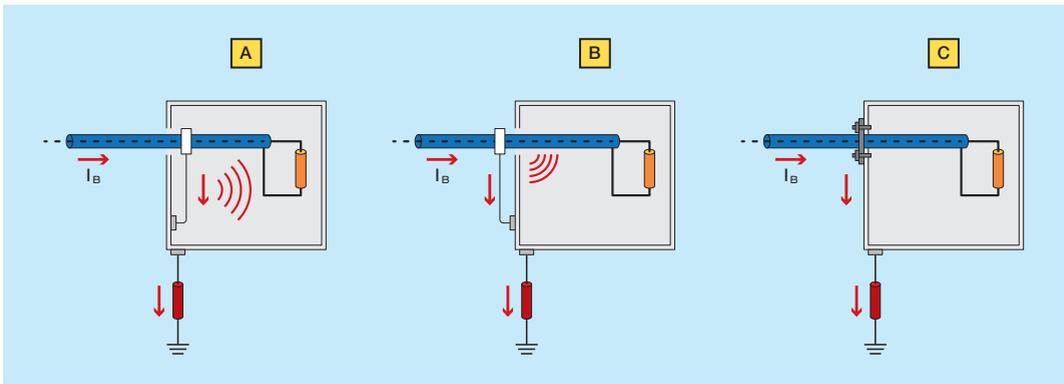


Fig.5.29- Terminação de um cabo blindado. (A) Ruim: terminação do lado de dentro com *pig tail*; (B) Melhor: terminação do lado de fora com *pig tail*; (C) Ideal: terminação com um conector coaxial apropriado.

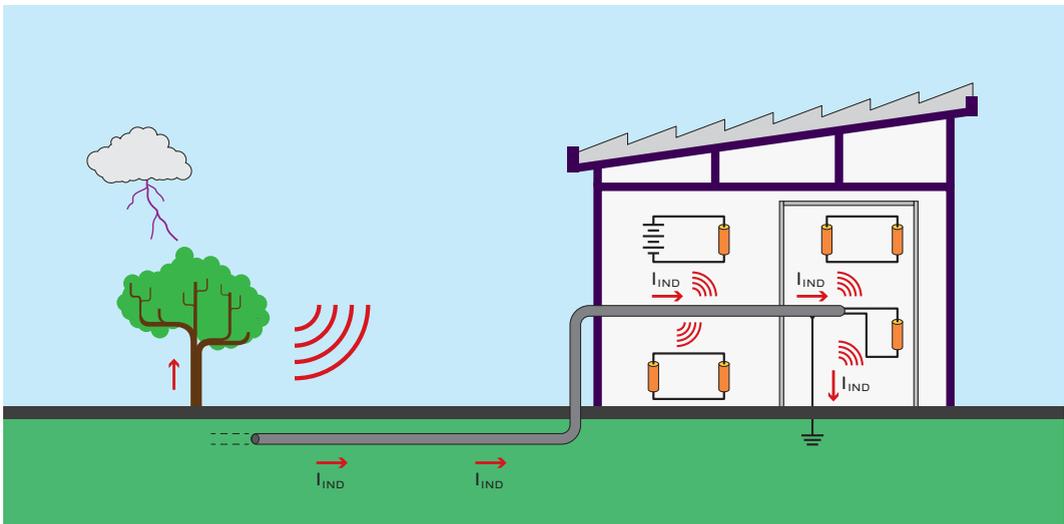


Fig. 5.30 - Corrente na blindagem de um cabo que é aterrado no interior da edificação e que induz tensões perigosas no cabeamento interno. O correto é aterrar o cabo na entrada da edificação.

5.4 - ARRANJO DA FIAÇÃO REDUZINDO LAÇOS

A escolha adequada das rotas dos cabos internos dos sistemas de energia e de telecomunicações de uma edificação pode evitar a formação de laços e conseqüentemente reduzir os valores das tensões e correntes induzidas. Os laços podem ser formados por cabos de uma mesma rede ou por cabos de redes diferentes. O caso clássico é mostrado na Fig.5.31, onde os cabos das redes de telecomunicações e de energia formam um grande laço.

A redução nos valores das tensões induzi-

das é diretamente proporcional à redução na área do laço. A Fig.5.32 ilustra um exemplo onde a mudança da posição de uma das redes implica numa redução significativa da área do laço.

Mesmo no caso de equipamentos instalados sobre malhas de referência de sinal, conforme mostrado na Fig.5.33, a redução dos laços formados pelos cabos é uma técnica eficiente.

No caso de cabos externos, a minimização das áreas dos laços também reduz os valores das tensões e correntes conduzidas para dentro da edificação, conforme mostrado na Fig.5.34.

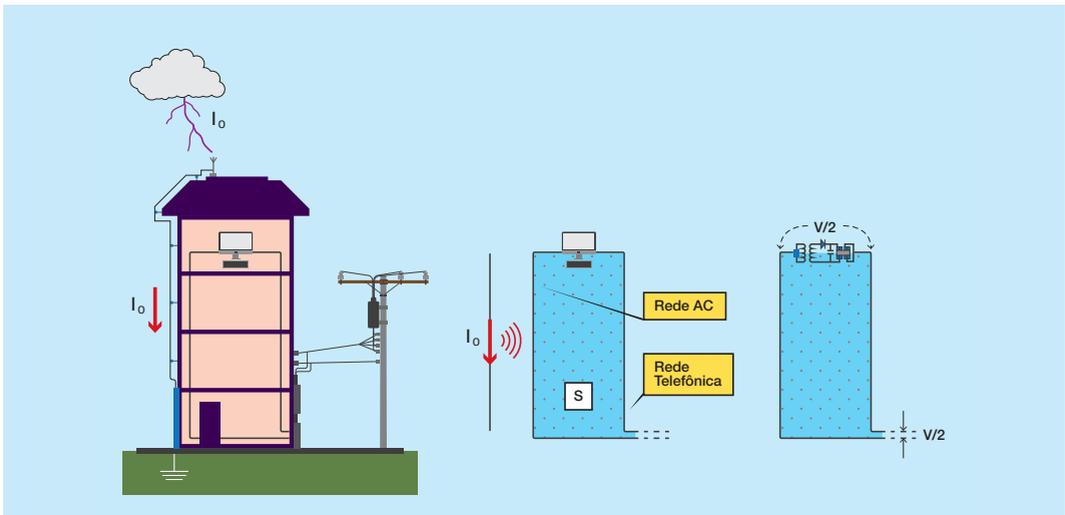


Fig. 5.31 – Tensão induzida em laço formado pela rede de telecomunicações e pela rede elétrica.

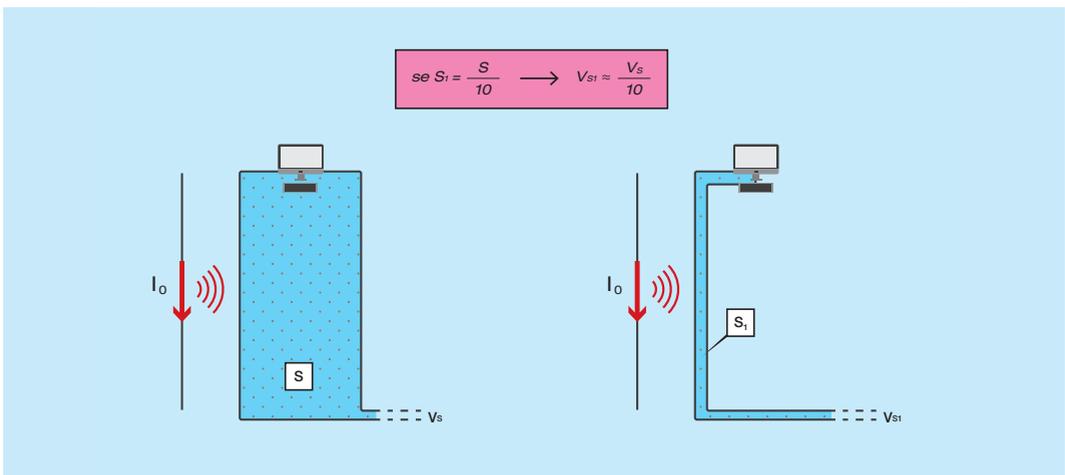


Fig. 5.32 – Redução do valor da tensão induzida devido à redução da área do laço.

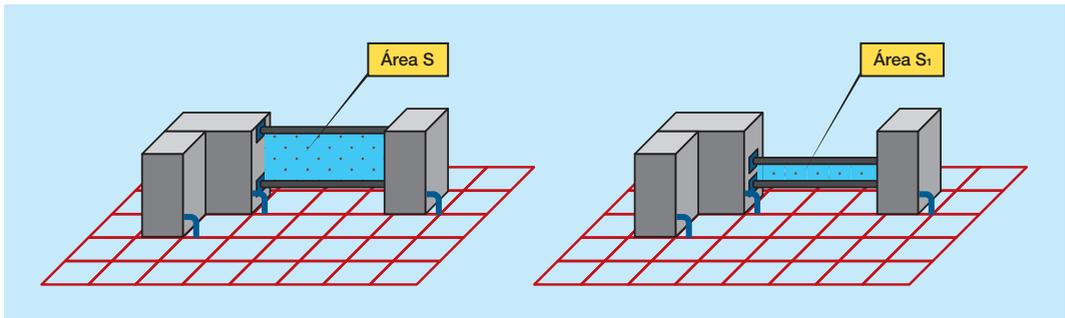


Fig. 5.33 – Redução de laços em cabos que interligam equipamentos instalados sobre malhas de referência de sinal.

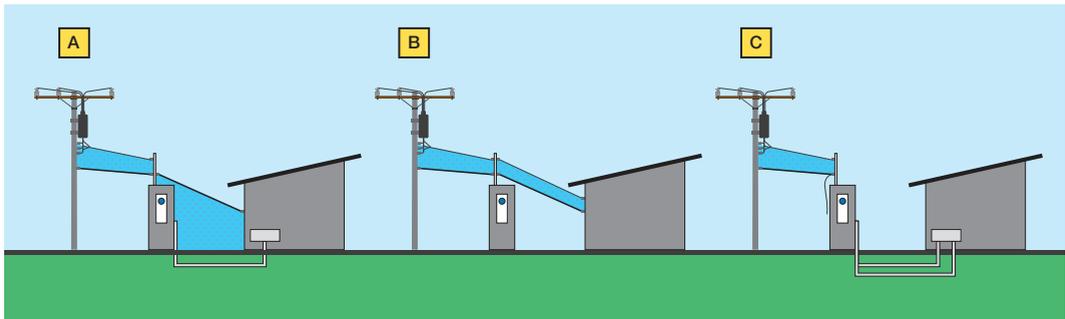


Fig. 5.34 – Redução do valor da tensão induzida devido à redução da área dos laços formados pelas linhas de alimentação e de comunicação de uma edificação.

5.5 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo desse capítulo:

- ☑ O cálculo dos fatores de blindagem para os campos eletromagnéticos originados em uma descarga atmosférica é tarefa complexa e uma boa alternativa é a utilização de programas;
- ☑ O valor do fator de blindagem proporcionado pelos condutores do SPDA e da ferragem estrutural pode ser estimado por meio das expressões simplificadas apresentadas na NBR 5419;
- ☑ Em geral, a blindagem proporcionada pelo SPDA e pela ferragem estrutural de uma edificação só será efetiva na redução dos valores dos campos originados em uma descarga que incide nas suas proximidades se o reticulado formado pelos condutores e ferragens for relativamente pequeno (menor que 10m);
- ☑ Os valores dos campos dentro da edificação gerados pelas descargas precisam ser confrontados com os valores suportáveis pelos equipamentos. Se os valores suportáveis forem inferiores aos valores dos campos incidentes, medidas de proteção (por exemplo, instalação de blindagem adicional) precisam ser adotadas;
- ☑ A utilização de cabos blindados também é efetiva na redução dos valores das tensões e correntes induzidas. No entanto, aberturas nas blindagens do cabo e terminações inadequadas podem reduzir significativamente o efeito da blindagem;
- ☑ O arranjo dos condutores internos evitando a formação de laços é uma técnica poderosa para minimizar os valores das tensões e correntes induzidas.

CORRENTES QUE CIRCULAM NOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS INSTALADOS NA EDIFICAÇÃO

Uma das medidas de proteção contra surtos (MPS) mais eficientes é a instalação coordenada de dispositivos de proteção contra surtos (DPS). Entretanto, para a correta especificação dos DPS é fundamental o conhecimento dos valores de pico e das formas de onda das correntes que eles devem suportar.

A NBR 5419-4 [1] sugere que para a especificação dos DPS a serem instalados em uma edificação seja feito um estudo para a determinação dos valores de pico das correntes e das formas de onda, se possível com o auxílio de simulações computacionais. Caso não seja possível fazer um estudo específico, a norma sugere valores típicos. A NBR 5410 [2] por sua vez estabelece valores mínimos para os valores de pico das correntes que os DPS devem suportar e sugere formas de onda de corrente que devem ser utilizadas nos ensaios de qualificação dos mesmos.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em simulações computacionais que mostram que o tipo de instalação interfere muito nos valores e nas formas de onda das correntes. Será visto que os valores obtidos nas simulações são coerentes com os valores típicos sugeridos nas normas.

A modelagem utilizada nas simulações computacionais apresentadas pode ser útil para a realização de outros estudos de proteção. Além disso, as simulações e os resultados obtidos ajudam a compreender a origem dos valores típicos recomendados na norma. Foram avaliados os valores das correntes nas seguintes situações:

- ⊙ Descargas diretas que incidem na edificação (fonte de danos S1);
- ⊙ Descargas próximas da edificação (fonte de danos S2);

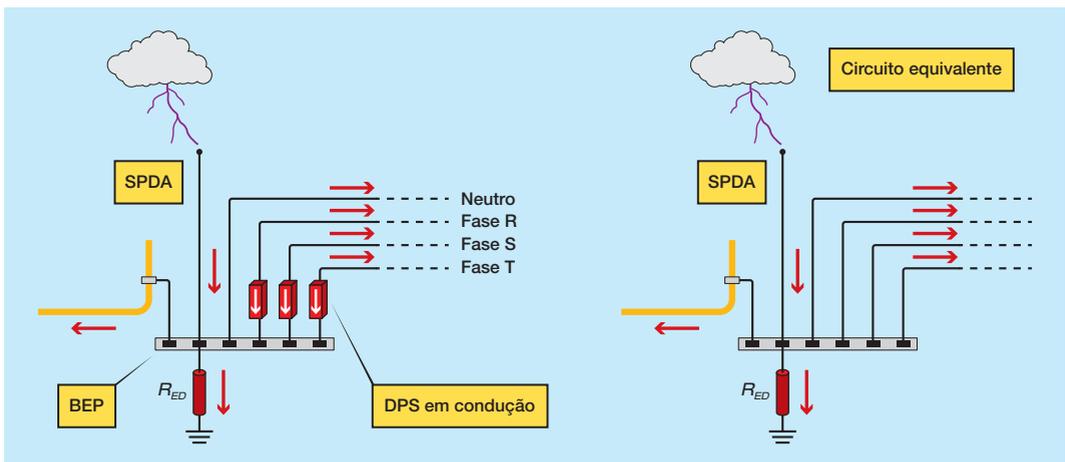


Fig. 6.1 – Modelagem utilizada para os DPS em estado de condução.

- ☑ Descargas diretas nas linhas que atendem à edificação (fonte de danos S3);
- ☑ Descargas próximas das linhas que atendem a edificação (fonte de danos S4).

Os DPS são analisados em detalhes no Capítulo 7. Para os estudos apresentados neste capítulo, esses dispositivos foram modelados como chaves ideais, ou seja, antes de atuar eles funcionam como se fossem chaves abertas e após a atuação eles funcionam como chaves fechadas. A Fig. 6.1 mostra um sistema onde as fases estão protegidas com DPS. Devido à incidência de uma descarga atmosférica os DPS atuam e o circuito equivalente, que é utilizado nas simulações, é mostrado na mesma figura.

6.1 - DESCARGAS DIRETAS QUE INCIDEM NA EDIFICAÇÃO (S1)

Essa seção trata das correntes que circulam nos DPS devido a descargas atmosféricas que incidem no SPDA da edificação, correspondendo à fonte de danos S1 definida na NBR 5419. Foram calculadas as correntes que circulam nos DPS para duas situações básicas:

- ☑ Acoplamento resistivo;
- ☑ Indução nos cabos internos da edificação.

6.1.1 - CORRENTES NOS DPS DEVIDO AO ACOPLAMENTO RESISTIVO

Com a atuação dos DPS os diversos cabos e tubulações que alimentam a edificação ficam em contato direto com o sistema de aterramento

e a corrente da descarga direta é dividida entre estes vários cabos e demais serviços entrantes metálicos. Foi avaliada uma edificação alimentada por rede de baixa tensão com neutro multiaterrado e também foi avaliada a influência de tubulações metálicas interligadas na malha de aterramento.

Para o cálculo das correntes que circulam na rede, nos cabos da edificação e nos dispositivos de proteção contra surtos, foram realizadas simulações computacionais cujos resultados são apresentados a seguir. As simulações foram feitas na plataforma PSpice [3] e os parâmetros utilizados nas simulações são mostrados a seguir. Foi considerado que os DPS instalados na edificação estão em estado de condução plena e sua impedância foi considerada como sendo igual a zero.

6.1.1.1 - EDIFICAÇÃO ALIMENTADA POR LINHA AÉREA DE BAIXA TENSÃO

A Fig. 6.2 ilustra o caso de uma edificação alimentada por uma linha de baixa tensão com o neutro multiaterrado. O cabo neutro da linha de baixa tensão é aterrado de 50 em 50m, com três hastes verticais com comprimentos unitários de 2,4m. Essa configuração é similar à configuração de uma linha de baixa tensão urbana onde o neutro é aterrado na entrada de todas as edificações. O neutro está aterrado em dez pontos e no final da linha de baixa tensão existe um segundo conjunto de DPS. Este segundo conjunto representa os DPS instalados em uma outra edificação que também é alimentada pela mesma linha de baixa tensão.

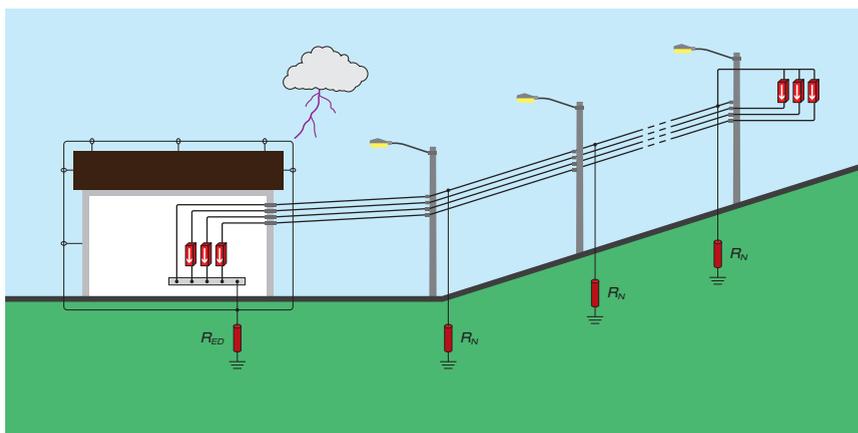


Fig. 6.2 Edificação alimentada por rede elétrica com neutro multiaterrado.

A onda de corrente de descarga utilizada é mostrada na Fig. 6.3. Ela corresponde à onda da descarga principal positiva, com forma de onda 10/350 μ s e valor de pico de 100 kA. Esses parâmetros são sugeridos na NBR 5419-1[6] para os estudos de proteção de edificações com Níveis de Proteção III e IV.

O valor da resistividade do solo foi considerado igual a 1700 Ω m, que corresponde ao valor da mediana dos valores da resistividade aparente dos solos do estado de Minas Gerais.

Essa distribuição é mostrada na Fig. 6.4, com base em valores medidos pela CEMIG [4].

A edificação foi tratada como tendo Nível de Proteção III ou IV. Como visto no Capítulo 4, para esse tipo de edificação a NBR 5419-3 [5] sugere a adoção de uma malha de aterramento em forma de anel, onde o raio equivalente da malha deve ser maior do que 5m. A Fig. 6.5 mostra a geometria considerada para a malha e o valor da sua resistência de aterramento.

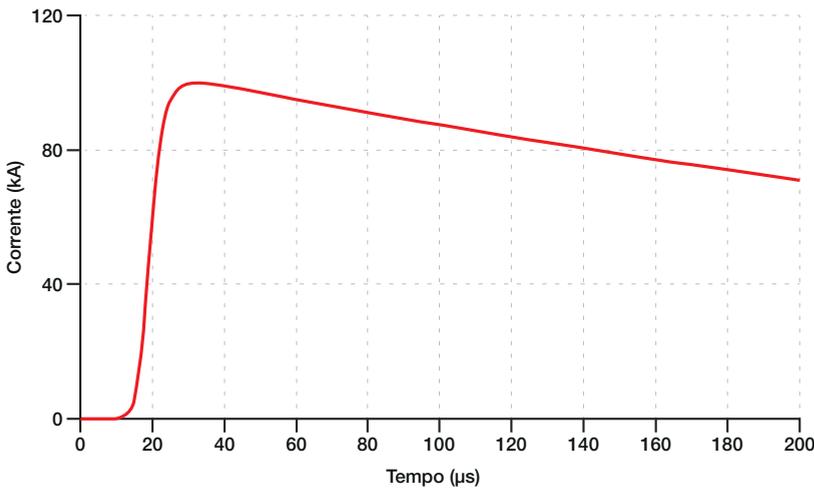


Fig. 6.3 – Onda de corrente utilizada nas simulações. Descarga principal positiva, forma de onda 10/350 μ s e valor de pico de 100kA [6].

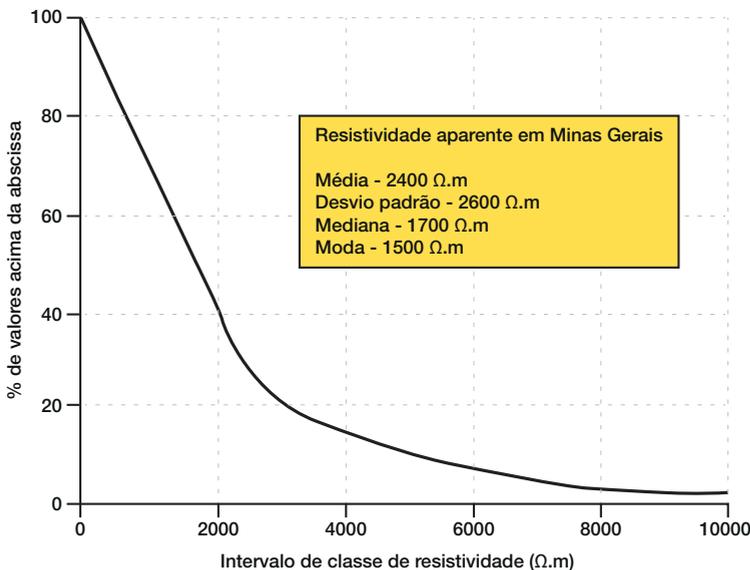


Fig. 6.4 Distribuição estatística dos valores da resistividade aparente dos solos do estado de Minas Gerais. Valores medidos pela CEMIG, adaptado de [4].



Fig. 6.5 – Malha de aterramento sugerida pela NBR 5419 para utilização em edificações com Níveis de Proteção III ou IV instaladas em um solo de resistividade igual a 1700Ωm.

O aterramento do neutro é feito com três hastes verticais de 2,4m de comprimento cada. A Fig. 6.6 mostra o valor da resistência de cada um dos pontos de aterramento do neutro. Na mesma figura é mostrado o arranjo utilizado para o cálculo dos parâmetros da linha.

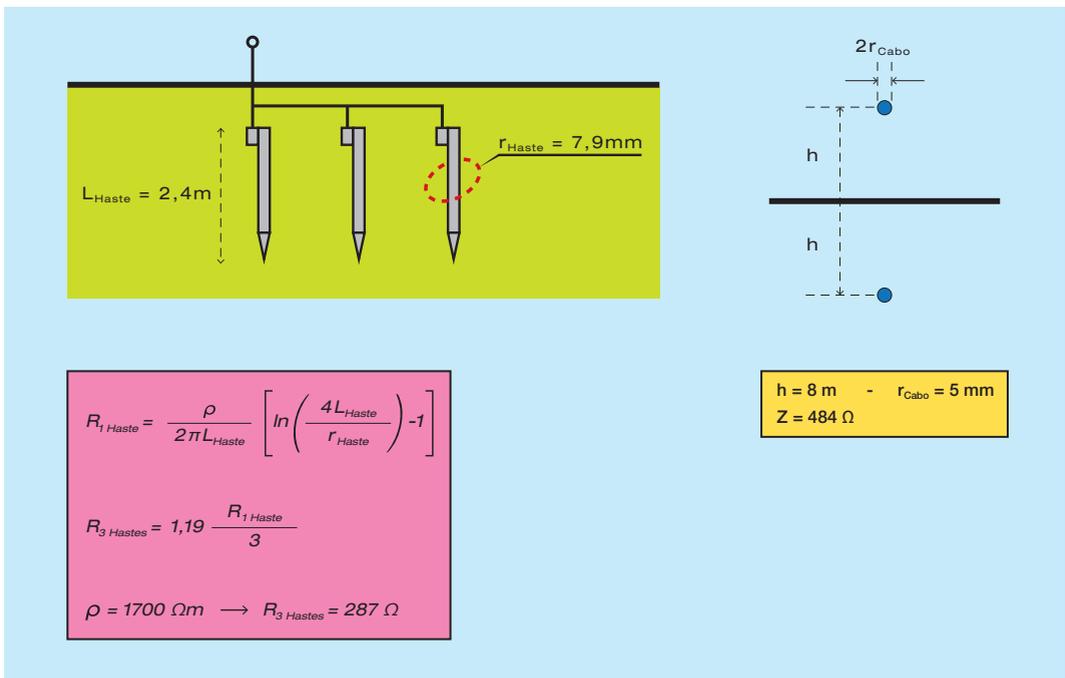


Fig. 6.6 – Aterramento do neutro da rede de baixa tensão com arranjo típico composto de três hastes. Resistividade do solo igual a 1700 Ωm e impedância de surto dos cabos igual a 484 Ω. Expressões retiradas de [5].

Conforme mostrado no Capítulo 3 a representação de um circuito por parâmetros concentrados é válida se o comprimento elétrico do circuito (l_e) for inferior a 0,5 (Fig. 3.2 do Capítulo 3). O comprimento elétrico foi definido como:

$$l_e = \frac{L}{v T_{\text{FRENTE}}} \quad (6.1)$$

onde L é o comprimento do circuito, v a velocidade de propagação e T_{FRENTE} é o tempo de frente de onda da corrente.

O comprimento do circuito mostrado na Fig. 6.2 e igual a 450m, considerando a velocidade de propagação igual à velocidade da luz no vácuo e o tempo de frente de onda da corrente igual a 10μs, o comprimento

elétrico é: $l_E = 0,15\text{m}$. Como o comprimento elétrico é inferior a 0,5 é razoável modelar os condutores da rede elétrica como indutâncias concentradas.

Foi considerado um circuito com três fases e elas foram representadas por um único condutor de raio igual ao raio geométrico (RMG) conforme mostrado na Fig. 6.7.

Os valores das indutâncias próprias e mútua foram calculados com as expressões e parâmetros mostrados na Fig. 6.8.

O circuito utilizado na simulação é o mostrado na Fig. 6.9, onde L_F é indutância própria do condutor equivalente que representa as três fases, L_N a indutância própria do neutro e L_M a indutância mútua

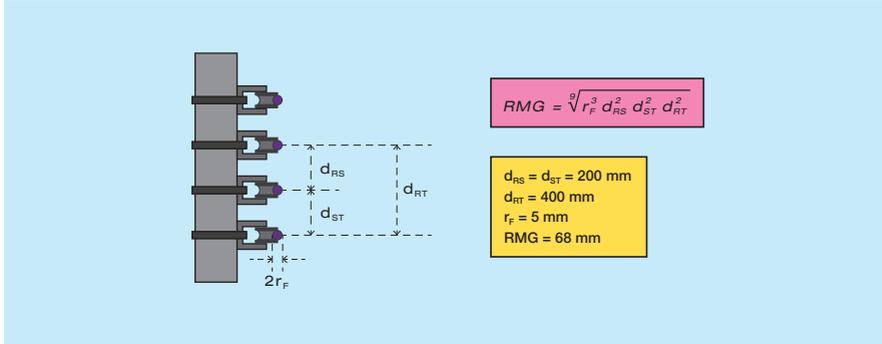


Fig. 6.7 Representação das três fases por um condutor equivalente de raio igual ao raio médio geométrico.

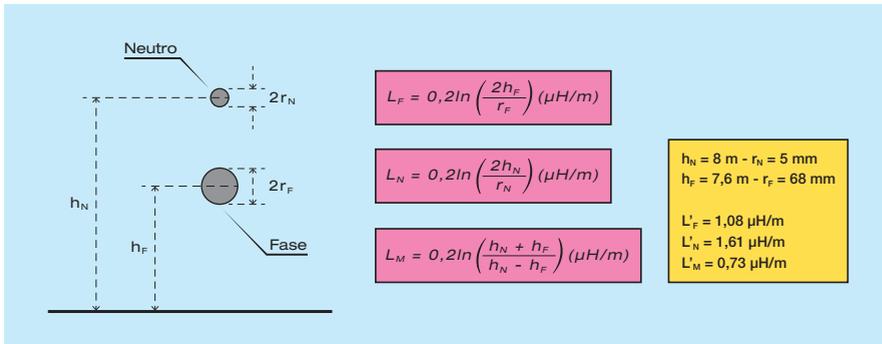


Fig. 6.8 Parâmetros da linha elétrica e valores das indutâncias.

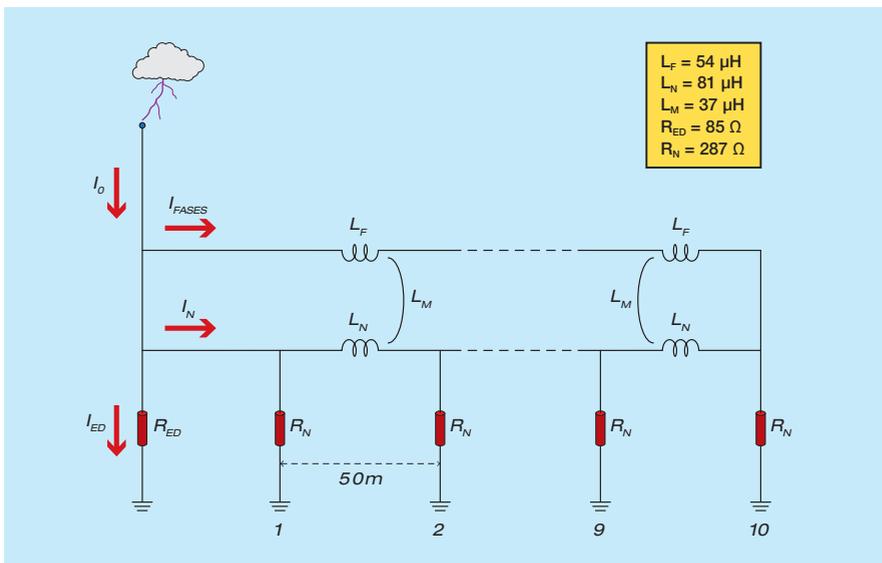


Fig. 6.9 Circuito utilizado na simulação.

entre os dois condutores.

A figura 6.10 mostra os valores e as formas de onda das correntes que circulam na malha da edificação (I_{ED}), no condutor neutro (I_N) e no condutor equivalente que representa as três fases (I_{FASES}).

Pode ser visto na Fig. 6.10 que a corrente no condutor que representa as três fases é igual a 29 kA e a corrente em cada uma delas é igual a 9,7 kA. A figura 6.11 mostra a distribuição de correntes considerando as três fases. A corrente que circula em cada um dos DPS é igual à corrente que circula em cada uma das fases (I_f).

6.1.1.2 - INFLUÊNCIA DE TUBULAÇÕES METÁLICAS ENTERRADAS

Será utilizada a mesma edificação da simulação anterior, com a diferença de que foi considerada a existência de uma tubulação metálica diretamente enterrada no solo e interligada na malha da edificação. Foi considerada uma tubulação de 100m de comprimento.

A tubulação enterrada foi modelada como sendo um cabo enterrado e o valor da resistência de aterramento foi calculado pela formulação de Sunde [7], mostrada na Fig. 6.12.

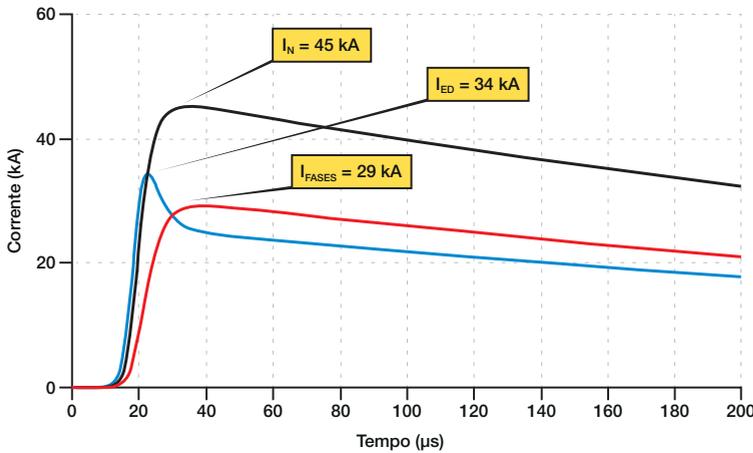


Fig. 6.10 – Valores das correntes na malha da edificação, no condutor neutro e nas fases da linha elétrica para o caso mostrado na figura 6.2.

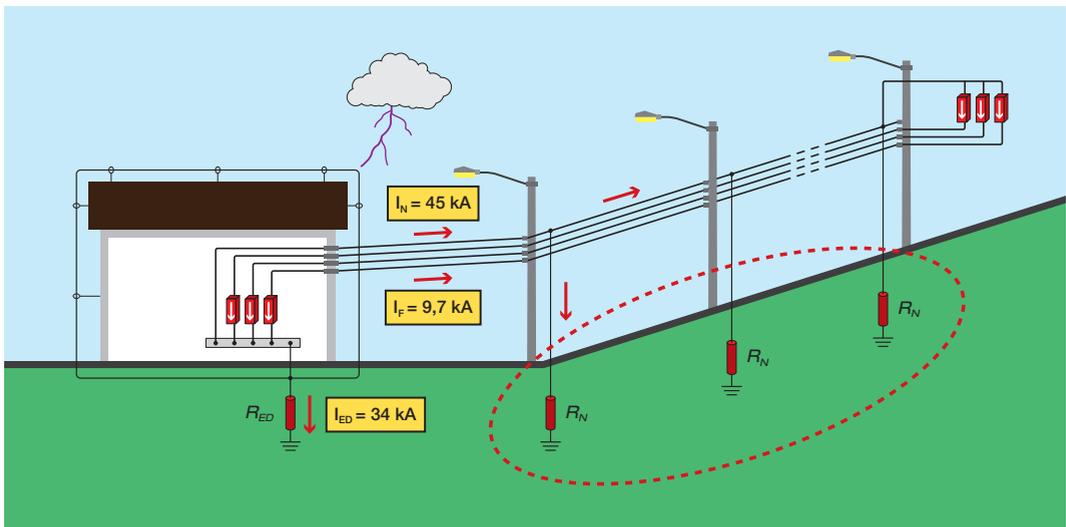


Fig. 6.11 – Distribuição de correntes no caso de uma edificação alimentada por uma rede de baixa tensão trifásica com neutro multiterrado.

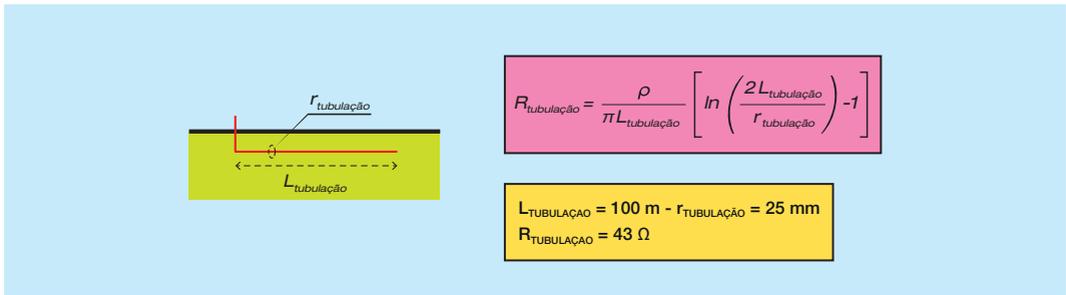


Fig. 6.12 – Modelagem adotada para o cálculo da resistência de aterramento da tubulação metálica enterrada que está interligada na malha de aterramento da edificação. Foi considerado uma tubulação de 100m de comprimento enterrada diretamente em um solo de 1700Ωm. Expressão proposta em [7].

Os valores das correntes são mostrados na Fig. 6.13, onde I_s é a corrente que circula na tubulação enterrada.

Na Fig. 6.14 é mostrada a mesma edificação utilizada na simulação anterior, com a dife-

rença que foram utilizadas três tubulações metálicas enterradas e interligadas na malha da edificação. A modelagem utilizada foi a mesma utilizada anteriormente. O valor da corrente ($I_s = 66\text{kA}$) mostrado na figura corresponde ao valor total da corrente que cir-

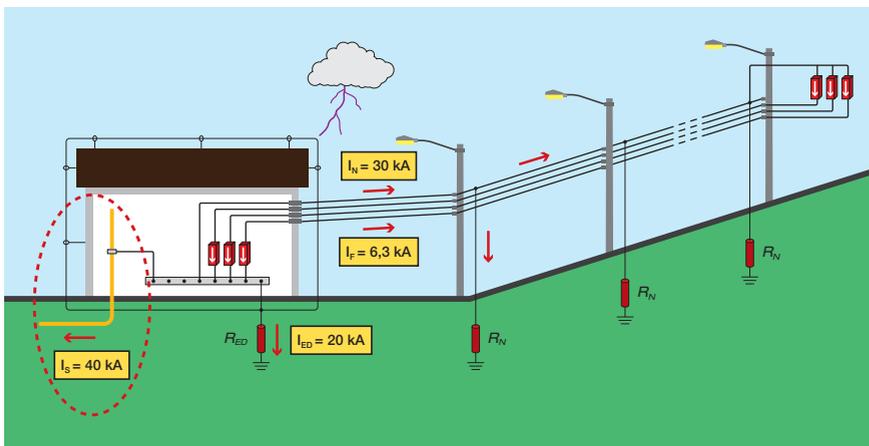


Fig. 6.13 Edificação alimentada por rede de baixa tensão com neutro multiterrado. Destaque para a tubulação metálica enterrada de 100m comprimento e interligada na malha de aterramento da edificação. Indicação dos valores de pico das correntes.

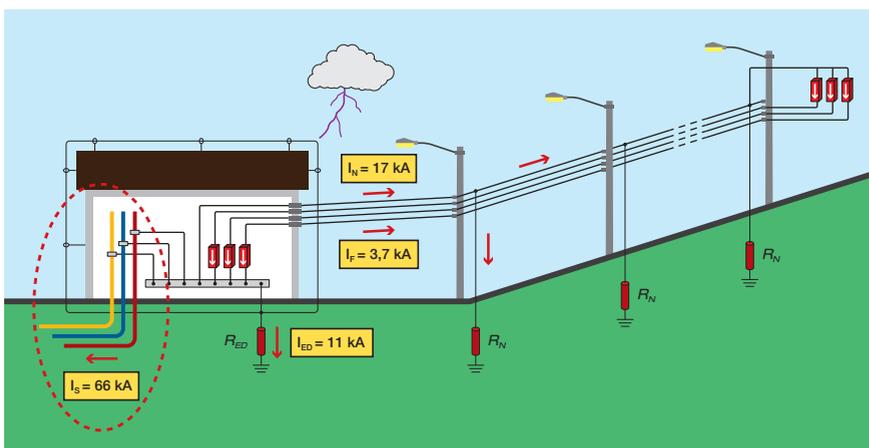


Fig. 6.14 Distribuição de correntes em uma edificação alimentada por rede de baixa tensão com neutro multiterrado. Destaque para as três tubulações metálicas de 100m comprimento cada, enterradas diretamente e que estão interligadas na malha de aterramento da edificação.

cula pelas três tubulações.

A presença das tubulações enterradas provoca uma redução significativa no valor da resistência de aterramento da edificação, porque a resistência de aterramento das tubulações se encontra em paralelo com a resistência de aterramento da malha da edificação. Isto implica também em uma redução significativa dos valores das correntes que circulam pelo DPS.

6.1.2 - CORRENTES NOS DPS DEVIDO À INDUÇÃO NOS CABOS INTERNOS DA EDIFICAÇÃO

Utilizando a metodologia de cálculo de tensões induzidas nos condutores internos de uma edificação, descrita em detalhes no Capítulo 3, foram calculadas as correntes que circulam por um laço formado pelos condutores internos. Como mostrado na Fig. 6.15, foi considerado que o laço se fecha via um DPS. O laço utilizado tem 50m² de área e seu lado maior (10m) está localizado a 1m de distância de um condutor do SPDA externo da edificação que conduz toda a corrente de descarga.

Nos casos anteriores, foi utilizada apenas uma forma de onda de corrente, pois no caso

das descargas diretas o parâmetro mais significativo é o valor de pico da corrente. No caso das tensões induzidas, a taxa de variação da corrente de descarga também é importante, de modo que foram calculadas as correntes induzidas considerando a descarga principal positiva com 100 kA de valor de pico, a corrente principal negativa com valor de pico de 50 kA e a corrente subsequente negativa com valor de pico de 25 kA. As formas de onda das correntes induzidas no laço e que circulam pelo DPS são mostradas na Fig. 6.16.

Os casos simulados consideram que toda a corrente de descarga flui por um único condutor de descida. Isso foi feito para se determinar os maiores valores de corrente que podem circular pelos DPS. Se a edificação possuir vários condutores de descida, a metodologia descrita no Capítulo 5 para o cálculo do campo magnético dentro da edificação pode ser utilizada. É importante observar que as expressões apresentadas no Capítulo 5 só se aplicam nas situações onde o campo magnético é calculado dentro do volume de segurança, também definido no Capítulo 5.

Como visto no Capítulo 3, se a resistência dos cabos que formam o laço for considerada nos cálculos, as formas de onda das correntes terão uma duração menor (cauda mais

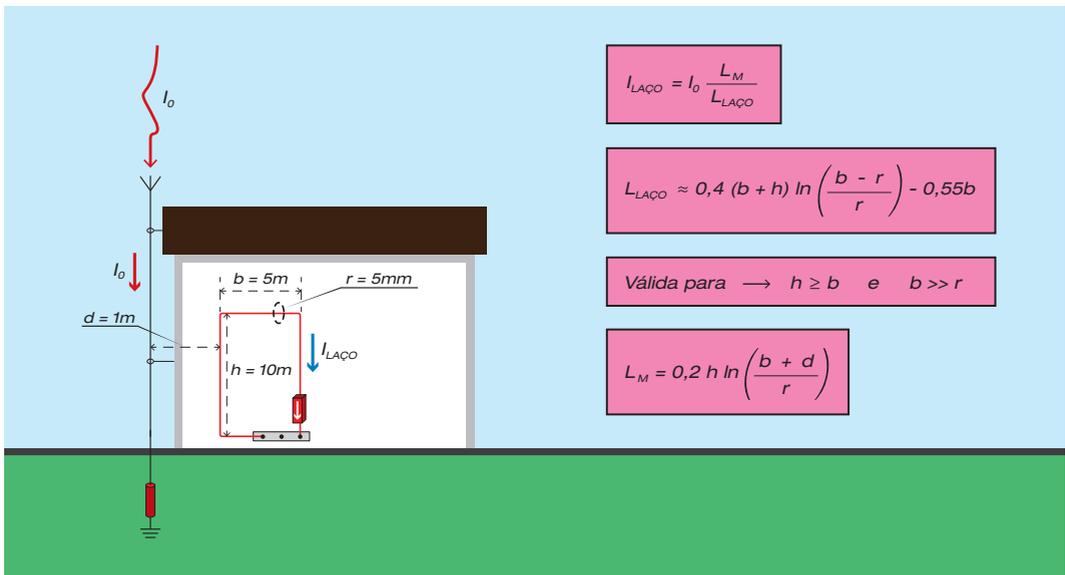
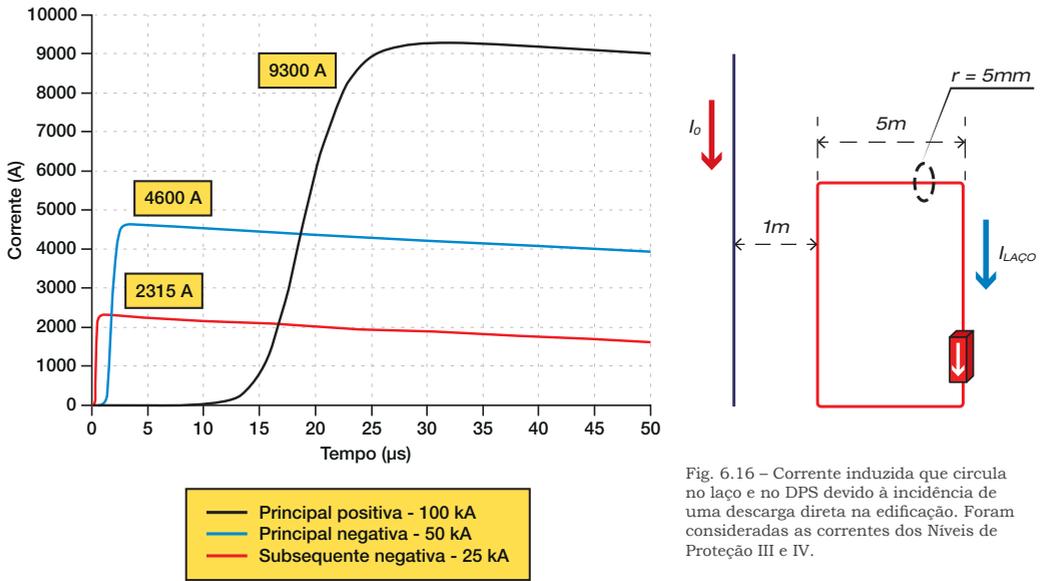


Fig. 6.15 – Arranjo utilizado para o cálculo da corrente induzida em um laço de 50m² instalado dentro de uma edificação, por uma descarga direta que incide na edificação. A corrente da descarga circula no único condutor de descida do SPDA que dista 1m do laço.



curta). A Fig. 6.14 mostra o mesmo caso anterior considerando a resistência do laço (R_{LACO}) igual a zero e igual a 400mΩ.

Pode ser visto na Fig. 6.17 que os valores de pico das correntes induzidas para os casos das descargas principal negativa e subse-

quente negativa não são influenciados pelo valor da resistência do laço. No caso da descarga principal positiva, a resistência do laço provoca uma redução de cerca de 10% no valor de pico da corrente induzida. Em todos os casos, a duração da corrente é significativamente influenciada pela resistência do laço.

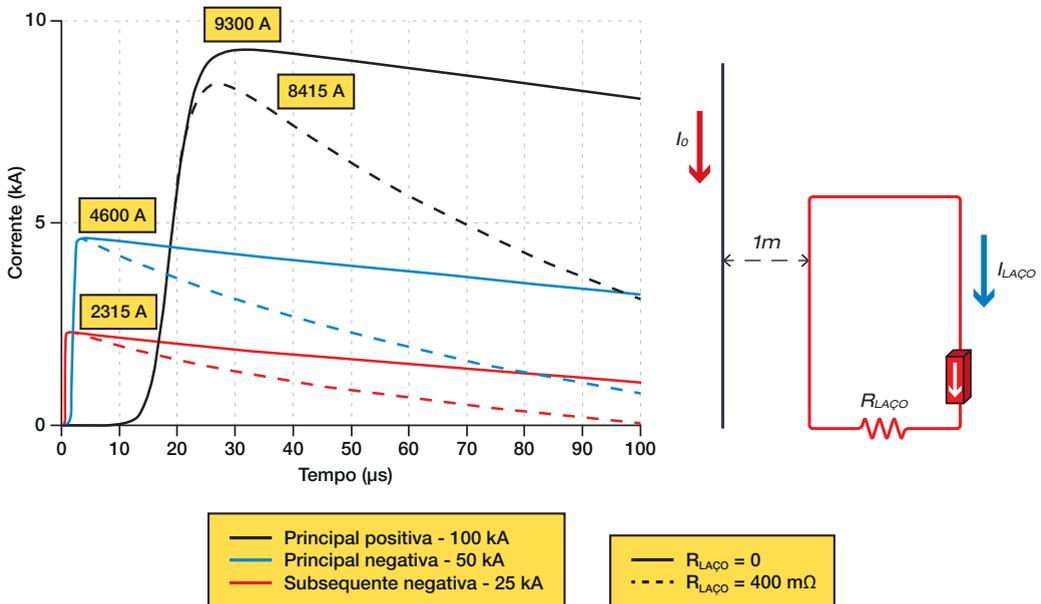


Fig. 6.17 – Corrente induzida que circula no laço e no DPS devido à incidência de uma descarga direta na edificação para diferentes valores de resistência do laço. A tensão induzida foi calculada considerando a resistência do laço igual a zero e igual a 400mΩ.

6.2 - DESCARGAS PRÓXIMAS DA EDIFICAÇÃO (S2)

Esta seção trata das correntes que circulam nos DPS devido a descargas atmosféricas que incidem nas proximidades da edificação, correspondendo à fonte de danos S2 definida na NBR 5419-4. Foram considerados os casos de descargas que incidem a 39, 48 e 60m de uma edificação. Esses valores correspondem às distâncias

mínimas que uma descarga pode incidir nas proximidades da edificação pois, se ela incidir mais perto, ela se tornaria uma descarga direta. O valor da distância mínima foi calculado como mostrado na Fig. 6.18, retirado de [1].

A Fig. 6.19 mostra a situação que foi simulada e a Fig. 6.20 as formas de onda das correntes induzidas no laço interno e que circularão pelo DPS.

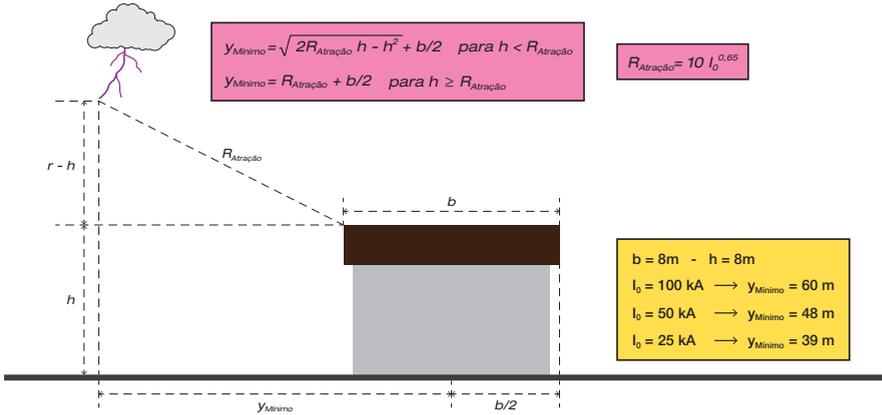


Fig. 6.18 Distância mínima de incidência de uma descarga nas proximidades de uma edificação. Adaptado de [1].

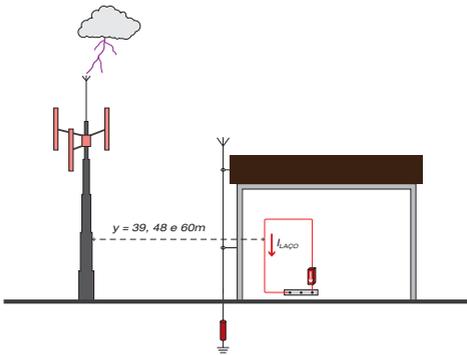


Fig. 6.19 – Descarga incidindo nas proximidades de uma edificação. Foram consideradas as distâncias de 60m, 48m e 39m para as correntes principal positiva, principal negativa e subsequente negativa, respectivamente.

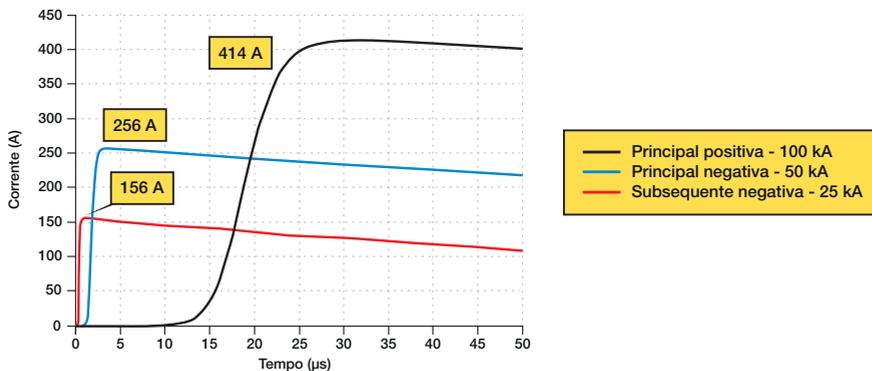


Fig. 6.20 Formas de onda das correntes induzidas para a situação mostrada na Fig. 6.19.

A Fig. 6.21 mostra os valores das correntes induzidas no laço interno, para o caso da descarga principal positiva e considerando os fatores de blindagens proporcionados pelo reticulado formado pelos cabos do SPDA. O laço utilizado é o mostrado na Fig. 6.15. Os fatores de blindagem utilizados são os mesmos calculados no Capítulo 5 (Tabela 5.1). Como visto anteriormente, se a resistência dos cabos que formam o laço for considerada nos cálculos, as formas de onda das correntes terão uma duração menor (cauda mais curta) do que as mostradas na Fig. 6.20.

6.3 - DESCARGAS DIRETAS NAS LINHAS QUE ATENDEM À EDIFICAÇÃO (S3)

Essa seção trata das correntes que circulam nos DPS devido a descargas atmosféricas que incidem nas linhas de energia elétrica e telecomunicações que atendem à edificação, correspondendo à fonte de danos S3 definida na NBR 5419. Quando uma descarga direta atinge uma linha aérea, um elevado valor de corrente circula nos cabos, conforme mostrado na Fig. 6.22. Como resultado uma tensão elevada surge no isolamento fase-terra da estrutura atingida (Fig.6.23), pro-

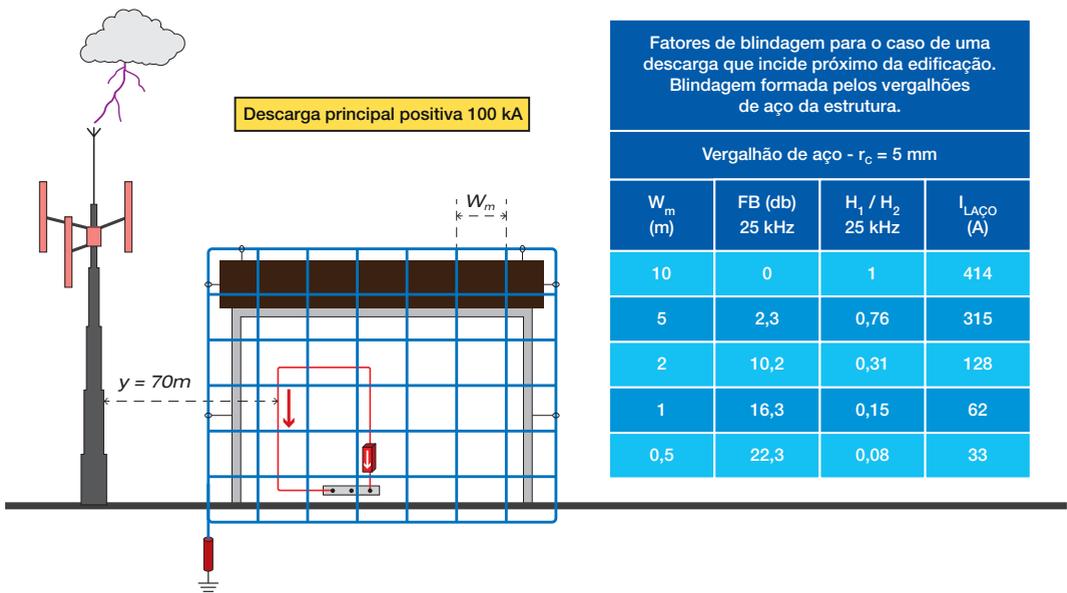


Fig. 6.21 - Valores das correntes induzidas no laço interno para o caso da descarga principal positiva e considerando os fatores de blindagens proporcionados pelo reticulado formado pelos cabos do SPDA. H_1 é o valor do campo magnético considerando a presença do SPDA reticulado e H_2 o campo sem a presença do SPDA.

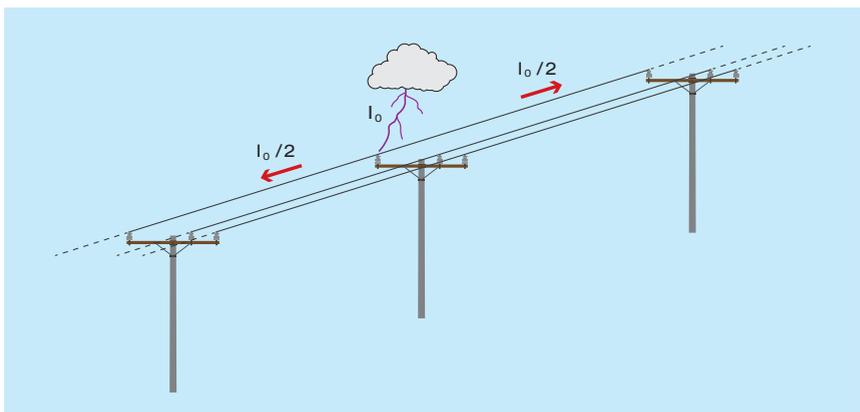


Fig.6.22
Descarga direta em uma rede aérea e divisão de corrente da descarga.

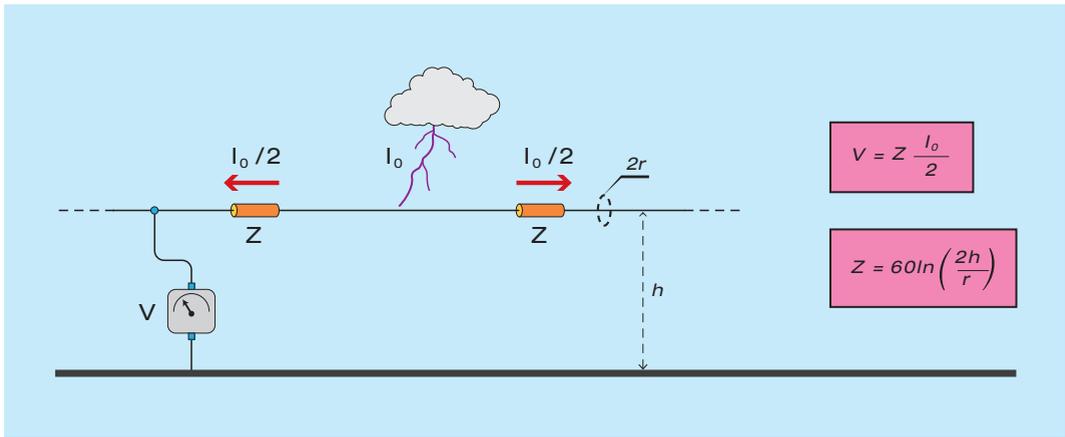


Fig.6.23 – Valor da tensão da fase atingida para a terra devido à circulação da corrente de descarga. A expressão para o cálculo da impedância de surto da fase (Z) é mostrada na figura.

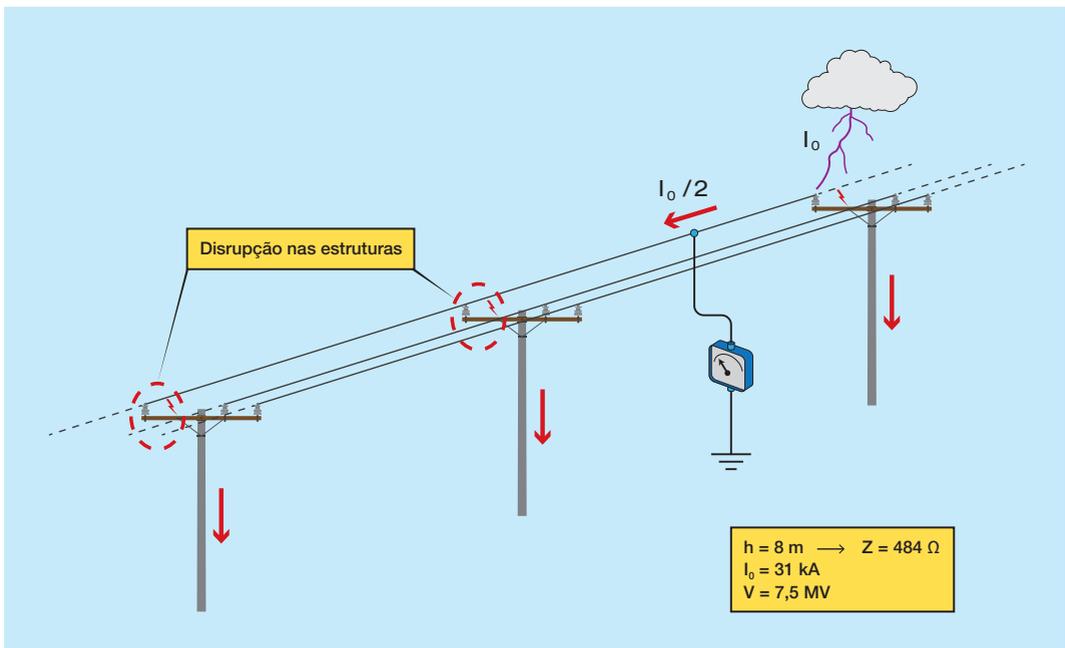


Fig.6.24 – Disrupções que ocorrem nas estruturas da linha devido ao elevado valor da tensão fase-terra. Podem também ocorrer disrupções entre as fases.

vocando disrupções nos isoladores desta estrutura e também nas estruturas adjacentes (Fig.6.24).

Nas estruturas onde ocorrem disrupções, parte da corrente de descarga flui para a terra e parte segue se propagando pela linha. Enquanto o valor da tensão for elevado, ocorrerão disrupções ao longo da linha. Essas disrupções só irão cessar quando o valor da tensão na linha for inferior ao valor da TSI (Tensão Suportável

de Impulso Atmosférico). TSI é o valor máximo de tensão suportável pelo isolamento da linha, quando submetido a ondas impulsivas. Essa situação é mostrada na Fig.6.25.

Como o valor da TSI das redes de distribuição de energia elétrica é relativamente baixo, os valores de corrente que viajam pela linha após as estruturas onde ocorreram disrupções também são relativamente baixos, conforme mostrado na Fig.6.26.

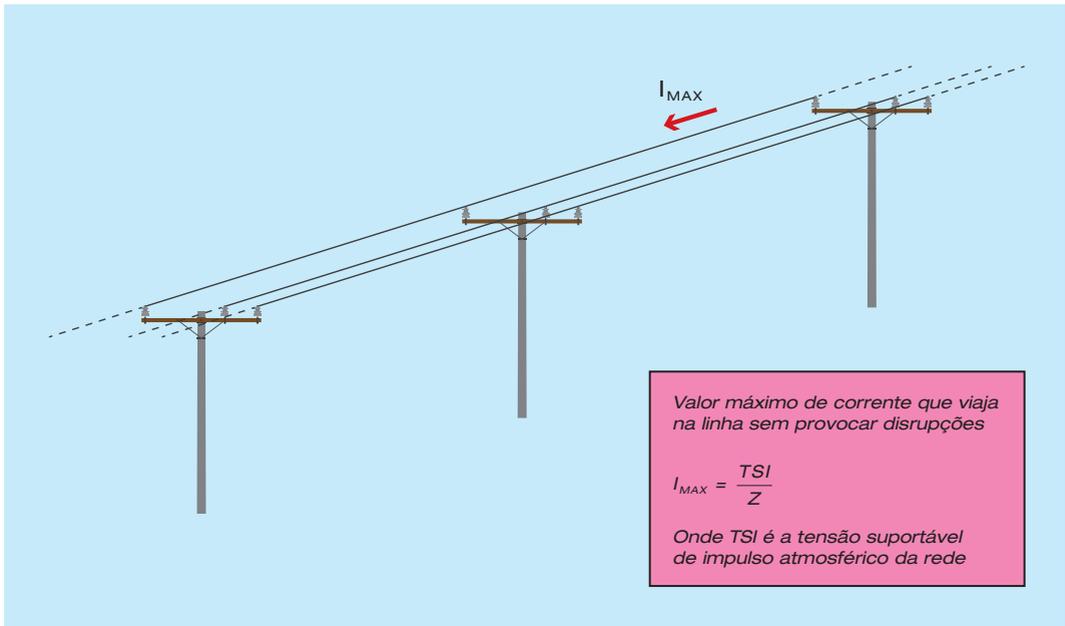


Fig.6.25 – Valor máximo de tensão que viaja pela linha após a ocorrência de disrupções nas estruturas.

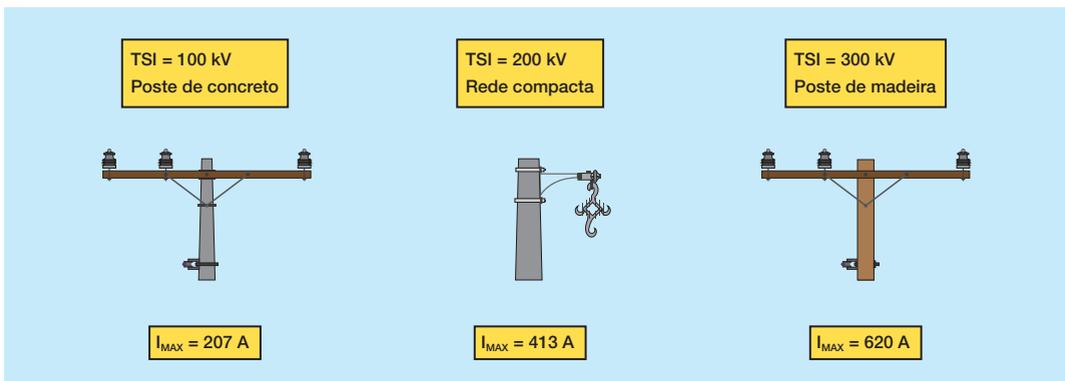


Fig.6.26 – Valores típicos das TSI de estruturas de redes de distribuição de 13,8kV e valores máximos da corrente que se propaga pela rede sem provocar disrupções.

No caso das linhas de baixa tensão e de cabos de telecomunicação, a TSI ainda é mais baixa, conforme mostrado na Fig. 6.27. A TSI entre a blindagem de um cabo típico de telecomunicações e um poste de concreto é da ordem de 100kV. Se o cabo for isolado do poste por um isolador de roldana este valor pode subir um pouco, entretanto neste capítulo será considerado o valor de 100kV.

É importante observar que em uma extremidade de linha terminada em curto circuito a corrente dobra de valor. Este é o

caso de uma linha terminada em um DPS (Fig. 6.28).

Como as correntes que se propagam pelas linhas são de valores relativamente baixos, os casos críticos serão aqueles onde as estruturas diretamente atingidas estão localizadas nas proximidades da edificação. O pior caso é o de uma descarga que atinge o poste mais próximo da edificação, conforme mostrado na Fig. 6.29. Essa figura mostra uma edificação alimentada por uma linha de baixa tensão constituída de três fases e neutro, sendo o neutro multiterreado.

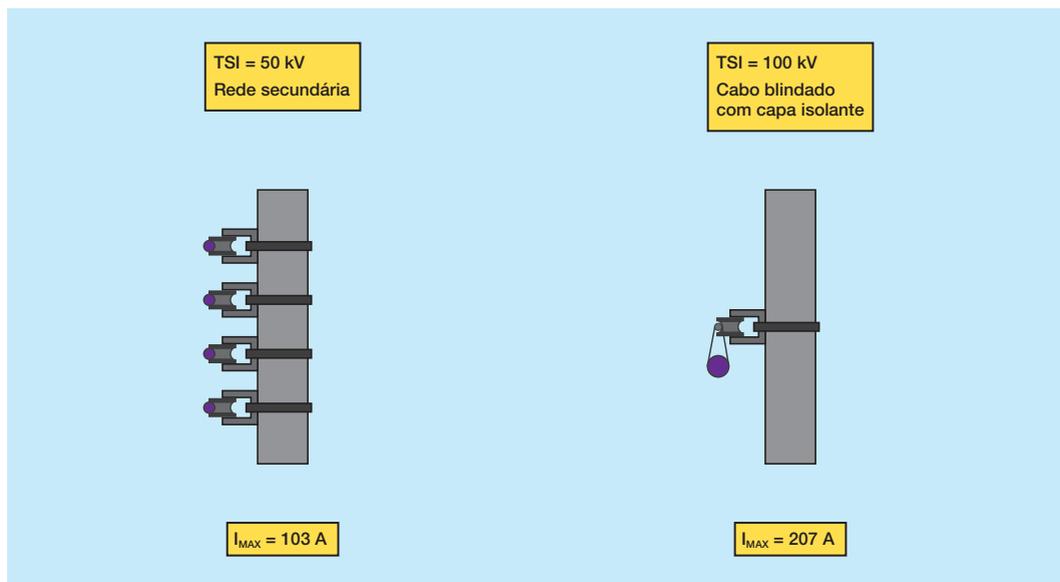


Fig. 6.27 – Valores típicos das tensões suportáveis de impulso atmosférico de estruturas de redes de baixa tensão e cabos telefônicos, e valores máximos da corrente que se propaga pela rede sem provocar disrupções.

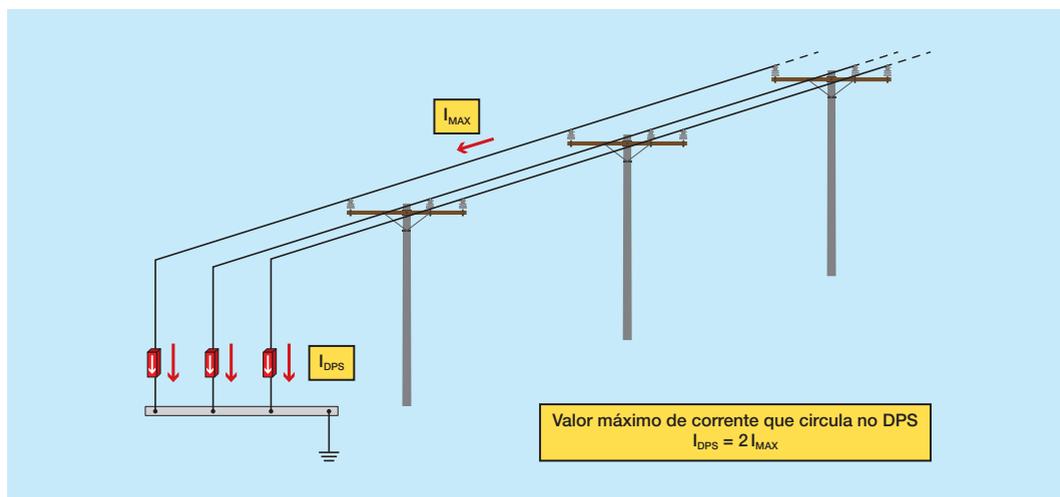


Fig. 6.28 – Corrente que circula em um DPS instalado na extremidade de uma linha de grande comprimento.

Se a distância entre o poste que alimenta a edificação e a mesma for pequena ($d < 100\text{m}$) os efeitos serão praticamente os mesmos de uma descarga que atinge diretamente a edificação, como mostrado na Fig. 6.29. Isso se deve ao fato de que a corrente que será utilizada tem uma frente de onda de $10\mu\text{s}$, que é um tempo bem superior ao tempo de trânsito da linha existente entre o poste e a edificação, de modo que a impedância da linha pode ser desconsiderada. Portanto, uma descarga direta em estruturas próxi-

mas da edificação representa uma situação semelhante a uma descarga direta na estrutura, a qual é considerada na Seção 6.1.

6.4 DESCARGAS PRÓXIMAS DAS LINHAS QUE ATENDEM A EDIFICAÇÃO (S4)

Essa seção trata das correntes que circulam nos DPS devido a descargas atmosféricas que incidem nas proximidades das linhas de energia elétrica e telecomunicações que atendem à edificação, correspondendo à

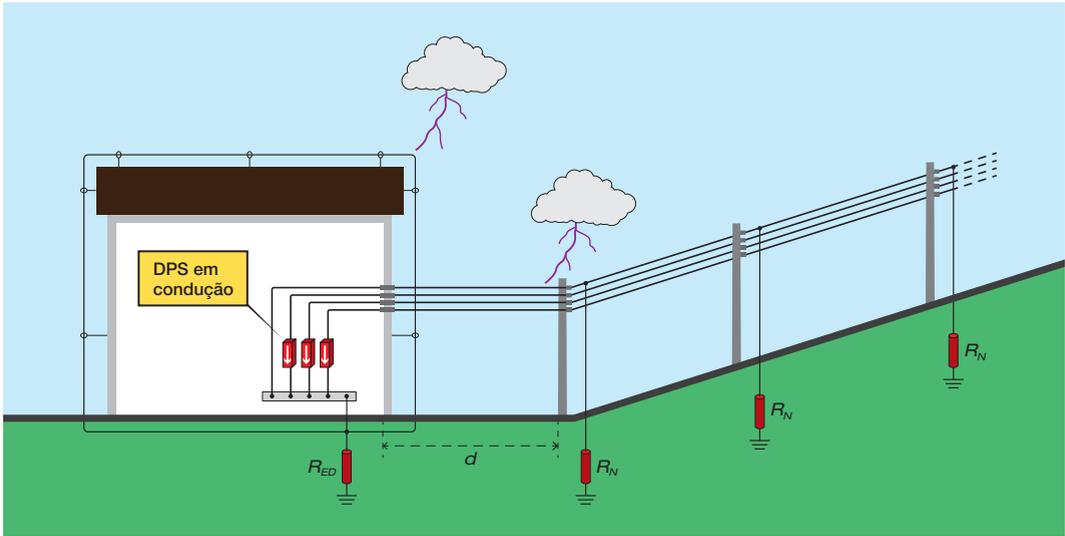


Fig. 6.29 – Se a distância entre a edificação e o primeiro poste for pequena ($d < 100\text{m}$) os efeitos de uma descarga direta no poste serão similares aos efeitos de uma descarga direta na edificação.

fonte de danos S4 definida na NBR 5419-4. Utilizando a metodologia de cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas, descrita de forma resumida no Capítulo 3 e em detalhes em [8, 9] foram calculadas as correntes que circulam pelo DPS de uma edificação devido a tensões induzidas nas linhas de energia elétrica e telecomunicações por descargas que incidem nas suas proximidades.

6.4.1 - CORRENTES INDUZIDAS NOS CABOS DA LINHA AÉREA DE ENERGIA ELÉTRICA

No caso das tensões induzidas em linhas, a taxa de variação da corrente de descarga também é importante, de modo que foram calculadas as correntes induzidas considerando a corrente principal positiva, a corrente principal negativa e a corrente subsequente negativa.

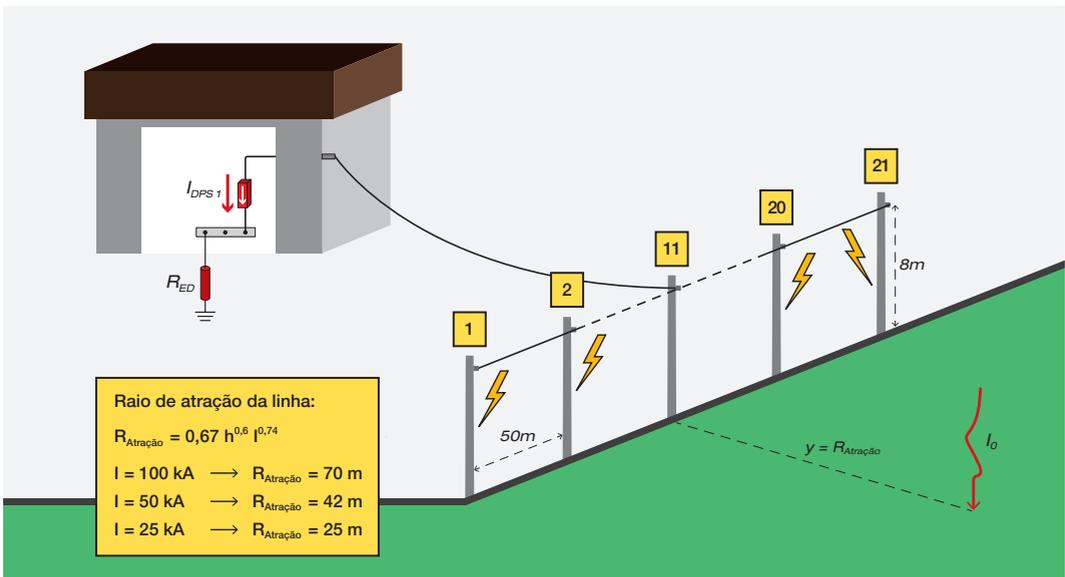


Fig.6.30 – Arranjo que representa uma edificação alimentada por uma linha aérea onde são induzidas tensões e correntes devido a incidência de uma descarga nas proximidades.

Foram utilizadas descargas relativas aos Níveis de Proteção III e IV, ou seja, corrente principal positiva com pico de 100kA, corrente principal negativa com pico de 50kA e corrente subsequente negativa com pico de 25kA. Para cada descarga, os valores dos raios de atração da linha foram calculados pela expressão mostrada na Fig. 6.30, proposta por Eriksson em [10]. Foi considerada uma descarga incidindo em um ponto distante da linha de um valor igual ao raio de atração, pois se ela incidisse mais próximo da linha seria atraída e se tornaria uma descarga direta.

Foi considerado um solo de resistividade igual a 1700Ωm e o valor da resistência de aterramento da edificação onde termina a linha foi considerado como sendo igual a 85Ω. A Fig. 6.30 mostra uma edificação alimentada por uma linha aérea de 1000m de comprimento, sendo que a edificação está

conectada no meio da linha.

As tensões induzidas na linha podem ser calculadas com o programa TIDA [8, 9] descrito no capítulo 3, ou de forma aproximada com as equações mostradas na Fig. 6.31 e retiradas de [11]. Essas expressões são válidas para uma linha infinita, mas os valores obtidos podem ser utilizados para estimar os valores das tensões induzidas em uma linha de 1000m de comprimento.

Os valores de pico das tensões induzidas utilizando as expressões aproximadas mostradas na Fig. 6.31 são mostrados na Tabela 6.1 para os casos das correntes de descargas associadas à descarga principal positiva, à descarga principal negativa e à descarga subsequente negativa.

Como visto anteriormente, o valor da TSI é igual ao valor máximo da tensão que pode

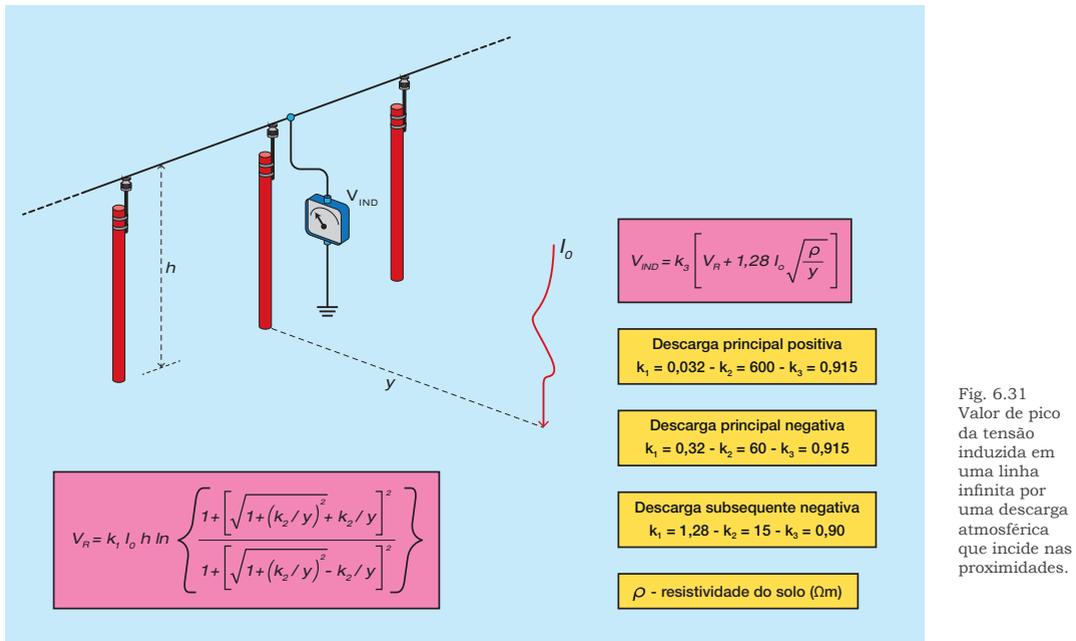


Fig. 6.31 Valor de pico da tensão induzida em uma linha infinita por uma descarga atmosférica que incide nas proximidades.

TABELA 6.1 - Tensões induzidas na linha calculadas pelas expressões analíticas

CORRENTE	VALOR DE PICO (kA)	DISTÂNCIA DESCARGA LINHA (y) (m)	TENSÃO INDUZIDA (kV)
PRINCIPAL POSITIVA	100	70	710
PRINCIPAL NEGATIVA	50	42	642
SUBSEQUENTE NEGATIVA	25	25	442

viajar na linha sem provocar disrupções. Se o valor da tensão induzida for superior ao valor da TSI, disrupções irão ocorrer ao longo da linha e parte da corrente induzida irá fluir para a terra nestes pontos.

Pode ser visto na Tabela 6.1 que as tensões induzidas são superiores às TSI de redes de distribuição de energia de alta e baixa tensão e também de cabos blindados com capa isolante. Nesta situação irão ocorrer disrupções nos postes, como ilustrado na Fig. 6.30. As disrupções que ocorrem nos postes colocam o cabo da rede elétrica em contato com o poste e, se o mesmo for de concreto armado ou metálico, ele irá funcionar como

um ponto de aterramento. Nas simulações que serão apresentadas a seguir a resistência de aterramento dos postes foi considerada como sendo igual ao valor adotado para o aterramento do neutro, ou seja, 287Ω. O circuito utilizado na simulação é o mostrado na Fig. 6.32, onde foram utilizados 21 postes espaçados de 50m entre si.

Os resultados estão na Fig. 6.33, onde são mostradas as formas de onda das correntes que circulam pelo DPS, obtidas utilizando o programa computacional TIDA [6]-[7]. No caso da descarga positiva a polaridade da corrente induzida foi invertida para facilitar a comparação entre as ondas mostradas na Fig. 6.33.

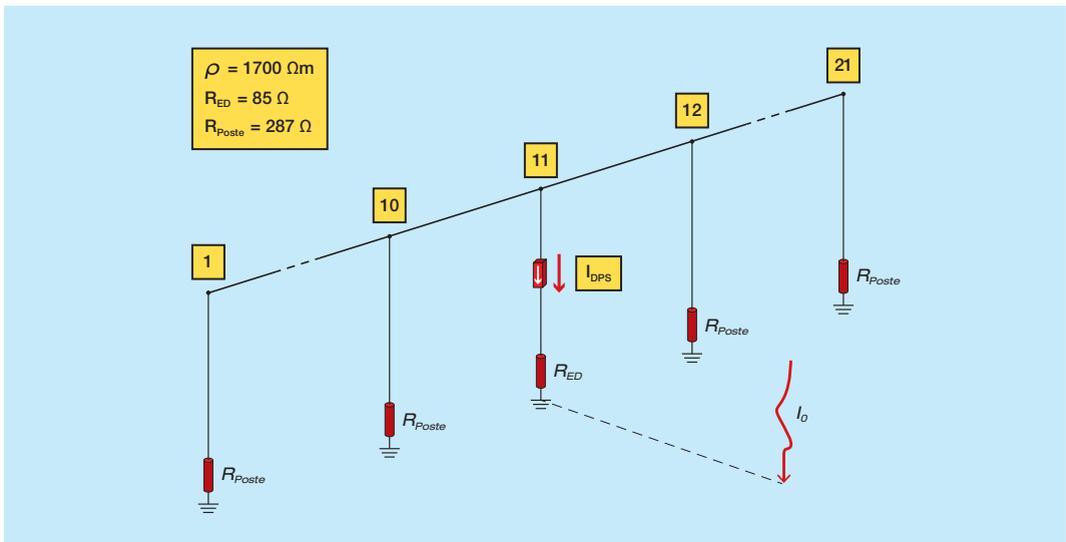


Fig. 6.32 – Circuito para o cálculo da corrente induzida considerando disrupções nos postes. Foram considerados 21 postes condutores espaçados de 50 m e a resistência de aterramento de cada poste foi considerada como sendo igual a 287 Ω.

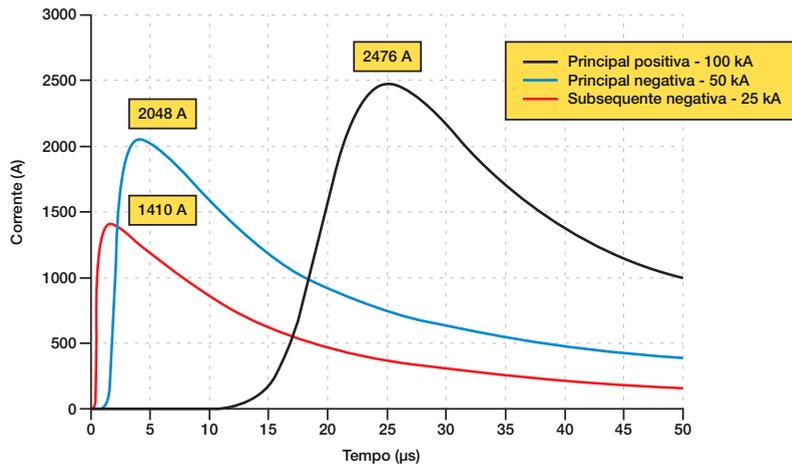


Fig.6.33 Correntes que circulam pelo DPS para solo de 1700Ωm e para ondas de corrente principal positiva de 100kA, principal negativa de 50kA e subsequente negativa de 25kA. Resistência de aterramento da edificação igual a 85Ω e distâncias descarga-linha iguais a 70, 42 e 25m.

Os valores obtidos nas simulações computacionais mostram que as formas de onda das correntes induzidas têm a cauda de onda mais curta do que as caudas das ondas das correntes de descarga. As caudas das ondas de correntes induzidas se aproximam da cauda da onda normalizada ($8/20\mu\text{s}$).

6.4.2 - CORRENTES INDUZIDAS NOS CABOS AÉREOS BLINDADOS DE TELECOMUNICAÇÕES

No caso de cabos aéreos blindados a tensão é induzida da blindagem para a terra.

A blindagem se comporta como se fosse um cabo aéreo e a metodologia anteriormente utilizada para o cálculo das correntes e tensões induzidas pode ser aplicada. O caso estudado é mostrado na Fig. 6.34.

O valor típico da TSI da blindagem de um cabo com capa isolante para o poste é da ordem de 100kV e, como já mostrado anteriormente, irão ocorrer disrupções da blindagem para o poste. O circuito utilizado na simulação é mostrado na Fig. 6.35 e os valores das correntes induzidas na blindagem são mostrados na Fig. 6.36.

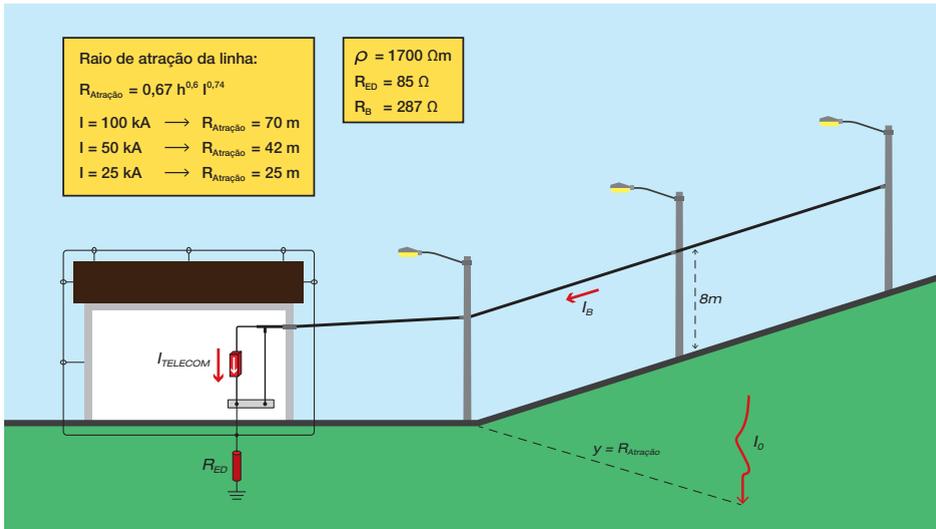


Fig. 6.34 – Arranjo que representa um cabo aéreo blindado que alimenta uma edificação e no qual são induzidas tensões e correntes devido à incidência de uma descarga nas proximidades.

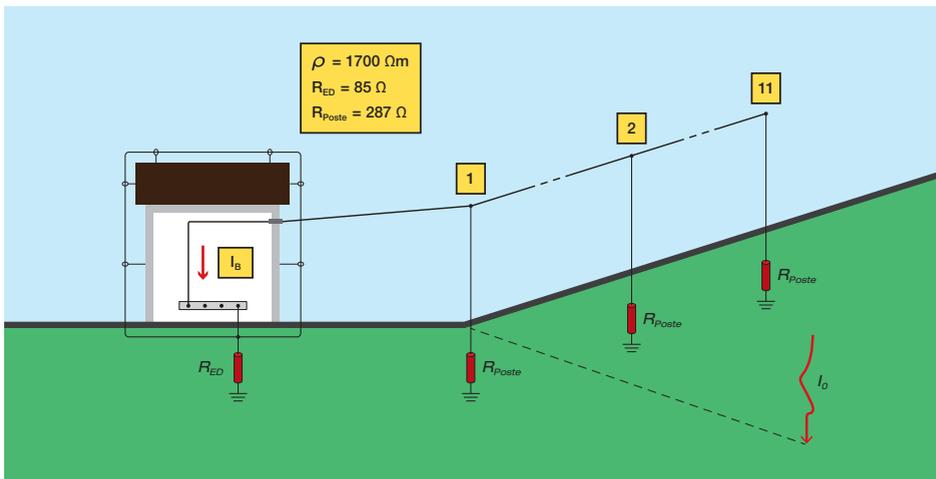


Fig. 6.35 – Circuito utilizado para o cálculo da corrente induzida na blindagem considerando que ocorrem disrupções em todos os postes. Foram considerados onze postes condutores espaçados entre si de 50m e a resistência de aterramento de cada poste é igual a 287Ω .

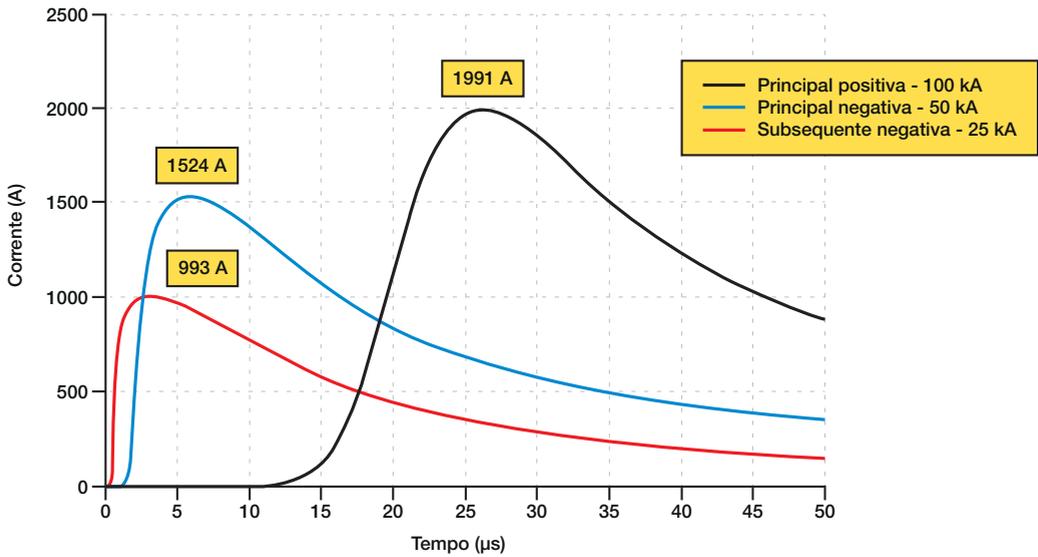


Fig. 6.36 – Correntes induzidas na blindagem do cabo. Foi considerado um solo de $1700\Omega\text{m}$ e as ondas de corrente principal positiva de 100kA , principal negativa de 50kA e subsequente negativa de 25kA . Resistência de aterramento da edificação igual a 85Ω e distâncias descarga-linhas iguais a 70 , 42 e 25m .

A Fig. 6.37 mostra o cálculo das correntes que circulam pelo DPS instalado entre um dos condutores internos e a barra de equalização da edificação (considerando um cabo blindado de 500m de comprimento) e a corrente de descarga principal positiva.

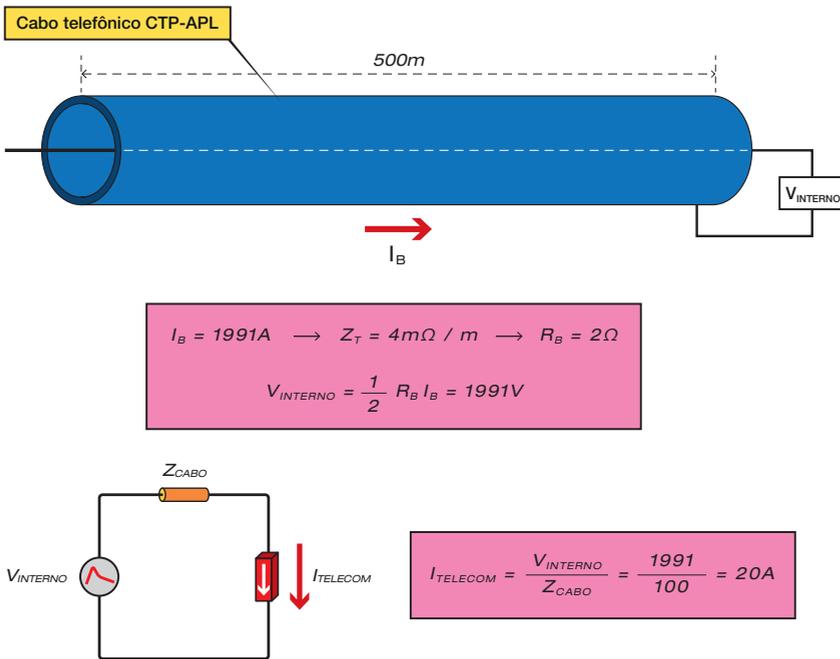


Fig. 6.37 - Cálculo da corrente que circula pelo DPS instalado entre um dos condutores internos e a barra de equalização da edificação. Foi considerado um cabo telefônico blindado, tipo CTP-APL, com resistência da blindagem igual a $4\text{m}\Omega/\text{m}$. A impedância de surto interna do cabo (Z_{cabo}) foi considerada como sendo igual a 100Ω .

No cálculo mostrado na Fig. 6.37 é importante distinguir a impedância de surto da blindagem em relação ao solo, que é o valor já calculado para o caso dos cabos aéreos, e a impedância de surto interna (entre o condutor interno e a blindagem (Z_{CABO})). A Fig. 6.38 ilustra essas duas impedâncias de surto. A melhor forma de obter o valor da impedância de surto do cabo (Z_{CABO}) é através de uma consulta ao catálogo do fabricante, mas ela normalmente se situa entre 50Ω e 150Ω .

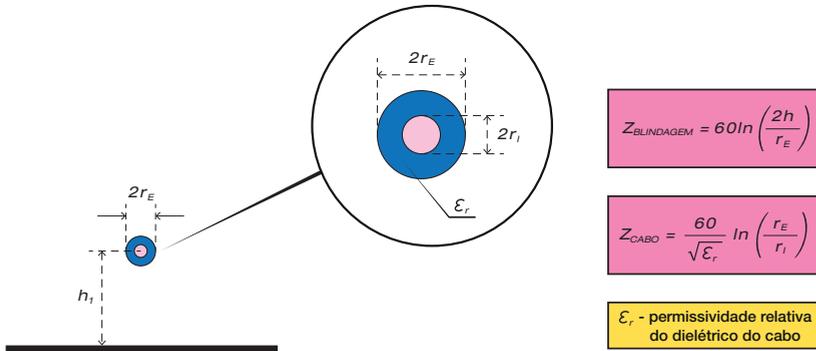


Fig. 6.38 Impedâncias de surto da blindagem em relação ao solo ($Z_{BLINDAGEM}$) e entre o condutor interno e a blindagem (Z_{CABO}).

6.4.3 - CORRENTES INDUZIDAS NOS CABOS BLINDADOS ENTERRADOS QUE ALIMENTAM A EDIFICAÇÃO

Com base na metodologia de cálculo de tensões induzidas em cabos enterrados, descrita de forma sucinta no Capítulo 3 e de forma detalhada em [12,13], foram calculadas as correntes que circulam pelo DPS instalado na blindagem de um cabo subterrâneo que interliga duas edificações e também no DPS que interliga um dos condutores internos do cabo ao barramento de equalização da edificação.

O caso estudado é referente a uma situação onde há alguma restrição (por exemplo, valor elevado da corrente de curto-circuito na

rede elétrica), de forma que a blindagem do cabo subterrâneo que interliga as duas edificações não pode ser aterrada diretamente nas duas malhas. Como mostrado no Capítulo 4, uma alternativa para essa situação é aterrar uma das extremidades da blindagem do cabo diretamente na malha de uma das edificações e aterrar a outra extremidade na malha da segunda edificação via um DPS.

A Fig. 6.39 mostra o arranjo que será estudado. Foi considerado um cabo de 150m de comprimento que interliga duas edificações. O cabo está instalado dentro de um duto isolante de PVC. O cabo é o mesmo utilizado no Capítulo 3 para o cálculo das correntes induzidas nas blindagens de cabos subterrâneos. Detalhes da modelagem do cabo podem ser vistas nas referências [12, 13].

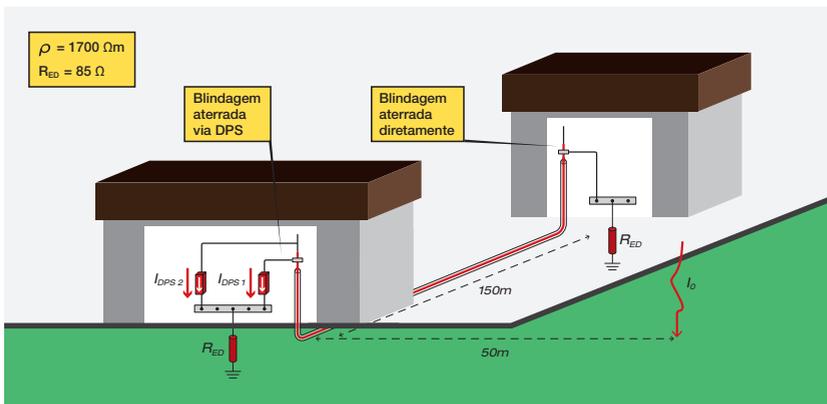


Fig. 6.39 – Arranjo para o cálculo da corrente induzida na blindagem de um cabo subterrâneo que interliga duas edificações. Uma das extremidades da blindagem é aterrada diretamente na malha da edificação e a outra extremidade é aterrada via um DPS.

Novamente foram utilizadas as ondas correspondentes à descarga principal positiva com 100kA de valor de pico, a corrente principal negativa com valor de pico de 50kA e a corrente subsequente negativa com valor de pico de 25kA. As formas de onda das correntes induzidas na extremidade da blindagem

do cabo são mostradas na Fig. 6.40. A Fig. 6.41 mostra o cálculo da corrente que circula pelo DPS instalado entre um dos condutores internos do cabo blindado e a barra de equalização da edificação. O cálculo foi feito para a corrente principal positiva de 100kA de pico.

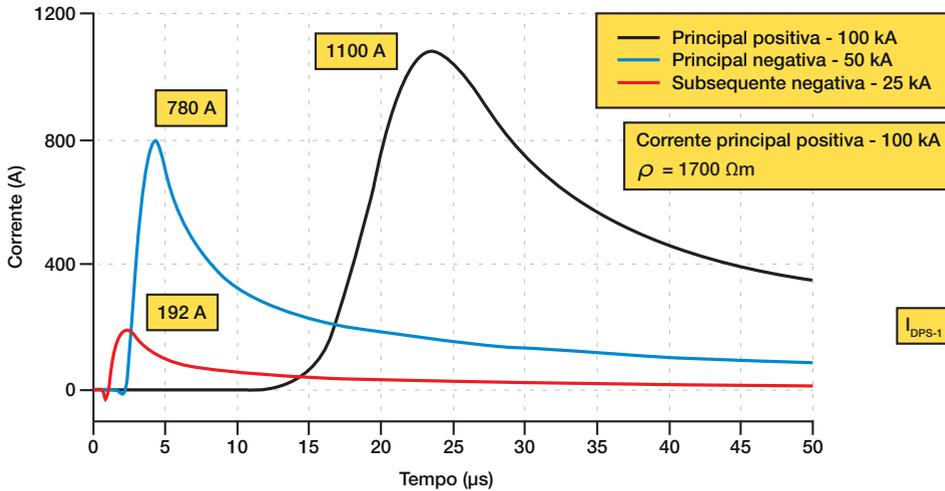


Fig. 6.40 – Correntes induzidas que circulam na extremidade da blindagem de um cabo subterrâneo que interliga duas edificações. I_{dps-1} é a corrente que circula na extremidade aterrada via DPS. Correntes de descarga principal positiva com 100 kA de pico, corrente principal negativa com 50 kA de pico e corrente subsequente negativa com 25 kA de pico.

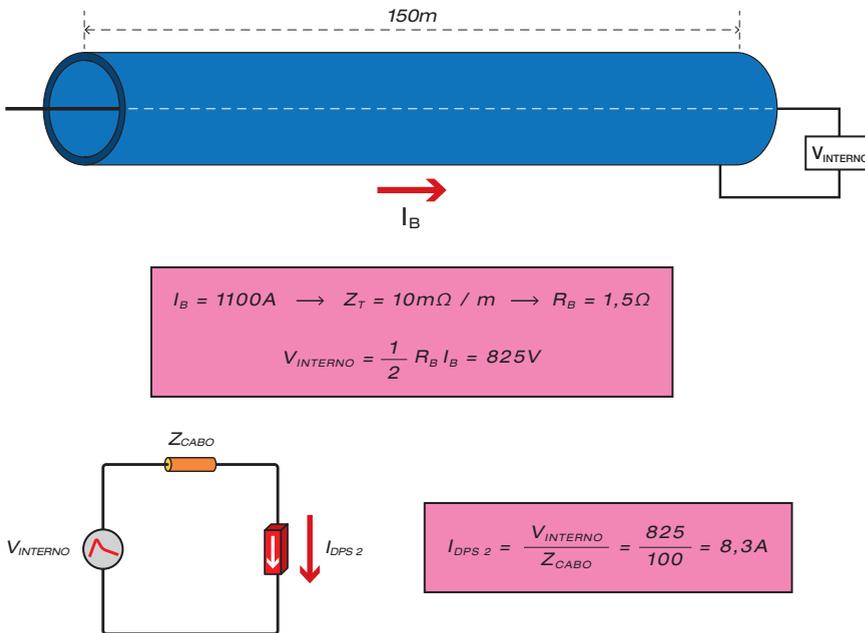


Fig. 6.41 – Cálculo da corrente que circula pelo DPS instalado entre um dos condutores internos e a barra de equalização da edificação. Foi considerado um cabo blindado, com blindagem de fios de cobre trançados, com resistência da blindagem igual a $10m\Omega/m$. A impedância de surto interna do cabo (Z_{CABO}) foi considerada como sendo igual a 100Ω . Descarga principal positiva.

É importante ressaltar que, no caso do cabo subterrâneo, também é importante avaliar se o valor da tensão induzida é superior à TSI do cabo. Se o valor da tensão induzida for superior ao valor da TSI do cabo irão ocorrer disrupções da blindagem para o solo. Valores típicos da TSI são da ordem de 100kV.

No caso analisado, como o comprimento do cabo é pequeno, os valores das tensões induzidas podem ser estimados pelo produto das correntes que circulam na blindagem do cabo multiplicado pela resistência de

aterramento da blindagem. Para o maior valor de corrente (1,1kA correspondente à descarga principal positiva) e considerando o valor da resistência de aterramento igual a 85Ω, a tensão induzida será igual a 94kV, que é inferior ao valor da TSI. Isto significa que no exemplo apresentado não irão ocorrer disrupções da blindagem para o solo.

6.5 - SÍNTESE E ANÁLISE DOS VALORES CALCULADOS

A Tabela 6.2 mostra um resumo dos valores calculados nas simulações realizadas.

TABELA 6.2			
Valores de corrente que circulam pelos DPS de uma edificação obtidos em simulações computacionais (kA)			
CASO	CORRENTE DE DESCARGA		
	Principal positiva (100kA)	Principal negativa (50kA)	Subsequente negativa (25kA)
DESCARGAS DIRETAS NA EDIFICAÇÃO (S1)			
Corrente no DPS de edificação alimentada por rede de baixa tensão trifásica com neutro multiterrado	9,7	---	---
Corrente no DPS de edificação alimentada por rede de baixa tensão trifásica com neutro multiterrado. Uma tubulação metálica enterrada	6,3	---	---
Corrente no DPS de edificação alimentada por rede de baixa tensão trifásica com neutro multiterrado. Três tubulações metálicas enterradas	3,7	---	---
Correntes nos DPS devido à indução nos condutores internos da edificação causada por descarga direta	9,3	4,6	2,3
DESCARGAS NAS PROXIMIDADES DA EDIFICAÇÃO (S2)			
Corrente no DPS instalado em laço formado pelos condutores internos da edificação (edificação sem blindagem).	0,41	0,26	0,16
DESCARGAS DIRETAS NA LINHA QUE ATENDE A EDIFICAÇÃO (S3)			
Corrente que propaga por linha aérea sem provocar disrupções (descarga distante) ¹	0,6	0,6	0,6
Corrente que circula em um DPS instalado no final da linha (descarga distante) ¹	1,2	1,2	1,2
DESCARGAS NAS PROXIMIDADES DAS LINHAS QUE ATENDEM A EDIFICAÇÃO (S4)			
Corrente no DPS de edificação alimentada por rede aérea	2,5	2,0	1,4
Corrente no DPS de edificação alimentada por cabo aéreo blindado de comunicação e sinal	0,020	---	---
Corrente no DPS instalado na blindagem de cabo subterrâneo que alimenta uma edificação	1,1	0,78	0,19
Corrente no DPS instalado no condutor interno de cabo blindado subterrâneo que alimenta uma edificação	0,008	---	---

(1) Os valores de corrente que trafegam pelas linhas devido a descargas que incidem nas mesmas em pontos longe da edificação são de baixo valor, o que significa que as correntes máximas nos DPS instalados nestas linhas ficam limitadas a 1,2kA. No entanto, os valores de corrente nos casos de descargas diretas no poste que alimenta a edificação se aproximam dos valores obtidos nos casos de descargas diretas na edificação (S1).

Os valores mostrados na Tabela 6.2 permitem formular as seguintes conclusões:

- ⊙ O maior valor de corrente no DPS (9,7kA) foi no caso da descarga direta em uma edificação alimentada por rede de baixa tensão com neutro multiaterado e sem tubulações metálicas.
- ⊙ A presença de longas tubulações metálicas enterradas diretamente no solo (e.g., maiores que 100m) reduzem significativamente a corrente que circula pelos DPS. Numa edificação com uma tubulação a corrente é reduzida para 6,3kA e com três tubulações para 3,7kA.
- ⊙ Para o caso das descargas diretas, a forma de onda das correntes que circulam nos DPS é de cauda longa e se aproxima da onda padronizada 10/350μs.
- ⊙ Nos casos das correntes induzidas nos condutores internos, as ondas apresentam cauda curta, se aproximando da onda padronizada 8/20μs.
- ⊙ Nos casos das correntes induzidas na rede externa, as ondas apresentam cauda curta, se aproximando da onda padronizada 8/20μs.
- ⊙ As simulações foram feitas com a onda de corrente de descarga principal positiva de 100kA. Para correntes de descarga de maior valor de pico, as correntes nos DPS serão proporcionalmente maiores.
- ⊙ As correntes induzidas nos condutores internos da edificação também podem atingir valores elevados (da ordem de 9kA) para um laço interno de 50m². O maior valor de corrente foi induzido pela descarga principal positiva.
- ⊙ No caso das tensões induzidas por descargas que incidem nas proximidades das linhas aéreas que alimentam a edificação, o maior valor de corrente foi devido a incidência da descarga principal positiva (2,5kA). Entretanto, este valor é bem próximo do valor induzido pela descarga principal negativa (2kA).
- ⊙ No caso de cabos subterrâneos blindados que atendem a edificação, os valores de corrente induzidas na blindagem

podem atingir valores elevados no caso de solos de alta resistividade.

6.6 - VALORES DE CORRENTES PROPOSTOS NAS NBR 5419 E NBR 5410

A NBR 5419-4 [1] sugere que para a realização do projeto de proteção seja feito um estudo para a determinação dos valores das correntes, se possível com o auxílio de simulações computacionais. Um pequeno roteiro de cálculo aproximado é apresentado na norma. Para os casos nos quais não é possível fazer um estudo específico, a NBR 5419-1 [6] sugere valores típicos que são apresentados e comparados com os valores obtidos nas simulações realizadas.

Uma aproximação sugerida na norma considera que, no caso de uma descarga direta na edificação, cerca de 50% da corrente de descarga flui pela malha de aterramento da edificação e 50% flui pelos condutores e tubulações que atendem a edificação. Para uma edificação atendida por uma rede elétrica de quatro condutores e atingida por uma descarga principal positiva de 200 kA de pico, 100 kA fluem pela malha de aterramento e 25 kA fluem em cada um dos condutores da rede, como mostrado na Fig. 6.42.

Para o caso de uma edificação que, além da rede elétrica, também recebe duas tubulações metálicas enterradas, o critério da NBR 5419 fornece uma corrente de 8,3kA em cada fase da rede, conforme mostrado na Fig. 6.43.

A NBR 5419-1 apresenta duas tabelas (E.2 e E.3) que mostram valores de corrente que circulam pelos DPS para várias situações. Os valores propostos são baseados em medições e também na experiência operativa de várias entidades ao redor do mundo.

Os valores mostrados nas tabelas são função do nível de proteção adotado para a edificação e ordenados em função da fonte de danos considerada. Conforme visto no Capítulo 2, para cada Nível de Proteção são definidos valores de pico máximo para as ondas de corrente. Para comodidade do leitor, são repetidas na Fig. 6.44 as definições das fontes de danos (S1, S2, S3 e S4) e na Tabela 6.3 os valores de corrente associados a cada Nível de Proteção.

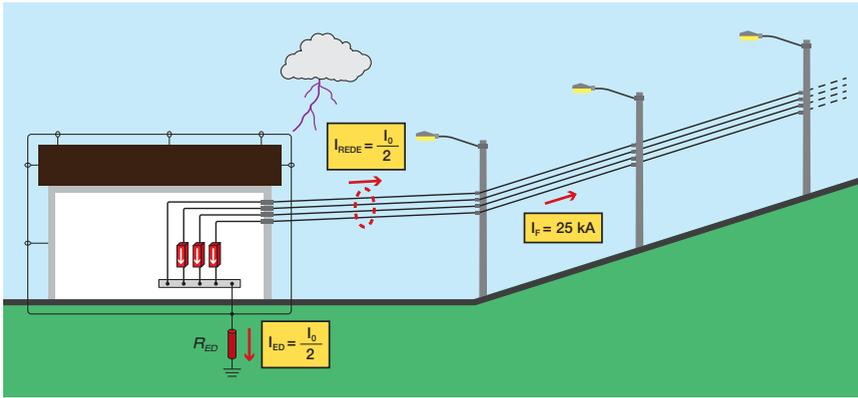


Fig. 6.42 Aproximação proposta na NBR 5419: 50% da corrente de descarga flui pela malha de aterramento da edificação e 50% flui pelos cabos das redes que atendem a edificação. Para uma descarga de 200kA de pico, 25kA circulação por cada um dos DPS ligados nas fases.

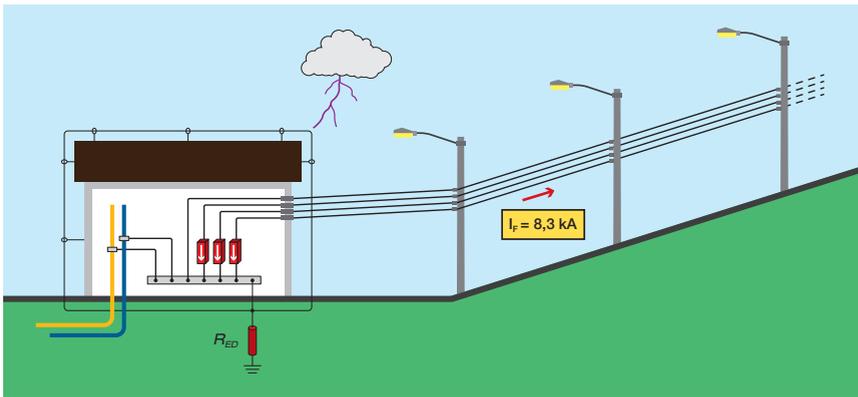


Fig. 6.43 Influência de tubulações metálicas interligadas na malha de aterramento da edificação. A corrente que flui pelos DPS fica reduzida a um terço do valor calculado sem considerar a presença das tubulações enterradas. Para uma corrente de descarga de 200kA de pico, 8,3kA circulação por cada um dos DPS ligados nas fases.

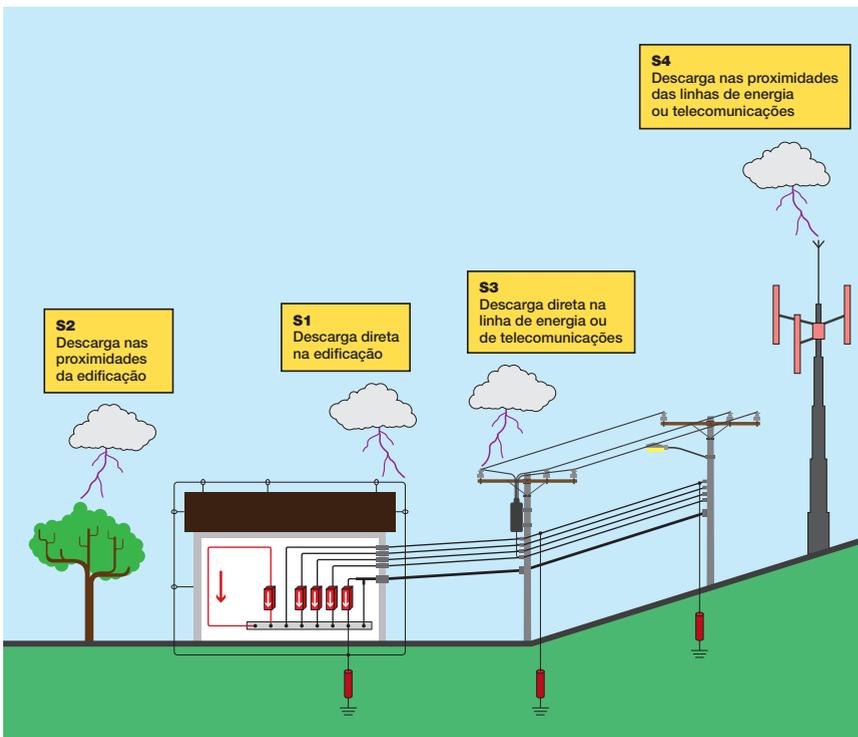


Fig. 6.44 Fontes de danos conforme a NBR 5419.

TABELA 6.3 - Valores de pico das correntes de descarga para cada Nível de Proteção

CORRENTE PRINCIPAL POSITIVA				
PARÂMETROS	NÍVEIS DE PROTEÇÃO			
	I	II	III	IV
VALOR DE PICO (kA)	200	150	100	100
CORRENTE PRINCIPAL NEGATIVA				
VALOR DE PICO (kA)	100	75	50	50
CORRENTE SUBSEQUENTE NEGATIVA				
VALOR DE PICO (kA)	50	37,5	25	25

As Tabelas E.2 e E.3 da NBR 5419-1 são reproduzidas a seguir nas Tabelas 6.4 e 6.5.

TABELA 6.4 - Valores esperados de correntes de surto devido a incidência de descargas nas linhas de baixa tensão. Adaptada da NBR 5419-1 (Tabela E.2)

NÍVEL DE PROTEÇÃO	Descargas diretas e nas proximidades das linhas		Descargas nas proximidades da edificação ^{a)}	Descargas diretas na edificação ^{a)}
	Fonte de danos S ₃ (descarga direta) ^{b)} Forma de onda da corrente: 10/350µs (kA)	Fonte de danos S ₄ (descarga indireta) ^{c)} Forma de onda da corrente: 8/20µs (kA)	Fonte de danos S ₂ (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20µs ^{d)} (kA)	Fonte de danos S ₁ (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20µs ^{d)} (kA)
III E IV	5	2,5	0,1	5
II	7,5	3,75	0,15	7,5
I	10	5	0,20	10

Nota: Os valores de corrente são referentes a uma fase

a) O tamanho e o posicionamento do laço em relação à descarga afetam os valores mostrados na tabela, os quais foram obtidos para um laço curto circuitado, sem blindagem, de 50m², com largura de 5m e distante 1m da parede da edificação. A edificação possui SPDA ($k_c = 0,5$). Para laços e edificações com outras características, os valores devem ser multiplicados pelos fatores K_{S1} , K_{S2} e K_{S3} (Seção B-4 da parte 2 da ABNT 5419-2).

b) Valores típicos para uma descarga que incide no poste mais próximo da edificação. Linha de energia com três fases e neutro.

c) Valores válidos para linhas aéreas. Para linhas subterrâneas os valores devem ser divididos por 2.

d) A indutância e a resistência do laço influenciam bastante a forma de onda da corrente induzida. Quando a resistência do laço é desprezível, a forma de onda da corrente tende a ser 10/350µs. Esse é o caso onde DPS do tipo comutador de tensão (curto-circuitante) é utilizado.

TABELA 6.5 - Valores esperados de correntes de surto devido a incidência de descargas nas linhas de telecomunicações. Adaptada da NBR 5419-1 (Tabela E.3)

NÍVEL DE PROTEÇÃO	Descargas diretas e nas proximidades das linhas		Descargas nas proximidades da edificação ^{a)}	Descargas diretas na edificação ^{a)}
	Fonte de danos S ₃ (descarga direta) ^{b)} Forma de onda da corrente: 10/350µs (kA)	Fonte de danos S ₄ (descarga indireta) ^{c)} Forma de onda da corrente: 8/20µs (kA)	Fonte de danos S ₂ (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20µs ^{d)} (kA)	Fonte de danos S ₁ (corrente induzida) Forma de onda da corrente: 8/20µs ^{d)} (kA)
III E IV	1	0,035	0,1	5
II	1,5	0,085	0,15	7,5
I	2	0,160	0,20	10

Nota: Os valores de corrente são referentes a apenas um dos condutores. Para mais detalhes consultar a Recomendação K.67 da ITU-T [14]

a) O tamanho e o posicionamento do loop em relação à descarga afetam os valores mostrados na tabela que foram obtidos para um laço curto circuitado, sem blindagem, de 50m², com largura de 5m e distante 1m da parede da edificação. A edificação possui SPDA com $K_c = 0,5$. Para laços e edificações com outras características, os valores devem ser multiplicados pelos fatores K_{S1} , K_{S2} e K_{S3} (Seção B-4 da parte 2 da ABNT 5419).

b) Valores referentes a uma linha de cabo não blindado e com vários pares. Para fios externos não blindados (fio *drop*) os valores devem ser multiplicados por 5.

c) Valores válidos para linhas aéreas. Para linhas subterrâneas os valores devem ser divididos por 2.

Os fatores K_{S1} , K_{S2} e K_{S3} , citados nas Tabelas 6.3 e 6.4, e já analisados no Capítulo 2, levam em conta a existência de blindagem proporcionada pelos cabos do SPDA, existência de blindagem interna na edificação e também as técnicas adotadas para se evitar a formação de laços [15].

Se os valores mostrados na Tabela 6.1, obtidos em simulações computacionais, forem comparados com os valores sugeridos na NBR 5419-1 (Tabelas 6.3 e 6.4), será observada uma boa concordância entre eles.

É importante observar que a NBR 5410 [2] também recomenda valores mínimos para a capacidade de condução de corrente dos DPS a serem utilizados em edificações. Os valores de corrente sugeridos na NBR 5410 para DPS instalados nas fases da rede elétrica são relacionados na Tabela 6.6.

A NBR 5410 também fornece dados para a especificação de DPS para proteção de linhas telefônicas. Ela recomenda a utilização de DPS curto-circuitante (e.g., centelhador a gás), seja para instalação nos pares telefônicos, seja para aterramento de blindagens e capas de cabos. A corrente mínima sugerida para o caso de cabos telefônicos com blindagem aterrada é 5kA e

para cabos com blindagem não aterrada é 10kA. No caso de regiões com atividade atmosférica severa, a norma sugere que sejam adotados maiores valores de corrente. A NBR 5410 não especifica a forma de onda de corrente.

Os valores mínimos sugeridos na NBR 5410 são conservativos e trabalham no lado da segurança.

6.7 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo deste capítulo:

- ⊙ Os valores de pico e as formas de onda das correntes que circulam pelos DPS dependem das características da descarga atmosférica, da edificação e das linhas de alimentação;
- ⊙ No caso das correntes induzidas nas linhas, a cauda da onda é de curta duração, ou seja, é mais curta que a cauda da onda de corrente de descarga. Para uma corrente de descarga com forma de onda 10/350μs, a onda de corrente induzida se assemelha a onda padronizada de forma 8/20μs;

TABELA 6.6 (ADAPTADA DA NBR 5410) - Valores de pico das correntes utilizadas nos testes dos DPS

CARACTERÍSTICAS DOS DPS PARA PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES		ORIGEM DOS SURTOS		
		Descargas diretas e transmitidos pela linha externa	Descargas diretas na edificação	Transmitidos pela linha externa de alimentação
FORMA DE ONDA DAS CORRENTES UTILIZADA NOS ENSAIOS	I_n	8/20μs	----	8/20μs
	I_{imp}	10/350μs	10/350μs	----
VALOR DE PICO MÍNIMO DA CORRENTE DO DPS INSTALADO ENTRE FASE E NEUTRO OU ENTRE FASE E TERRA (PE)		$I_{imp} = 12,5kA - I_n = 5kA$	$I_{imp} = 12,5kA$	$I_n = 5kA$
CLASSE		Classes I e II simultaneamente	Classe I	Classe II

- ☑ No caso das correntes induzidas em laços internos, a cauda da onda também é de curta duração se a resistência do laço não for desprezível. Para laços de resistência desprezível, a onda de corrente se aproxima da forma de onda da corrente de descarga atmosférica;
- ☑ No caso das correntes originadas em descargas diretas, seja nas linhas ou na edificação, as caudas das ondas são longas e a onda se aproxima da onda da corrente de descarga atmosférica;
- ☑ Nas redes com cabos enterrados (linhas subterrâneas), as correntes induzidas nas blindagens dos cabos podem atingir valores elevados;
- ☑ Plataformas computacionais que simulam circuitos elétricos são ferramentas úteis para o estudo da distribuição de correntes em edificações e redes atingidas por descargas atmosféricas diretas;
- ☑ Os valores calculados neste capítulo são coerentes com os valores típicos sugeridos na NBR 5419-1;
- ☑ Nas simulações realizadas, os DPS em condução foram modelados como tendo uma impedância desprezível. As referências [16] e [17] apresentam resultados de medições e simulações mais elaboradas, que mostram as correntes que circulam pelos DPS instalados em redes de baixa tensão;
- ☑ A NBR 5410 [2] recomenda valores mínimos para as capacidades de condução de corrente dos DPS a serem utilizados em edificações.

DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS)

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos relativos aos Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). São analisados os componentes que compõem um DPS, as técnicas de instalação e os parâmetros necessários para a sua correta especificação.

7.1 - O QUE É E COMO FUNCIONA UM DPS

A ABNT 5419-4 [1] define DPS como: “Dispositivo destinado a limitar as sobretensões e desviar correntes de surto. Contém pelo menos um componente não linear”. A mesma norma classifica o DPS em dois tipos: comutador de tensão e limitador de tensão.

Um DPS comutador de tensão ideal pode ser representado por uma chave conectada em paralelo com o circuito ou equipamento que se quer proteger. Essa chave é comandada pelo valor da tensão nos seus terminais. Se a tensão está abaixo de certo limite, a chave permanece aberta. No entanto, se a tensão atinge o limite, a chave fecha automaticamente, conforme mostrado na Fig. 7.1. O limite especificado para o fechamento da chave (U_p) deve ser menor que o valor de tensão suportável pelo equipamento protegido (U_w). É importante observar que a tensão de serviço contínuo (U_c) não pode provocar o fechamento da chave.

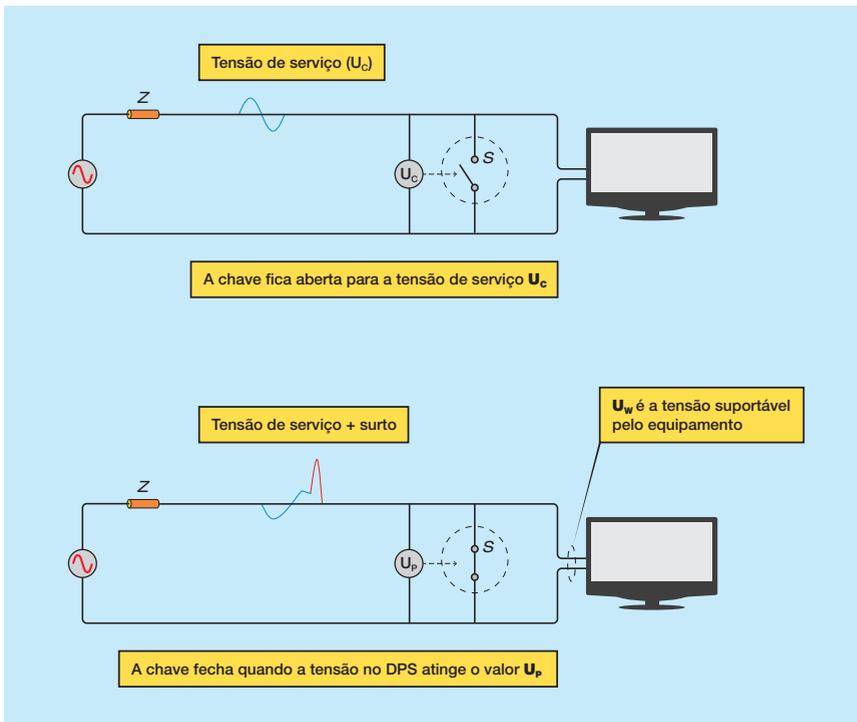


Fig. 7.1 – Atuação simplificada de um DPS. Ele não atua para a tensão de serviço (U_c) e atua se a tensão atingir o valor (U_p), que deve ser inferior ao valor suportável pelo equipamento (U_w).

A Fig. 7.2(A) mostra a situação onde a chave está fechada porque o valor da tensão da fonte somado ao valor da tensão de um surto presente na linha atingiu o valor U_p . Nessa situação, circula pelo DPS uma parcela de corrente proveniente da fonte (I_f) da fonte e outra do surto. Considera-se aqui que a corrente do surto é igual à corrente nominal do DPS (I_n).

A Fig. 7.2(B) mostra a situação onde a corrente do surto já se extinguiu e circula pelo DPS apenas a corrente subsequente da fonte (I_f). Caso a corrente que o DPS seja capaz de interromper por si mesmo (I_{fi}) seja maior que a corrente subsequente da fonte (I_f), a chave interrompe a corrente da fonte e abre o circuito, restabelecendo a condição normal do serviço (ver Fig. 7.2.(C)).

A análise realizada permite identificar alguns dos principais parâmetros envolvidos na especificação de um DPS:

- ✓ Máxima tensão de serviço contínuo da linha (U_c);
- ✓ Tensão de proteção do DPS (U_p);
- ✓ Máxima tensão que o equipamento suporta (U_w);
- ✓ Corrente nominal do DPS (I_n);
- ✓ Corrente subsequente da fonte (I_f);
- ✓ Máxima corrente subsequente que o DPS consegue interromper (I_{fi}).

Conforme visto, um DPS comutador de tensão apresenta uma baixa tensão entre seus terminais quando no estado de condução. Já um DPS limitador de tensão apresenta uma impedância não-linear no estado de condução, resultando em uma tensão entre seus terminais que é próxima da sua tensão de proteção (U_p). A Fig. 7.3 ilustra os dois tipos de DPS.

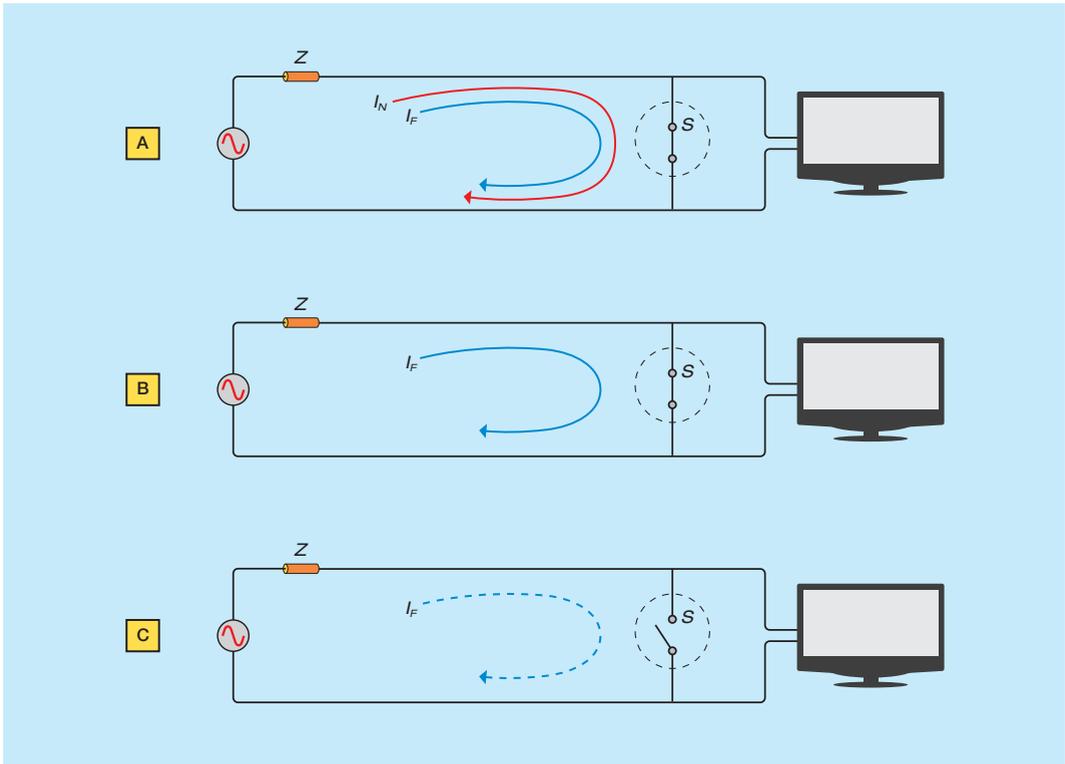


Figura 7.2 – Correntes drenadas por um DPS. Ele deve drenar a corrente do surto (I_n) e interromper a corrente de curto-circuito da fonte (I_f) para restabelecer o serviço.

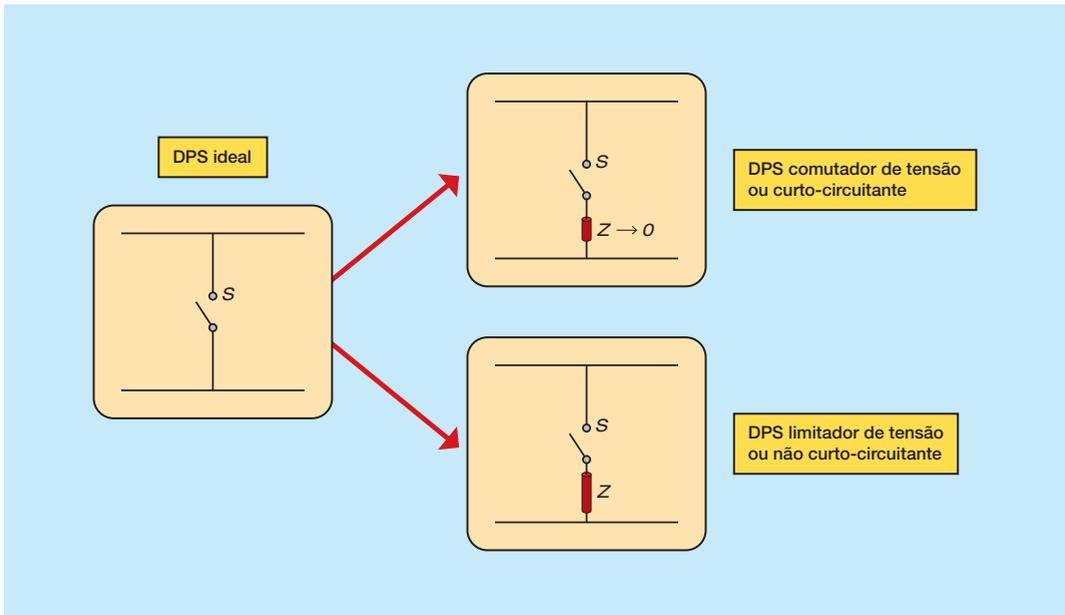


Figura 7.3 – DPS comutador de tensão e DPS limitador de tensão.

É importante fazer a distinção entre um DPS e um componente de proteção (e.g., centelhador, varistor ou diodo). Um DPS contém um ou mais componentes de proteção encapsulados em um invólucro seguro e apropriado para a instalação, o que inclui um sistema de fixação mecânica e conectores elétricos apropriados para a aplicação. Além disso, é comum que o DPS seja capaz de indicar o seu fim de vida útil, facilitando a manutenção. Dados os aspectos de segurança envolvidos, é altamente recomendável que um DPS esteja em conformidade com as normas aplicáveis.

A Fig. 7.4 mostra um DPS destinado à instalação em rede elétrica de baixa tensão, instalado normalmente no quadro de força. Observe-se que, além do varistor, ele contém também um desconector térmico (para o caso de sobreaquecimento), contatos para sinalização remota (normalmente aberto e normalmente fechado), uma bandeirola frontal para sinalização local, conectores para instalação dos condutores e sistema de fixação no painel (padrões DIN e NEMA). Além disso, o seu desenho mecânico é similar ao de um disjuntor termomagnético, o que facilita a sua instalação em quadros de força.

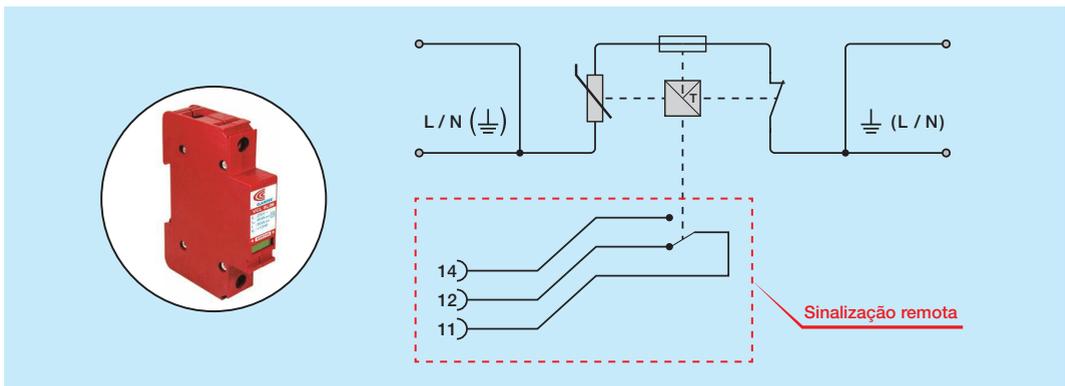


Figura 7.4 – Exemplo de DPS utilizado em rede elétrica de baixa tensão e seu diagrama elétrico.

7.2 - COMPONENTES DE UM DPS

Essa seção apresenta de forma sucinta os principais componentes utilizados em DPS, como centelhadores, varistores e diodos. O texto foi adaptado da referência [2]. A Fig. 7.5 mostra a simbologia utilizada para representar os componentes mais usuais,

enquanto a Fig. 7.6 mostra fotografias destes componentes. Além dos componentes descritos nas Figs. 7.5 e 7.6, existem no mercado DPS constituídos por outros tipos de componentes, tais como tiristores e centelhadores especiais, esses últimos capazes de extinguir valores significativos da corrente de seguimento de 60 Hz.

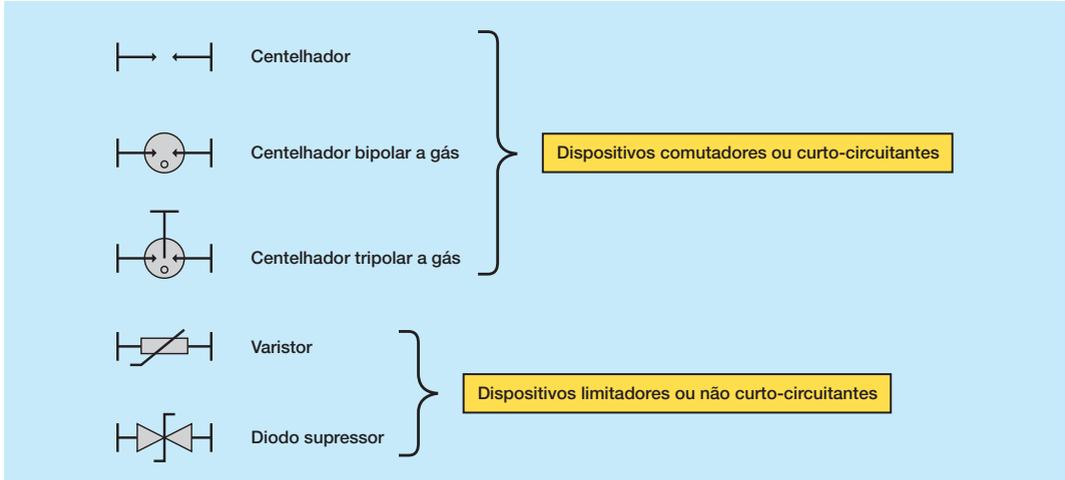


Figura 7.5 – Exemplos de componentes de proteção utilizados nos DPS.



Figura 7.6 – Fotografias de componentes de proteção utilizados nos DPS.

7.2.1 - CENTELHADORES

Os centelhadores mais simples são constituídos de dois eletrodos no ar. Ao se aplicar uma sobretensão entre esses eletrodos, a rigidez dielétrica do ar é rompida e forma-se um arco elétrico entre eles. A tensão entre os dois eletrodos depois que o arco se forma é relativamente baixa. A sobretensão que causa o arco elétrico é chamada tensão de disparo. Como os eletrodos estão no ar, a tensão de disparo depende das condições ambientais, como pressão, temperatura e umidade. Em decorrência dessas desvantagens, os centelhadores a ar foram substituídos pelos centelhadores a gás em muitas aplicações.

A diferença do centelhador a gás em relação ao centelhador a ar consiste na instalação dos eletrodos dentro de uma câmara cheia de um gás nobre (argônio e neônio) a baixa pressão. O uso do gás nobre justifica-se porque ele não reage com o metal dos eletrodos. O uso da câmara fechada permite que o desempenho do centelhador a gás não seja influenciado pelas variações nas condições ambientais. Já a baixa pressão na câmara possibilita obter uma grande estabilidade para a tensão de disparo, pois permite que o espaçamento entre os eletrodos seja muito maior do que no caso do centelhador a ar, para uma mesma tensão de disparo nominal. Por exemplo, o antigo centelhador a ar para telecomunicações tinha uma distância entre eletrodos (*gap*) de 0,076 mm, enquanto um centelhador a gás equivalente tem um *gap* de cerca de 1mm. A precisão de um *gap* maior é muito mais fácil de ser obtida em um processo industrial, contribuindo para a maior uniformidade da tensão de disparo do centelhador a gás. Além disso, um *gap* maior evita que pequenos fragmentos de material se soltem dos eletrodos durante uma descarga curte-circuitem o centelhador.

Para tensões abaixo da sua tensão de disparo, a resistência do centelhador a gás é da ordem de $10G\Omega$, enquanto na condição de condução (arco elétrico) ela cai para cerca de $0,1\Omega$. A capacitância de um centelhador a gás é muito baixa, da ordem de alguns pF. Essa característica torna esse componente especialmente adequado para a proteção de circuitos por onde trafegam sinais

de comunicação de alta frequência. Os centelhadores podem drenar correntes muito elevadas e sua tensão de disparo nominal pode variar de 70V a vários kV.

Quando sujeito a surtos de elevada taxa de crescimento, o centelhador apresenta variação em sua tensão de disparo, devido ao tempo para ionização do gás. No entanto, a tensão de disparo se mantém constante para baixas taxas de crescimento da tensão aplicada. A tensão de disparo nominal é normalmente medida a uma taxa de 100 V/s e é também conhecida como “tensão de disparo em corrente contínua” ou apenas V_{cc} .

Uma das limitações para o uso de centelhadores em linhas de potência é sua dificuldade em extinguir o arco elétrico após a passagem do surto. Isso ocorre porque, após a extinção da corrente de surto, a corrente subsequente da fonte (I_f) mantém o centelhador ionizado causando um curto-circuito na linha. A elevada corrente que flui por esse curto-circuito impede que o centelhador restabeleça o isolamento do circuito. Portanto, um centelhador não deve ser utilizado diretamente em uma rede elétrica de baixa tensão. Cabe ressaltar que existem centelhadores que são especialmente projetados para uso em linhas de potência em corrente alternada, onde mecanismos sofisticados de expulsão e resfriamento do arco elétrico possibilitam que o mesmo seja extinto na passagem da corrente por zero.

Normalmente os surtos em pares trançados são induzidos em modo comum, ou seja, entre cada fio e a terra. No entanto, os surtos em modo comum podem ser convertidos em modo diferencial (entre os dois fios) devido ao rompimento do isolamento de um dos fios para a terra ou em função de operação assíncrona de centelhadores bipolares. Nesse último caso, mais comum, o centelhador de um fio atua antes do centelhador do outro fio, originando um surto entre os fios.

A Fig. 7.7 mostra dois circuitos, sendo o Circuito A com dois centelhadores bipolares (um para cada fio) e o Circuito B com um centelhador tripolar, onde os três eletrodos (Fio 1, Fio 2 e terra) estão em uma mesma câmara. Nessas condições, o surto induzido em modo comum nos fios do Circuito A pode

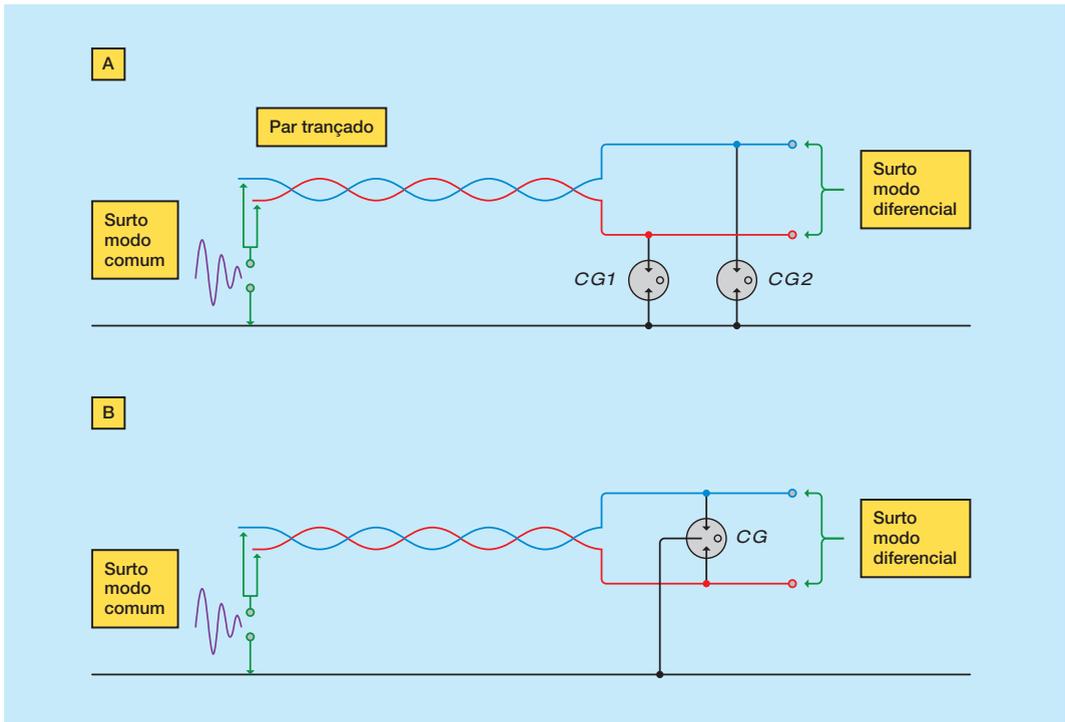


Fig. 7.7 –Conversão de surto em modo comum para modo diferencial em função de operação assíncrona de centelhadores bipolares.O centelhador tripolar evita esse problema

ser convertido em modo diferencial em função da operação assíncrona dos centelhadores CG1 e CG2. No caso do Circuito B, o surto induzido em modo comum provoca a ionização da câmara única do centelhador tripolar, o que resulta em um surto em modo diferencial desprezível.

7.2.2 - VARISTORES

Após um tratamento térmico (ou processo de sinterização) do óxido de zinco associado com outros óxidos metálicos (e.g., óxido de antimônio, bismuto, cobalto e manganês) é obtido um material cerâmico que apresenta uma resistência ôhmica dependente da tensão aplicada. Este material é denominado varistor ou MOV (*Metal Oxide Varistor*).

Em baixa tensão a resistência do varistor é da ordem de $1\text{m}\Omega$ e a sua resistência aparente cai para menos de 1Ω durante a condução de uma corrente impulsiva elevada. O varistor é normalmente caracterizado pela tensão desenvolvida entre os seus terminais quando ele é percorrido por uma corrente de 1mA . Essa tensão é conhecida

como “tensão de varistor” ou “tensão de referência”.

Uma desvantagem do varistor é que a tensão da rede provoca a circulação permanente de uma corrente de fuga, de valor muito baixo (μA) quando o componente é novo, mas que vai aumentando de valor ao longo do tempo. Essa corrente de fuga aquece o componente e pode levar a uma degradação térmica. Dessa forma, é recomendável que um varistor seja instalado em uma linha de potência acompanhado de um dispositivo de segurança que desliga o varistor em caso de sobreaquecimento.

Como o varistor mantém uma tensão residual entre os seus terminais, ele não causa um curto-circuito na linha. Essa característica torna esse componente particularmente apropriado para a proteção de linhas de potência, já que ele interrompe a corrente após o surto. Além disso, há varistores capazes de drenar várias dezenas de kA . Essas características fazem com que os varistores sejam largamente utilizados em sistemas elétricos de potência, utilização

essa que vai desde os pequenos varistores na entrada de força dos equipamentos de uso doméstico, até os grandes para-raios utilizados nas subestações de alta tensão. Os varistores possuem capacitância elevada (da ordem de nF), o que frequentemente inviabiliza o seu uso em circuitos de comunicação que operam em alta frequência.

7.2.3 - DIODOS

Existem diodos projetados para conduzir correntes de surto no sentido reverso, como um diodo Zenner. São também denominados diodos supressores de surtos e frequentemente dois diodos são montados juntos em um mesmo encapsulamento, com polaridades opostas. Essa montagem confere ao conjunto uma característica bidirecional.

Para os diodos com tensão nominal até 6V, o mecanismo de condução é o efeito Zener. Acima deste valor, o principal mecanismo é o efeito avalanche. São encontrados comercialmente diodos de proteção com tensão nominal de 3 a 200V e corrente de surto até 10kA (onda 8/20 μ s).

A capacitância dos diodos supressores de surtos é da ordem de dezenas de pF, embora se observe uma variação considerável dependendo do projeto do dispositivo. De uma forma geral, a capacitância dos diodos supressores de surtos não inviabiliza o uso desses componentes em circuitos que trabalham com alta frequência, muito embora seja recomendável realizar uma análise de cada caso específico.

Uma característica muito positiva do diodo é que a sua atuação não é sensível à taxa de crescimento da tensão aplicada. Além disso, os principais parâmetros do diodo podem ser determinados a partir do projeto do componente, i.e., o diodo pode ser projetado de forma customizada para uma determinada aplicação. Essas características, aliadas à sua baixa capacitância, tornam o diodo um componente adequado para a proteção de circuitos eletrônicos.

7.2.4 - DPS HÍBRIDO OU COMBINADO

Para linhas de comunicação onde trafegam sinais de alta frequência, um diodo adequa-

damente selecionado pode ser a melhor opção. No entanto, a instalação de um diodo em uma linha muito exposta a surtos pode danificar o diodo, dada a sua capacidade de corrente ser relativamente baixa. Nesse caso, o diodo pode entrar em curto-circuito e proteger o equipamento a jusante, mas a linha ficará fora de serviço.

Uma alternativa comumente utilizada é a combinação de diferentes componentes em um arranjo híbrido, que possui um diodo e um centelhador no mesmo circuito. A Fig. 7.8(A) mostra um arranjo deste tipo, no qual a condição de coordenação $V_d > 1,2V_{CC}$ deve ser observada, onde V_d é a tensão de operação do diodo e V_{CC} é a tensão de disparo em corrente contínua do centelhador. O fator 1,2 visa comportar a variação de V_{CC} em um lote de produção, que normalmente é de 20%.

Nesse caso, um surto com alta taxa de crescimento de tensão causa a atuação do diodo, o que limita a tensão a jusante na sua tensão de proteção. Decorrido um pequeno intervalo de tempo (da ordem de alguns μ s), o centelhador a gás atua e drena a maior parte da energia do surto. Observe-se que o diodo drenará a corrente do surto apenas durante o tempo necessário para o centelhador atuar. Caso não houvesse o centelhador, o diodo poderia ser danificado pela energia do surto. Por outro lado, se houvesse apenas o centelhador na linha, a sua elevada tensão de disparo em rampa rápida poderia danificar o equipamento. De certa forma, nessa configuração o diodo protege o equipamento e o centelhador protege o diodo.

No exemplo considerado a tensão de operação do diodo é maior do que a tensão de disparo em corrente contínua do centelhador. No entanto, nem sempre essa condição pode ser satisfeita, pois os centelhadores a gás apresentam um limite inferior para a sua tensão de disparo que é inerente à tecnologia. Nesse caso, é necessário introduzir um componente em série com a linha, entre o centelhador e o diodo, de forma a garantir a coordenação entre esses componentes.

Essa situação é mostrada na Fig. 7.8(B), onde um resistor foi inserido no circuito.

A condição de coordenação é $V_D + R \times I_D > 1,2V_{CC}$, onde R é a resistência do resistor e I_D é a corrente nominal do diodo. Essa condição garante que o centelhador irá atuar quando a corrente drenada pelo diodo atingir o seu valor nominal.

Ao utilizar um resistor para a coordenação entre dois componentes de proteção, é inevitável haver uma perda de sinal (perda de inserção). Dessa forma, as características dos componentes devem ser escolhidas de forma a minimizar o valor da resistência necessária. Por exemplo, um resistor de 20Ω em série com uma linha ADSL (*Asynchronous Digital Subscriber Line*) causa uma perda de inserção de 0,35dB.

Quando a capacitância paralela do diodo representar um problema maior de perda por inserção, uma solução bastante praticada é inserir o diodo em uma ponte retificadora. A capacitância resultante será a da ponte, que é bem menor do que a capacitância do diodo. Já existe disponível diodo e ponte retificadora juntos, montados em um mesmo encapsulamento.

7.2.5 - OUTRAS TECNOLOGIAS DE COMPONENTES DE PROTEÇÃO

Esta seção descreveu as principais tecnologias de componentes de proteção. No entanto, cabe observar que existe no mercado outras tecnologias, muitas das quais consistem em variantes das tecnologias apresentadas nessa seção. Uma análise abrangente dessas tecnologias foge ao escopo desse capítulo, de forma que serão brevemente descritas, a título de exemplo, algumas daquelas que são mais utilizadas:

- ⊙ **Centelhador a ar com disparo forçado:** Trata-se de um centelhador com *gap* de ar (*spark-gap*) cujo disparo é provocado por um circuito dedicado que produz uma pequena centelha que ioniza o *gap* principal. O objetivo dessa tecnologia é associar a capacidade de corrente do centelhador a ar com uma tensão de disparo mais precisa. Esse componente é utilizado em DPS Classe I, conforme será visto na Seção 7.4.
- ⊙ **Centelhadores a gás combinados:**

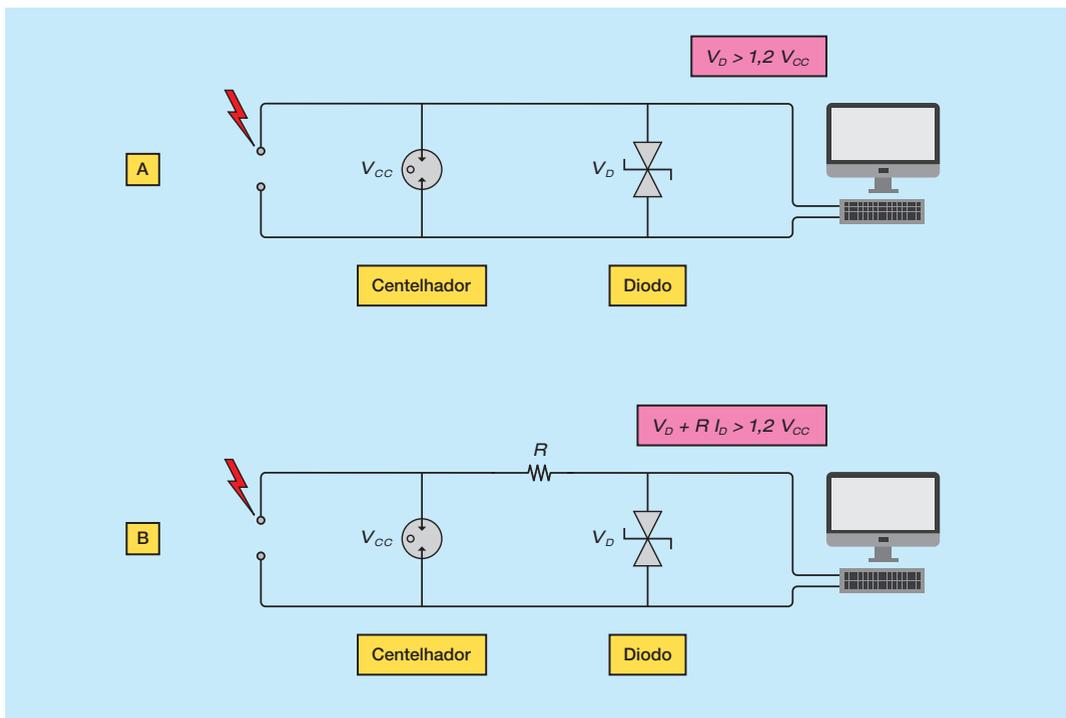


Fig. 7.8 - Exemplo de coordenação entre centelhador a gás e diodo, formando um DPS híbrido.

Trata-se da montagem em série de diversos centelhadores a gás, com capacitores ou varistores em paralelo com cada centelhador. Os componentes em paralelo controlam a distribuição da tensão em cada centelhador, possibilitando o controle da tensão de disparo do conjunto. A principal vantagem desse arranjo é associar a elevada capacidade de corrente do centelhador a gás com uma elevada capacidade de interromper a corrente subsequente ao surto, através da soma das tensões de arco dos diversos centelhadores.

☑ **Varistor com desconector térmico:** Trata-se da incorporação de um desconector térmico ao corpo de um varistor, resultando em um componente de três pinos. A vantagem é obtida pela proximidade do desconector com o varistor, o que garante uma atuação precisa do desconector térmico.

☑ **Arranjo de diodos (*diode array*):** Trata-se de uma associação de diodos, visando maximizar o desempenho do conjunto. Um arranjo usual consiste na montagem de um diodo de proteção em uma ponte formada por diodos retificadores. A principal vantagem desse arranjo é a redução da capacitância apresentada pelo conjunto, a qual é relevante para aplicações em circuitos

com sinais de banda larga.

☑ **Circuito integrado de proteção:** Trata-se de um circuito integrado projetado para atuar como componente de proteção. Usualmente contém tiristores e diodos em um único encapsulamento, cujas características de atuação são otimizadas para uma determinada aplicação. Normalmente esses componentes são utilizados em placas de circuito impresso, visando prover uma proteção fina para equipamentos eletrônicos.

7.3 - INSTALAÇÃO DE DPS

Um DPS deve ser instalado sempre que existir a possibilidade de um surto atingir um equipamento ou instalação e a intensidade estimada do surto for superior ao valor suportável pelo equipamento ou instalação.

7.3.1 - ONDE INSTALAR UM DPS

Os DPS devem ser instalados nas fronteiras entre ambientes, por exemplo, entre a área externa e interna de uma edificação e na transição entre uma linha aérea e uma subterrânea. Pode também ser necessário instalar DPS nas entradas de equipamentos sensíveis. A Fig. 7.9 mostra a instalação de DPS nas transições de áreas de exposição e junto a equipamento.

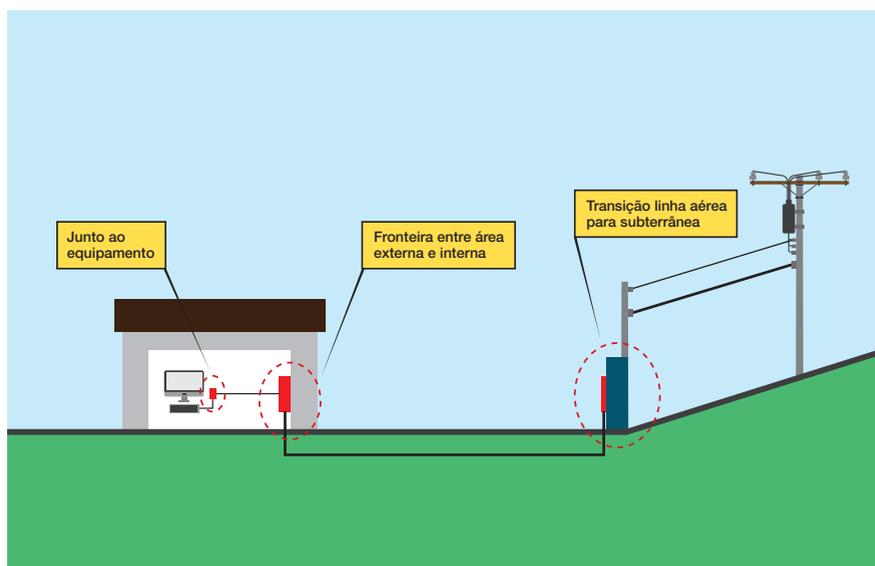


Figura 7.9
Instalação de DPS nas fronteiras entre áreas de exposição e junto a equipamento sensível.

O grau de exposição do local onde será instalado o DPS define a sua capacidade de corrente: quanto maior o grau de exposição, maior deve ser a capacidade de condução de corrente. A Fig. 7.10 ilustra a instalação coordenada de DPS em uma linha de energia que alimenta uma edificação. Um DPS Classe I tem uma suportabilidade de corrente superior ao DPS Classe II, que tem capacidade superior ao DPS Classe III. Essas classes são definidas na Seção 7.4.

7.3.2 - COMO INSTALAR UM DPS

A forma de instalação do DPS pode resultar em tensões a jusante do DPS que são significativamente maiores do que a tensão de proteção do DPS (U_p). Essas tensões são aplicadas ao equipamento a ser protegido e podem danificá-lo, mesmo que o nível de resistibilidade do equipamento (U_w) seja superior a U_p . As principais causas dessas sobretensões são: (i) comprimento dos cabos de conexão; (ii) laço a jusante do DPS; e (iii) reflexão de onda. A seguir são descritas técnicas de instalação visando mitigar essas sobretensões.

7.3.2.1 - COMPRIMENTO DOS CABOS DE CONEXÃO

Um fator muito importante em uma instalação é o comprimento dos cabos utilizados para a conexão do DPS. Cada cabo tem uma indutância própria que, quando percorrida por uma corrente impulsiva, dá origem a uma tensão indutiva que pode atingir valores significativos. A Fig. 7.11 ilustra essa situação, onde a tensão desenvolvida nos cabos ($\Delta U = V_1$ e V_2) também é aplicada ao equipamento a ser protegido. A tensão resultante ($U_{p/f}$) é a tensão de proteção efetiva do DPS e pode ultrapassar o nível de resistibilidade do equipamento (U_w).

Se o DPS for do tipo limitador (e.g., varistor), a tensão resultante $U_{p/f}$ pode ser calculada de forma conservativa por $U_{p/f} = \Delta U + U_p$. Como os valores de pico da tensão indutiva ΔU e de U_p ocorrem em instantes de tempo um pouco diferentes, fazer a soma desses valores de pico implica em uma margem de segurança.

Se o DPS for do tipo comutador (e.g, centelha-

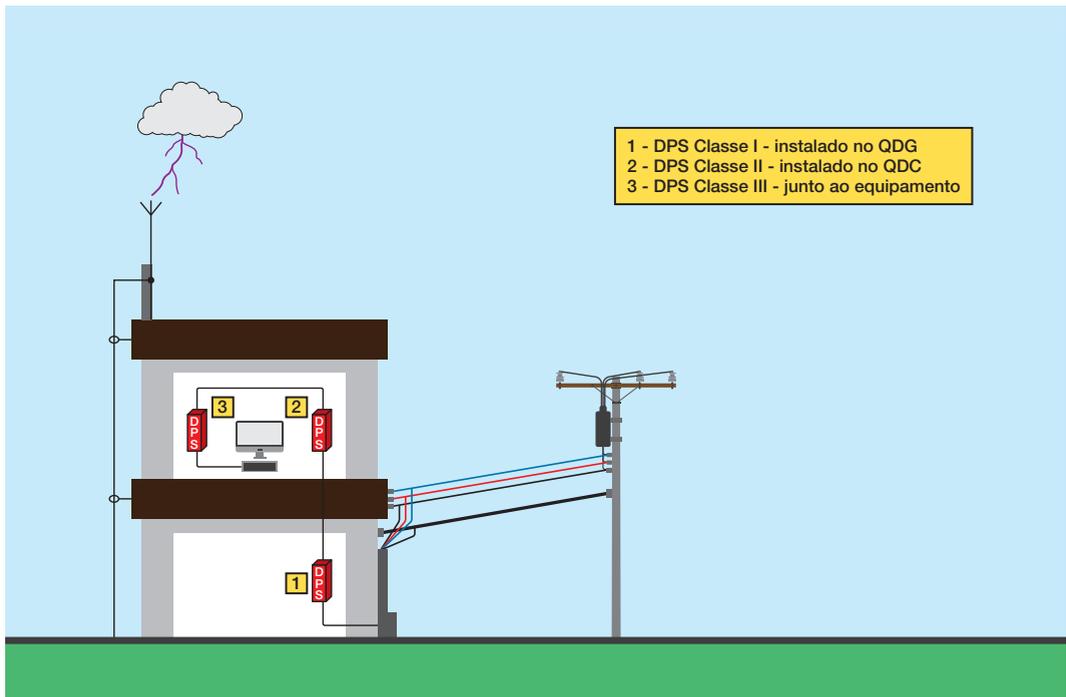


Figura 7.10 –Exemplo de instalação de DPS. As Classes de DPS são descritas na Seção 7.4.

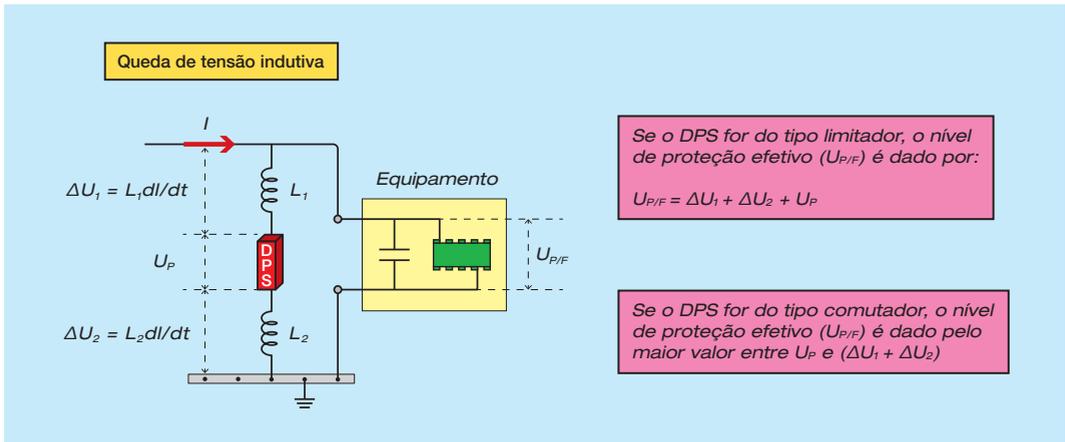


Fig. 7.11 – Instalação ruim: a tensão indutiva ΔU é aplicada ao equipamento.

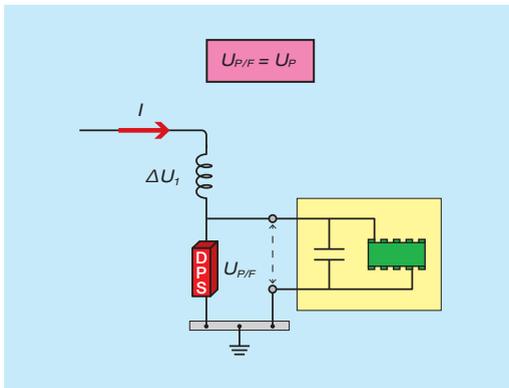


Fig. 7.12 – Instalação boa: a tensão indutiva ΔU não é aplicada ao equipamento.

dor a gás), o valor de pico de ΔU ocorre depois que o DPS atua, enquanto o valor de pico de U_p ocorre antes da atuação do DPS. Portanto, a tensão de proteção do DPS é determinada pelo maior valor entre ΔU e U_p .

O valor de pico da tensão indutiva ΔU depende da taxa de variação da corrente que percorre os cabos de conexão do DPS, a qual pode ser muito diferente da taxa de variação da corrente da descarga atmosférica. Quando não houver dados para calcular o valor esperado desta tensão indutiva, a NBR 5419-4 [1] sugere utilizar o valor de 1kV/m.

A tensão indutiva ΔU pode ser significativamente reduzida pela forma de instalação mostrada na Fig. 7.12. Observe-se que, nesta forma de instalação, a tensão indutiva não é mais aplicada a jusante do DPS.

7.3.2.2 - LAÇO A JUSANTE DO DPS

A existência de um laço formado pelos cabos a jusante do DPS também pode adicionar uma sobretensão à tensão residual do DPS. A Fig. 7.13(A) ilustra essa situação, onde a corrente de uma descarga atmosférica que flui por um condutor de descida induz uma tensão U_1 no laço formado a jusante do DPS. Esse tipo de sobretensão é facilmente controlada ao se reduzir a área do laço, o que pode ser feito aproximando-se os condutores que vão até o equipamento, conforme ilustrado na Fig. 7.13(B). Caso seja viável, recomenda-se que os cabos que vão do DPS até o equipamento sejam trançados. Os Capítulos 3 e 5 apresentam diversas possibilidades para reduzir a exposição de um laço às tensões induzidas por descargas atmosféricas.

7.3.2.3 - REFLEXÃO DE ONDA

Se o comprimento dos cabos entre o DPS e o equipamento for longo o suficiente para que os cabos se comportem como linha (ver Cap. 3), a onda de tensão se propaga pelos cabos e reflete nos terminais do equipamento. O resultado é uma tensão oscilatória na porta do equipamento, cujo valor de pico pode atingir o dobro da tensão de proteção do DPS ($2 \times U_{p/f}$).

A Fig. 7.14 ilustra a sobretensão resultante da reflexão de onda na porta do equipamento. Embora essa reflexão dependa da impedância apresentada pela porta do equipamento (ver Cap. 3) e também da existên-

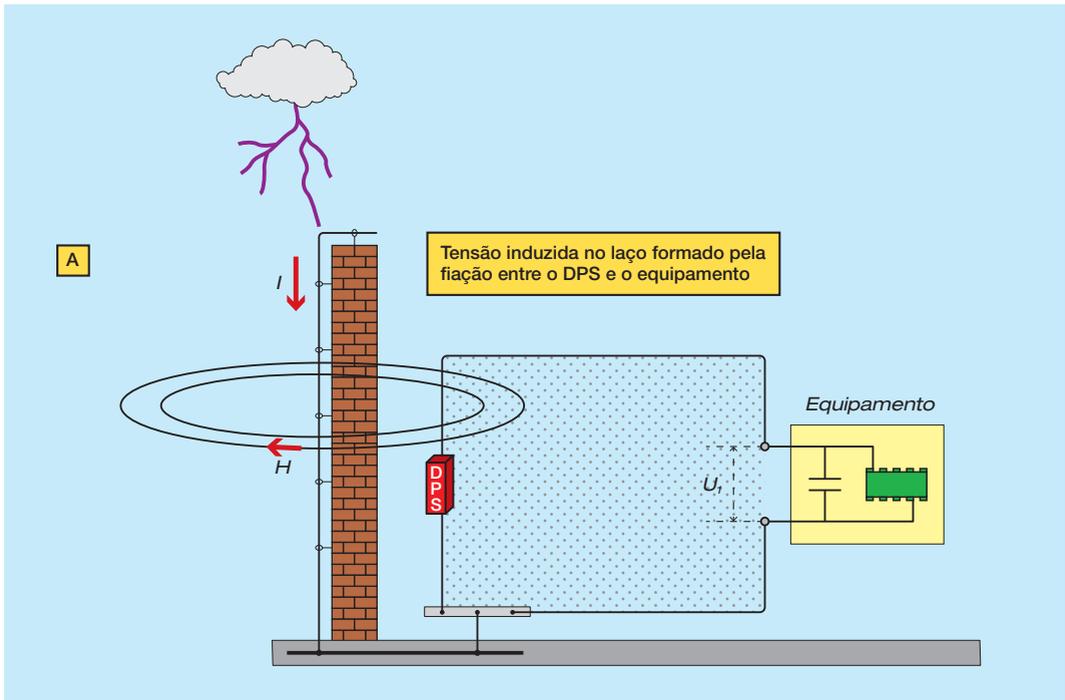
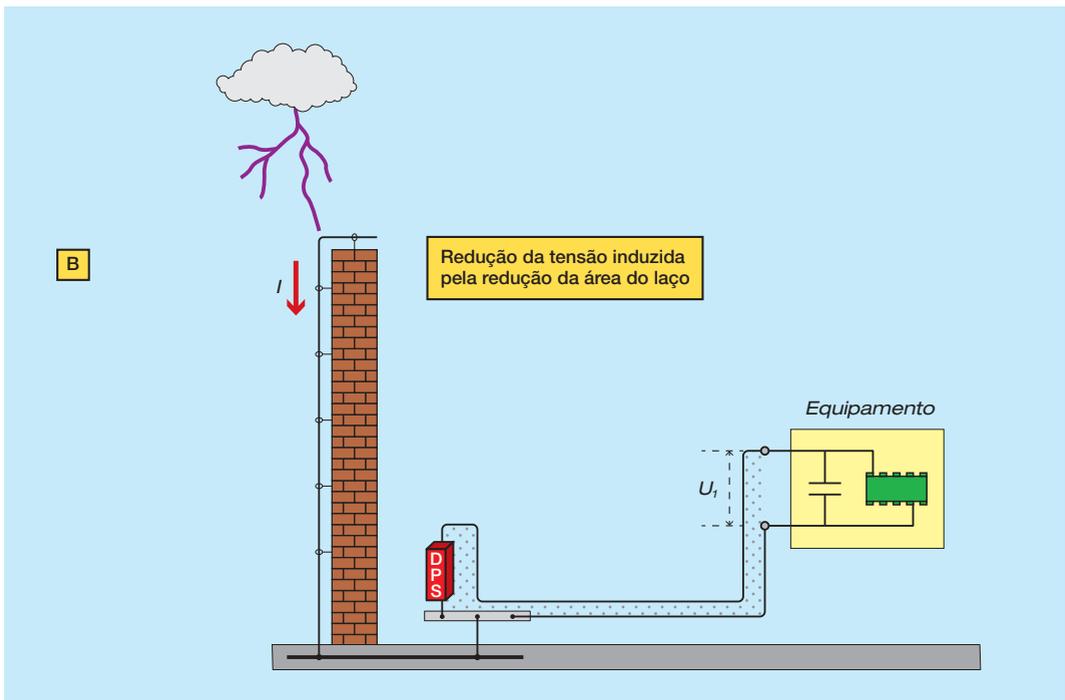


Fig. 7.13 – (A) Instalação ruim: laço grande; (B) Instalação boa: laço pequeno.



cia de derivações no circuito considerado, a NBR 5419 fornece um critério conservativo para se considerar essas sobretensões.

Segundo esse critério, se o comprimento dos cabos é desprezível, a máxima tensão esperada na porta do equipamento é a tensão de

proteção efetiva do DPS ($U_{p/f}$). Esse caso se aplica a DPS instalados no circuito de entrada do próprio equipamento. Para DPS instalados até 10m do equipamento, a máxima tensão aplicada ao equipamento é considerada como $1,25 \times U_{p/f}$. Já para DPS instalados há mais de 10 m do equipamento, considera-se que ocorre uma reflexão completa e a máxima tensão aplicada ao equipamento é $2 \times U_{p/f}$. O quadro da Fig. 7.14 mostra a aplicação desse critério na seleção da tensão de proteção efetiva do DPS, onde se observa que a tensão induzida no laço (U_1) é considerada apenas para circuitos com comprimento superior a 10m. Note-se que U_w é o nível de resistibilidade do equipamento.

7.3.3 - ESQUEMAS DE INSTALAÇÃO DE DPS

Os DPS devem ser instalados em todos os cabos e serviços metálicos que não são diretamente aterrados nos limites entre ZPRs, incluindo a entrada da edificação (limite entre ZPR 0 e ZPR 1). Esse princípio vale para fases, neutro, cabos de telecomunicação e blindagens de cabos. As Figs. 7.15 a 7.17 mostram as situações mais usuais.

Cabe ressaltar que o DPS instalado entre neutro e PE na Fig. 7.16(B) deve possuir capacidade para drenar a corrente de surto total, somadas as capacidades dos DPS instalados nas fases.

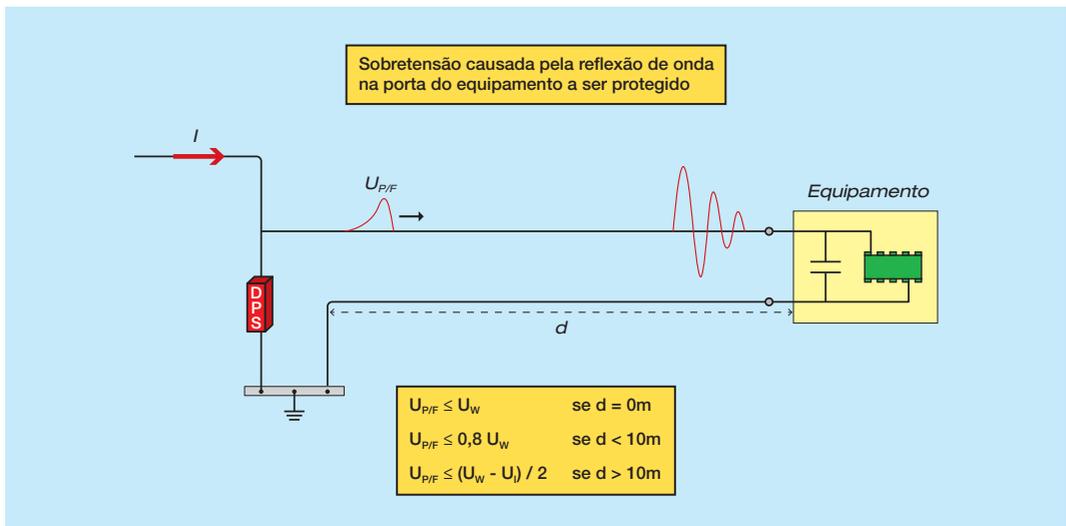


Fig. 7.14 – Sobretensão na entrada do equipamento a ser protegido devido à reflexão de onda.

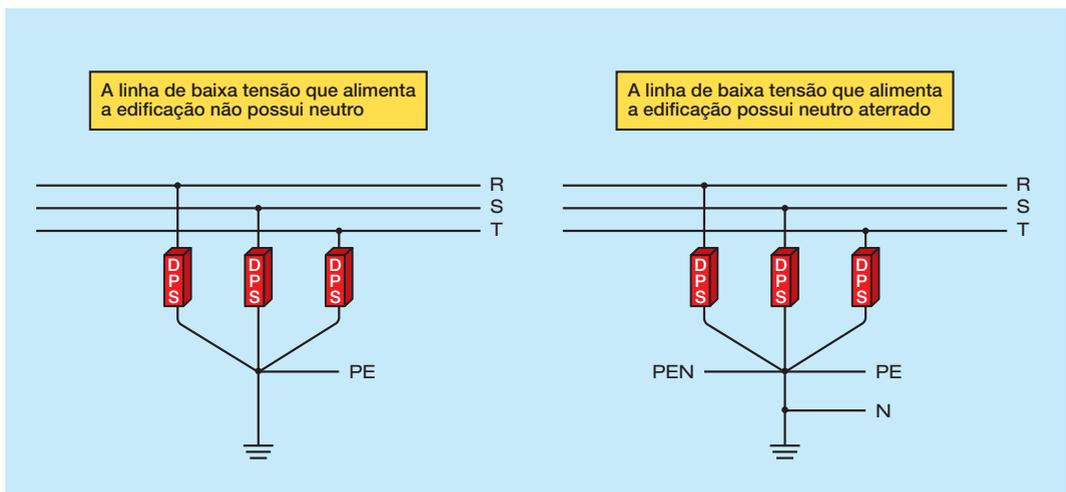


Fig. 7.15 – Esquemas de ligação dos DPS em linha elétrica sem neutro e com neutro aterrado.

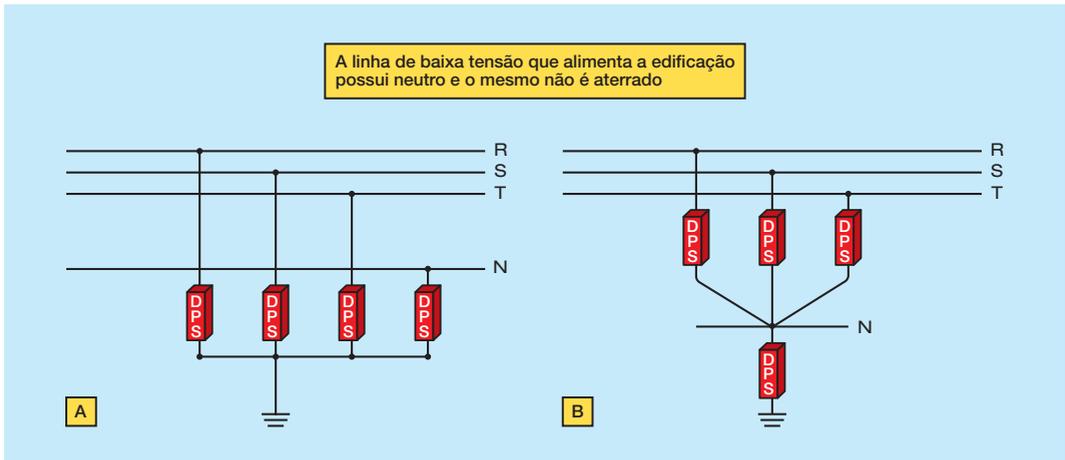


Fig. 7.16 – Esquema de ligação dos DPS em linha elétrica com neutro que não é aterrado.

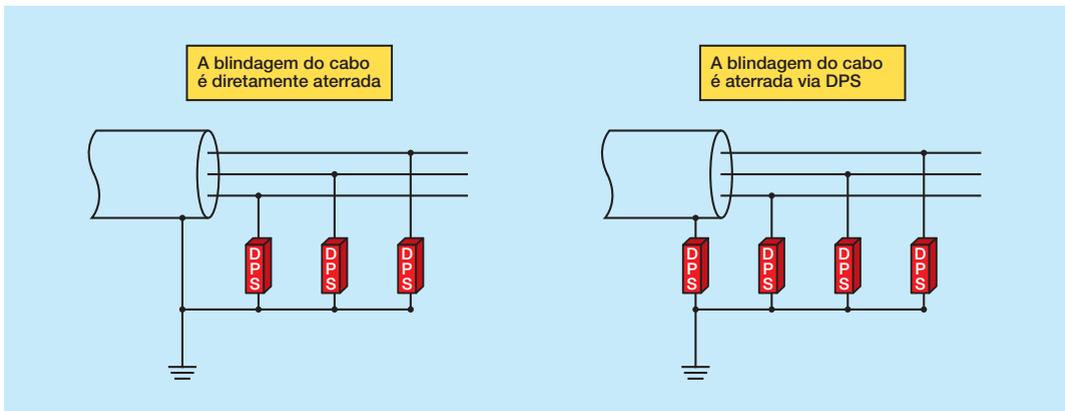


Fig. 7.17 – Esquemas de ligação dos DPS em linha de telecomunicações.

7.4 - CLASSES DE DPS

Um DPS especificado para suportar uma parcela da corrente de uma descarga atmosférica é classificado como Classe I. O DPS Classe I é normalmente utilizado na entrada de edificações expostas às descargas atmosféricas diretas e ele deve ser capaz de conduzir uma corrente impulsiva (I_{imp}) com forma de onda 10/350 μ s. Conforme a IEC 61643-11 [3], a tensão de proteção U_p de um DPS Classe I é determinada da seguinte forma:

- ☑ Para DPS do tipo limitador de tensão, U_p é igual ao valor de pico da tensão residual obtida quando o DPS drena uma corrente com valor de pico igual a I_{imp} e forma de onda 8/20 μ s;

- ☑ Para DPS do tipo comutador de tensão, U_p é igual ao maior valor entre:

- ✓ Valor de pico da tensão residual obtida quando o DPS drena uma corrente com valor de pico igual a I_{imp} e forma de onda 8/20 μ s;
- ✓ Valor de pico obtido quando é aplicado no DPS um impulso de tensão com onda 1,2/50 μ s e 6kV de pico (tensão de circuito aberto do gerador).

Um DPS especificado para suportar apenas correntes induzidas por descargas atmosféricas é classificado como Classe II. O DPS Classe II é normalmente utilizado na entrada de edificações que não estão expostas às descargas atmosféricas diretas (no SPDA da edificação ou nas linhas que atendem à edificação) e também em quadros inter-

nos das edificações em geral. Conforme a IEC 61643-11 [3], a tensão de proteção U_p de um DPS Classe II é determinada da seguinte forma:

- ⊙ Para DPS do tipo limitador de tensão, U_p é igual ao valor de pico da tensão residual obtida quando o DPS drena uma corrente com o valor de pico igual a I_n e forma de onda $8/20\mu\text{s}$;
- ⊙ Para DPS do tipo comutador de tensão, U_p é igual ao maior valor entre:
 - ✓ Valor de pico da tensão residual obtida quando o DPS drena uma corrente com valor de pico igual a I_n e forma de onda $8/20\mu\text{s}$;
 - ✓ Valor de pico obtido quando é aplicado no DPS um impulso de tensão com onda $1,2/50\mu\text{s}$ e 6kV de pico (tensão de circuito aberto do gerador).

Outra classe de DPS (Classe III) é normalmente utilizada no interior de edificações, imediatamente a montante do equipamento a ser protegido. Essa classe de DPS é especificada em termos do surto fornecido por um Gerador de Onda Combinada. Esse gerador apresenta tensão de circuito aberto

e corrente de curto circuito com formas de onda $1,2/50\mu\text{s}$ e $8/20\mu\text{s}$, respectivamente, e uma impedância de 2Ω . Conforme a IEC 61643-11 [3], a tensão de proteção U_p de um DPS Classe III é igual à máxima tensão obtida quando o DPS é submetido a uma descarga do gerador de onda combinada.

Alguns fabricantes produzem DPS que podem ser classificados tanto como Classe I quanto como Classe II, com seus respectivos valores de I_{imp} e I_n . Esses DPS costumam ser designados por Classe I/II.

A Fig. 7.18 mostra as formas de onda $8/20\mu\text{s}$ e $10/350\mu\text{s}$ em uma mesma escala de tempo, de forma a ilustrar a maior duração da última. A Fig. 7.19 mostra as formas de onda da tensão de circuito aberto e da corrente de curto circuito do Gerador de Onda Combinada.

Conforme visto no Capítulo 6, a NBR 5419 sugere que seja feito um estudo específico para calcular os valores das correntes que devem ser especificadas para cada classe de DPS, em função de sua aplicação. Na impossibilidade de realizar esse estudo, a norma sugere os valores conservativos mostrados nas Tabelas 6.4 e 6.5 do Capítulo 6.

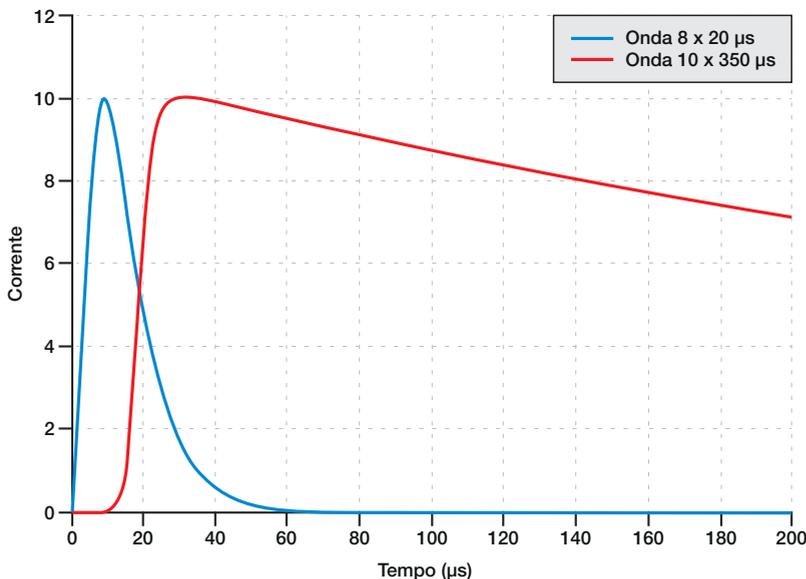


Fig. 7.18 – Ondas de corrente para ensaio de DPS Classe I ($10/350\mu\text{s}$) e Classe II ($8/20\mu\text{s}$).

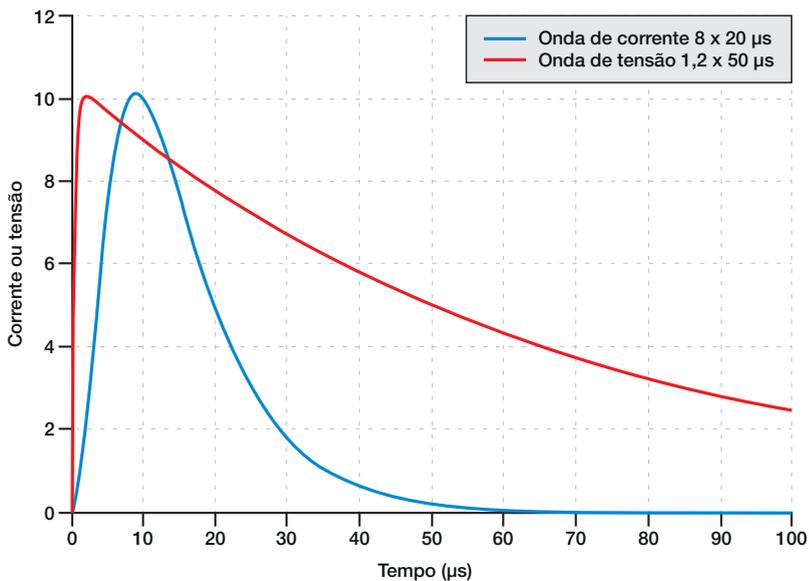


Fig. 7.19 – Ondas de corrente (8/20μs) e tensão (1,2/50μs) para ensaio de DPS Classe III.

7.5 - PRINCIPAIS PARÂMETROS DE UM DPS

7.5.1 - TENSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO CONTÍNUA (U_c)

7.5.1.1 - LINHAS DE ENERGIA ELÉTRICA

O DPS não deve atuar com a tensão de operação da linha onde ele está instalado. O valor da tensão de operação de uma linha pode variar. Por exemplo, nas linhas de energia é permitida a operação da rede com 6% de sobretensão permanente. Portanto, deve ser considerada uma margem de segurança para especificar a tensão máxima de operação contínua do DPS.

Como visto no Capítulo 4, em redes com o neutro isolado ou aterrado via impedância, durante a ocorrência de contato de uma fase com a terra, a tensão nas fases sãs pode atingir valores iguais à tensão fase-fase. Nesses casos, a máxima tensão de operação contínua do DPS deve ser maior ou igual à tensão fase-fase da linha, mesmo que o DPS esteja instalado entre fase e neutro.

Segundo a NBR 5410 [4], a máxima tensão de operação contínua (U_c) deve ser maior ou igual aos valores indicados na Tabela 7.1. O valor de U_c depende do esquema de aterramento e dos cabos onde o DPS está instalado. U é o valor da tensão entre fases e U_0 o valor da tensão fase-neutro.

TABELA 7.1 (ADAPTADA DE [4])

Valor mínimo da tensão U_c do DPS em função do esquema de aterramento

DPS CONECTADO ENTRE	ESQUEMAS DE ATERRAMENTO				
	TT	TN-C	TN-S	IT COM NEUTRO	IT SEM NEUTRO
Fase-Neutro	$1,1 U_0$	-	$1,1 U_0$	$1,1 U_0$	-
Fase-PE	$1,1 U_0$	-	$1,1 U_0$	$\sqrt{3} U_0$	U
Fase-PEN	-	$1,1 U_0$	-	-	-
Neutro-PE	U_0	-	U_0	U_0	-

Além das tensões máximas de operação indicadas na Tabela 7.1, os DPS também podem ser submetidos às sobretensões temporárias (U_t) que podem ocorrer no sistema, devido a falhas na rede elétrica. A Tabela 7.2, adaptada da IEC 61643-11 [3], indica os máximos valores e a duração de U_t em função do tipo de sistema elétrico, considerando uma regulação de 10% da tensão nominal.

Nos esquemas TN-C e TN-S, os maiores valores ocorrerão nos casos de rompimento do neutro e podem atingir o valor da tensão fase-fase, acrescida de 10% devido à regulação da rede. Já nos sistemas TT e IT, os maiores valores são devidos a faltas na rede de média ou alta tensão, onde a circulação de corrente de curto-circuito pelo sistema de aterramento do transformador pode levar a uma sobretensão temporária de 1200 V, que é adicionada à tensão de serviço.

Cabe observar que a IEC 61643-11 requer que o DPS suporte a sobretensão temporária decorrente à falha na rede de baixa tensão (BT) do consumidor. Por outro lado, para as outras falhas mostradas na Tabela 7.2, a norma admite que o DPS suporte a sobretensão temporária ou falhe de forma segura.

Visando mitigar os problemas relacionados com as sobretensões temporárias, é recomendável que os DPS apresentem tensão de operação contínua (U_c) igual ou su-

perior à tensão fase-fase da rede elétrica, mesmo se instalados entre fase e terra. Um erro comum na especificação de DPS é escolher uma tensão de proteção desnecessariamente baixa, com a correspondente redução da tensão máxima de operação contínua. Com isso, a margem de segurança entre a tensão máxima de operação contínua e a tensão de operação da linha fica comprometida, podendo levar à atuação indevida do DPS. Nesses casos, um DPS mal especificado passa a ser um ofensor para o sistema elétrico que ele deveria proteger.

7.5.1.2 - LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Para os casos de DPS instalados em linhas de telecomunicações, a sua máxima tensão de operação contínua também deve ser superior à máxima tensão de serviço esperada na linha. Por exemplo, uma linha do Sistema Telefônico Fixo Comutado (STFC) normalmente opera com tensões até 180V de pico. Essa tensão corresponde à tensão de campainha somada à tensão contínua do serviço analógico de voz. Portanto, um DPS para uma linha do STFC deve ter uma tensão de serviço contínuo (U_c) acima de 200V. No caso de um centelhador a gás instalado junto ao equipamento de comutação, recomenda-se que sua tensão de disparo em corrente contínua seja igual ou maior que 250V. Esse valor justifica-se porque um lote de centelhador a gás normalmente apresenta uma variação de 20% em torno do seu valor nominal.

TABELA 7.2 (ADAPTADA DE [4])
Sobretensões temporárias esperadas em DPS instalados em rede de baixa-tensão (BT)

Configuração		Falha na rede BT do consumidor (duração: 5s)	Falha na rede BT da concessionária ou perda de neutro (duração: 120min.)	Faltas na rede de média/alta tensão (duração: 0,2s)
TN	L-PEN L-N	$1,45 U_0$	$1,1 U$	-
TT	L-PE	$1,1 U$	$1,45 U_0$	$1200 + 1,1 U_0$
	L-N	$1,45 U_0$	$1,1 U$	-
	N-PE	-	-	1200
IT	L-PE	-	-	$1200 + 1,1 U_0$
	L-N	$1,45 U_0$	$1,1 U$	-
	N-PE	-	-	$1200 + 1,1 U_0$

Cabe observar que uma linha de telecomunicações que tenha serviço ADSL (*Asynchronous Digital Subscriber Line*) compartilha o mesmo meio físico com o STFC, de forma que a tensão máxima de operação contínua do DPS instalado nesta linha é determinada pelas características do STFC. Portanto, um distribuidor geral (DG) que atenda uma DSLAM (*Digital Subscriber Line Access Multiplexer*) e uma central de comutação deve ser protegido por DPS com tensão máxima de operação contínua igual ou maior que 250 V.

7.5.2 - TENSÃO DE PROTEÇÃO (U_p)

Conforme mostrado na Seção 7.3, a tensão de proteção efetiva do DPS ($U_{v/p}$) depende da tensão de proteção do DPS (U_p) e das características da instalação. Por melhor que seja a instalação considerada (em termos de proteção contra surtos), a tensão de proteção do DPS deve sempre ser inferior ao nível de resistibilidade do equipamento (U_w).

É importante destacar que, quanto menor a tensão de proteção de um DPS, melhor proteção ele oferece ao equipamento. Portanto, o valor de U_p deve ser o menor possível, desde que não se comprometa a margem de segurança da tensão máxima de operação contínua do DPS (U_c). A tensão de proteção de um DPS comutador normalmente depende da taxa de crescimento da tensão nos seus terminais. Quanto maior a taxa de crescimento, maior a tensão de proteção. Já para um DPS limitador, a sua a tensão de proteção normalmente depende do valor da sua corrente de descarga nominal.

A título de exemplo, considere-se uma rede local residencial composta por um conjunto de equipamentos de tecnologia da informação e comunicação (TIC), tais como modem, roteador, computadores, impressora e scanner. Todos esses equipamentos são alimentados em 127 V por uma régua de força conectada a um quadro equipado por um DPS. Supõe-se que foram tomadas precauções na instalação de forma que a tensão efetiva de proteção é igual à tensão de proteção do DPS ($U_{p/ef} = U_p$). Considerando que os equipamentos de TIC são homologados pela Anatel, eles apresentam um nível de resistibilidade $U_w = 4$ kV para surtos aplicados da linha elétrica para a terra (modo

comum). Nessas condições, a instalação do DPS Clamper VCL 275V 20kA Slim [6] no quadro de força garante que a máxima tensão aplicada em modo comum na linha elétrica é dada por $U_p = 1,2$ kV. Essa tensão é bem inferior ao nível de resistibilidade dos equipamentos ($U_w = 4$ kV), o que garante a sua proteção. Cabe observar que a tensão máxima de operação contínua desse DPS é 275V, o que fornece uma boa margem de segurança em relação à tensão nominal da linha elétrica (127V).

A NBR 5410 estabelece que a tensão de proteção do DPS deve ser compatível com a Categoria II de suportabilidade indicado no Anexo A. Por exemplo, para sistema trifásico com tensão 127/220V, a tensão de proteção do DPS não deve ser superior a 1,5kV. Dessa forma, verifica-se que o DPS Clamper VCL 275V 20kA Slim também atende à recomendação da NBR 5410.

No Anexo A são apresentados os valores de tensões suportáveis de equipamentos (U_w) segundo a NBR 5410 [4], enquanto no Anexo B são apresentados os valores especificados pela Anatel para a certificação compulsória de equipamentos de telecomunicações [5].

7.5.3 - CORRENTE IMPULSIVA (I_{imp})

A corrente impulsiva de um DPS corresponde a um valor de corrente que tem uma baixa probabilidade de ocorrer no seu local de instalação e é utilizada para especificar o DPS Classe I. Naturalmente, o DPS deve suportar essa corrente, sem que suas características de proteção sejam alteradas. A corrente impulsiva (I_{imp}) é definida com forma de onda 10/350 μ s, a qual visa reproduzir os estresses decorrentes da condução de uma parcela da corrente de uma descarga atmosférica direta.

7.5.4 - CORRENTE NOMINAL (I_n)

A corrente nominal de um DPS corresponde a um valor de corrente que tem uma baixa probabilidade de ocorrer no seu local de instalação e é utilizada para especificar o DPS Classe II. Naturalmente, o DPS deve suportar essa corrente, sem que suas características de proteção sejam alteradas. A

corrente nominal (I_n) é definida com forma de onda 8/20 μ s, a qual é também característica de correntes induzidas por descargas atmosféricas.

7.5.5 - CORRENTE MÁXIMA DE DESCARGA (I_{max})

A corrente máxima de descarga de um DPS corresponde a um valor de corrente que tem uma baixíssima probabilidade de ocorrer no seu local de instalação. Essa corrente tem forma de onda 8/20 μ s e é utilizada para determinar a capacidade máxima de um DPS Classe II. Após conduzir a corrente máxima, o DPS não deve ter as suas características de proteção significativamente alteradas.

7.5.6 - CORRENTE SUBSEQUENTE QUE O DPS É CAPAZ DE INTERROMPER (I_{μ}) SEM OPERAR O DESLIGADOR

O DPS deve ser capaz de interromper a corrente subsequente ao surto, de forma a restaurar as condições normais de funcionamento do circuito. A corrente máxima que o DPS consegue interromper é designada por IFI, a qual depende das características do circuito considerado (e.g., tensão de serviço). Os DPS tipo comutador de tensão, por exemplo, centelhadores e *spark gaps*, normalmente possuem capacidade limitada de interromper correntes subsequentes.

7.5.7 - SUPORTABILIDADE AO CURTO CIRCUITO (I_{scrr})

Um DPS para proteção de linhas de energia deve ser capaz de interromper correntes de valor igual ou superior ao valor da corrente de curto-circuito presumida no ponto onde ele está instalado. Devido à possibilidade de falha no DPS, o mesmo deve ser associado a um dispositivo de proteção contra sobrecorrente, que também deve ter capacidade de interromper a corrente de curto circuito no ponto de instalação. Além disso, o DPS deve dispor de sistema que indica a sua situação, ou seja, se ele está em boas condições de operação ou se está em condição de falha e deve ser substituído. O elemento de proteção contra sobrecorrente pode ser exclusivo do DPS ou ser compartilhado com o restante do sistema, conforme mostrado na Fig. 7.20.

No caso de DPS com protetor de sobrecorrente exclusivo, se o DPS apresentar problemas e o dispositivo de proteção contra sobrecorrente atuar, o DPS será desconectado. Nesse caso, o sistema continua funcionando normalmente, mas sem a proteção contra surtos. Somente quando for detectado que o DPS está desconectado e o mesmo for substituído, o sistema voltará a ser protegido contra surtos.

No caso de DPS com protetor de sobrecorrente

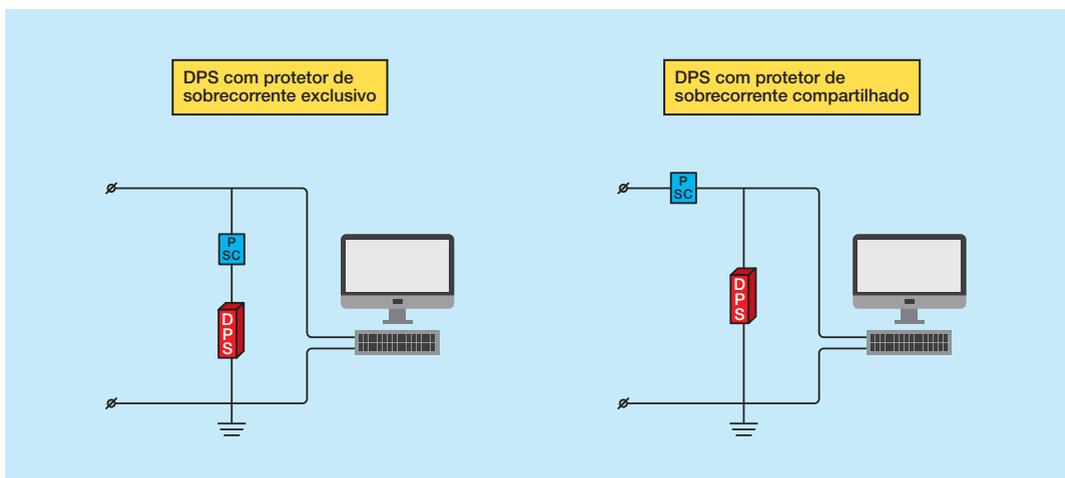


Figura 7.20 – DPS com protetor de sobrecorrente exclusivo e com protetor compartilhado.

rente compartilhado, se o DPS apresentar problemas o dispositivo de proteção contra sobrecorrente irá atuar e o sistema será desligado. Somente quando o DPS for substituído o sistema poderá ser religado. Nesse caso, o sistema não ficará sem a proteção contra surtos, mas ficará desligado até que a manutenção seja realizada.

7.6 - DPS MULTIPROTEÇÃO

DPS Multiproteção (DPSM) é um DPS especial de Classe III que tem por função proteger simultaneamente mais de uma porta de um equipamento. Esse tipo de DPS é designado pela ITU-T como MSPD (*Multiservice Surge Protective Device*). Um exemplo de DPSM é o modelo utilizado para a proteção de modems ADSL, o qual protege a porta de alimentação elétrica em corrente alternada (plugue de força padrão) e porta ADSL (conector RJ-11). Em alguns casos, o DPSM protege também a porta Ethernet (conector RJ-45). A principal função de um DPSM é propiciar uma proteção contra surtos aplicados entre diferentes portas de um mesmo equipamento. Este tipo de DPS pode ou não ter uma conexão de aterramento.

A Fig. 7.21 mostra um DPSM da Clamper, onde se observa conexões para (i) porta de energia elétrica em corrente alternada (tomadas padronizadas); (ii) porta para sinal

de antena de externa de TV ou TV por assinatura (conector coaxial); e (iii) porta para sinal de linha de telecomunicações, como STFC ou xDSL (conector RJ11). O DPSM limita os surtos entre as diversas portas, evitando que os mesmos sejam aplicados no equipamento terminal (e.g., computador, modem, televisor, etc) e o danifique.

Visando ilustrar o funcionamento de um DPSM, considere-se um computador conectado a um modem ADSL, conforme mostrado na Fig. 7.22. Como as linhas de força e de sinais correm por trajetos distintos na planta externa e ainda formam um laço no interior da edificação, é de se esperar a indução de sobretensões entre essas duas linhas. Conforme mostrado na Fig. 7.22(A), a instalação de dois DPS tradicionais (na linha elétrica e na linha de sinais) não é capaz de mitigar a tensão induzida entre as duas linhas. Para tal, é necessário um DPSM (ver Fig.7.22.(B)), que conjuga componentes de proteção em cada uma das linhas e também um componente de proteção entre as duas linhas. Observe-se que o DPSM fornece uma proteção efetiva aos equipamentos, mesmo se não houver uma conexão de aterramento disponível. É importante ressaltar que as tomadas de força do computador e de outros periféricos também devem estar protegidas pelo DPSM. O esquema típico de um DPSM é mostrado na Fig. 7.23.

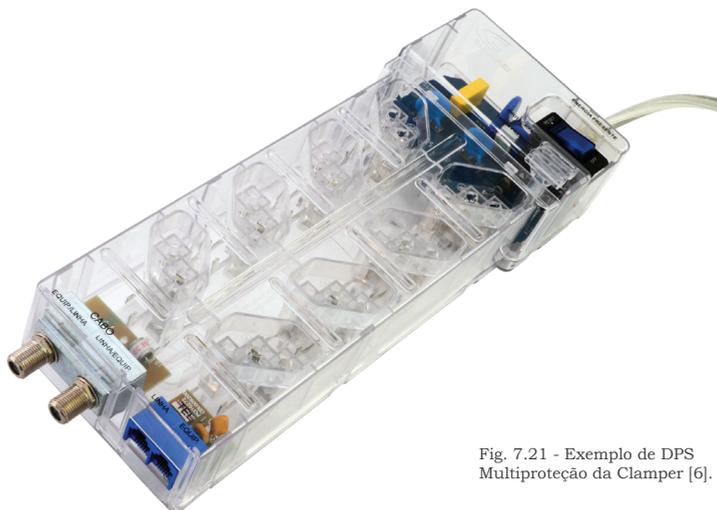


Fig. 7.21 - Exemplo de DPS Multiproteção da Clamper [6].

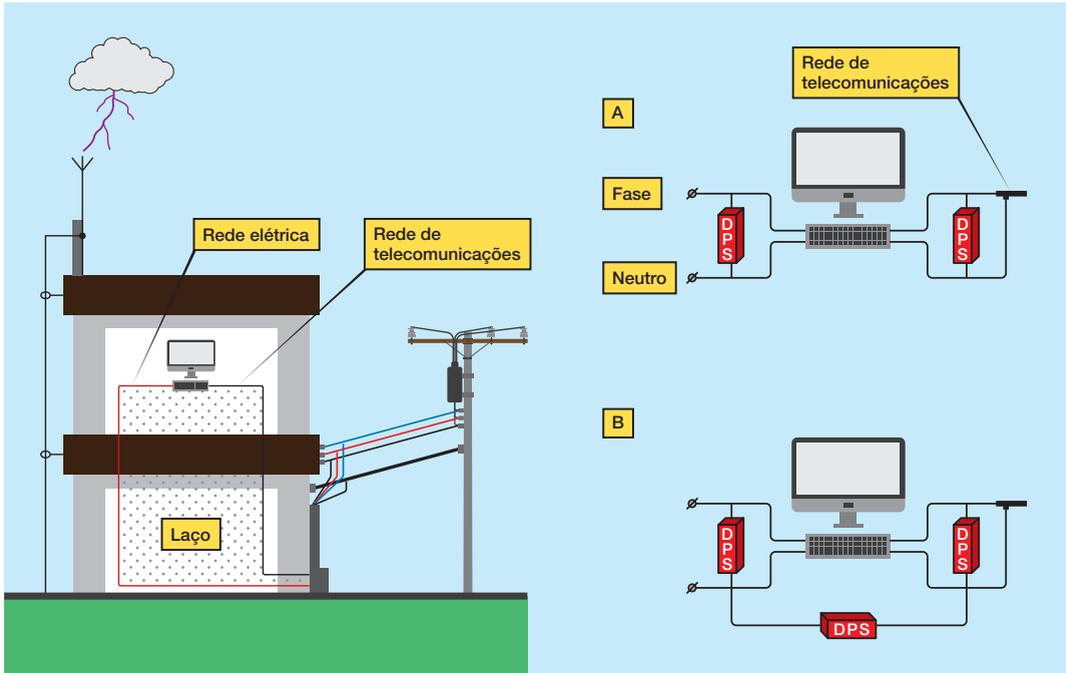


Fig. 7.22 – Arranjo para proteção de equipamento eletrônico que é ligado simultaneamente nas redes de energia elétrica e de telecomunicações.

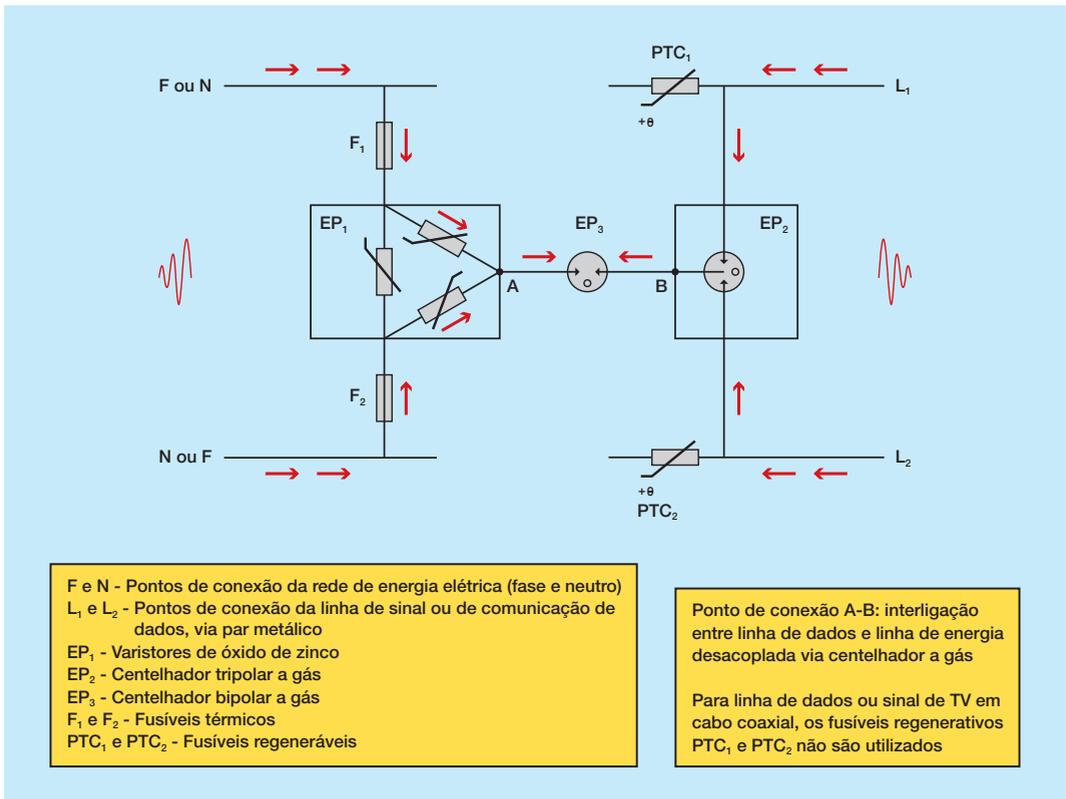


Fig.7.23 – DPS Multiproteção (DPSM) para proteção de equipamentos ligados simultaneamente nas redes de energia e de telecomunicações.

7.7 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo deste capítulo:

- ⊙ O Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) é um produto composto por um ou mais componentes não-lineares comutados por tensão e protegidos contra sobreaquecimento, podendo também incluir proteção contra sobrecorrente, sistema de fixação, terminais para conexão na rede e capacidade de indicar sua falha. É muito importante que o DPS atenda aos requisitos das normas aplicáveis, visando garantir que ele exerça a sua função de proteção, assim como evitar que ele apresente risco às instalações do usuário;
- ⊙ A correta especificação do DPS depende do nível de suportabilidade do equipamento a ser protegido (U_w) e envolve os seguintes parâmetros:
 - ✓ Tensão máxima de operação contínua (U_o);
 - ✓ Tensão de proteção (U_p);
 - ✓ Corrente impulsiva (I_{imp}), para DPS Classe I;
 - ✓ Corrente nominal (I_n), para DPS Classe II;
- ✓ Corrente subsequente máxima (I_{β});
- ✓ Suportabilidade ao curto circuito (I_{scct}).
- ⊙ Caso o DPS instalado em rede de energia elétrica não tenha proteção contra sobrecorrente, deve ser instalado um dispositivo de proteção contra sobrecorrente (e.g., disjuntor ou fusível) a montante do mesmo, para garantir que o curto-circuito resultante de uma eventual falha do DPS seja devidamente eliminado;
- ⊙ A forma de instalação do DPS é tão importante quanto o dispositivo em si, pois características da instalação podem elevar significativamente sua tensão de proteção efetiva do DPS ($U_{p/ef}$). Conexões curtas que evitem a formação de laços são fundamentais para garantir uma proteção adequada. A instalação coordenada de DPS é uma medida eficaz para a proteção dos equipamentos elétricos e eletrônicos, assim como das instalações elétricas dos usuários;
- ⊙ Os DPS protegem tanto contra surtos originados por descargas atmosféricas quanto contra surtos originados por outras fontes (e.g., manobras no sistema elétrico).

ANEXO A
Tensões suportáveis de equipamentos segundo NBR 5410

TENSÕES IMPULSIVAS SUPORTÁVEIS PELOS EQUIPAMENTOS E COMPONENTES DA EDIFICAÇÃO

TENSÃO NOMINAL DA INSTALAÇÃO (V)		TENSÃO SUPORTÁVEL (U_w) REQUERIDA (kV)			
Sistemas trifásicos	Sistema monofásicos com neutro	CATEGORIA DE PRODUTO			
		Produto a ser utilizado na entrada da instalação ⁽⁴⁾	Produto a ser utilizado em circuitos de distribuição e circuitos terminais ⁽³⁾	Equipamentos de utilização ⁽²⁾	Produtos especialmente protegidos ⁽¹⁾
		CATEGORIA DE SUPORTABILIDADE A IMPULSOS			
		IV	III	II	I
120/208 127/220	115-230 120-240 127-254	4	2,5	1,5	0,8
220/380 230/400 277/480	-	6	4	2,5	1,5
400/690	-	8	6	4	2,5

Para componentes associados a linhas de sinal utilizados na entrada da instalação (categoria IV de suportabilidade), a tensão de impulso suportável mínima é de 1500 V (ver IEC 61663-2).

(1) Produtos destinados a serem conectados à instalação elétrica fixa da edificação, mas providos de alguma proteção específica, situada na instalação fixa ou entre ela e o equipamento;
(2) Também destinados a serem conectados à instalação elétrica fixa da edificação (aparelhos eletrodomésticos, eletroprofissionais, ferramentas portáteis e cargas análogas);
(3) Componentes da instalação fixa propriamente dita (quadros, disjuntores, condutores, barramentos, interruptores e tomadas) e outros equipamentos de uso industrial (motores por exemplo);
(4) Produtos utilizados na entrada da instalação ou nas proximidades, a montante do quadro de distribuição principal (medidores, dispositivos gerais de seccionamento e proteção e outros itens usados tipicamente na interface da instalação elétrica com a rede pública de distribuição).

ANEXO B
Tensões suportáveis de equipamentos de telecomunicações segundo
Resolução 442/2006 da ANATEL

PORTA		TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO (kV)		FORMA DE ONDA (μ s)	
SERVIÇO	CONECTOR	MODO COMUM	MODO DIFERENCIAL	TENSÃO	CORRENTE
Alimentação elétrica CA	Plugue de força	4	2	1,2 / 50	8 / 20
Linha externa de telecomunicações	RJ11	1,5	1,5	10 / 700	-
Linha interna	RJ45	1	-	1,2 / 50	-

INSTALAÇÃO DE DPS EM EDIFICAÇÕES DE PEQUENO E MÉDIO PORTE

8.1- INTRODUÇÃO

A decisão de instalar um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) em uma edificação brasileira depende da avaliação de uma série de fatores técnicos, mas também depende da necessidade de obedecer a legislação e a normalização pertinentes.

Vários municípios brasileiros possuem códigos e leis municipais que obrigam a instalação de SPDA, enquanto outros municípios não exigem a instalação de SPDA. Além disso, existem duas normas que tratam do tema. A NBR 5419 [1 a 4], norma específica sobre o assunto, que analisa o tema de forma ampla e aprofundada, e a NBR 5410 [5], que trata das instalações elétricas de baixa tensão, e analisa a necessidade de instalação de DPS nas redes de energia e de telecomunicações.

A NBR 5410 recomenda a instalação de DPS em toda linha de telecomunicações que adentre uma edificação. De forma geral, para linhas de energia a norma recomenda a instalação de DPS nos casos de edificações que são alimentadas por redes aéreas e estejam em regiões com nível cerâmico acima de 25 dias de trovoada por ano. No Brasil é rara a existência de redes de energia subterrâneas, sendo que as poucas existentes, geralmente estão localizadas nas áreas centrais das grandes metrópoles. Também são raras as regiões no país que possuem nível cerâmico abaixo de 25 dias de trovoada por ano. Isto implica em que praticamente toda edificação necessite de DPS instalados nas redes de energia e telecomunicações para atender a NBR 5410. Além da instalação de DPS, a norma trata do aterramento, da equalização de potenciais e da utilização do condutor de proteção

(PE), o que acaba gerando uma interseção com as técnicas de proteção recomendadas na NBR 5419.

A NBR 5419-2 recomenda a adoção de valores toleráveis de riscos associados à perda de vida humana, perda de serviço ao público e perda de patrimônio cultural. A norma recomenda que sejam adotadas medidas de proteção de forma a garantir que os riscos sejam inferiores aos valores toleráveis sugeridos na norma. No caso de perda de valor econômico, a norma sugere que seja feita uma análise de custo benefício relativa à instalação de sistemas de proteção.

A adoção de sistemas de proteção para os equipamentos e sistemas internos (Medidas de Proteção contra Surtos - MPS e SPDA interno), em princípio, está muito associada à perda de valores econômicos e à perda de serviço ao público. Por exemplo, uma estação rádio base de telefonia celular que deixa de funcionar devido a uma descarga atmosférica implica em perda de valor econômico, mas também em perda de serviço ao público que deixa de contar com o acesso à rede celular. Entretanto, é importante observar que as MPS e o SPDA interno também estão associados à perda de vida humana, pois medidas tais como a equalização de potenciais, adoção de distâncias de isolamento, instalação de DPS, uso de interfaces de isolamento e utilização de malhas equalizadas minimizam as chances de choques em pessoas no interior e nas imediações da edificação.

Como visto no Capítulo 2, a análise de riscos associados à proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos passa por uma avaliação da pertinência de aplicação de todas as MPS. Nos exemplos apresentados no Capítulo 2, as

vantagens de adoção de cada uma das MPS são avaliadas em termos do período esperado para a ocorrência de danos à instalação.

Fica claro nos casos analisados no Capítulo 2 que a não instalação de DPS implica em riscos elevados, ou seja, um curto período de tempo para a ocorrência de danos. Fica também claro que a escolha da classe dos DPS, que está associada ao nível de proteção escolhido, interfere bastante no período para a ocorrência de danos.

Apenas a instalação de DPS é exemplificada neste capítulo, e também nos dois seguintes, tendo em vista:

- ⊙ A obrigatoriedade de instalação de DPS em quase todas as edificações, segundo a NBR 5410;
- ⊙ A facilidade de sua aplicação tanto em edificações existentes quanto naquelas a serem construídas;
- ⊙ Que é uma das MPS mais simples de serem aplicadas;
- ⊙ Que é uma das MPS de menor custo;
- ⊙ Que é uma das MPS mais eficazes;
- ⊙ Que as demais MPS já foram analisadas em profundidade nos Capítulos 4 e 5.

Neste capítulo são detalhados os arranjos utilizados para a instalação de DPS em

edificações de pequeno e médio porte. São utilizados como exemplos uma casa antiga, com instalação elétrica que não atende às recomendações das normas atuais e uma casa moderna, que utiliza o esquema TN-S recomendado nas normas. É também apresentado o arranjo de proteção utilizado em um prédio de 20 andares, que atende às recomendações da norma atual.

São sugeridos valores típicos para a especificação do DPS. Entretanto, é importante ressaltar que para um dimensionamento otimizado, as metodologias descritas nos capítulos anteriores devem ser utilizadas.

8.2 - OS PRODUTOS CLAMPER

Nos sete primeiros capítulos deste livro foram apresentados conceitos teóricos e recomendações oriundas de normas técnicas nacionais e internacionais. Neste e nos próximos dois capítulos são apresentados exemplos de projeto e instalação de DPS em edificações e em instalações especiais, alinhados com os conceitos apresentados nos capítulos anteriores. Nestes exemplos são utilizados produtos desenvolvidos e comercializados pela CLAMPER, empresa com 25 anos de experiência de campo e desenvolvimento de soluções conforme demanda de clientes, quer sejam profissionais ou residenciais.

A Fig. 8.1 mostra como são identificados os principais parâmetros de um DPS CLAMPER para redes elétricas.

CLAMPER®
VCL SLIM

U_c : 175 V ~
I_{máx.} : 60 kA (8/20) T2
I_n : 30 kA (8/20)
I_{imp.} : 12,5 kA (10/350) T1
U_p : < 0,8 kV

STATUS

DPS Classe I / II

Tensão máxima de operação contínua (U_c): 175 V
Corrente máxima de descarga (I_{máx.}) - 2 aplicações (8/20 μs): 60 kA
Corrente de descarga nominal (I_n) - 15 a 20 aplicações (8/20 μs): 30 kA
Nível de proteção (U_p): < 0,8 kV
Corrente máxima de descarga (I_{imp.}) (10/350 μs): 12,5 kA



DPS Classe II

Tensão máxima de operação contínua (U_c): 275 V

Corrente máxima de descarga ($I_{máx}$) - 2 aplicações (8/20 μ s): 45 kA

Corrente de descarga nominal (I_n) - 15 a 20 aplicações (8/20 μ s): 20 kA

Nível de proteção (U_p): < 1,5 kV

Fig. 8.1 – Identificação dos principais parâmetros de um DPS CLAMPER para redes elétricas. (A) DPS Classe I/II; (B) DPS Classe II.

Os principais modelos que serão utilizados nos exemplos apresentados nos Capítulos 8 a 10 são mostrados na Fig. 8.2.



Fig. 8.2 – Principais modelos de DPS CLAMPER para redes elétricas que serão utilizados nos exemplos.

Para a identificação dos principais parâmetros dos DPS utilizados nas linhas de telecomunicações, de comunicação de dados e também os de Multiproteção é necessário consultar os catálogos [6], pois os mesmos são identificados por nomes genéricos tais como:

- ⊙ CLAMPER Multiproteção;
- ⊙ iPocket 2P;
- ⊙ iCLAMPER energia;
- ⊙ iCLAMPER Tel.

8.3 - UMA CASA

Os equipamentos elétricos e eletrônicos instalados nas residências estão sujeitos aos surtos elétricos conduzidos pelos condutores metálicos das linhas que entram na edificação, conforme mostrado na Fig. 8.3. A cada dia os eletrodomésticos estão ficando mais sofisticados, com a utilização de microcontroladores embarcados e, conseqüentemente, mais suscetíveis às sobretensões e sobrecorrentes.

De forma geral, pode se dizer que todas as

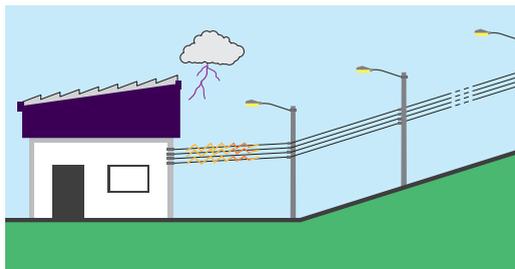


Fig. 8.3 – Sobretensão originada nas linhas de energia e de telecomunicações

linhas que entram ou saem da edificação devem ser protegidas conforme mostra a Fig. 8.4. Somente em edificações instaladas em regiões de baixa atividade atmosférica e sem linhas externas pode-se abrir mão da instalação de um arranjo de proteção. Como já dito, os critérios para cálculo de risco apresentados no Capítulo 2 permitem uma avaliação técnica e econômica sobre a pertinência da adoção de medidas de proteção.

8.3.1 - CASA COM SISTEMA TN-C

A instalação elétrica da grande maioria das residências brasileiras não está em conformidade com a NBR 5410 que recomenda a utilização do esquema de aterramento TN-S com condutor de proteção (PE) e barramento de equalização. Na maior parte das edifi-

cações existe apenas o condutor neutro que é aterrado na entrada da edificação, caracterizando um sistema TN-C (ver Capítulo 4). Apesar de não recomendado na norma atual é possível, com algumas limitações, instalar DPS nessas edificações e melhorar a proteção dos equipamentos eletroeletrônicos. É importante ressaltar que, mesmo sendo possível instalar DPS nas edificações sem o condutor de proteção, o ideal é que a instalação elétrica seja refeita de modo a atender às recomendações da norma NBR 5410 de 2004.

Será considerada uma residência sem SPDA instalado e duas possibilidades para esta situação. A primeira é que não foi instalado SPDA porque a análise de riscos realizada indicou uma baixa probabilidade de incidência de descargas diretas. Neste caso, também será baixa a possibilidade de circulação pelo DPS de parcela da corrente de descarga direta e é recomendável e suficiente a instalação de DPS Classe II.

A segunda possibilidade é que a residência faça parte do grande conjunto de residências brasileiras que não estão em conformidade com as normas técnicas atuais e por isso não têm SPDA. Nesta situação também é recomendável a instalação de DPS Classe II.

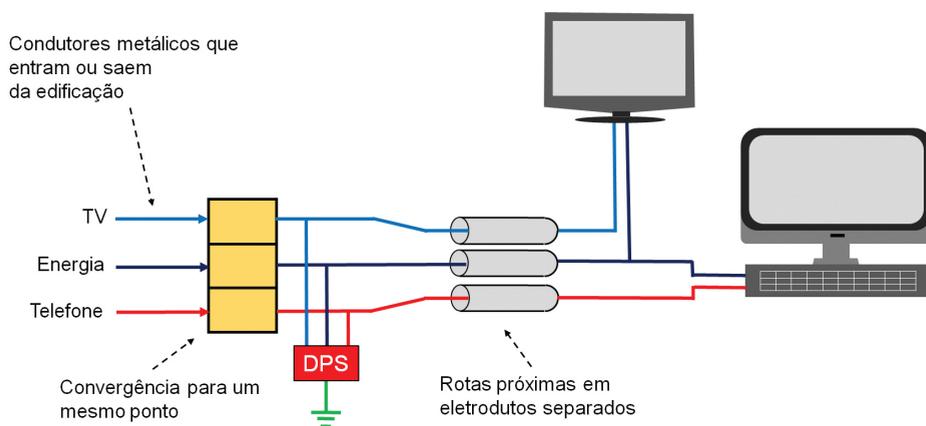


Fig. 8.4 – Linhas de energia e de telecomunicações a serem protegidas.

É importante lembrar que a classe do DPS está associada à possibilidade ou não de circulação de parcela da corrente de descarga pelo DPS. O DPS Classe I suporta parcela da corrente de descarga (onda 10/350 μ s) e o Classe II suporta apenas as correntes induzidas (onda 8/20 μ s). Por outro lado, o Nível de Proteção da edificação está associado ao valor de pico da corrente de descarga esperada.

Para a escolha do DPS em função do Nível de Proteção da edificação não existem critérios normalizados, uma vez que o cálculo dos riscos associados a danos em equipamentos eletroeletrônicos calculados no Capítulo 2 são válidos apenas para edificações que possuem um SPDA externo instalado. Nesta situação, será recomendada a utilização de DPS para edificação com Nível de Proteção (III-IV).

Conforme a Tabela 6.4 do Capítulo 6, para NP III-IV é recomendável a utilização de DPS com corrente nominal (onda 8/20 μ s) de 5kA, para os DPS instalados nas redes elétricas.

Conforme Tabela 6.5 do Capítulo 6, se a edificação for alimentada por rede telefônica constituída de um fio *drop* é recomendável a utilização de DPS com corrente nominal (onda 8/20 μ s) também de 5kA, para os DPS instalados na linha telefônica.

Os DPS primários para linhas de energia devem ser instalados entre fase e neutro, preferencialmente na origem da instalação, sendo necessário um para cada fase. Algumas concessionárias de energia já padronizaram a instalação do DPS dentro da caixa de medição, conforme exemplo mostrado na Fig. 8.5.

Segundo a IEC 61643-12 [7], os quadros de distribuição de circuitos secundários (QDC) localizados a mais de 20m da entrada de força ou do quadro de distribuição geral (QDG) também devem ser equipados com DPS Classe II (ver Fig. 8.6).

Ainda segundo a IEC 61643-12 [7], os eletrodomésticos ou equipamentos eletrônicos

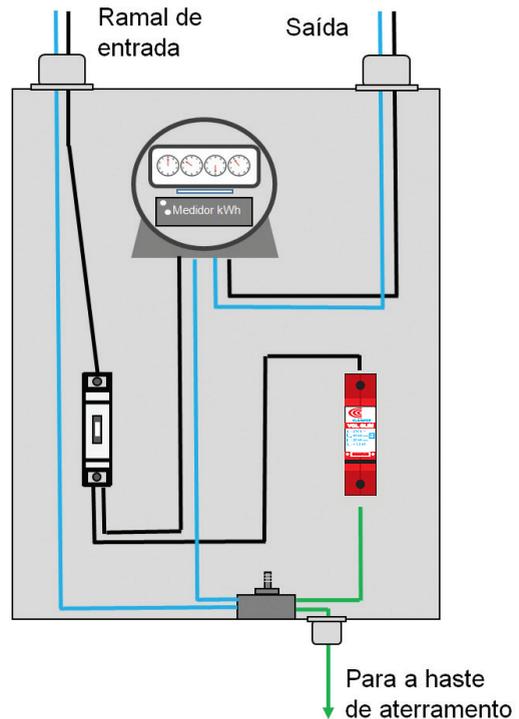


Fig.8.5 - Instalação de DPS na entrada da instalação (caixa de medição).

localizados há mais de 10m do QDG devem ser protegidos através de DPS Classe III. São exemplos desses equipamentos: geladeira, máquina de lavar louça, forno micro-ondas, dentre outros.

Os equipamentos eletrônicos com entradas múltiplas, com linha de energia e de telecomunicações, devem ser protegidos com DPS combinados. São exemplos desses equipamentos: televisores com entrada de sinal conectada (por exemplo, cabo coaxial), modem via cabo (*cable modem*), modem ADSL/VDSL, telefone sem fio, dentre outros. Cabe destacar que a equalização de potencial local realizada pelo DPS é fundamental para garantir a proteção desses equipamentos. Estes DPS combinados são também denominados DPS Multiproteção (DPSM) e são descritos em detalhes no Capítulo 7.

As Tabelas 8.1 e 8.2 apresentam modelos de DPS para utilização em redes de 220/127 V e 380/220 V.

Fig.8.6 – Localização dos DPS em rede sem condutor PE.

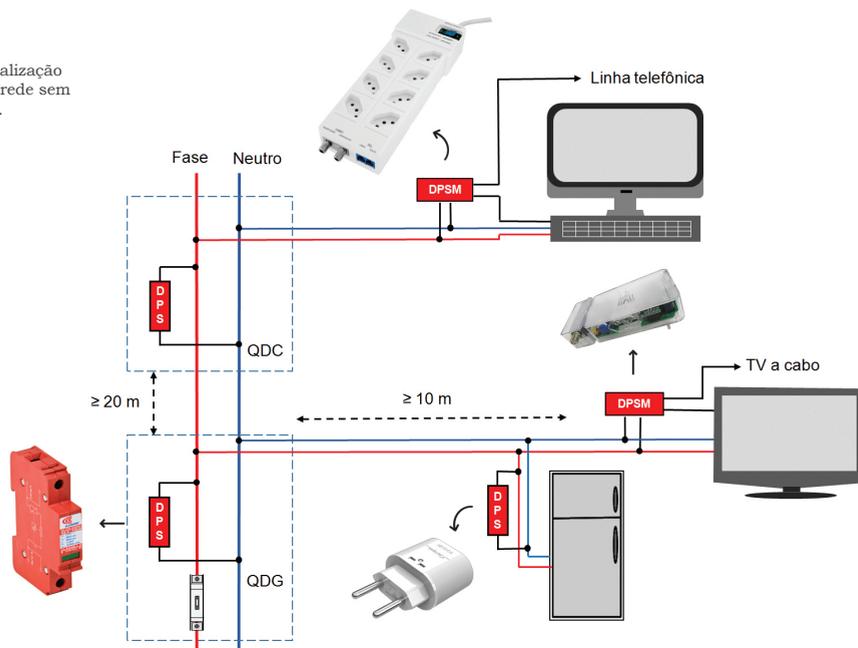


TABELA 8.1
Modelos indicados para aplicação em uma casa com tensão 220/127V

LOCAL	MODELO	QUANTIDADE
QDG	VCL 275V 20 kA* ¹	01 por fase
QDC	VCL 275V 20 kA* ¹	01 por fase
Computador	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Tel	01
TV a cabo	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Cabo	01
Home Theater	CLAMPER Multiproteção	01
Eletrodoméstico (Geladeira, máquina de lavar louça, etc)	iPocket	01 por eletrodoméstico

TABELA 8.2
Modelos indicados para aplicação em uma casa com tensão 380/220 V

LOCAL	MODELO	QUANTIDADE
QDG	VCL 460V 20 kA* ¹	01 por fase
QDC	VCL 460V 20 kA* ¹	01 por fase
Computador	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Tel	01
TV a cabo	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Cabo	01
Home Theater	CLAMPER Multiproteção	01
Eletrodoméstico (Geladeira, máquina de lavar louça, etc)	iPocket	01 por eletrodoméstico

NOTA 1 – O DPS VCL 275V 20kA, possui corrente nominal (I_n) igual a 10kA. Apesar da indicação de corrente nominal (I_n) ser de 5kA, conforme Tabela 6.4 do Capítulo 6, o DPS com corrente nominal de 10kA possui melhor custo benefício do que o DPS de 5kA.

É importante ressaltar que a escolha da tensão nominal do DPS (275 V para sistemas 220/127 V) leva em conta as sobretensões temporárias (causadas, por exemplo, pelo rompimento do condutor neutro), conforme analisado no Capítulo 4. Com este valor de tensão nominal o DPS não irá operar devido à sobretensão originada no rompimento do neutro. Além disso, para a proteção de equipamentos que atendam aos níveis de suportabilidade da NBR 5410 [2] (neste caso, tensão suportável $U_w = 1,5kV$), o DPS de tensão nominal 275V garante uma margem de proteção adequada, pois a tensão de proteção do DPS ($U_p = 1,2kV$) é inferior à tensão suportável pelo equipamento.

Se a possibilidade de rompimento do neutro for remota, um DPS com valor menor de tensão nominal pode ser utilizado. Nessas condições, um DPS com $U_c = 175V$ poderia ser utilizado em sistemas de 220/127V, quando conectado entre fase e neutro ou fase e terra. O DPS de menor tensão nominal irá apresentar uma menor tensão residual. Entretanto, se houver o rompimento do neutro, o DPS entrará em operação permanente e o sistema de proteção contra sobrecorrentes irá atuar e retirar o DPS do circuito.

A análise anterior é importante, pois existem no mercado brasileiro muitos equipamentos eletroeletrônicos que não atendem aos valores de tensão suportável normalizados e cujo valor de tensão suportável é menor do que o valor especificado pelas normas aplicáveis e reproduzidos no Anexo A do Capítulo 7. Nestes casos, os DPS de tensão nominal 275 V podem não fornecer proteção adequada e para que a proteção seja efetiva é necessário utilizar DPS de menor valor de tensão nominal. Entretanto, se houver o rompimento do neutro, os DPS poderão ser retirados de serviço.

O raciocínio anterior feito para redes de 220/127V vale também para as redes de 380/220V, desde que os valores relevantes de U_c e U_w sejam considerados.

8.3.2 - CASA COM SISTEMA TN-S E SEM SPDA EXTERNO

Os DPS primários devem ser instalados preferencialmente na origem da instalação,

tanto nas linhas de energia quanto nas de telecomunicações. A escolha da classe e do nível de proteção devem seguir os critérios já discutidos no item anterior. A Fig. 8.7 ilustra a instalação de DPS na origem de uma instalação elétrica TN-S trifásica.

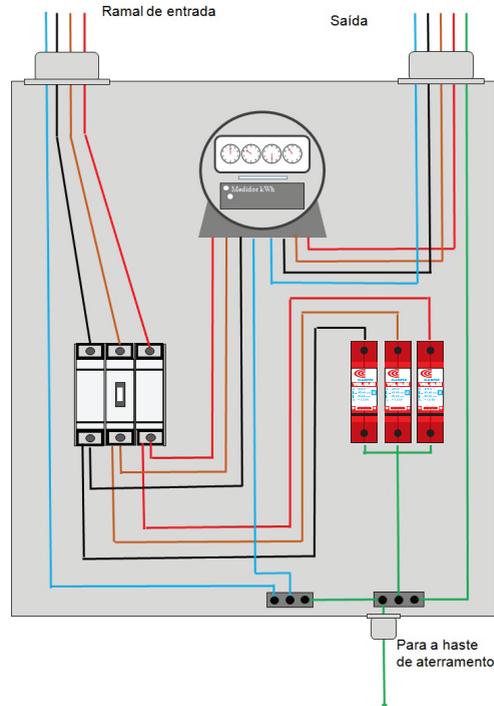


Fig. 8.7 - Instalação de DPS na origem da instalação junto à caixa de medição.

Quadros de Distribuição de Circuitos Secundários (QDC) localizados há mais de 20m da origem da instalação ou do Quadro de Distribuição Geral (QDG) também devem ser protegidos com DPS classe II.

Os eletrodomésticos ou equipamentos eletrônicos localizados há mais de 10m do QDG também devem ser protegidos através de DPS Classe III, como por exemplo geladeira, máquina de lavar louça, micro-ondas, dentre outros.

De maneira análoga ao exposto na Seção 8.2.1, os equipamentos eletrônicos com entradas múltiplas, como linha de energia e de telecomunicações, devem ser protegidos por DPS combinados. São exemplos desses equipamentos, televisores com entrada de sinal conectada (por exemplo, cabo coaxial), mo-

dem via cabo (*cable modem*), modem ADSL/VDSL, telefone sem fio, dentre outros. Cabe destacar que a equalização de potencial local realizada pelo DPS é fundamental para garantir a proteção desses equipamentos. Estes DPS combinados são também denominados DPS Multiproteção (DPSM) e são descritos em detalhes no Capítulo 7.

A Fig. 8.8 ilustra a instalação de DPS no sistema TN-S considerado, onde os modelos de DPS são mostrados nas Tabelas 8.1 e 8.2.

8.3.3 - CASA COM SISTEMA TN-S E COM SPDA EXTERNO

Pode-se ver no Capítulo 2 que a instalação de DPS em uma casa aumenta de forma significativa o período esperado entre danos.

Para uma casa de um pavimento com SPDA externo instalado e localizada em uma região com densidade de descargas igual a 10 descargas/km²/ano, o período esperado entre falhas é mostrado na Tabela 8.3.

Pode ser visto na Tabela 8.3 que o Nível de Proteção da edificação também interfere no valor do período esperado entre falhas.

Devido à probabilidade significativa de circular uma parcela da corrente de descarga direta pelo DPS, serão necessários DPS com maior capacidade energética, tanto para as linhas de energia, quanto para as linhas de telecomunicações. Os DPS devem ser Classe I e instalados na origem da edificação, ou seja, na transição entre a zona de proteção ZPR 0_b e ZPR 1.

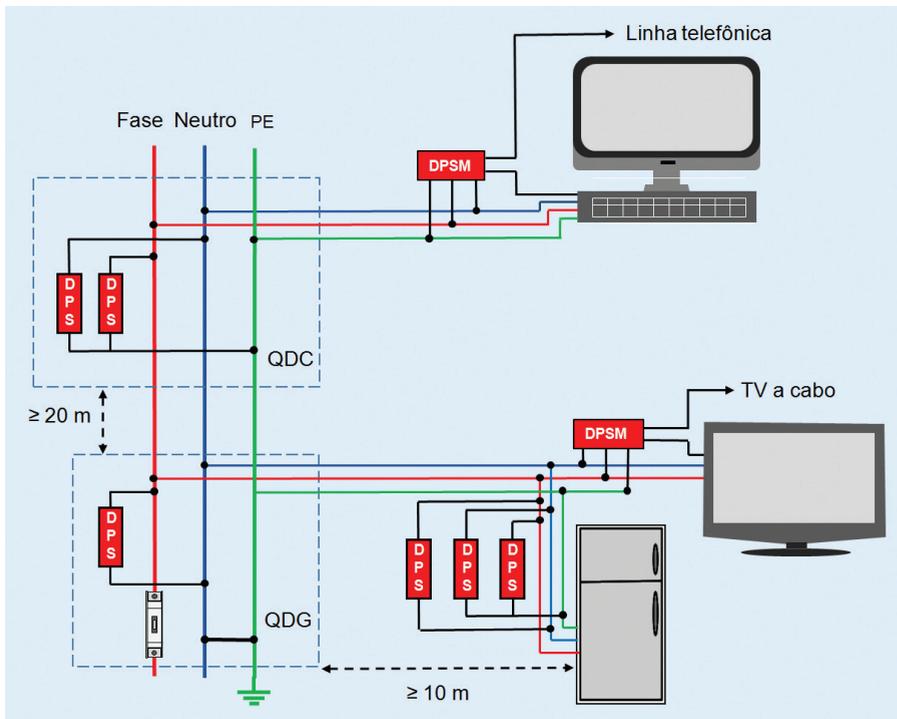


Fig.8.8
Localização dos DPS em rede TN-S.

TABELA 8.3 - Período esperado entre falhas para o caso de uma casa simples de um pavimento com SPDA externo com malha de 10m de largura

DPS INSTALADO	DPS PARA NÍVEL DE PROTEÇÃO	PERÍODO ESPERADO ENTRE FALHAS (ANOS)
Não	----	0,6
Sim	III e IV	12
Sim	II	30

Para esta situação, deve ser determinado o valor da corrente (onda 10/350 μ s) que circulará pelo DPS. O valor máximo para a corrente de descarga principal positiva para o Nível de Proteção I é 200kA, para o Nível de Proteção II é 150kA e para Nível de Proteção III-IV é 100kA. Considera-se que a casa é alimentada por uma rede elétrica de três fases e neutro, uma linha telefônica metálica e um cabo coaxial (TV a cabo). Utilizando a metodologia descrita na NBR 5419-1, que considera que 50% da corrente de descarga flui pela malha de aterramento e 50% flui pelas linhas que atendem a edificação, é de se esperar uma corrente da ordem de 4,2kA fluindo pelos DPS para NP III-IV; 6,25kA para NP II e 8,3 kA para o NP I. É importante observar que independentemente do Nível de Proteção da edificação a NBR 5410 sugere um valor mínimo de 12,5kA. Portanto, especificar $I_{imp} = 12,5kA$ não só atende a NBR 5410

como também garante uma longa vida útil para o DPS.

Considerando as correntes induzidas (onda 8/20 μ s), pelas Tabelas 6.4 e 6.5 do Capítulo 6 são esperadas correntes de 5 kA, 7,5 kA e 10 kA para os Níveis de Proteção III-IV, II e I respectivamente.

As recomendações contidas na Seção 8.3.2 devem ser seguidas para os demais equipamentos. Adicionalmente, devem ser previstos DPS para os seguintes equipamentos expostos aos surtos:

- ✓ Portão eletrônico;
- ✓ Interfone;
- ✓ Sistema de segurança por câmeras.

A Fig. 8.9 mostra os diversos DPS que devem ser instalados na edificação.

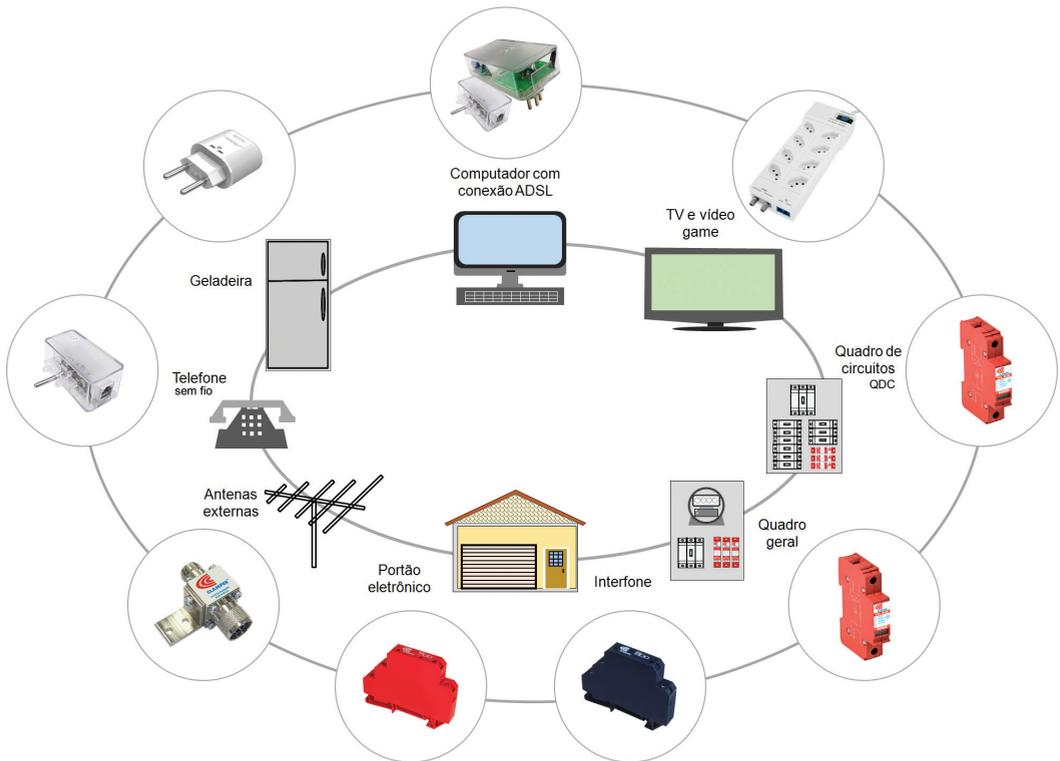


Fig.8.9 – Localização e tipos de DPS em uma residência.

As Tabelas 8.4 e 8.5 apresentam modelos de DPS para utilização em redes de 220/127V e 380/220V. Foi considerada uma edificação com Nível de Proteção II.

TABELA 8.4 Modelos indicados para aplicação em casa com sistema de aterramento TN-S e SPDA externo Tensão de alimentação 220/127V		
LOCAL	MODELO	QUANTIDADE
Entrada da edificação	VCL 275V 12,5/60kA	01 por fase
QDC	VCL 275V 20kA	01 por fase
Computador	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Tel	01
TV a cabo	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Cabo	01
Home theater	CLAMPER Multiproteção	01
Eletrodoméstico (Geladeira, máquina de lavar louça, etc)	iPocket	01 por eletrodoméstico
Portão eletrônico	722.B.010.127	01
Interfone	822.B.020	01

TABELA 8.5 Modelos indicados para aplicação em casa com sistema de aterramento TN-S e SPDA externo Tensão de alimentação 380/220V		
LOCAL	MODELO	QUANTIDADE
Entrada da edificação	VCL 460V 12,5/120kA	01 por fase
QDC	VCL 460V 20kA	01 por fase
Computador e Modem ADSL/VDSL	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Tel	01
TV e Cable Modem	iCLAMPER Energia e iCLAMPER Cabo	01
Home Theater	CLAMPER Multiproteção	01
Eletrodoméstico (Geladeira, máquina de lavar louça, etc)	iPocket	01 por eletrodoméstico
Portão eletrônico	722.B.010.220	01
Interfone	822.B.020	01

O DPS VCL 275V 12,5/60 kA possui corrente nominal (I_n) igual a 30kA e o DPS VCL 275V 20kA, possui corrente nominal (I_n) igual a 10kA. Em geral, o valor da corrente nominal (forma de onda 8/20 μ s) de um DPS Classe I é elevado, porque como o mesmo deve suportar correntes com forma de onda 10/350 μ s, ele naturalmente possui uma maior suportabilidade de a correntes com forma 8/20 μ s. Esta é a razão para a especificação do DPS VCL 275V 12,5/60kA, que possui corrente nominal igual a 30kA. Este valor é superior aos valores esperados

(5kA e 7,5kA para os Níveis de Proteção III-IV e II), como estimado anteriormente.

8.4 - UM PRÉDIO DE 20 ANDARES

8.4.1 - PROTEÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE BAIXA-TENSÃO

Os DPS primários para linhas de energia e de telecomunicações devem ser instalados na origem da instalação, sendo necessário um para cada fase.

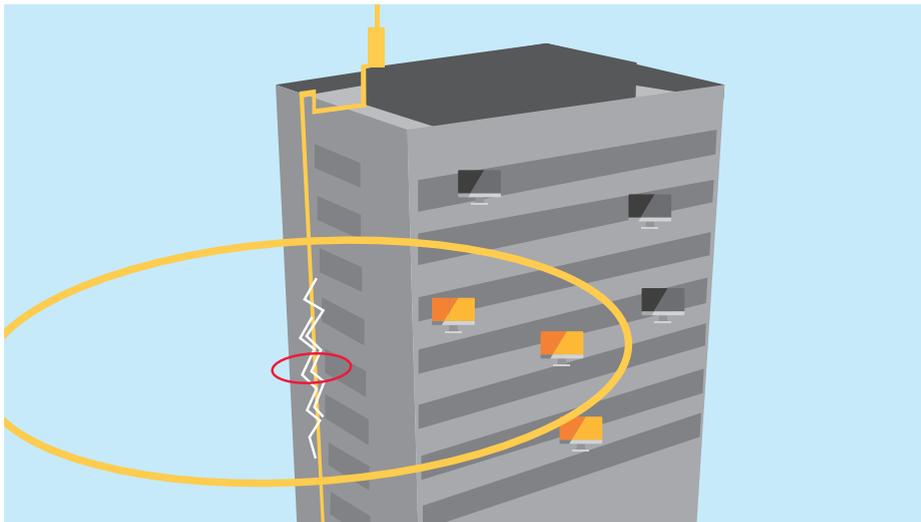


Fig. 8.10
Prédio
elevado com
SPDA externo

Considerando a exposição mais elevada de prédios, a definição dos DPS Classe I a serem instalados na entrada da edificação deve levar em consideração o nível de proteção do sistema de proteção contra descargas atmosféricas - SPDA.

Novamente, conforme apresentado no Capítulo 2, a instalação de DPS em um edifício aumenta de forma significativa o período esperado entre danos. Considerando-se um edifício de 20m de altura, área em planta de 30 × 60m, com SPDA externo instalado e localizado em uma região com densidade de descargas igual a 10 descargas/km²/ano. Para essas condições, o período entre falhas é mostrado na Tabela 8.6.

Pode ser visto na Tabela 8.6 que o Nível de Proteção da edificação interfere de forma significativa no valor do período esperado

entre falhas. Os modelos recomendados de DPS são os mostrados nas Tabelas 8.4 e 8.5, onde foi considerada uma edificação com Nível de Proteção II. Os DPS para linhas de energia devem ser instalados na caixa de medição, conforme mostrado na Fig. 8.11.

8.4.2 - PROTEÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE TELECOMUNICAÇÕES

Os DPS para linhas de telecomunicações devem ser instalados no Distribuidor Geral (DG) de telecomunicações do prédio, conforme mostrado na Fig. 8.12.

A Tabela 8.7 apresenta modelos de DPS para utilização nas redes de telecomunicações que atendem a edificação. As recomendações contidas na Seção 8.3.2 devem ser seguidas para os demais equipamentos.

TABELA 8.6

Período esperado entre falhas para o caso de um edifício de 20 m de altura e área de 30x60 m com SPDA externo com malha de 10 m de largura

DPS INSTALADO	DPS PARA NÍVEL DE PROTEÇÃO	PERÍODO ESPERADO ENTRE FALHAS (ANOS)
Não	---	0,5
Sim	III e IV	10
Sim	II	26
Sim	I	52



DJ - Disjuntor para DPS
DPS - Classe I, modelo VCL 275V
 12,5/60kA, um por fase

Fig.8.11 – Exemplo de instalação de DPS Classe I dentro da caixa de medição em rede 220/127V.

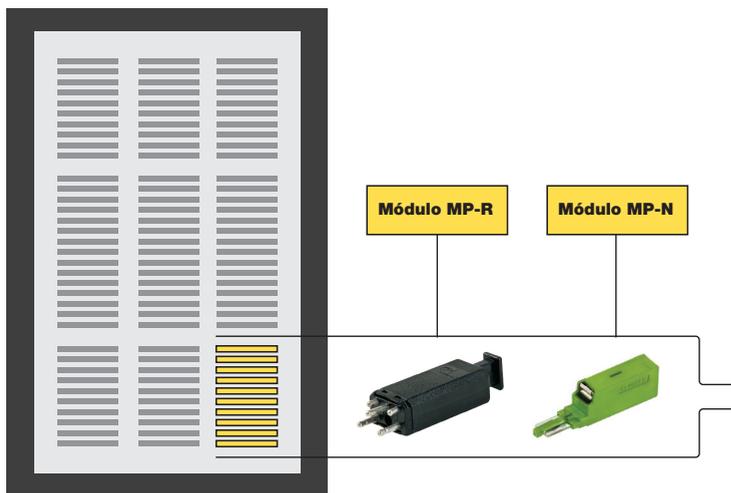


Fig.8.12 - DPS classe I para linhas telefônicas e de dados.

TABELA 8.7

Modelos indicados para aplicação nas linhas de telecomunicações na entrada da edificação
 DPS para instalação no Distribuidor Geral (DG)

APLICAÇÃO	MODELO	QUANTIDADE
Linha Telefônica	MP-R –regenerável	01 por linha
Linha ADSL/VDSL	MP-N	01 por linha
Cabo coaxial	812.X.050	01 por cabo coaxial

8.4.3 - PROTEÇÃO DA ANTENA DE TELEVISÃO

As antenas merecem atenção especial devido ao seu elevado grau de exposição. Antenas localizadas em coberturas de prédios com SPDA devem atender à distância de segurança conforme mostrado na Fig. 8.13. Neste

caso deve ser instalado DPS Classe I no cabo coaxial da antena.

8.5 - FOTOGRAFIAS DE INSTALAÇÕES TÍPICAS

A Fig. 8.14 mostra fotografias de instalações típicas de DPS em redes elétricas.

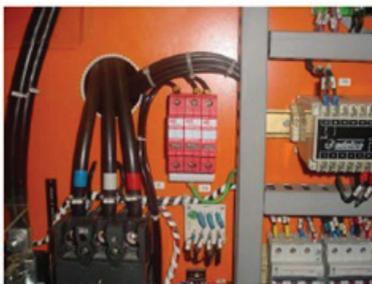
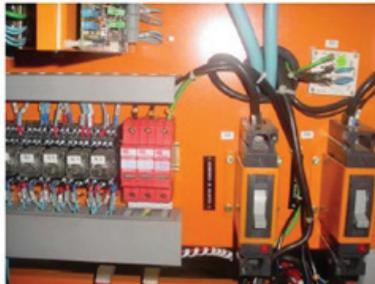
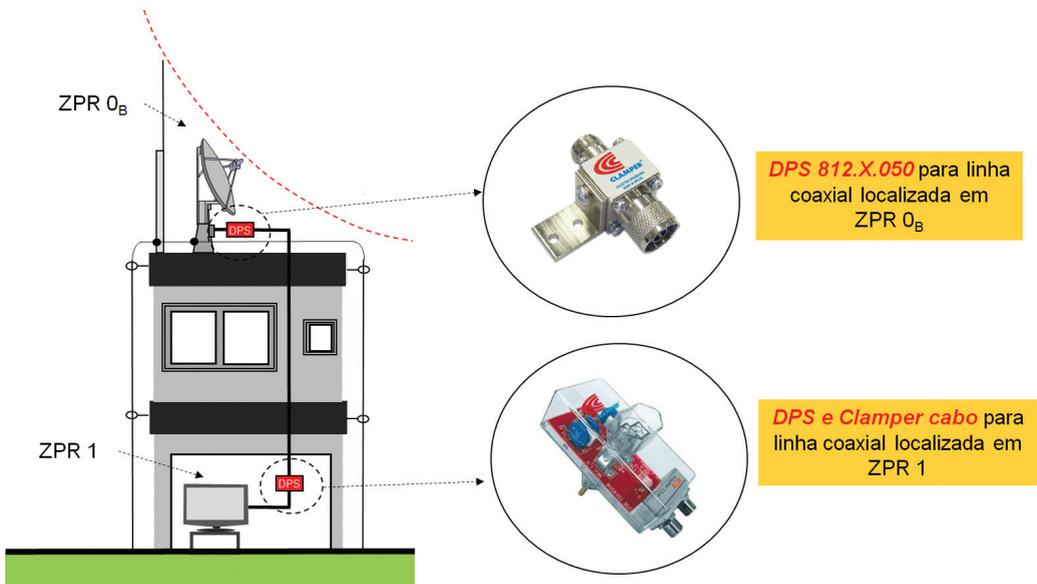


Fig. 8.14 – Fotografias de instalações típicas de DPS em redes elétricas.

8.6 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

- ⊙ A instalação de DPS é uma das medidas de proteção contra surtos (MPS) mais efetivas e uma das mais simples de ser aplicada.
- ⊙ Mesmo sendo possível a instalação de DPS nas edificações antigas que não possuem o condutor de proteção, o ideal é que a instalação elétrica seja refeita de modo a atender às recomendações da norma NBR 5410, principalmente visando a segurança pessoal.
- ⊙ Devem ser instalados DPS distribuídos ao longo da instalação, de forma coordenada, para garantir a efetividade da proteção.
- ⊙ Equipamentos ligados simultaneamente a linhas de energia e de telecomunicações podem ser protegidos por DPS Multiproteção (DPSM) instalados nessas linhas.

PROTEÇÃO DE REDES DE BAIXA TENSÃO, SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES E PLANTAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA E EÓLICA

Os DPS devem ser utilizados para proteção de todos os tipos de equipamentos elétricos e eletrônicos. Entretanto, as particularidades dos equipamentos e dos sistemas onde os mesmos estão instalados devem ser observadas e os DPS devem ser selecionados de forma harmoniosa com estas características.

No Capítulo 8 foram apresentados exemplos de aplicação de DPS em edificações residenciais ou comerciais de pequeno e de médio porte. Neste e no próximo capítulo serão apresentados exemplos de aplicação de DPS em outros sistemas. Serão descritos neste capítulo os arranjos para a proteção contra surtos de:

- ⊙ Redes de distribuição de energia em baixa tensão;
- ⊙ Redes de telefonia fixa e de comunicação de dados através de pares metálicos
- ⊙ Estações Rádio Base – ERB de telefonia móvel celular;
- ⊙ Plantas de geração fotovoltaica de pequeno e grande porte;
- ⊙ Plantas de geração eólica.

A nova NBR 5419 [1] não cobre totalmente a proteção de todos estes sistemas. Entretanto, com o auxílio de outras normas e com os conceitos desenvolvidos no livro, é possível definir arranjos eficientes de proteção basea-

dos na instalação de DPS.

9.1 - REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EM BAIXA TENSÃO

As redes de distribuição de energia em baixa tensão são responsáveis por grande parte das sobretensões que chegam às instalações dos consumidores. Essas sobretensões são originadas por descargas atmosféricas diretas ou próximas à rede de distribuição, ou por chaveamentos no sistema elétrico. Estudos recentes [2] mostram que 55% dos danos em transformadores de distribuição são provocados por descargas atmosféricas, conforme mostra a Fig. 9.1. Nas redes rurais esse número pode ser ainda maior.

As concessionárias de distribuição de energia elétrica adotam como procedimento padrão a instalação de para-raios de média tensão (PRMT) no primário do transformador, mas isso não é suficiente para garantir a sua proteção. Tensões elevadas são transferidas para o lado secundário do transformador, podendo provocar a queima do mesmo. A instalação de DPS no secundário, denominados para-raios de baixa tensão (PRBT), reduz significativamente os valores das sobretensões e protege o transformador.

As concessionárias utilizam para-raios de média tensão (PRMT) com corrente nominal de 10kA. Os para-raios de baixa tensão (PRBT) também devem seguir a mesma indicação para a corrente nominal de descarga,

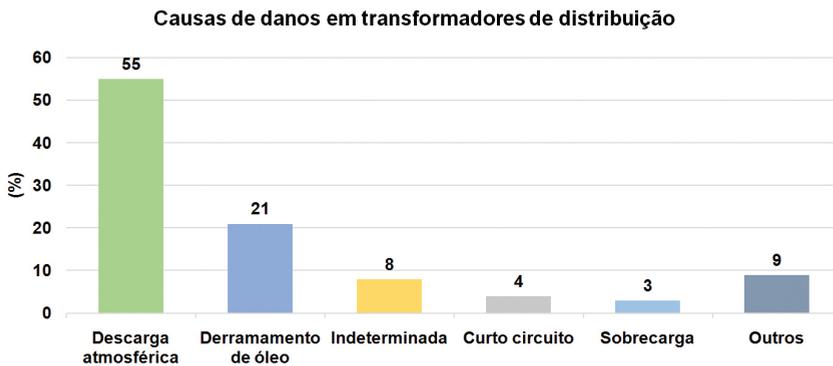


Fig. 9.1 – Dados referentes à queima de transformadores de distribuição. Retirado de [2].

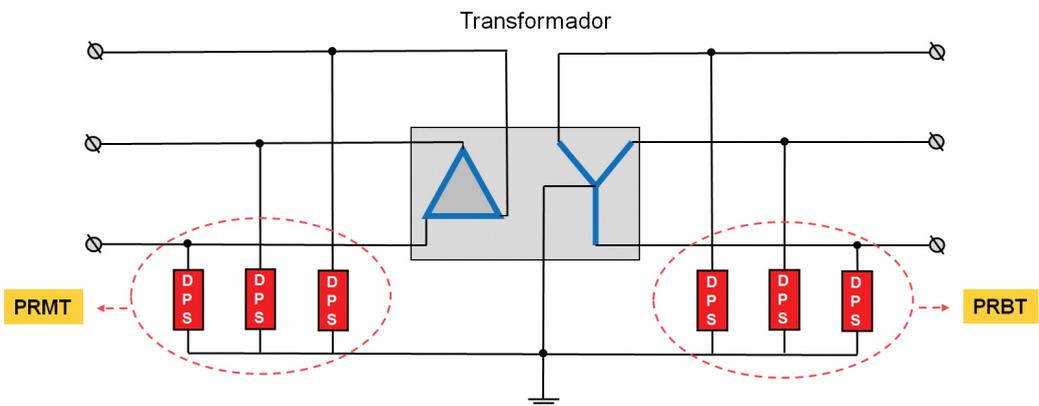


Fig.9.2 – Diagrama esquemático de proteção de transformador de distribuição.

ou seja, 10kA. Medições de correntes impulsivas, provocadas por descargas atmosféricas em cabos de aterramento de transformadores indicaram valores medianos de 1,2kA e que raramente ultrapassaram 10kA [3]. É interessante ressaltar que tanto o PRMT quanto o PRBT são DPS cujo elemento básico é um varistor. O PRBT deve ser instalado junto à bucha secundária do transformador, conforme mostrado na Fig. 9.3.

Deve ser instalado um PRBT por fase, conforme indicado na Fig. 9.4. As conexões devem ser curtas (menores que 0,5m). A Fig. 9.5 mostra uma instalação real, contendo um conjunto de PRBT instalado no circuito secundário de um transformador.

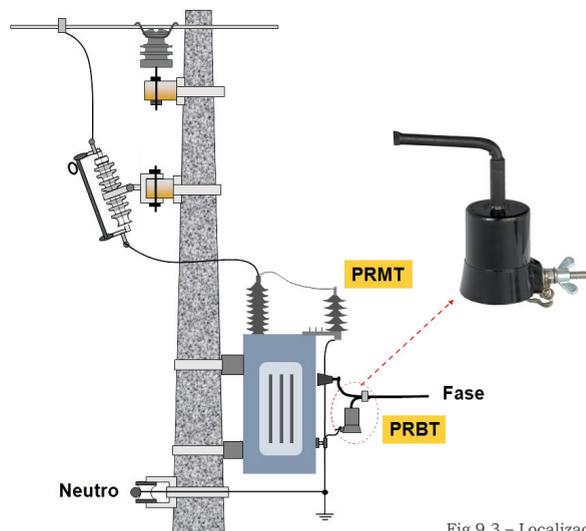


Fig.9.3 – Localização do PRBT junto ao transformador

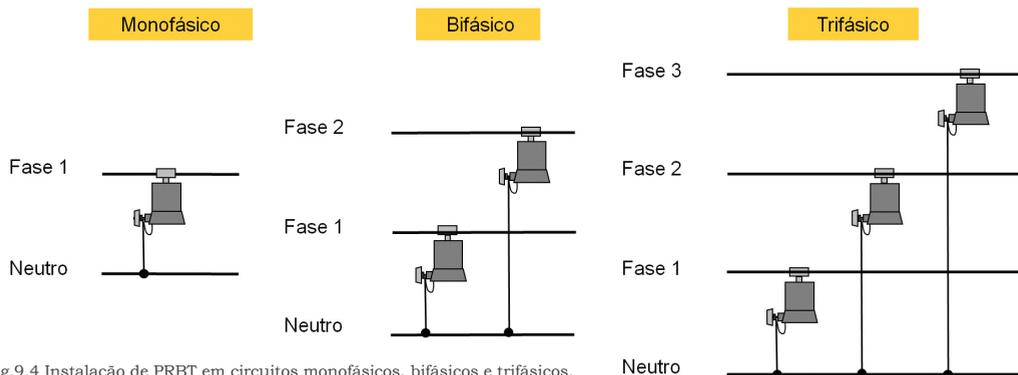


Fig.9.4 Instalação de PRBT em circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos.



Fig. 9.5 Detalhe de instalação de PRBT no secundário de um transformador.

O PRBT possui um dispositivo automático (não explosivo) para desconexão da rede elétrica no caso de falha ou término de sua vida útil, conforme mostrado na Fig. 9.6. Esse dispositivo provê a indicação visual do PRBT desconectado, permitindo a sua detecção por uma pessoa localizada no solo.

Os modelos mais indicados de PRBT para aplicação em redes 220/127V e 380/220V são detalhados na Tabela 9.1. Existem modelos para aplicação em redes secundárias convencionais (cabos nus) e redes isoladas (cabos isolados).

Dois modelos com valores de corrente nominais de 10kA e 20kA são disponibilizados. O modelo de 20kA deve ser utilizado em redes com maior grau de exposição às descargas atmosféricas.



Fig. 9.6 – Detalhe do desligador/indicador de fim de vida útil de um PRBT.

TABELA 9.1
Especificação e modelos de PRBT

Modelos	Tensão nominal	Máxima tensão de operação contínua (U_c)	Corrente de descarga nominal (I_n) a 8/20 μ s
PRBT 280V 10kA / C*	220V	280V	10kA
PRBT 280V 10kA / I*	220V	280V	10kA
PRBT 280V 20kA / C	220V	280V	20kA
PRBT 280V 20kA / I	220V	280V	20kA
PRBT 440V 10kA / C	380V	440V	10kA
PRBT 440V 10kA / I	380V	440V	10kA
PRBT 440V 20kA / C	380V	440V	20kA
PRBT 440V 20kA / I	380V	440V	20kA

* A letra C se refere a rede convencional (cabos nus) e a letra I a rede isolada (cabos isolados).

9.2 - REDE DE TELEFONIA FIXA E DE COMUNICAÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DE PARES METÁLICOS

Nos dias de hoje, com a internet das coisas (IoT) batendo à porta, as redes de telecomunicações passaram a ser parte de extrema importância para o dia a dia das pessoas e empresas. A confiabilidade e operacionalidade de sistemas industriais, bancários e muitos outros está intrinsecamente ligada ao desempenho dos sistemas de telecomunicações, notadamente ao acesso à internet.

As redes de telecomunicações, utilizadas para transporte das informações, estão diretamente expostas aos surtos elétricos pro-

vocados por descargas atmosféricas diretas ou próximas, assim como por chaveamentos no sistema elétrico de energia. A Fig. 9.7 mostra um diagrama simplificado de uma rede de telefonia fixa e de comunicação de dados tipo ADSL. A proteção para os equipamentos instalados na residência ou escritório já foi detalhada no Capítulo 8.

9.2.1 - PRÉDIO DA ESTAÇÃO DE TELECOMUNICAÇÕES

O prédio da central telefônica normalmente está exposto aos riscos S1, S2, S3 e S4, de acordo com a NBR 5419 [3]. Conforme visto no Capítulo 2, instalações com torres elevadas estão ainda mais vulneráveis às

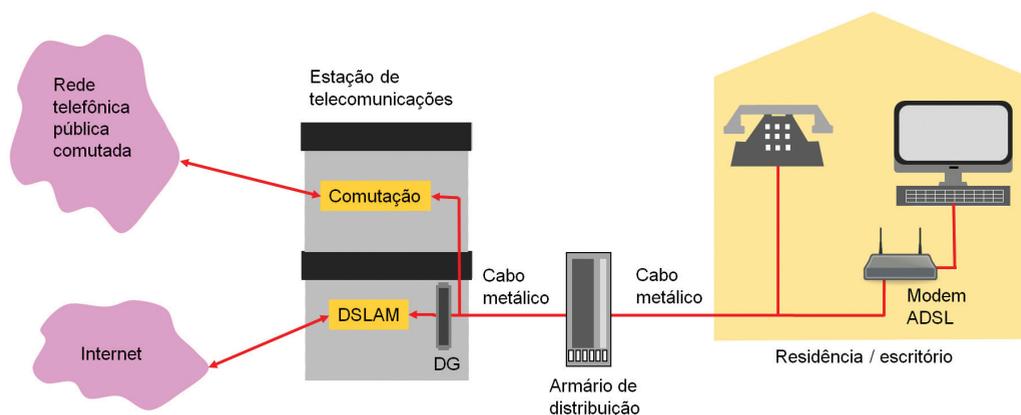


Fig. 9.7 – Diagrama simplificado de rede de telefonia fixa e comunicação de dados através de pares metálicos.

descargas diretas e seus efeitos. Pode ser visto na Tabela 9.2, mostrada no Capítulo 2 e repetida a seguir, que o Nível de Proteção da edificação também interfere no valor do período esperado entre falhas. Para uma proteção adequada, o Prédio da Estação de Telecomunicações requer a instalação de DPS nos sistemas de energia e no distribuidor geral.

TABELA 9.2

Período esperado entre falhas para o caso de uma Estação de Telecomunicações com torre de 100m de altura. SPDA externo com malha de 10m de largura e sem utilização de arranjo otimizado para a fiação interna.

Região com $N_g = 10$ descargas /km²/ano.

DPS para nível de proteção	Período esperado entre falhas (anos)
III e IV	5
I	22
DPS especial	223

9.2.1.1 - SISTEMA DE ENERGIA

Considerando uma edificação alimentada por uma rede trifásica (3 fases e neutro), Nível de Proteção I, ou seja, risco de descarga direta na estrutura com valor de pico igual a 200kA, o DPS para o sistema de energia deve suportar corrente impulsiva mínima de 25kA (onda 10/350µs).

Conforme mostrado na Tabela 9.2, se for utilizado um DPS especial (DPS com características melhores de proteção (maior corrente nominal e menor nível de proteção, comparados com os requisitos definidos para o NP I), o tempo esperado entre falhas aumenta de forma significativa. Na Fig. 9.8 é exemplificada a utilização de um DPS de grande capacidade de corrente para onda 10/350µs (60kA).

DPS Classe II devem ser utilizados de forma complementar, para garantir coordenação de energia e tensão residual adequada à suportabilidade dos sistemas de energia dos equipamentos da Estação de Telecomunicações. A Fig. 9.8 mostra um diagrama esquemático de aplicação de DPS na entrada do prédio da Estação de Telecomunicações.

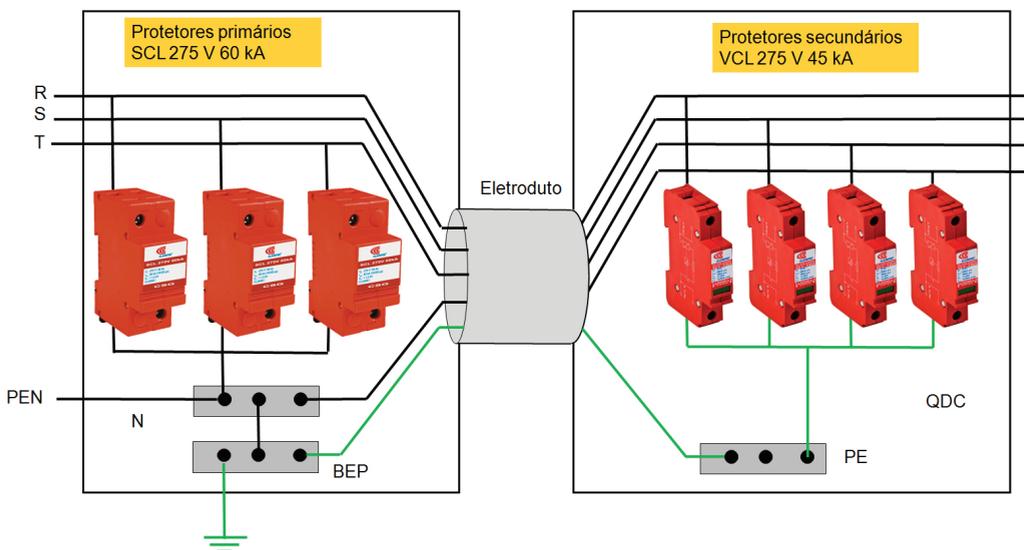


Fig. 9.8 – Exemplo de aplicação de DPS na entrada de energia elétrica da Estação de Telecomunicações.

9.2.1.2 - DISTRIBUIDOR GERAL

O Distribuidor Geral (DG) é a parte das instalações da Estação de Telecomunicações que faz a interface entre os condutores que vêm da rede externa e os condutores que vão para os equipamentos de telecomunicações. O DG é normalmente formado por dois conjuntos de blocos terminais: os blocos verticais, onde terminam os cabos telefônicos que vêm da rede externa; e os blocos horizontais, de onde partem os cabos internos que vão para os equipamentos. Pares de fios trançados (*jumpers*) fazem as conexões entre os dois conjuntos de blocos. Existem vários tipos de distribuidores com diferentes padrões de blocos de conexão. Todos os blocos verticais devem ser protegidos com DPS específicos, também chamados de módulos protetores, sendo necessário um módulo protetor para cada par de fios. Um DG de uma Estação de Telecomunicações urbana pode possuir mais de 20.000 pares de fios a serem protegidos. A Fig. 9.9 mostra um DG típico com blocos terminais verticais e módulos protetores.

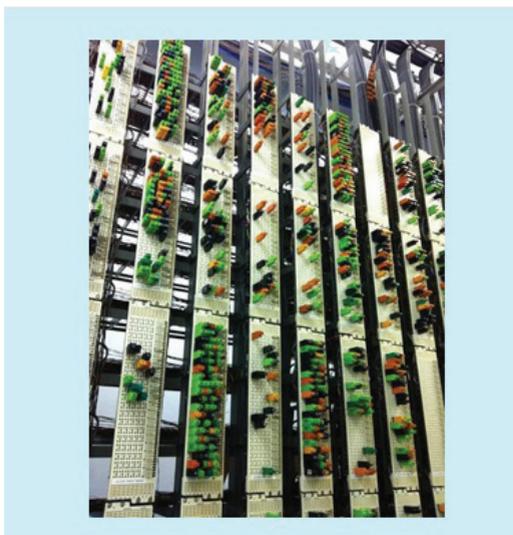


Fig. 9.9 - Exemplo de distribuidor geral (DG) equipado com módulos protetores.

Os módulos protetores para linhas telefônicas devem possuir proteção paralela contra sobretensão e em série contra sobrecorrente. Na proteção contra sobrecorrente é utilizado um termistor que atua como um fusível regenerável, isto é, ele abre o circuito

quando há sobrecorrente na linha e volta a fechar o circuito quando a fonte da sobrecorrente é removida. Esse tipo de módulo é denominado Módulo Protetor Regenerável (MP-R), conforme padronização da Anatel. A Fig. 9.10 mostra o circuito típico de um módulo protetor regenerável MP-R à base de centelhador a gás, onde as chaves representam um dispositivo de falha segura (*fail-safe*). Esse dispositivo tem a função de aterrar permanentemente o módulo em caso de sobreaquecimento.

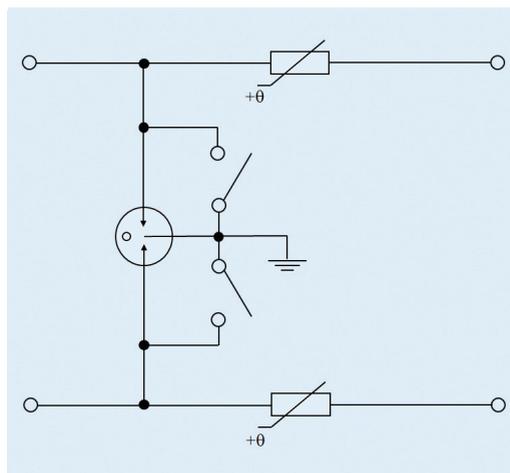


Figura 9.10 – Diagrama elétrico do Módulo Protetor Regenerável (MP-R).

A Fig. 9.11 mostra diferentes tipos de módulos protetores MP-R e seus respectivos blocos terminais utilizados em DGs. O bloco C303 era o padrão da antiga Telebrás e ainda é muito encontrado nas Estações de Telecomunicações mais antigas. Os blocos IDC Contato Cilíndrico e IDC Engate Rápido têm sido preferidos nas novas instalações, principalmente por ocuparem menos espaço.

Para os pares de fios destinados simultaneamente para linhas telefônicas e comunicação de dados, como as linhas ADSL, os módulos protetores devem possuir baixa perda de inserção, para minimizar o seu impacto na transmissão digital. Nesse caso, é preferível utilizar o Módulo Protetor Normal (MP-N), que possui proteção paralela contra sobretensão. A Fig. 9.12 mostra o circuito típico de um Módulo Protetor Normal MP-N.



Fig. 9.11 – Exemplos de blocos e módulos protetores MP-R.

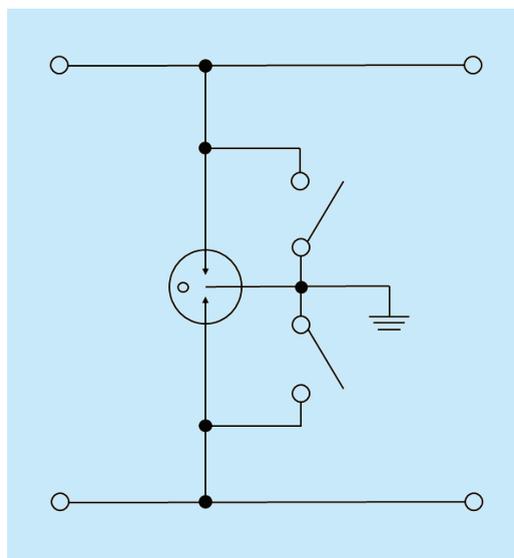


Fig. 9.12 - Diagrama elétrico Módulo Protetor Normal (MP-N).



Fig. 9.13 – Módulos tipo MP-N-ERCP (acima) e MP-N 5 (abaixo) pinos para proteção de linhas ADSL/VDSL.

Para facilitar a diferenciação entre os módulos MP-R e MP-N, as operadoras de telecomunicações padronizam cores distintas conforme descrito a seguir:

- ☑ Preto - módulos protetores destinados a proteção de linha telefônica fixa;
- ☑ Verde - módulos protetores destinados a proteção de linha de comunicação de dados (por exemplo – ADSL/VDSL).

A Fig.9.13 mostra exemplo de um módulo protetor tipo MP-N-ERCP para linhas de comunicação tipo ADSL/VDSL.

9.2.2 - ARMÁRIO ÓPTICO

Nas expansões e atualizações das redes de telecomunicações, os armários de distribuição têm sido substituídos por armários ópticos. A configuração resultante é mostrada na Fig. 9.14, que deve ser comparada com a Fig. 9.7. Nesse caso, o DG é substituído por um Distribuidor Geral Óptico (DGO), onde são feitas as conexões entre as fibras ópticas que vêm da rede e as fibras que vão para os equipamentos. Um cabo óptico conecta o DGO até um Armário Óptico, onde ficam os equipamentos que fazem a interface de comunicação com a rede metálica (DSLAM).

Ponto de transição entre a rede de fibra ótica e a rede de par metálico, o armário ótico pode cobrir uma área de alguns km² e está exposto, na grande maioria dos casos, a descargas indiretas.

Considerando os riscos de danos S2, S3 e S4 conforme a norma NBR 5419, a fonte de alimentação dos equipamentos deve ser protegida com DPS Classe II. Existe uma variedade grande de DPS com corrente de descarga nominal adequada para a aplicação e boa relação custo benefício.

A Fig. 9.15 mostra detalhe do DPS instalado na entrada de um armário ótico. O DPS deve possuir sistema de sinalização remota para possibilitar o monitoramento de seu fim de vida útil através do sistema de su-

pervisão do próprio armário ótico.

A partir do armário ótico, os cabos da rede até o ambiente do cliente da operadora são metálicos e devem ser protegidos com DPS específicos, também chamados de módulos protetores, sendo necessário um módulo protetor para cada par de fios. Um armário ótico possui um Distribuidor Geral (DG) com 200 até 2400 pares de fios a serem protegidos. A Fig.9.16 mostra diferentes tipos de blocos utilizados nos armários óticos.

Os módulos protetores devem possuir baixa perda por inserção, para minimizar o seu efeito sobre a transmissão digital. Portanto, é recomendável utilizar o Módulo Protetor Normal (MP-R) para essa aplicação. Esse tipo de módulo protetor é descrito na Seção 9.2.1.2.

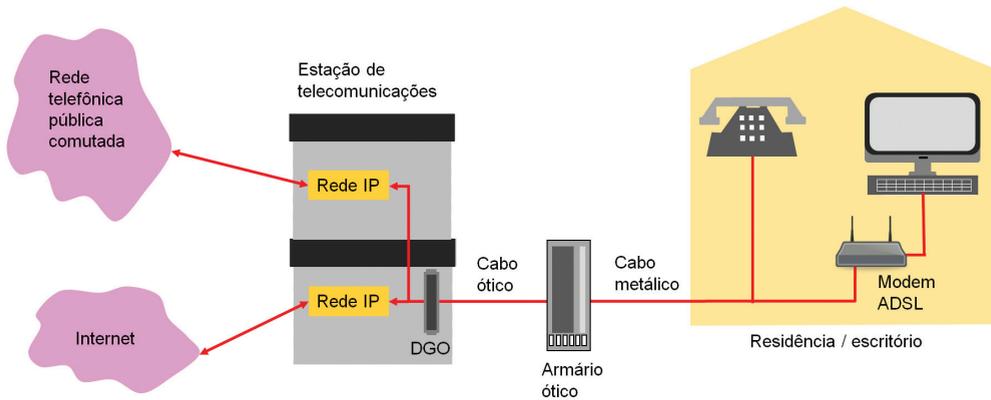


Fig. 9.14 -Diagrama simplificado de rede de telefonia fixa e comunicação de dados através de Armário Ótico.



Fig.9.15– Detalhe VCL SP 275V 45kA/SR instalado na linha de energia de um Armário Ótico, para proteção do retificador.



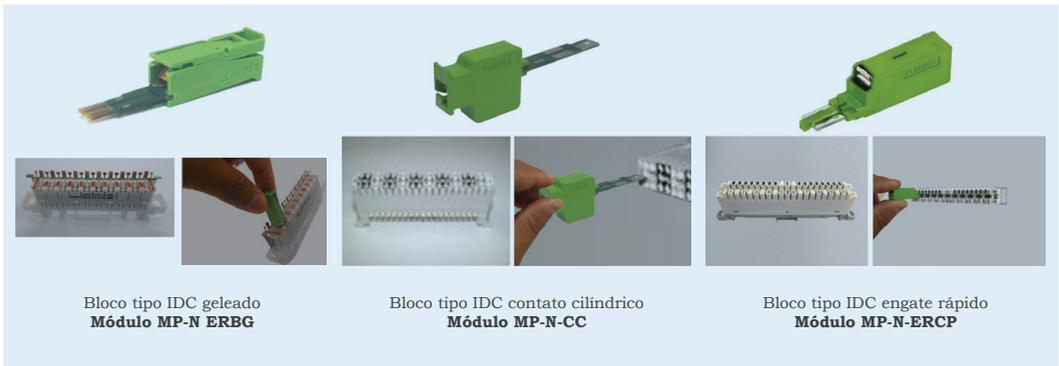


Fig. 9.16 – Exemplos de módulos protetores e blocos terminais para Armário Óptico.

9.3 - ESTAÇÕES RÁDIO BASE DE TELEFONIA MÓVEL CELULAR

As estações rádio base (ERB) estão espalhadas pelas cidades, quer seja no topo dos edifícios, das montanhas ou até mesmo em terrenos comuns. Existem estações internas, tipo micro ERBs e externas. As estações externas, principalmente as localizadas em topo de edifícios ou de morros, estão expostas aos riscos S1, S2, S3, S4, conforme NBR 5419 e devem ser protegidas contra as descargas atmosféricas. Os principais componentes que compõem uma estação rádio base externa são mostrados na Fig. 9.17, com destaque para:

- ✓ Torre;
- ✓ Container ou armário;
- ✓ Fonte de alimentação (retificador);
- ✓ Iluminação de balizamento;
- ✓ Rádio instalado dentro do armário ou na torre.

9.3.1 - SISTEMA DE ENERGIA

Considerando risco de descarga direta na estrutura e Nível de Proteção III-IV, conforme NBR 5419, o DPS para o sistema de energia deve suportar corrente impulsiva mínima de 12,5kA para onda 10/350µs. Os

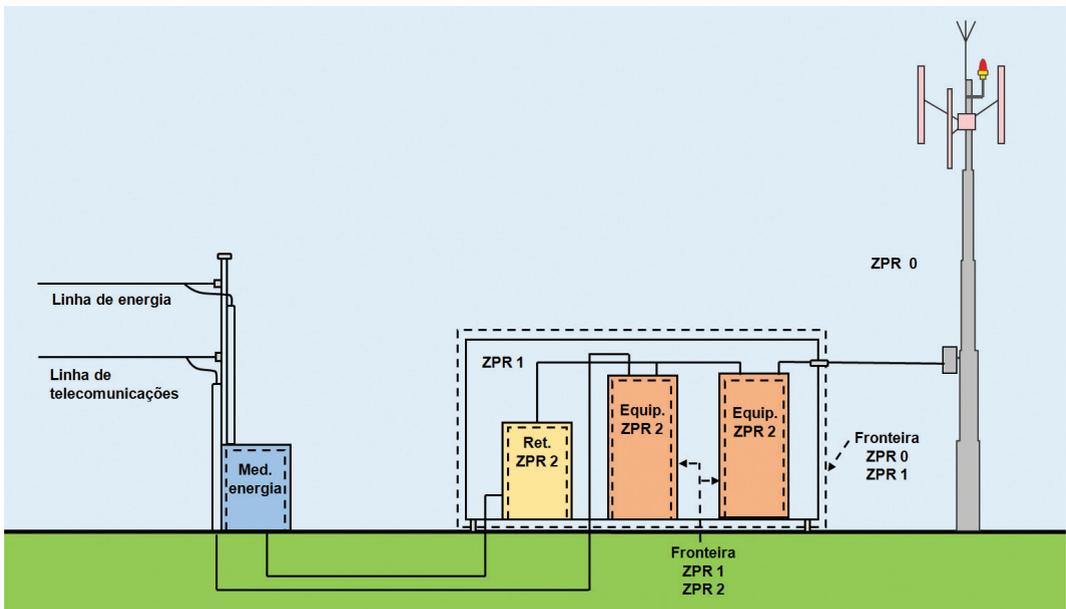


Fig.9.17 – Configuração básica de uma estação rádio base (ERB). Adaptado de [4].

sistemas de energia devem ser protegidos com DPS Classe I na entrada do prédio, na fronteira entre a zona ZPR 0_b e a zona ZPR 1. DPS Classe II devem ser utilizados de forma complementar para garantir coordenação de energia e tensão residual adequada à suportabilidade dos sistemas de energia dos equipamentos da ERB. A Fig. 9.18 mostra diagrama esquemático de aplicação de DPS na entrada da instalação (VCL SP 275V 45kA/SR).

A Fig. 9.19 mostra DPS primário, Classe I, aplicado na entrada de uma ERB, junto ao medidor da concessionária de energia.



Fig. 9.19 - DPS Classe I modelo VCL 275V 12,5/60kA aplicado na entrada da instalação, próximo ao medidor de energia da concessionária de energia.

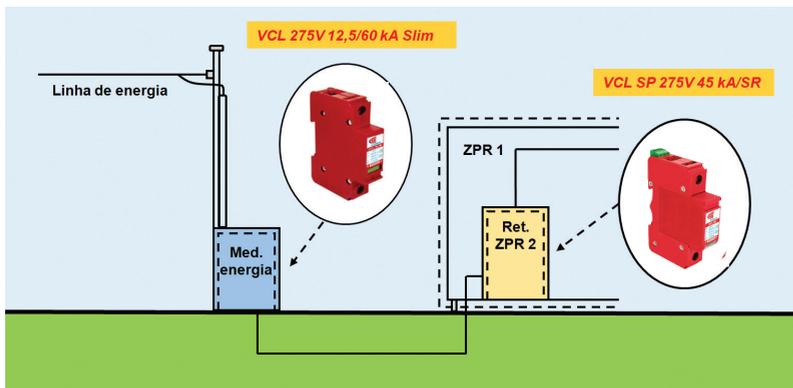


Fig. 9.18 - Exemplo de aplicação de DPS na entrada de estação rádio base alimentada em 127/220V trifásico.

9.3.2 - BALIZAMENTO

A fonte de alimentação e o controle da iluminação de balizamento localizados dentro do container ou armário estão expostos aos riscos S1 e S2. O conjunto de DPS para proteção do sistema de balizamento deve ser instalado na fronteira entre a zona ZPR 0 e ZPR 1, conforme mostra a Fig. 9.20. Para sistemas alimentados em -48Vcc, a tensão nominal do DPS deve ser 75 V.

9.3.3 - CABOS COAXIAIS E GUIAS DE ONDA CONECTADOS ÀS ANTENAS DA TORRE

Embora as blindagens dos cabos coaxiais e guias de onda provenientes das antenas estejam conectados à malha de aterramento em vários pontos, inclusive quando os cabos se afastam da torre, com vistas a evitar centelhamento perigoso, ainda assim podem ser necessários protetores específicos para os cabos coaxiais (exceto guia de onda)



Fig. 9.20 - Detalhe de aplicação de DPS VCL 75V 45kA para proteção de iluminação de balizamento em estação rádio base alimentada em -48Vcc.

para bloquear correntes resultantes de descargas atmosféricas diretas na torre.

Os DPS, quando aplicáveis, devem ser instalados na transição entre o ambiente externo, ou seja, na transição entre a zona ZPR 0 e ZPR 1. A Fig. 9.21 mostra arranjo típico de aterramento das blindagens dos cabos coaxiais na fronteira entre ZPR 0 e ZPR 1.



Fig. 9.21 – Aterramento da blindagem de cabos coaxiais.

A Fig. 9.22 mostra DPS instalado nos cabos coaxiais, na transição entre a zona ZPR 0 e ZPR 1.



Fig. 9.22 – DPS modelo 812.X.050/N instalado na entrada do prédio ou container.

9.3.4 - LINHAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Em algumas estações rádio base podem existir conexões com estações de telefonia

fixa através de cabos metálicos. Nestes casos, devem ser aplicados DPS nas conexões na fronteira entre ZPR 0 e ZPR 1. O tipo do DPS vai depender da tecnologia de comunicação utilizada.

9.4 - SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO

São apresentadas alternativas de proteção para o circuito elétrico da planta fotovoltaica. Entretanto, é importante ressaltar que os circuitos de telecomunicação e de transmissão de dados e sinais, eventualmente existentes na planta, também precisam de proteção contra surtos.

9.4.1 - SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO DE PEQUENO PORTE

A Fig. 9.23 mostra o arranjo básico de um sistema de geração solar fotovoltaico de pequeno porte interligado à rede de distribuição de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos estão diretamente expostos a surtos provocados por descargas atmosféricas ou por chaveamento nas linhas de energia. Estes surtos podem reduzir a vida útil ou até mesmo danificar os módulos fotovoltaicos e os inversores, situações que certamente terão impacto nos custos de manutenção e consequente aumento do tempo de amortização do investimento. Várias ocorrências podem causar sobretensões em um sistema fotovoltaico conforme a seguir:

- ☑ Descarga direta no SPDA externo da instalação;
- ☑ Descargas próximas à instalação;
- ☑ Descargas diretas ou próximas à rede de distribuição de energia da concessionária de energia;
- ☑ Sobretensões oriundas da rede de distribuição de energia em função de faltas, chaveamentos (operações de comutação).

Como solução faz-se necessária a utilização de protetores contra surtos elétricos (DPS) apropriados para mitigação desses riscos de

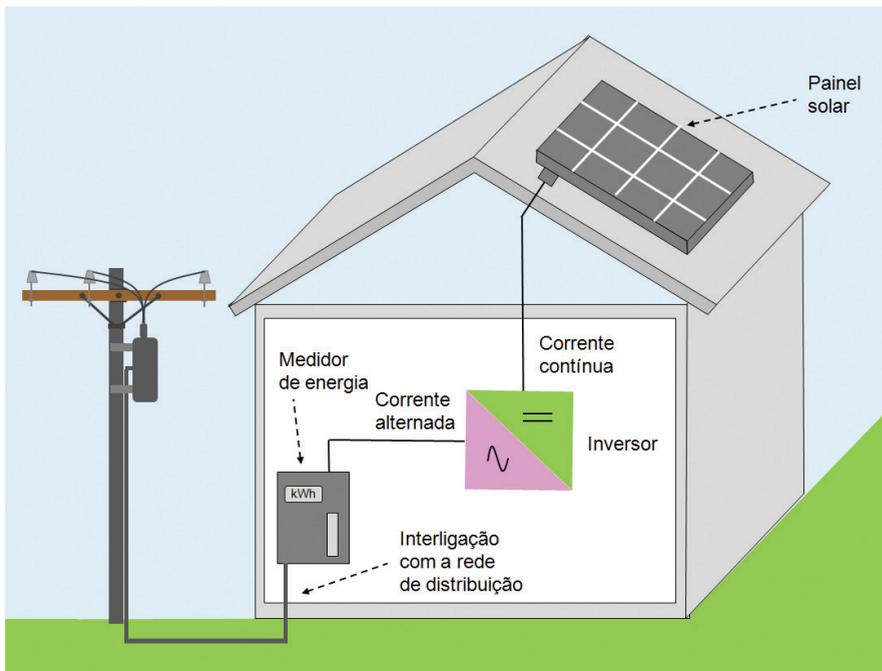


Fig.9.23
Esquema de geração fotovoltaica de pequeno porte interligada à rede de distribuição de energia elétrica.

queima e danos, protegendo assim o investimento realizado no sistema fotovoltaico. A seleção e instalação de DPS em sistemas fotovoltaicos dependerá de vários fatores conforme a seguir:

- ⊙ Densidade de descargas para a terra, N_g (descargas/km²/ano);
- ⊙ Características do sistema de energia de baixa tensão (por exemplo, linhas aéreas ou subterrâneas) e do equipamento a ser protegido;
- ⊙ Suportabilidade dos equipamentos frente à sobretensões;
- ⊙ Existência ou não de um SPDA.

Os critérios para a instalação de DPS descritos a seguir foram baseados na proposta de norma IEC 61643-32[4]. Do ponto de vista da suportabilidade dos equipamentos instalados nas linhas de corrente contínua, os DPS devem possuir nível de proteção inferior à suportabilidade dos equipamentos.

A Tabela 9.3 [5] mostra valores de suportabilidade a tensões impulsivas para equipamentos que compõem o sistema de geração fotovoltaica, onde U_{ocmax} representa a máxima tensão do sistema fotovoltaico em

corrente contínua e U_w representa a suportabilidade dos equipamentos à sobretensões impulsivas.

9.4.1.1 - PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS

No caso de sistemas onde a probabilidade de incidência de uma descarga direta é baixa, pode ser instalada apenas proteção contra os surtos induzidos pelas descargas que incidem nas proximidades dos painéis e também das linhas de alimentação. A localização e tipo dos DPS para proteção contra surtos provocados por descargas atmosféricas próximas deve ser conforme detalhado na Fig. 9.24. É considerado que a edificação não possui SPDA.

O DPS 2 mostrado na Fig. 9.2 não será necessário se a distância entre o quadro de distribuição de circuitos e o inversor for menor que 10m.

O DPS 4 não será necessário se a distância entre o inversor e o painel fotovoltaico for menor que 10m conforme mostra a Fig. 9.25 e o nível de proteção U_p do DPS 1 menor ou igual a $0,8 U_w$ ou se o nível de proteção U_p do DPS 1 for menor ou igual a $0,5 U_w$, conforme

Tabela 9.3. As distâncias L_1 e L_2 devem ser inferiores a 0,5m, conforme Fig 9.25.

TABELA 9.3 - ADAPTADA DE [4]				
Suportabilidade a tensões impulsivas de equipamentos que compõem o sistema de geração fotovoltaica				
U_{OCmax} (V)	Suportabilidade a tensões impulsivas - U_w (kV)			
	Módulo Classe B Isolação básica	Inversor	Outros equipamentos	Módulo Classe A Isolação reforçada
100	0,8	2,5 (mínimo)	0,8	1,5
150	1,5		1,5	2,5
300	2,5		2,5	4
424	4		4	4
600	4	4	4	6
800	5		5	6
849	6		6	8
1000	6		6	8
1500	8		8	8

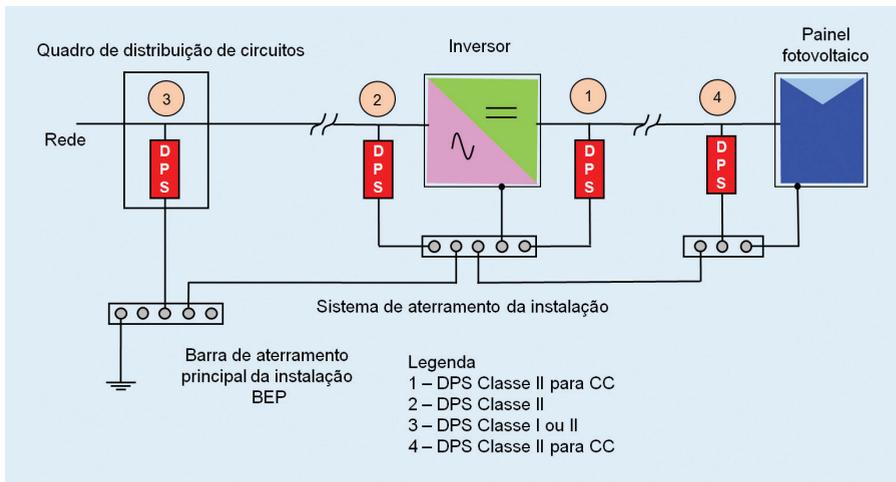


Fig.9.24 Diagrama esquemático de localização dos DPS. Adaptado de [4].

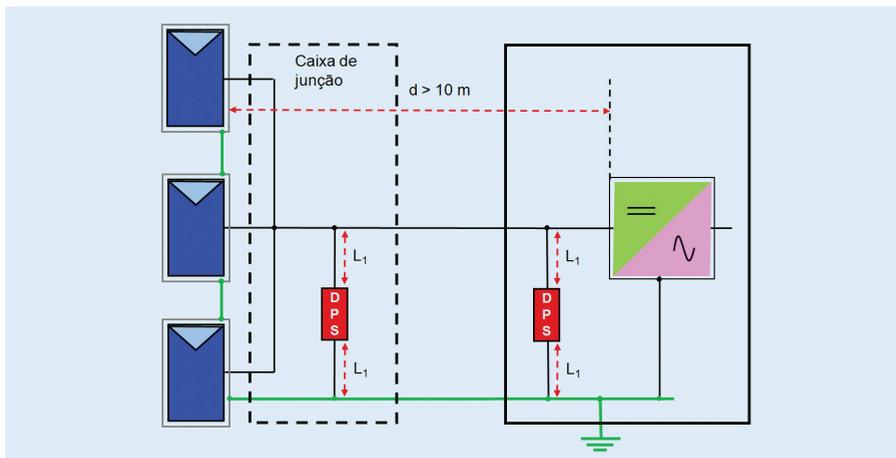


Fig.9.25 Esquema de conexão de DPS no lado CC do sistema de geração. Adaptado de [4].

A Tabela 9.4 sugere modelos de DPS a serem utilizados nessa aplicação.

TABELA 9.4
Especificação e modelos indicados para proteção contra descargas indiretas

Item	Modelo	Classe	Máxima tensão de operação contínua U_{cpu} / U_c	Corrente de descarga total I_{Total} (8/20 μ s)	Corrente de descarga nominal I_n (8/20 μ s)	Nível de proteção $U_{L+/L-}$
1 e 4	CLAMPER Solar 150V _{cc} 40kA	II	150V _{CC}	40kA	10kA	0,8kV
	CLAMPER Solar 300V _{cc} 40kA	II	300 V _{CC}	40kA	10kA	1,6kV
	CLAMPER Solar 600V _{cc} 40kA	II	600 V _{CC}	40kA	10kA	2,4kV
	CLAMPER Solar 1000V _{cc} 40kA	II	1000 V _{CC}	40kA	10kA	4,0kV
2	VCL SP 275V 20kA	II	275 V _{RMS}	20kA	10kA	1,2kV
3	VCL SP 275V 20kA VCL SP 275V 20kA	II	275 V _{RMS}	20kA	10kA	1,2kV

Nota: Os modelos indicados para aplicação em corrente contínua possuem 3 módulos integrados, preparados para conexão tipo estrela, conforme detalhado no item 9.4.3.1.

9.4.1.2 INSTALAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM EDIFICAÇÃO COM SPDA EXTERNO ISOLADO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.

A Fig. 9.26 ilustra um sistema de painéis fotovoltaicos instalado em uma edificação

com SPDA. O sistema fotovoltaico não é interligado ao SPDA.

Mesmo com a separação entre o sistema de captação e o sistema de geração fotovoltaica, uma parcela da corrente da descarga será

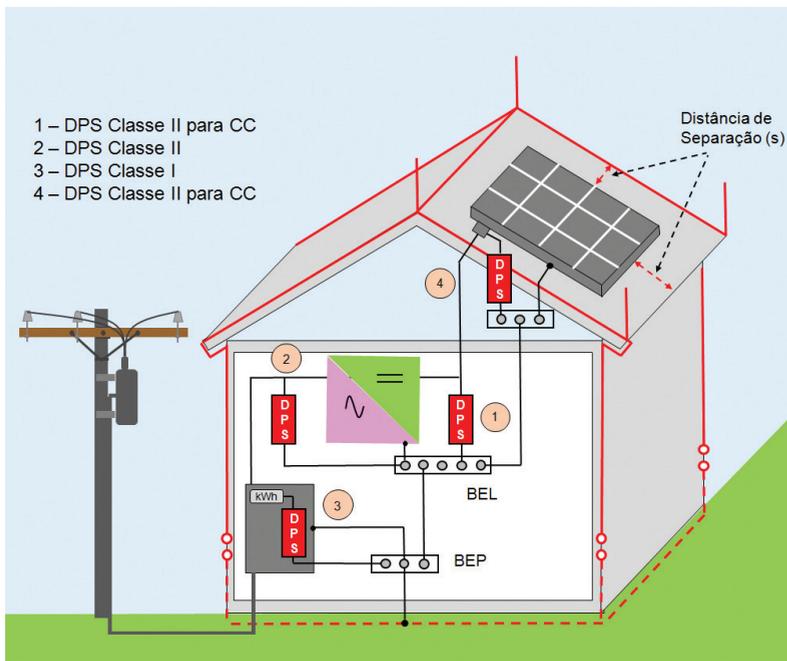


Fig.9.26 – Localização dos DPS no caso de painéis isolados do SPDA. Adaptado de [4].

conduzida via linhas de alimentação elétrica. Neste caso, deve-se utilizar DPS Classe I, ou seja, com capacidade para drenar uma parcela da corrente da descarga, conforme mostra a Fig.9.26 (DPS 3).

O DPS 2 não será necessário se o inversor estiver localizado junto ao quadro de distribuição de circuitos, conectado à mesma barra de terra (PE) do quadro, com com-

primimento de cabo menor que 0,5m. O DPS 4 não será necessário se a distância entre o inversor e o painel fotovoltaico for menor que 10m e o nível de proteção U_p do DPS 1 menor ou igual a $0,8 U_w$ ou se o nível de proteção U_p do DPS 1 for menor ou igual a $0,5 U_w$, conforme Tabela 9.3.

A Tabela 9.5 sugere modelos de DPS a serem utilizados nessa aplicação.

TABELA 9.5 Especificação e modelos indicados para proteção contra descargas diretas, SPDA isolado dos painéis fotovoltaicos						
Item	Modelo	Classe	Máxima tensão de operação contínua U_{cpw} / U_c	Corrente de descarga total $I_{Total} (8/20\mu s)$	Corrente de descarga nominal $I_n (8/20\mu s)$	Nível de proteção U_p L+/L-
1 e 4	CLAMPER Solar150V _{cc} 40kA	II	150V _{CC}	40kA	10kA	0,8kV
	CLAMPER Solar 300V _{cc} 40kA	II	300 V _{CC}	40kA	10kA	1,6kV
	CLAMPER Solar 600V _{cc} 40kA	II	600 V _{CC}	40kA	10kA	2,4kV
	CLAMPER Solar 1000 V _{CC} 40kA	II	1000 V _{CC}	40kA	10kA	4,0kV
2	VCL SP275V 20kA	II	275 V _{RMS}	20kA	10kA	1,2kV
3	VCL 275V 12,5/60kA	I/II	275 V _{RMS}	60 kA	30 kA	1,3kV

Nota: Os modelos indicados para aplicação em corrente contínua possuem 3 módulos integrados, preparados para conexão tipo estrela, conforme detalhado no item 9.4.3.1.

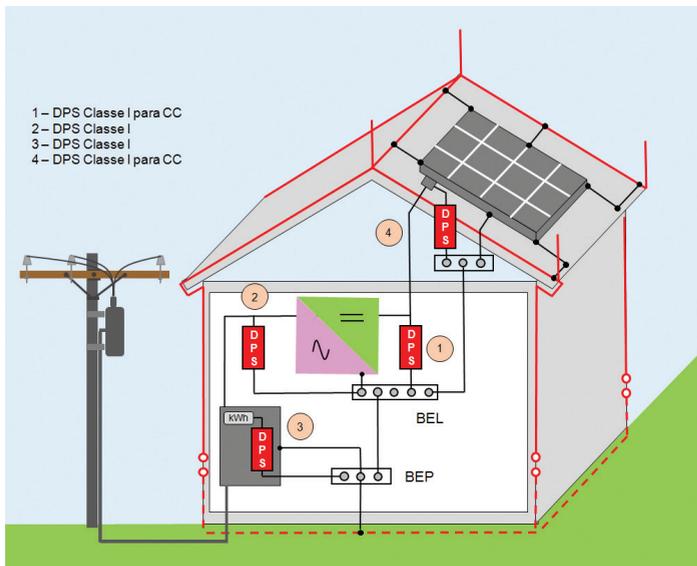


Fig.9.27 - Localização dos DPS no caso de painéis interligados no SPDA. Adaptado de [4].

TABELA 9.6 – ADAPTADO DE [4]

Valores estimados de I_n e I_{imp} para DPS tipo limitador de tensão para instalação na linha de corrente contínua

Nível de proteção do SPDA -Corrente de descarga		Número de condutores de descida			
		<4		≥4	
		Valores mínimos de I_n para onda 8/20µs e I_{imp} para onda 10/350 µs para seleção de DPS			
		$I_{dps1}=I_{dps2}$ $I_{8/20} // I_{10/350}$	$I_{dps3} =$ $I_{dps1}+I_{dps2} = I_{Total}$ $I_{8/20} // I_{10/350}$	$I_{dps1}=I_{dps2}$ $I_{8/20} // I_{10/350}$	$I_{dps3} =$ $I_{dps1}+I_{dps2} = I_{Total}$ $I_{8/20} // I_{10/350}$
I	200kA	17 / 10	34 / 20	10 / 5	20 / 10
II	150kA	12,5 / 7,5	25 / 15	7,5 / 3,75	15 / 7,5
III e IV	100kA	8,5 / 5	17 / 10	5 / 2,5	10 / 5

Por exemplo, para uma instalação com SPDA Nível de Proteção III, deve-se utilizar DPS nos cabos de corrente contínua com corrente de impulso limp mínima de 5kA e corrente nominal de descarga I_n de 8,5kA.

Como os condutores estarão em paralelo com os condutores de aterramento, os DPS devem ser Classe I, conforme mostra a Fig. 9.27.

O DPS 2 da Fig.9.27 não será necessário se o inversor estiver localizado junto ao quadro de distribuição de circuitos, conectado à

mesma barra de terra do quadro, com comprimento de cabo menor que 0,5m. O DPS 4 deve ser instalado o mais próximo possível do painel fotovoltaico.

Sugestão de modelos a serem aplicados considerando Nível de Proteção III e instalação com até 4 descidas conforme Tabela 9.7.

9.4.2 - PLANTA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DE GRANDE PORTE

Uma planta de geração fotovoltaica em geral

TABELA 9.7

Especificação e modelos indicados para proteção contra descargas diretas, SPDA isolado dos painéis fotovoltaicos

DPS	Modelo	Classe	Máxima tensão de operação contínua U_{cpu} / U_c	Corrente de descarga total I_{Total} (8/20µs)	Corrente de descarga I_{imp} (10/350µs)	Corrente de descarga nominal I_n (8/20 µs)	Nível de proteção U_p L+/L-
1 e 4	CLAMPER Solar 150 V_{CC} 5/60kA	I/II	150 V_{CC}	60kA	5,0kA	20kA	1,2kV
	CLAMPER Solar 300 V_{CC} 5/60kA	I/II	300 V_{CC}	60kA	5,0 kA	20kA	3,0kV
	CLAMPER Solar 600 V_{CC} 5/60kA	I/II	600 V_{CC}	60kA	5,0kA	20kA	2,5kV
	CLAMPER Solar 1000 V_{CC} 5/60kA	I/II	1000 V_{CC}	60kA	5,0kA	20kA	5,0kV
2	VCL 275V 12,5/60kA	I/II	275 V_{RMS}	60kA	12,5kA	30kA	0,8kV
3	VCL 275V 12,5/60kA	I/II	275 V_{RMS}	60kA	12,5kA	30kA	0,8kV

Nota: Os modelos indicados para aplicação em corrente contínua possuem 3 módulos integrados, preparados para conexão tipo estrela, conforme detalhado no item 9.4.3.1.

possui uma malha de aterramento, o que reduz os valores da corrente de descarga a serem drenados pelos DPS em corrente contínua. A parcela da corrente de descarga que circula pelo DPS depende:

- ☑ Do nível de proteção do SPDA;
- ☑ Da resistência de aterramento (resistência de aterramento de valor elevado resultará em correntes mais elevadas para os DPS instalados nas linhas de corrente contínua);
- ☑ Do reticulado da malha de aterramento;
- ☑ Da impedância do DPS;
- ☑ Do tipo de inversor utilizado, centrali-

zado ou distribuído. No caso de sistema centralizado, a corrente parcial de descarga será drenada pelo DPS instalado na linha de corrente contínua. No caso de sistema com inversores distribuídos, a corrente parcial será drenada pelos DPS instalados nas linhas de corrente alternada.

A Fig. 9.29 mostra de forma simplificada uma planta de geração com vários painéis interligados.

A Tabela 9.8 mostra valores mínimos para corrente nominal (I_n) e corrente de impulso (I_{imp}), tanto para DPS tipo limitador de tensão quanto para tipo comutador de tensão, a serem instalados nas linhas de corrente contínua conforme recomendado em [4].

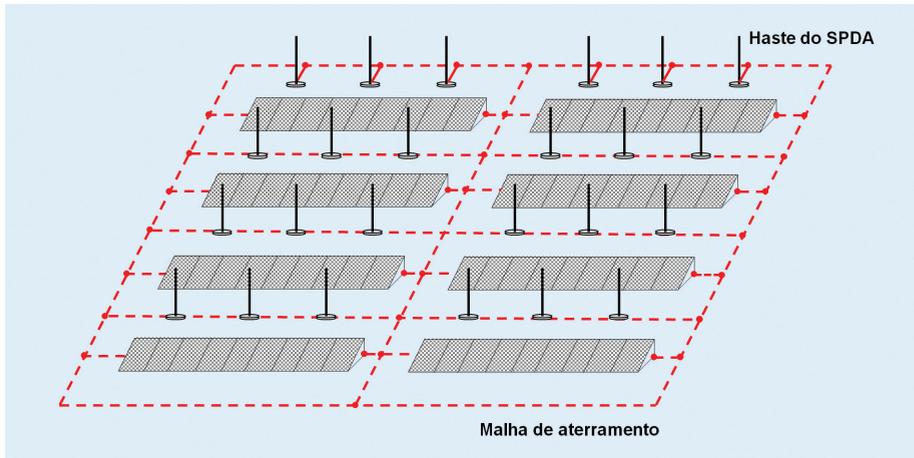


Fig.9.29 Planta de geração fotovoltaica com vários painéis interligados.

TABELA 9.8- ADAPTADO DE [5]

Especificação e modelos indicados para proteção contra descargas diretas, SPDA conectado à estrutura dos painéis fotovoltaicos

Nível de proteção do SPDA - Corrente de descarga, onda 10/350µs		DPS conectado nas linhas de corrente contínua					
		I_{imp} em kA (10/350 µs), I_n em kA (8/20 µs)					
		DPS tipo limitador de tensão				DPS tipo comutador de tensão (spark gap)	
		$I_{10/350}$		$I_{8/20}$		$I_{10/350}$	
Cada modo* (kA)	I_{Total} (kA)	Cada modo (kA)	I_{Total} (kA)	Cada modo (kA)	I_{Total} (kA)		
III e IV	100kA	5	10	15	30	10	20

* Cada modo se refere aos modos de proteção (polo positivo para o polo negativo, polo positivo para a terra e polo negativo para a terra).

A Tabela 9.9 sugere os modelos a serem aplicados, considerando Nível de Proteção III-IV e instalação com até 4 descidas.

9.4.3 - TIPOS DE CONEXÕES PARA OS DPS INSTALADOS NO LADO CC DO SISTEMA DE GERAÇÃO

O lado de corrente contínua (CC) do sistema de geração fotovoltaica possui dois polos, o positivo e o negativo, que podem ser ou não aterrados. Nos sistemas isolados nenhum dos dois polos é ligado na terra e nos sistemas aterrados um dos polos é ligado diretamente à terra. Dependendo do tipo de sistema, existe mais de uma possibilidade para a conexão dos DPS e estas possibilidades serão descritas a seguir.

Podem ser utilizados DPS tripolares ou uma combinação de DPS monopolares de maneira a proporcionar proteção em todos os modos, ou seja, do polo positivo para a terra, do polo negativo para a terra e entre os dois polos.

9.4.3.1 - SISTEMAS COM OS DOIS POLOS ISOLADOS

Três tipos de conexão são utilizados em sistemas isolados:

- ☉ conexão tipo estrela;

- ☑ conexão tipo delta;
- ☑ conexão em modo comum.

Para aplicação de DPS em sistema de geração fotovoltaica com tensões em corrente contínua entre $100V_{cc}$ e $1000V_{cc}$, a prática recomenda a utilização de uma combinação de DPS ligados em série. Na Fig. 9.30 é detalhada uma ligação tipo estrela onde os DPS 1, DPS 2 e DPS 3 devem ser iguais no que se refere à tensão nominal e à capacidade de corrente nominal de surto. A soma das tensões nominais dos DPS 1 e DPS 2, DPS 1 e DPS 3, DPS 2 e DPS 3 deve ser superior à tensão máxima do sistema (U_{ocmax}) entre os terminais positivo e negativo.

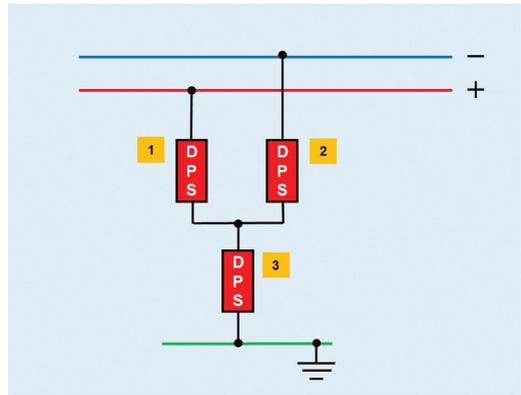


Fig.9.30 – Conexão tipo estrela para sistema isolado. Adaptado de [4].

TABELA 9.9 - Especificação e modelos indicados para proteção de planta de geração fotovoltaica de grande porte

Item	Modelo	Classe	Máxima tensão de operação contínua U_{cpv} / U_c	Corrente de descarga total I_{Total} (8/20 μ s)	Corrente de descarga I_{imp} (10/350 μ s)	Corrente de descarga nominal I_n (8/20 μ s)	Nível de proteção U_p $L+/L-$
1 e 4	CLAMPER Solar 150 V_{cc} 5/60kA	I/II	150 V_{cc}	60kA	5,0kA	20kA	1,2kV
	CLAMPER Solar 300 V_{cc} 5/60kA	I/II	300 V_{cc}	60kA	5,0 kA	20kA	3,0kV
	CLAMPER Solar 600 V_{cc} 5/60kA	I/II	600 V_{cc}	60kA	5,0kA	20kA	2,5kV
	CLAMPER Solar 1000 V_{cc} 5/60kA	I/II	1000 V_{cc}	60kA	5,0kA	20kA	5,0kV
2	VCL 275V 12,5/60kA	I/II	275 V_{RMS}	60kA	12,5kA	30kA	0,8kV
3	VCL 275V 12,5/60kA	I/II	275 V_{RMS}	60kA	12,5kA	30kA	0,8kV

Nota: Os modelos indicados para aplicação em corrente contínua possuem 3 módulos integrados, preparados para conexão tipo estrela, conforme detalhado no item 9.4.3.1.

A Fig. 9.31 mostra um exemplo de produto adequado para instalação em sistema fotovoltaico de 1000 V_{cc}, preparado para conexão tipo estrela.

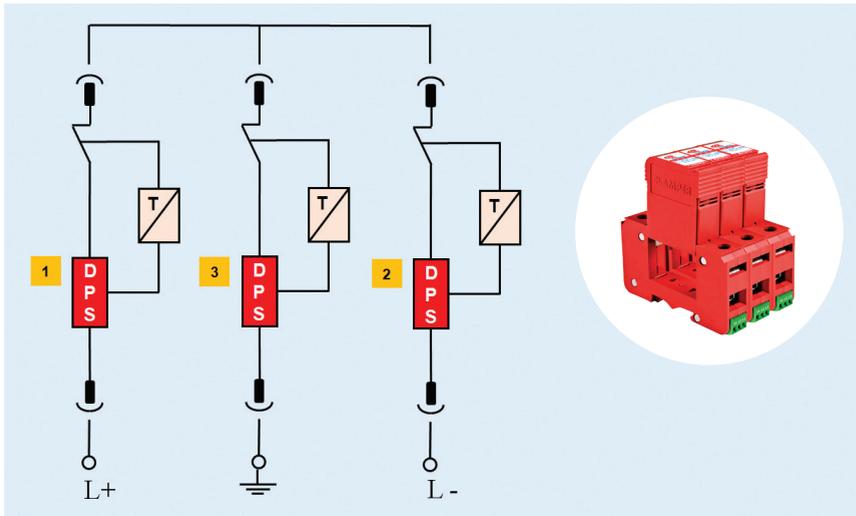


Fig.9.31 - Exemplo de produto com circuito preparado para conexão tipo estrela, CLAMPER Solar 1000 V_{cc} 40kA.

A conexão em delta, detalhada na Fig. 9.32, representa a conexão clássica utilizada para proteção em modo comum, ou seja, entre linha e terra e modo transversal, entre linhas. Os DPS 1, DPS 2 e DPS 3 devem ser iguais no que se refere à tensão nominal e capacidade de corrente nominal. O DPS 1, conectado em modo transversal, deve possuir tensão nominal superior à tensão máxima do sistema (U_{ocmax}) entre o polo positivo e negativo.

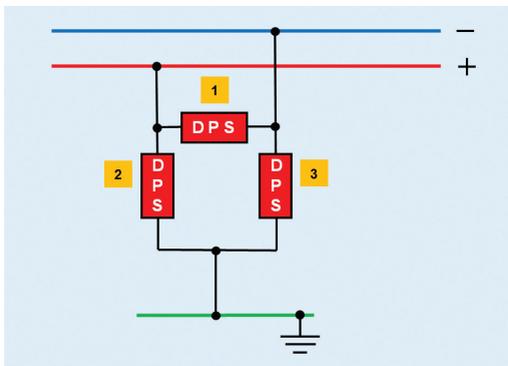


Fig.9.32 - Conexão em delta para sistema isolado. Adaptado de [4].

Na conexão em modo comum detalhada na Fig.9.33, deve ser levada em consideração a suportabilidade dos equipamentos às sobretensões (ver Tabela 9.1), uma vez que a tensão residual a ser estabelecida entre os polos positivo e negativo, quando da operação dos DPS, será a soma das tensões residuais dos DPS 1 e DPS 2.

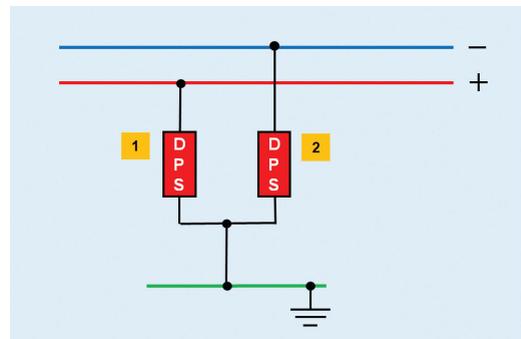


Fig.9.33 - Conexão em modo comum para sistema isolado. Adaptado de [4].

9.4.3.2 - SISTEMAS COM UM DOS POLOS ATERRADOS

Em sistema com um dos polos aterrados, deve ser previsto um DPS entre o polo positivo e o negativo (DPS 1) e outro entre o polo aterrado e a barra de aterramento da instalação (DPS 2), conforme detalhado na Fig.9.34. O DPS 2 poderá ser suprimido se a conexão do DPS 1 for executada na mesma barra de aterramento do polo, ou se a distância (L) for inferior a 1m. O DPS 1, conectado em modo transversal, deve possuir tensão nominal superior à tensão máxima do sistema (U_{ocmax}) entre o polo positivo e negativo. O DPS 2, quando necessário, poderá ter tensão nominal inferior à tensão entre os polos positivo e negativo.

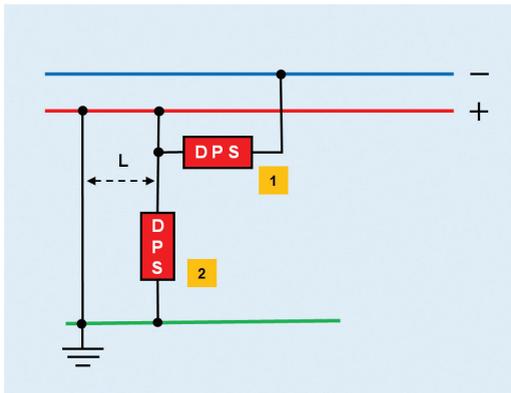


Fig.9.34 -Conexão em sistema aterrado. Adaptado de [4].

9.5 - SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

Aproximadamente 4% da energia elétrica gerada no Brasil em 2015 foi de origem eólica e a utilização desta fonte renovável vem crescendo de forma acentuada nos últimos anos. Um parque de geração eólica é constituído de um conjunto de aerogera-

dores que podem ser instalados na terra ou no mar. Os principais componentes de um aerogerador são:

- ✓ Torre;
- ✓ Nacele;
- ✓ Cubo do rotor (*hub*);
- ✓ Pás rotatórias;
- ✓ Caixa de câmbio (engrenagens);
- ✓ Freio;
- ✓ Gerador elétrico;
- ✓ Anemômetro e
- ✓ Sistema de controle.

A Fig. 9.35 ilustra um aerogerador. Existem sistemas que trabalham com uma caixa de engrenagens para aumentar a velocidade instalada entre a turbina e o gerador e existem sistemas mais modernos onde a turbina é ligada diretamente ao eixo do gerador, conforme a Fig. 9.36.

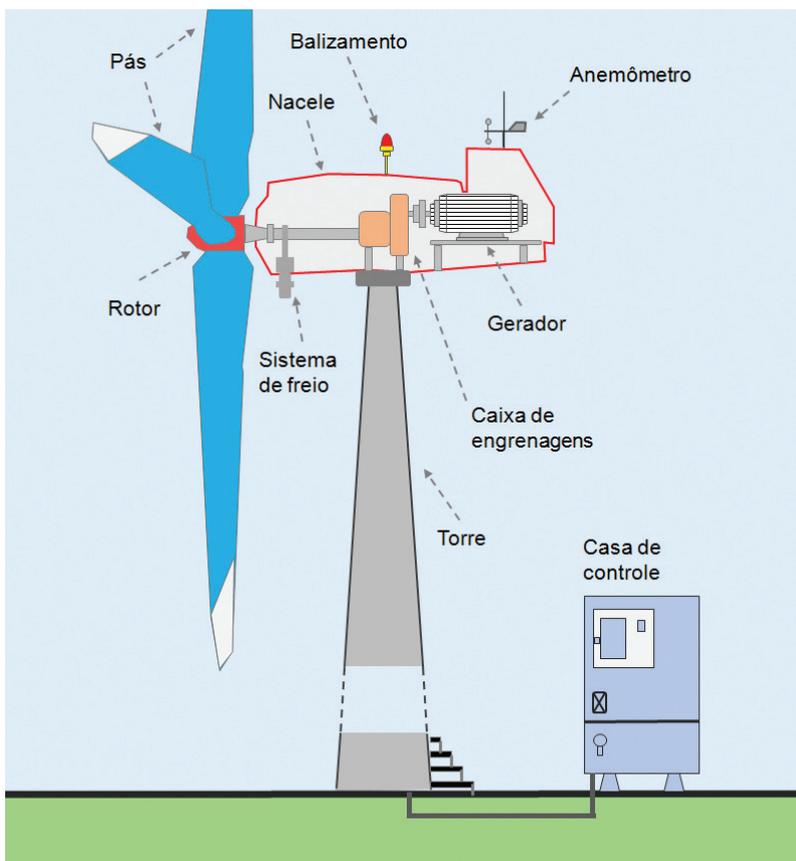


Fig. 9.35 – Principais componentes de um aerogerador.

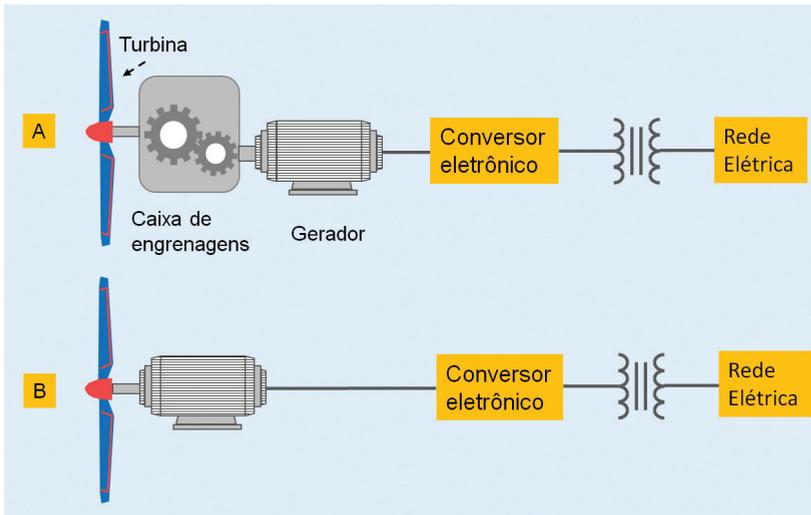


Fig. 9.36 – (A) Turbina ligada ao gerador por meio de um caixa multiplicadora de velocidade e (B) turbina ligada diretamente ao eixo do gerador.

As plantas de geração eólica em geral são instaladas em áreas descampadas e as torres muitas vezes atingem alturas superiores a 100m. Este elevado grau de exposição torna as instalações bastante suscetíveis aos efeitos das descargas atmosféricas. Arranjos de proteção precisam ser instalados e tanto as descargas que incidem diretamente quando as que incidem nas proximidades do sistema precisam ser consideradas, conforme mostrado na Fig. 9.37.

Conforme a referência [5], na Europa a frequência de danos a aerogeradores se situa na faixa de 4 a 8% ao ano (dados obtidos no período 1991 a 1998). No Japão, a frequência de danos é na faixa de 10 a 20% (apurada no período 2002 a 2006) e na costa japonesa este número sobe para cerca de 30% dos aerogeradores instalados.

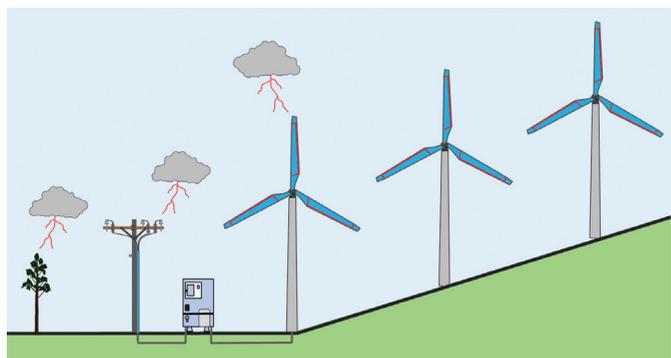
Para o caso de aerogeradores de alta potência (> 1000kW) a referência [6] indica que 75%

dos danos ocorrem nas pás. A referência [6] afirma que, considerando aerogeradores de todas as potências, 50% dos danos ocorrem nos sistemas elétricos e de controle.

Os aerogeradores são conectados na rede elétrica e todos os elementos que compõem o circuito elétrico precisam de proteção. O cubo do rotor é responsável pela rotação das pás da turbina em função da velocidade e direção do vento. Se o acionamento e controle do cubo forem elétricos, ele também precisa ser protegido.

Os aerogeradores possuem conexões com redes externas de telecomunicações e utilizam uma rede interna para transmissão de dados entre equipamentos localizados na nacelle, na base e no cubículo de controle e estes sistemas também precisam ser protegidos. A Fig. 9.38 ilustra os componentes que devem ser protegidos com a instalação de DPS.

Fig. 9.37 – Descargas diretas e nas proximidades dos aerogeradores precisam ser consideradas no projeto do sistema de proteção.



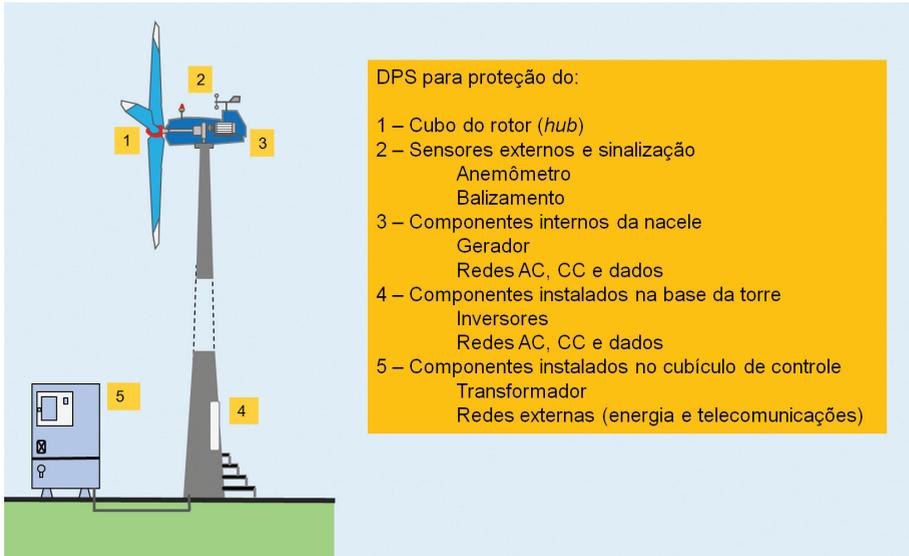


Fig. 9.38
Sistemas que devem ser protegidos com a instalação de DPS.

A classe dos DPS deve ser escolhida em função do posicionamento do mesmo em relação às zonas de proteção. As zonas de proteção, conforme definidas na NBR 5419, podem ser vistas na Fig. 9.39.

DPS para o circuito elétrico típico de um aerogerador. A Fig. 9.41 mostra o posicionamento dos DPS para a rede de telecomunicações e dados. As Tabelas 9.9 e 9.10 mostram os modelos recomendados para o circuito elétrico e rede de telecomunicações, respectivamente.

A Fig. 9.40 mostra o posicionamento dos

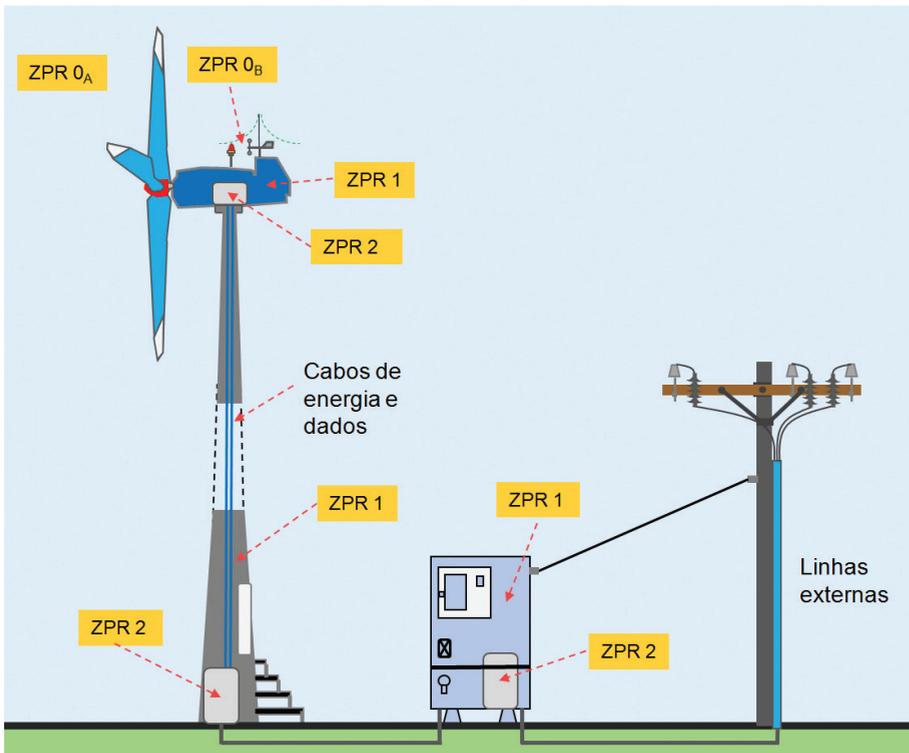


Fig. 9.39
Zonas de proteção contra descargas conforme definido na NBR 5419.

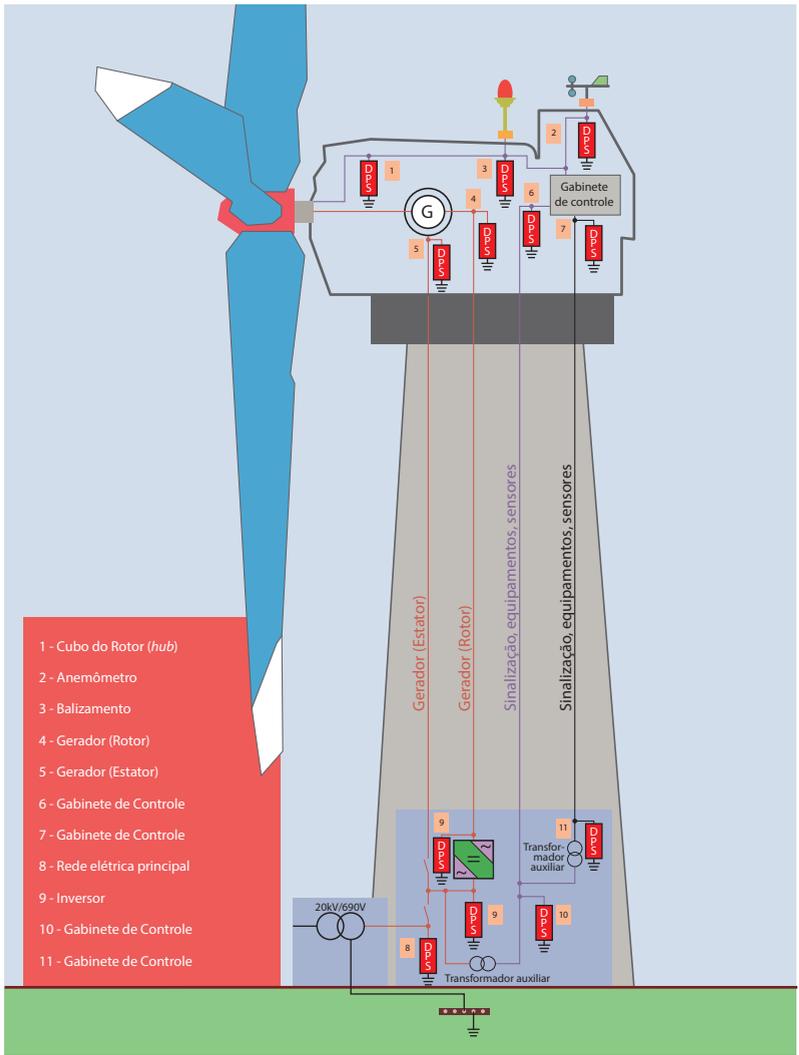


Fig. 9.40 - Circuito elétrico típico de um aerogerador indicando os pontos para instalação de DPS.

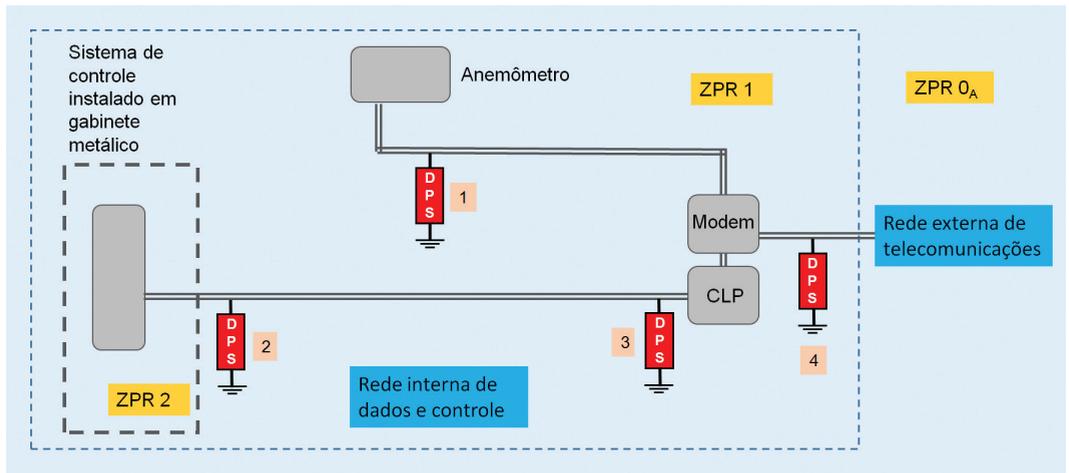


Fig. 9.41 - Circuito de telecomunicação e dados típico de um aerogerador, com indicação dos pontos para instalação dos DPS.

TABELA 9.9

Modelos recomendados de DPS para proteção de aero geradores (rede elétrica) com tensão de estator 690V

Local de Instalação		Modelo	Tensão nominal
1	Cubo do rotor	VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - N) = 220V$
		VCL 75V 45kA Slim	$U_N = 24Vdc, 48Vcc$
2	Anemômetro	VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - N) = 220V$
		VCL 75V 45kA Slim	$U_N = 24Vcc$
3	Balizamento	VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - N) = 220V$
4	Estator – Gerador	VCL 680V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 690V$
5	Rotor – Gerador	VCL 680V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 690V$
		VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 480V$
		VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 380V$
6	Gabinete de controle (220V)	VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - N) = 220V$
7	Gabinete de controle (24V, 48V)	VCL 75V 45kA Slim	$U_N = 24Vcc$
8	Rede elétrica principal	VCL 680V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 690V$
9	Inversor	VCL 680V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 690V$
		VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 480V$
		VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - L) = 380V$
10	Gabinete de controle (220V)	VCL 460V 45kA Slim	$U_N (L - N) = 220V$
11	Gabinete de controle (24V, 48V)	VCL 75V 45kA Slim	$U_N = 24Vcc$

Em alguns casos, o transformador de elevação pode estar na nacela e nesses casos a especificação dos DPS 5 e 8 deve ser revista.

TABELA 9.10

Modelos recomendados de DPS para proteção de aero geradores (rede de telecomunicações)

Local de instalação		Descrição
1	Anemômetro	922.B.0m3.048 Faster
2	Linha de dados ou barramento de dados	822.B.020
3	Linha de dados ou barramento de dados	822.B.020
4	Linha telefônica e modem	822.B.130

Notas:

1) Os DPS 2 e 3 foram especificados para uma aplicação em RS232 ou RS485. Para outras aplicações, como por exemplo, *loop* de corrente e entradas e saídas digitais de controladores programáveis, utilizar os protetores 922.B.0m3 para sinais analógicos ou 922.B.010 para sinais digitais. Estes protetores estão disponíveis nas tensões de 12Vcc, 24Vcc, 48Vcc ou 60Vcc para sinais analógicos e 12Vcc, 24Vcc, 48Vcc, 60Vcc, 127VRMS ou 220VRMS para sinais digitais.

2) Para as conexões ethernet, com conectores tipo RJ45, utilizar o modelo 882.J.020

9.6 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Grande parte dos desligamentos e queimas de equipamentos que ocorrem nas redes de distribuição de energia elétrica é provocada pelas descargas atmosféricas. É prática usual das concessionárias de energia elétrica a instalação de DPS na rede primária (denominados PRMT – para raios de média tensão), o que não evita o aparecimento de surtos na rede de baixa tensão e conseqüentemente nos enrolamentos secundários dos transformadores de distribuição levando muitas vezes a queima do transformador. A instalação de DPS no secundário dos transformadores (denominados PRBT – para raios de baixa tensão) reduz significativamente as ocorrências. Além da redução do número de danos em transformadores a instalação de PRBT reduz os valores dos surtos que atingem as instalações das edificações atendidas pela rede de distribuição.

Os sistemas de telecomunicações, notadamente os que possuem antenas instaladas em torres elevadas, são muito suscetíveis aos efeitos das descargas atmosféricas. Devido à importância dos sistemas de telecomunicações na sociedade contemporânea é obrigatório utilizar arranjos de proteção contra surtos em todos os elementos que

compõem o sistema.

É cada vez maior a instalação de sistemas de geração solar fotovoltaica em todo o mundo. É inerente aos sistemas que os mesmos sejam instalados de forma exposta, de modo a permitir a incidência direta da luz solar. Este elevado grau de exposição torna os sistemas bastante vulneráveis aos efeitos das descargas atmosféricas. A utilização de inversores para a conversão da energia gerada em corrente contínua em corrente alternada exige a instalação de DPS para a proteção contra surtos. Os próprios painéis fotovoltaicos também são sensíveis as sobretensões e devem ser protegidos.

Os sistemas de geração eólica entraram de forma definitiva na matriz energética brasileira. A altura elevada das torres dos aerogeradores e o fato dos mesmos serem instalados em áreas descampadas torna obrigatória a instalação de arranjos de proteção eficientes para evitar a queima ou paralização dos sistemas de geração devido à incidência de descargas atmosféricas. Devem ser instalados DPS para a proteção do acionamento/controlado do rotor, do gerador, dos inversores, dos retificadores, do transformador e das redes de dados e energia interna e externa.

PROTEÇÃO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED, DUTOS DE ÓLEO E GÁS E SISTEMAS FERROVIÁRIOS

Os sistemas de iluminação LED, os dutos de óleo e gás e os sistemas ferroviários precisam ser protegidos contra os surtos originados nas descargas atmosféricas que incidem nas proximidades ou diretamente nos componentes dos sistemas. Serão descritos neste capítulo os arranjos para a proteção destes sistemas.

A nova NBR 5419 [1] não cobre totalmente a proteção de todos estes sistemas. Entretanto, com o auxílio de outras normas e com os conceitos desenvolvidos neste livro, é possível definir arranjos eficientes de proteção baseados na instalação de DPS.

10.1 - SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED

O uso de luminárias LED tem se tornado cada vez mais atrativo. Apesar do custo inicial elevado, as vantagens tais como baixo consumo, elevada vida útil, baixo custo de manutenção e alta eficiência tornam essas luminárias um bom investimento, trazendo benefícios a médio e longo prazo. Como desvantagem, sistemas de iluminação LED são muito suscetíveis a danos por surtos elétricos oriundos das linhas de energia, o que gera a necessidade de utilização de dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

Para atender aos requisitos mínimos de suportabilidade aos surtos elétricos, as fontes de alimentação (*drives*) podem possuir proteção interna, porém, devido a localização das luminárias as mesmas podem ser facilmente afetadas por surtos elétricos de maior intensidade. Desta forma, recomenda-se a instalação de um DPS externamente ao driver adequado para suportar surtos de maior intensidade.

Não é recomendado aumentar a capacidade da proteção interna do driver que poderia incorrer em danos nos circuitos do mesmo quando da operação do circuito de proteção em função das elevadas correntes de surtos.

10.1.1 - SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA LED

As luminárias LED estão diretamente expostas a surtos provocados por descargas atmosféricas ou por chaveamento nas linhas de energia. Estes surtos podem reduzir a vida útil, diminuir a intensidade luminosa ou até mesmo danificar permanentemente a luminária, uma vez que elas estarão expostas a tensões impulsivas de alguns milhares de volts. Situações essas que certamente terão impacto nos custos de manutenção e, conseqüente, no aumento do tempo de amortização. Como solução faz-se necessário utilizar DPS apropriados para mitigação dos riscos de danos, protegendo assim o investimento realizado nas luminárias.

A especificação dos DPS deve ser feita com base na localização da luminária LED. Luminárias destinadas à iluminação pública, localizadas em áreas externas, necessitam de uma atenção especial por estarem mais expostas. Conforme NBR 5419 [1], essas luminárias situam-se na Zona de Proteção ZPR 0. Neste caso devem-se levar em consideração dois cenários:

- ☑ Descargas atmosféricas indiretas, isto é, que atingem objetos nas proximidades da rede;
- ☑ Descargas atmosféricas diretas, isto é, que atingem diretamente a rede.

10.1.1.1 - PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRETAS

A Fig. 10.1 ilustra a situação onde uma descarga atmosférica atinge um objeto (árvore) localizado nas proximidades da rede elétrica onde luminárias LED estão instaladas.

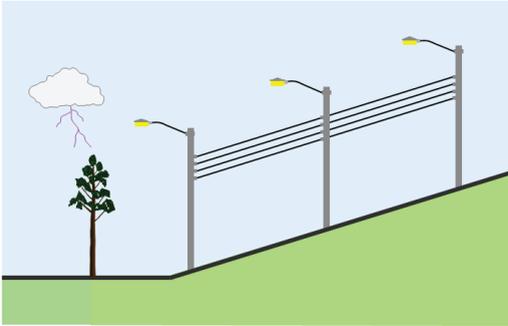


Fig.10.1 - Surto induzido em rede contendo luminárias LED para iluminação pública, devido a descarga atmosférica indireta

Conforme visto no Capítulo 7, os DPS para proteção contra descargas atmosféricas in-

diretas devem suportar correntes impulsivas com forma de onda 8/20 μ s (Classe II). Para regiões de menor exposição (junto ao equipamento), são especificados surtos com tensão em circuito aberto na forma de onda 1,2/50 μ s e corrente de curto circuito com onda 8/20 μ s, também chamados de ensaio em onda combinada (DPS Classe III). A Tabela 10.1, baseada na Referência [2], também segue essa linha.

As luminárias localizadas em área externa, mas sem possibilidade de incidência de descarga direta, zona ZPR 0_B, devem ser protegidas com DPS Classe II. Os DPS devem ser ensaiados conforme norma ABNT NBR IEC 61643-1 [3], sendo capazes de suportar vários surtos sem se danificar.

A Fig. 10.2 mostra o esquema de proteção da luminária LED e a Tabela 10.2 mostra os modelos a serem aplicados para linhas de energia com tensão nominal de 127V ou 220V.

TABELA 10.1
Especificação de DPS para proteção contra descargas indiretas

Exposição	Classedo DPS	Tensão de circuito aberto $U_{oc}(1,2/50\mu s)$	Corrente máxima de descarga $I_{max}(8/20\mu s)$
Baixa	III	6 kV ¹	3 kA ¹
Alta	II	10 kV ²	10 kA ²

Nota 1: Gerador de onda combinada / Nota 2: Geradores independentes (tensão e corrente)

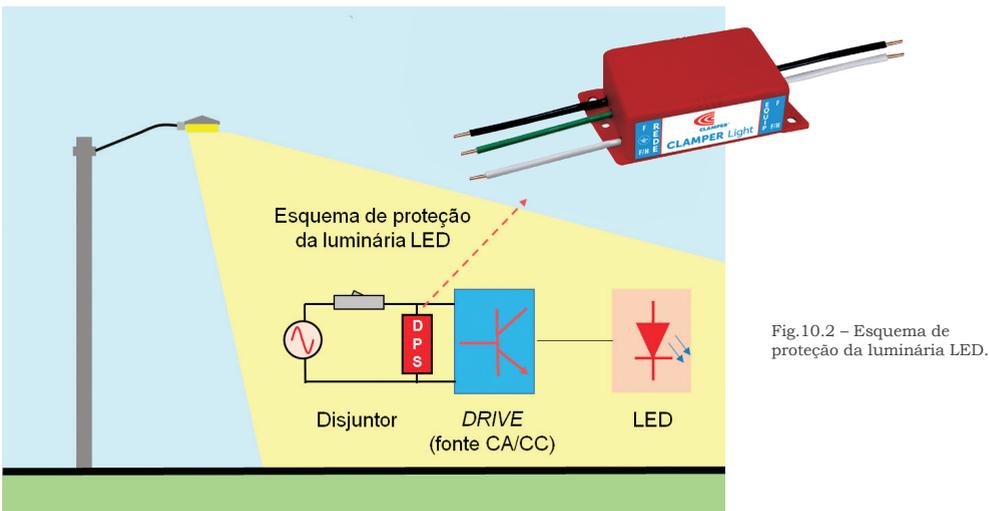


Fig.10.2 – Esquema de proteção da luminária LED.

TABELA 10.2
Modelos a serem aplicados para linhas de energia com tensão nominal de 127 ou 220V

Classe	Tensão de circuito aberto V_{oc} (1,2/50 μ s)	Corrente máxima de descarga I_{max} (8/20 μ s)	Corrente nominal de descarga I_n	Modelo
II + III	10kV	12kA	5kA	Clamper Light 12 S ou Clamper Light 12 P

10.1.1.2 - PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS

As luminárias localizadas na zona ZPR 0_A devem ser protegidas com DPS Classe I instalados na entrada da estrutura. Uma coordenação entre DPS Classe I e Classe II pode ser necessária para garantir o nível de proteção adequado à capacidade de isolamento dos circuitos a serem protegidos.

Considerando a luminária LED instalada em mastro metálico aterrado, grande parte da corrente de surto será drenada para a terra, gerando surtos nas linhas de alimentação em todos os modos.

Em sistemas de energia onde o condutor neutro é multiterrado, a baixa impedância oferecida pelos múltiplos caminhos pode reduzir a parcela da corrente da descarga que será conduzida pelos DPS. A Fig.10.3 mostra um sistema de iluminação pública exposto ao risco de descarga direta

na estrutura, Fig. 10.3.

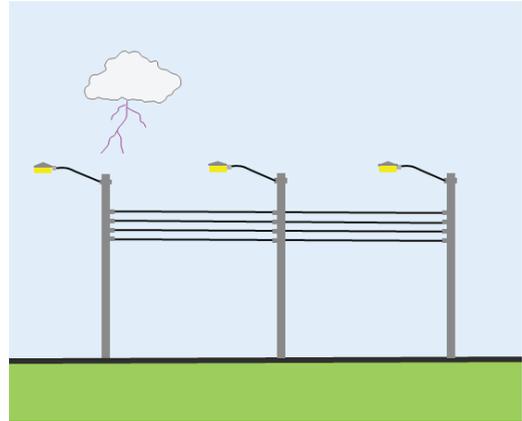


Fig.10.3 – Descarga atmosférica direta em estrutura de iluminação pública de LED.

A Fig. 10.4 ilustra a aplicação de DPS em luminária com risco de descarga direta e a Tabela 10.3 mostra os modelos a serem aplicados para linhas de energia com tensão nominal de 127 ou 220V.

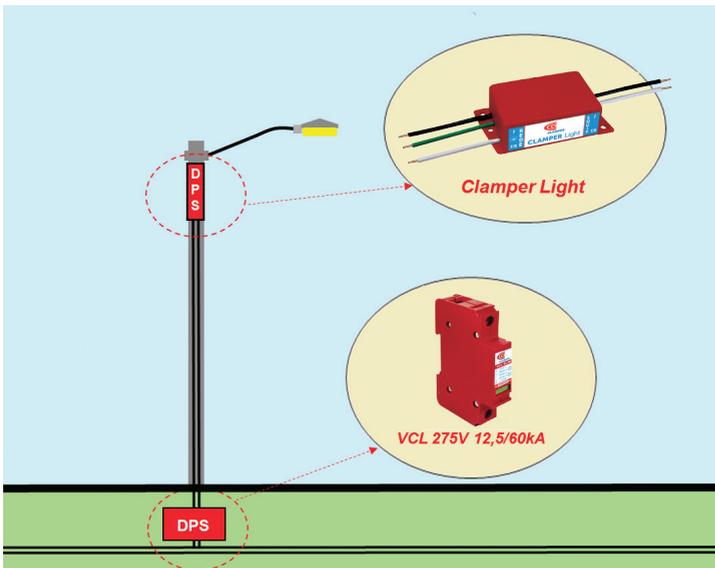


Fig.10.4 – Aplicação de DPS em Luminária com risco de descarga direta.

TABELA 10.3

Modelos a serem aplicados para linhas de energia com tensão nominal de 127 ou 220V

Item	Classe	Tensão de circuito aberto V_{oc} (1,2/50 μ s)	Corrente de impulso I_{imp} (10/350 μ s)	Corrente máxima de descarga I_{max} (8/20 μ s)	Corrente nominal de descarga I_n (8/20 μ s)	Modelo
1	II+III	10kV	NA	12kA	5kA	Clamper Light 12 S ou Clamper Light 12 P
2	I + II	NA	12,5kA	60kA	30kA	VCL 275V 12,5/60kA

10.1.2 - SISTEMA DE ILUMINAÇÃO INTERNA LED

As luminárias localizadas em áreas internas, zona ZPR 1, devem ser protegidas com DPS Classes II e III como mostrado na figura 10.5.

A Tabela 10.4 mostra os modelos a serem aplicados para linhas de energia com tensão nominal de 127V ou 220V.

10.1.3 - INSTALAÇÃO E CONEXÕES

O DPS pode ser instalado de duas formas distintas, em série ou em paralelo com o driver. A escolha do tipo de conexão deve

ser definida com base no final de vida útil do DPS. Um DPS instalado em paralelo com a luminária garantirá a continuidade na iluminação, mesmo após seu fim de vida útil, porém, sem a presença da proteção contra surtos. Já um DPS instalado em série com a luminária cortará o fornecimento de energia para a mesma quando atingir o fim de vida útil. Isso faz com que a luminária se apague, servindo como indicação para a necessidade de troca do DPS.

O DPS terá também a função de isolar fisicamente a fonte de alimentação da rede elétrica, protegendo a luminária contra outros surtos elétricos que possam ocorrer na rede.



Fig.10.5 – Detalhe da localização dos DPS para proteção de sistema interno de iluminação.

TABELA 10.4

Modelos a serem aplicados para linhas de energia com tensão nominal de 127 ou 220V

Classe	Tensão de circuito aberto V_{oc} (1,2/50 μ s)	Corrente máxima de descarga I_{max} (8/20 μ s)	Corrente nominal de descarga I_n	Modelo
III	6kV	3kA	NA	Clamper Light 4,5 S ou Clamper Light 4,5 P
II	NA	20kA	10kA	VCL 275V 20kA

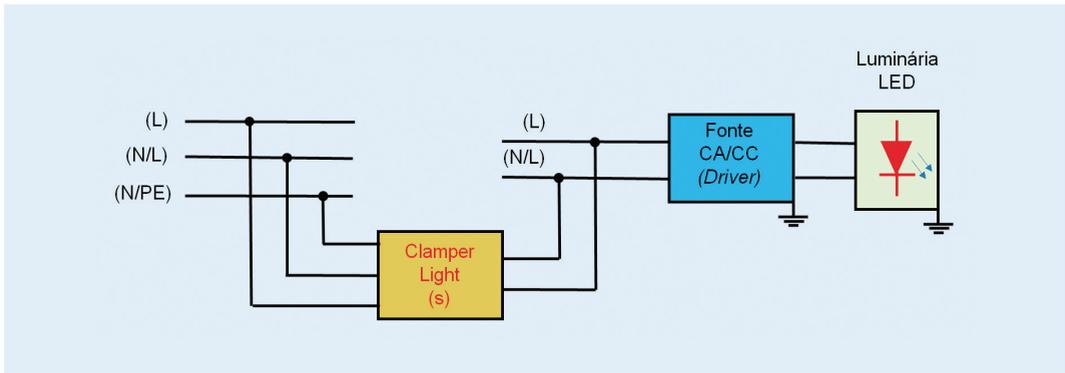


Fig.10.6 – Detalhe conexão em série com a luminária.

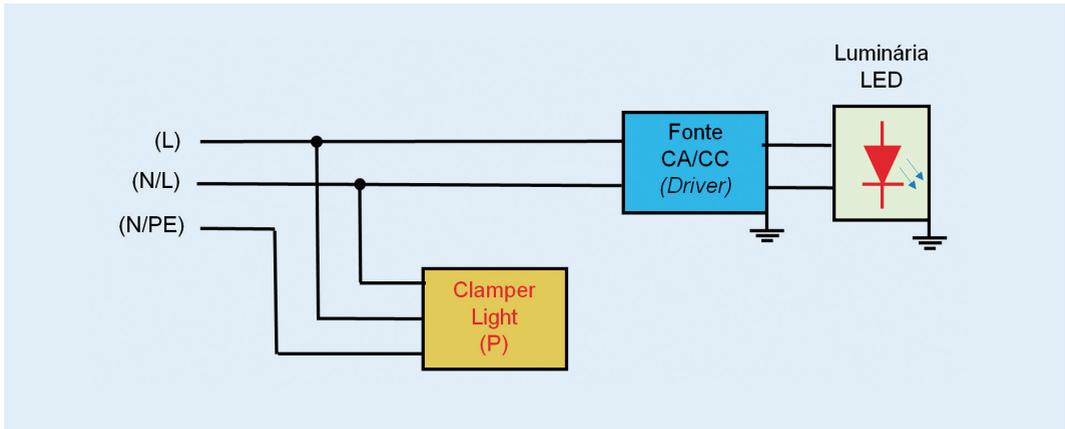


Fig.10.7 – Detalhe conexão em paralelo com a luminária.

O DPS instalado em paralelo com a carga, ao final de vida útil, se desconectará do sistema, mantendo a luminária de LED energizada. A iluminação permanecerá funcional, mas desprotegida com relação aos surtos elétricos. Este protetor possui sinalização de vida útil feita por LED, sendo que este LED permanecerá aceso enquanto o protetor estiver ativo e apagado quando houver a necessidade de substituição do DPS. Este tipo de instalação exige uma manutenção preventiva muito bem planejada, para que se possa verificar o estado dos DPS.

10.2 - DUTOS DE ÓLEO E GÁS

10.2.1 - PROTEÇÃO CATÓDICA

O uso de dutos metálicos para transporte de óleos, gases combustíveis, ou até mesmo água, requer uma série de cuidados especi-

ais, seja devido às características das instalações ou à inflamabilidade do que é transportado. Técnicas de proteção catódica contra corrosão acelerada, através de injeção de corrente contínua no duto, são largamente utilizados, conforme mostrado na Fig. 10.8.

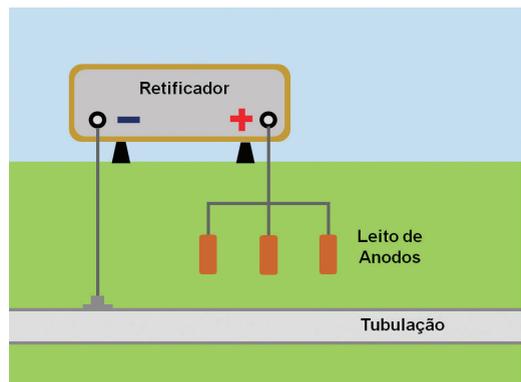


Fig. 10.8 - Sistema de proteção catódica contra corrosão acelerada.

Para sectionar diferentes circuitos de proteção catódica ou isolar o duto com proteção catódica de trechos aterrados, como por exemplo, na fronteira entre o ambiente do cliente e a rede de distribuição, são utilizados isolantes nas juntas dos dutos. A isolação das juntas é fundamental para o correto funcionamento dos sistemas de proteção catódica, conforme detalhe da Fig. 10.9.



Fig. 10.9 - Corte longitudinal de junta isolante monobloco - Fonte: Gasmig.

As grandes extensões de dutos favorecem a exposição destes às descargas atmosféricas, conforme mostrado na Fig. 10.10.

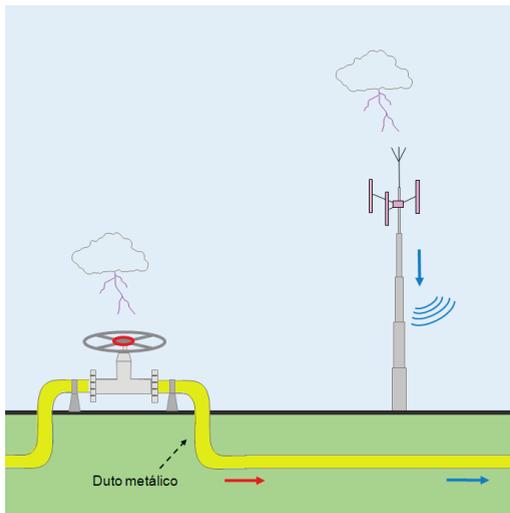


Fig. 10.10 - Duto exposto aos efeitos das descargas atmosféricas diretas e indiretas.

Outra situação que requer cuidado é a instalação desses dutos sob linhas de transmissão de alta tensão. No Brasil, grande parte dos gasodutos foi instalada sob ou em paralelo com as linhas de transmissão de energia elétrica, aproveitando a área de concessão. Como mostrado na Fig. 10.11, os dutos estão sujeitos a induções provocadas pelas correntes alternadas de regime permanente

e de curto circuito.

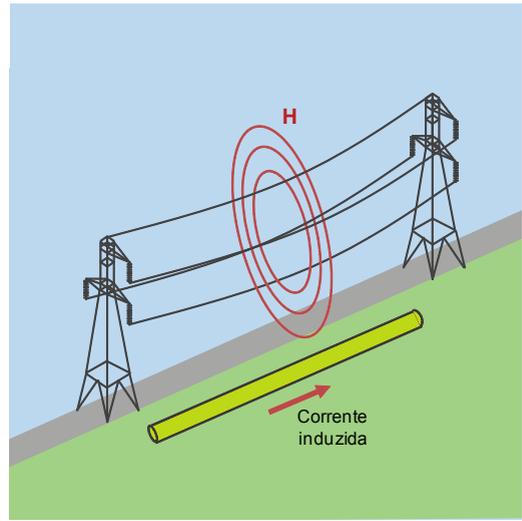


Fig. 10.11- Os dutos estão sujeitos à induções de 60Hz quando instalados nas proximidades de linhas de transmissão de energia elétrica

Considerando os diferentes tipos de eventos, a escolha do DPS deve levar em conta:

- ☑ Densidade de descargas na região;
- ☑ Nível de isolamento da junta isolante;
- ☑ Existência de indução de 60Hz de forma permanente no duto;
- ☑ Localização do DPS - dentro ou fora de área classificada.

A substituição de uma junta de isolação danificada é extremamente onerosa, considerando a necessidade de parada total do sistema para execução dos reparos, além das questões de segurança que envolvem a operação. A Fig. 10.12 mostra uma junta com rompimento do isolamento provocado por descarga atmosférica.

10.2.2 - SELEÇÃO DE DPS PARA O RETIFICADOR

Considerando o elevado nível de exposição do retificador que alimenta o sistema de proteção catódica, os DPS devem ser Classe I, tanto para a entrada em 60Hz, quanto para a saída em corrente contínua que é conectada diretamente ao duto, conforme indicado na Fig. 10.13.



Fig. 10.12 Rompimento de isolamento em junta monobloco devido a descarga atmosférica – Fonte: GASMIG.

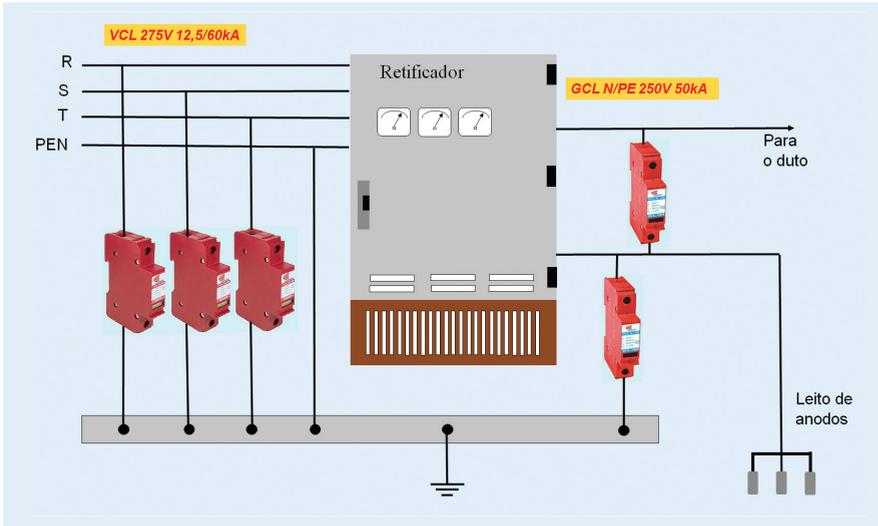


Fig. 10.13 Proteção do retificador.

10.2.3 - SELEÇÃO DE DPS PARA A JUNTA ISOLANTE

Dutos sujeitos aos impactos de descargas

atmosféricas devem ser protegidos. O DPS deve ser Classe I, adequado para área classificada e instalado na junta de isolamento, conforme detalhado nas Figs. 10.14, 10.15

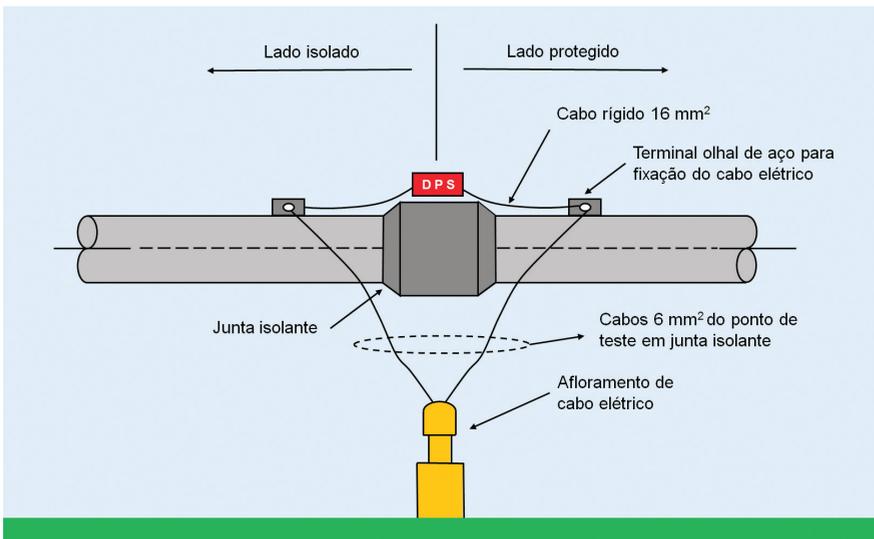


Fig. 10.14 Ligação elétrica do DPS à junta. Adaptado de [4].

e 10.16. As conexões devem ser curtas (menores que 50cm), a fim de garantir nível de proteção inferior à tensão disruptiva da junta de isolamento.



Fig. 10.15 - Proteção de junta isolante ao longo da linha. DPS modelo GCL EC EX

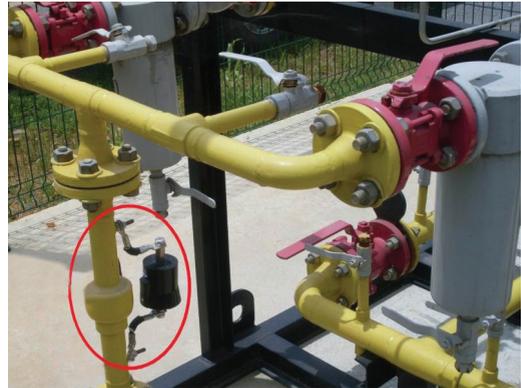


Fig. 10.16 - Proteção de junta isolante no citygate. DPS modelo GCL EC EX

10.2.4 - SELEÇÃO DE DPS PARA DUTO COM INDUÇÃO DE 60HZ EM REGIME PERMANENTE

Nos casos de tensão induzida em função de proximidade do duto com linhas de transmissão de energia elétrica, deve ser utilizado um dispositivo de proteção combinado adequado para:

- ☑ Desacoplar a tensão induzida em 60Hz, sem prejudicar a proteção catódica;
- ☑ Proteger o duto contra os efeitos das descargas atmosféricas.

O DPS deve possuir as seguintes características:

- a) Tecnologia de estado sólido;
- b) Frequência de operação: 60 Hz;
- c) Tensão de bloqueio: -3; +1 V;
- d) Corrente de regime: 45 ARMS;
- e) Corrente de falta máxima (30 ciclos): 3,7kA;
- f) Corrente de impulso máxima (8/20 μ s): 100kA.

A conexão deve ser executada conforme mostrado nas Figs. 10.18 e 10.19. Recomenda-se a instalação de DPS em todos os afloramentos do duto ao longo do percurso adjacente à linha de transmissão de energia.

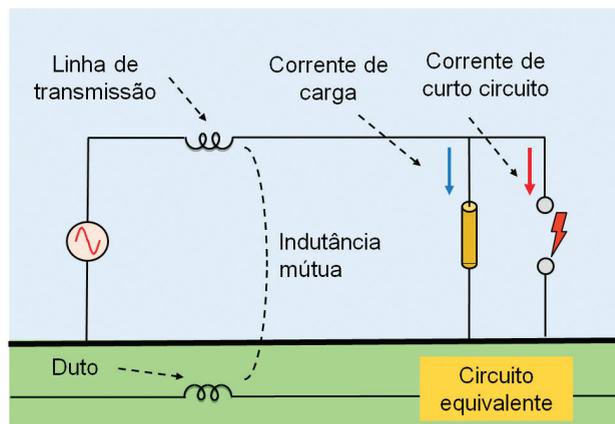
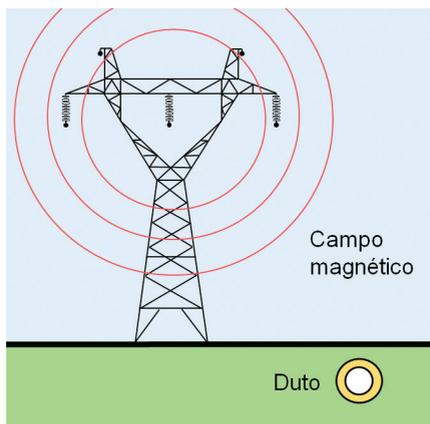


Fig. 10.17 - Indução da corrente 60Hz em duto próximo à linha de transmissão de energia. Tanto as correntes de carga normal quanto as de curto circuito provocam induções no duto enterrado.

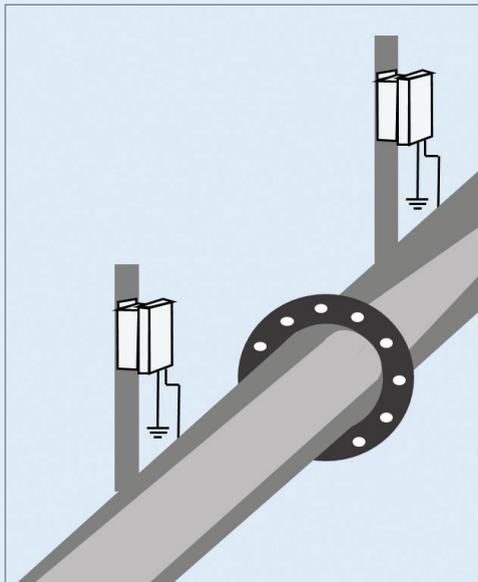


Fig. 10.18 Instalação DPS desacoplador nos dois lados do duto sujeito a indução de tensão 60Hz.



Fig. 10.19 Protetor desacoplador de corrente alternada modelo DDCC instalado no citygate.

10.3 - SISTEMAS FERROVIÁRIOS

10.3.1 - DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO E SINALIZAÇÃO FERROVIÁRIOS

Até alguns anos atrás, os sistemas de automação e sinalização ferroviários eram eletromecânicos, baseados em relês especiais. Para proteção contra surtos elétricos eram utilizados dispositivos mais robustos como, por exemplo, centelhadores com *gap* de ar ou de carvão. Nos dias de hoje, existem controladores lógicos programáveis microprocessados e desenvolvidos especificamente para aplicação em sistemas ferroviários, que exigem DPS devidamente coordenados para garantir desempenho e segurança.

Os sistemas de sinalização ferroviária são de natureza extremamente complexa, com vários intertravamentos e redundâncias em uma série de subsistemas conectados deste o trilho até as salas de controle.

A Fig. 10.20 mostra o diagrama esquemático reduzido de um sistema de sinalização ferroviária, onde podem estar presentes

sensores, sinalizadores e controles localizados junto aos trilhos. No caso, por exemplo, do circuito de via (CDV), os condutores de sinalização de presença da composição são ligados diretamente nos trilhos e conduzidos até o Abrigo, que pode estar distante até 2,5km. Os trilhos possuem talas com isolamento elétricas que separam os diversos circuitos de via, permitindo o intertravamento entre máquina de chave, dos sinaleiros bem como a localização das composições na via.

Dispositivos que compõem a sinalização ferroviária:

- ⊙ CDV – circuito de via;
- ⊙ DD – detector de descarrilamento;
- ⊙ MC – máquina de chave e
- ⊙ Sinaleiros.

A Fig. 10.21 mostra fotografias dos principais componentes que compõem o sistema de sinalização ferroviária. Em um trecho de ferrovia sinalizado, que pode chegar até 50km, são vários sensores de descarrilamento, circuitos de via, máquinas de chave para desvios nas entradas e saídas dos pátios.

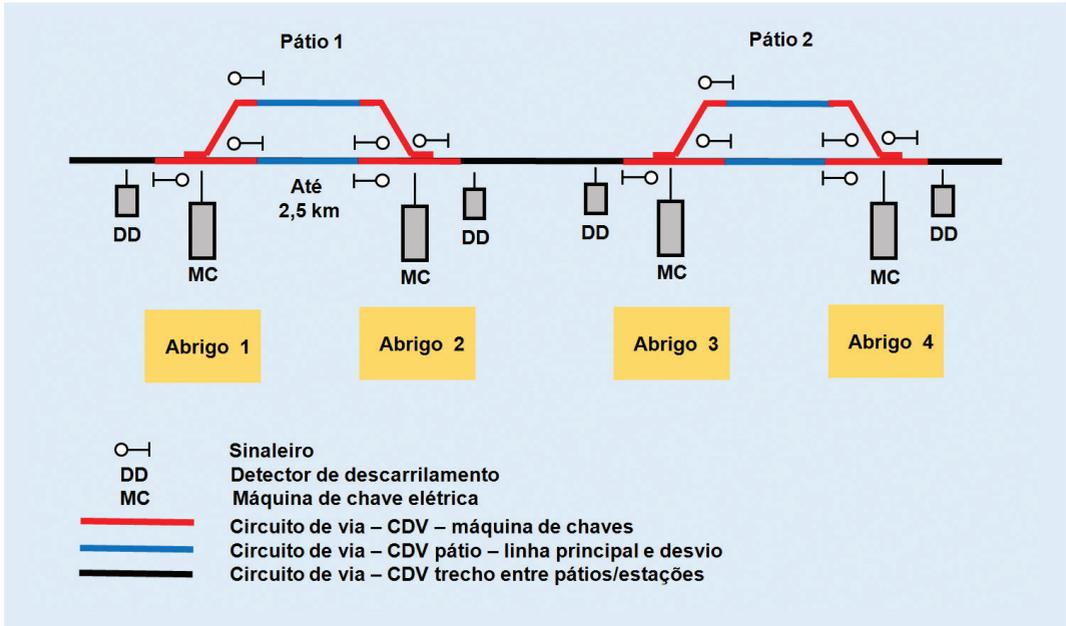


Fig. 10.20 - Diagrama esquemático simplificado de sinalização ferroviária.

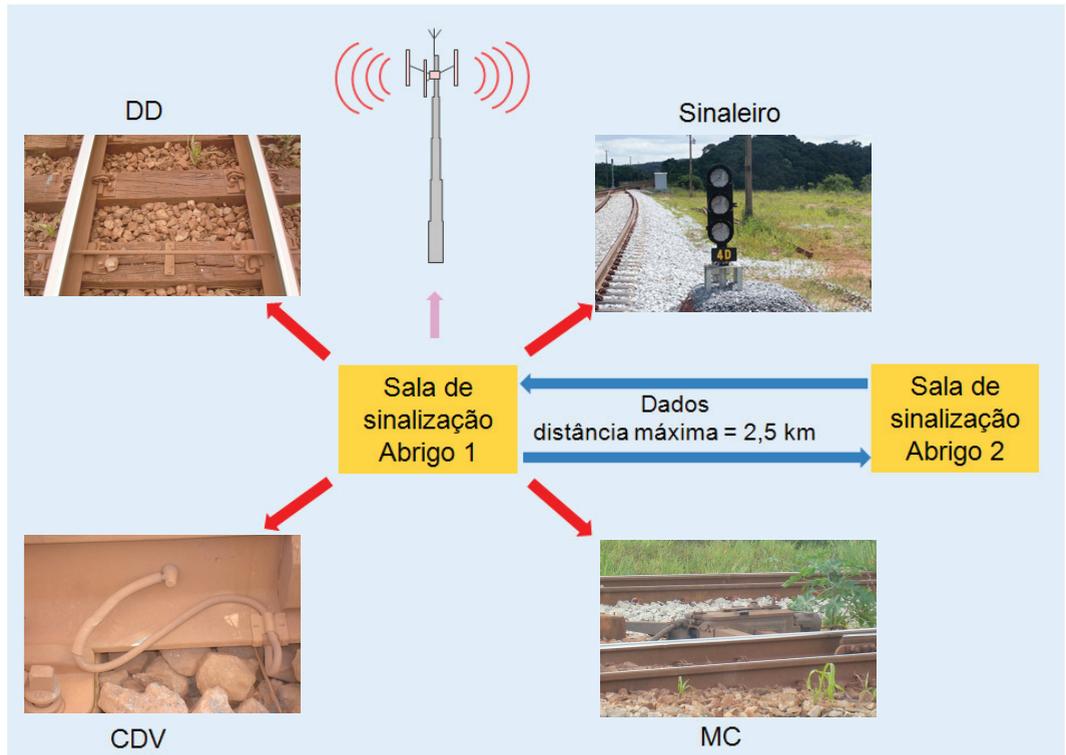


Fig.10.21 - Fotografias dos componentes que compõem a sinalização em ferrovia.

A Fig. 10.22 mostra a estrutura de um abrigo típico edificado em alvenaria e outro, tipo bastidor, também chamado de Case, localizados ao longo da ferrovia.

Os sistemas estão expostos a:

- ☑ Descarga direta ou próxima dos trilhos;
- ☑ Descarga direta ou próxima ao sistema de telecomunicações;
- ☑ Descarga direta ou próxima dos abrigos de equipamentos de automação e controle;
- ☑ Surtos oriundos da rede de distribuição de energia em função de descarga, faltas ou chaveamentos (operações de comutação).

Todas as linhas elétricas ou de sinais devem ser protegidas. As linhas de sinais vitais, destinadas ao tráfego de sinais essenciais à segurança e ao correto funcionamento do sistema básico de sinalização ferroviária, como, por exemplo, CDV, máquina de chave e sinaleiro, podem requerer DPS especiais em função da segurança envolvida.

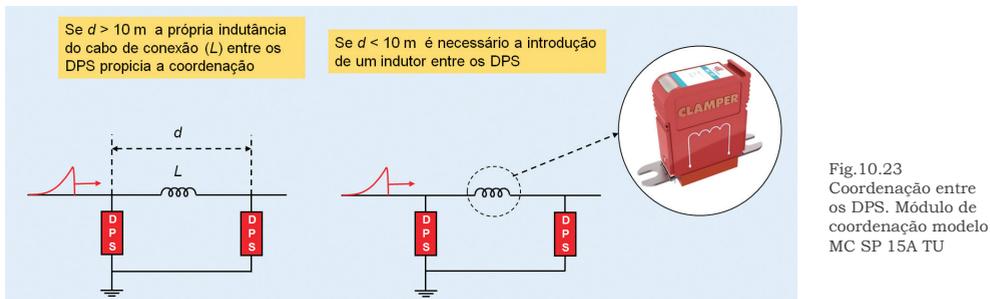
10.3.2 - LINHAS DE ENERGIA

Quando o sistema ferroviário for alimentado através de linhas elétricas com neutro aterrado (esquema de aterramento tipo TN), a seleção do DPS deve atender aos requisitos da NBR 5410 [5]. Considerando a possibilidade de descarga direta, os DPS devem ser mais robustos, com corrente de impulso I_{imp} mínima de 25kA para os DPS Classe I e corrente nominal de descarga de 20kA para os DPS Classe II. Quando o sistema ferroviário for alimentado através de linhas elétricas não diretamente aterradas (sem aterramento do neutro) sujeitas a elevadas sobreensões temporárias, recomenda-se que a tensão máxima de operação contínua (U_c) dos DPS seja igual ou superior à tensão entre linhas do sistema (U).

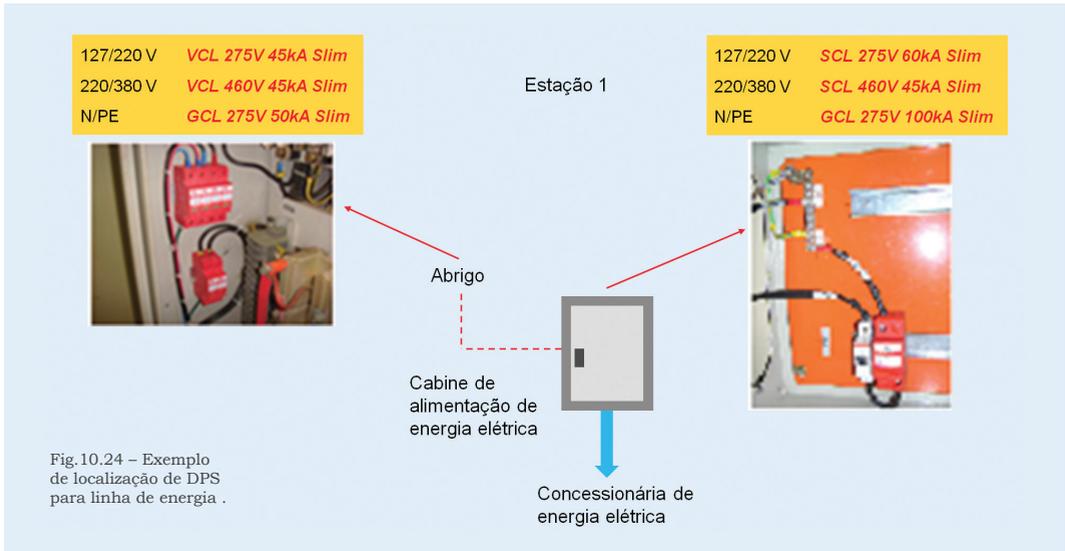
Os DPS devem ser instalados na entrada das linhas de energia, na zona ZPR 0 e internamente, na zona ZPR 1. Pode ser necessária a utilização de dispositivos de coordenação entre os DPS, caso a distância entre eles seja inferior a 10m, conforme mostrado na Fig. 4. A Fig. 10.24 mostra a localização dos DPS. Caso não exista cabine de alimentação



Fig.10.22 – Abrigo típico utilizado para equipamentos de sinalização e bastidor Case.



com distância adequada, elementos adicionais de coordenação se tornam mandatórios.



10.3.3 - SISTEMAS DE SINALIZAÇÃO FERROVIÁRIA

Considerando o risco de descarga direta no trilho e a necessidade de coordenação entre os DPS, a melhor prática é instalar DPS Classe I junto aos sensores próximos aos trilhos e DPS Classe II na entrada do abrigo ou bastidor Case. Desta forma, evita-se a instalação de elementos de coordenação indutivos já mencionados.

Os DPS devem ser conectados conforme mostra a Fig.10.25. Os DPS Classe I devem

ser conectados em modo comum. Já os DPS Classe II devem ser conectados tanto em modo diferencial quanto em modo comum.

10.3.3.1 - SENSOR DE DESCARRILAMENTO - DD

A Fig. 10.26 mostra diagrama simplificado do circuito detector de descarrilamento, normalmente instalado próximo das máquinas de chave responsáveis pelos desvios.

A Fig. 10.27 mostra a barra de “DD”, a caixa de junção e DPS tipo curto circuitante, Classe I.

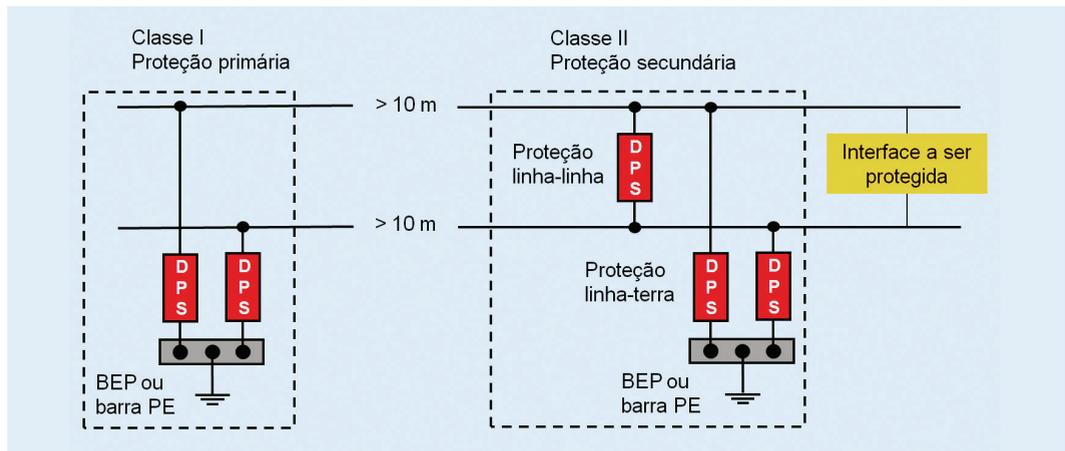


Fig.10.25 – Diagrama conexão de DPS para sinais de sinalização ferroviária. Adaptado de [6].

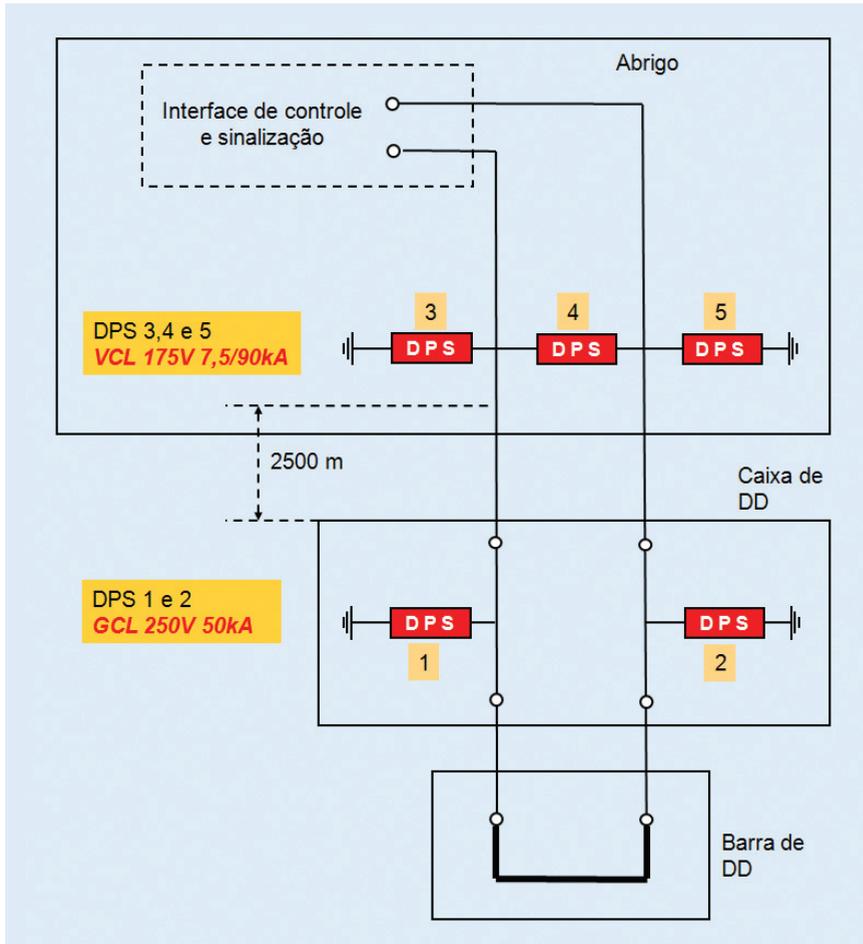


Fig.10.26 – Diagrama simplificado do circuito de detecção de descarrilamento – DD. Adaptado de projeto VALE/MRS-CLAMPER.

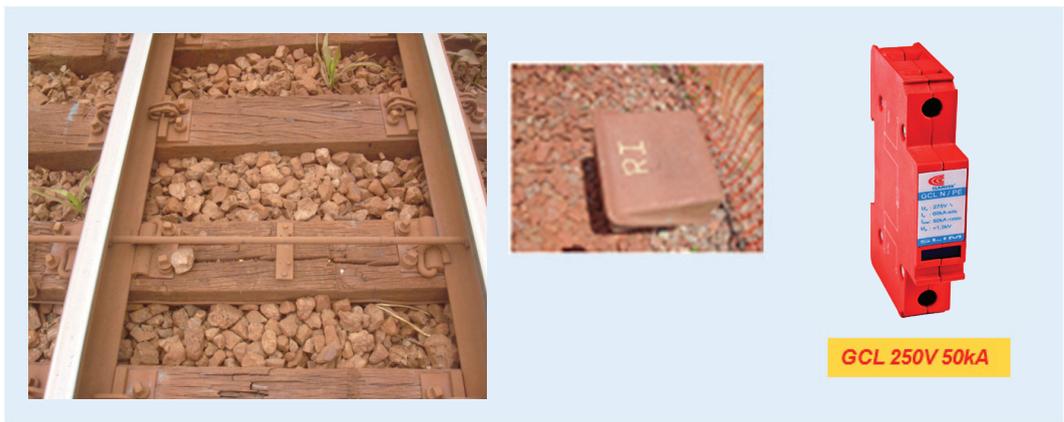


Fig.10.27 - Fotografia DPS GCL 250V 50kA Classe I instalado em caixa de junção próxima ao trilho.

10.3.3.2 - CIRCUITO DE VIA – CDV

A Fig. 10.28 mostra diagrama simplificado do circuito de via, responsável pela localização da composição na via. É considerado um sinal vital para o sistema de sinalização ferroviária e está mais exposto às descargas diretas, uma vez que os condutores que levam os sinais são conectados diretamente nos trilhos

A Fig. 10.29 mostra detalhe do DPS tipo curto-circuitante, Classe I, aplicado na caixa de

junção do circuito de via junto ao trilho.

10.3.3.3 - MÁQUINA DE CHAVE

Os circuitos que acionam a máquina de chave, responsável por alterar a trajetória do trem de uma linha para outra adjacente, são de alta criticidade. Possuem comando com linha de alimentação elétrica e linha de sinal de indicação de estado da máquina de chave.

A Fig. 10.30 mostra diagrama simplificado da máquina de chave.

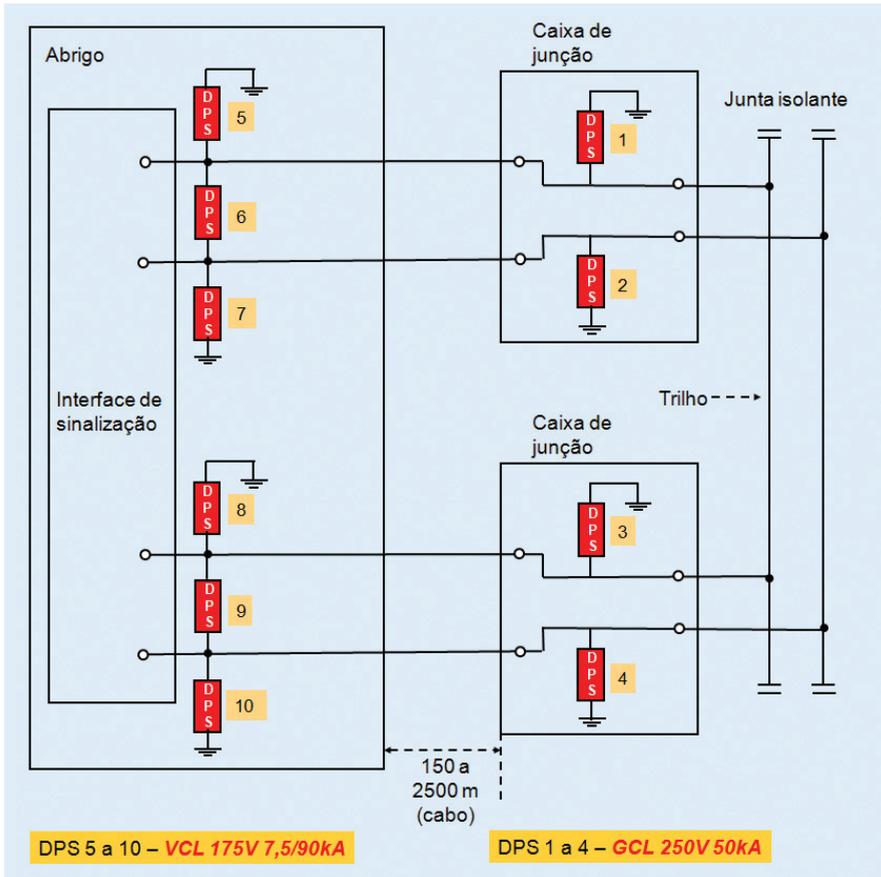


Fig. 10.28 Diagrama simplificado do circuito de via (CDV). Adaptado de projeto de projeto VALE/MRS-CLAMPER.



Fig. 10.29 – Fotografia DPS GCL 250V 50kA Classe I, instalado em caixa de junção próxima ao trilho.

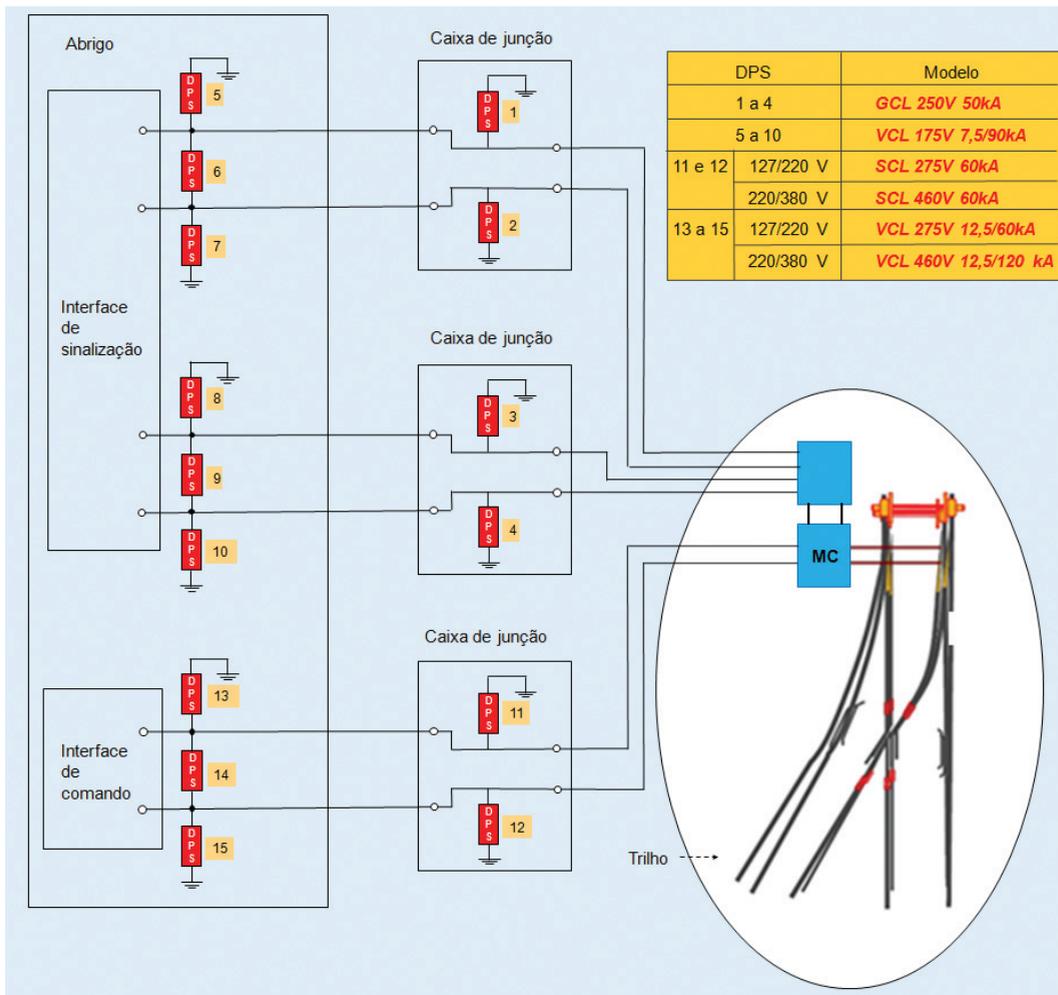


Fig.10.30 – Diagrama simplificado do circuito da máquina de chave. Adaptado de projeto VALE/MRS-CLAMPER .

A Fig. 10.31 mostra detalhe de DPS Classe I instalados em caixa de junção próxima da máquina de chave.



Fig.10.31 - Fotografia DPS Classe I instalado em caixa de junção próxima ao trilho.

10.3.3.4 - SINALEIROS

O sistema de sinalização visual, também considerado como vital para o sistema, está exposto a surtos induzidos por descargas atmosféricas próximas. Deve ser protegido tanto no campo, principalmente no caso de lâmpadas LED, quanto no lado do abrigo.

A Fig. 10.33 mostra fotografia de sinaleiro, com DPS instalados na caixa de junção localizada no poste metálico.

Caso não seja possível efetuar a instalação dos DPS primários próximos ao trilho, os mesmos podem ser instalados na entrada do abrigo ou no bastidor Case, lembrando da necessidade de se fazer a coordenação

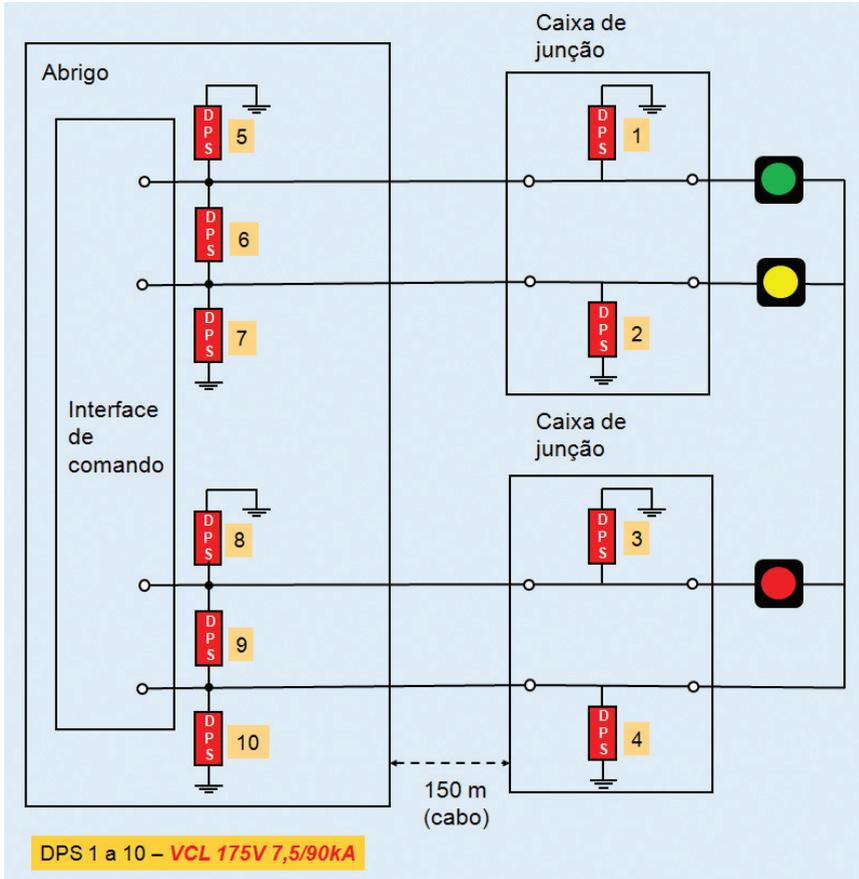


Fig.10.32 – Diagrama simplificado da proteção dos circuitos sinaleiros. Adaptado de projeto WABTEC/MRS-CLAMPER.



Fig.10.33 – DPS instalado na caixa de junção junto ao poste do sinaleiro.

entre os DPS com a utilização de indutores. A Fig. 10.34 mostra exemplo do indutor de coordenação, que deve ser dimensionado conforme a capacidade de corrente do circuito a ser protegido.

A Fig. 10.35 mostra instalação de DPS Classe I em detectores de descarrilamento (DD), circuitos de via (CDV) e máquina de chave integrados em um mesmo painel, na entrada do abrigo.



Fig. 10.34 – Fotografia de indutor de coordenação modelo MC SP 15A TU, 250V, 15A.



Fig. 10.35 – DPS Classe I instalados na entrada do abrigo para proteção de sinais de sinalização ferroviária.

10.3.3.5 - INSTALAÇÃO DOS DPS NOS ABRIGOS QUE RECEBEM OS SINAIS DA FERROVIA

Os bastidores normalmente utilizam sistema de conexão padrão AREMA [8], para entrada e saída de cabos. Esse sistema, com parafuso, porca e contra porca, traz mais segurança, considerando que o sistema é submetido à trepidação constante. A Fig. 10.36 mostra o modelo de DPS adequado para esse tipo de conexão.

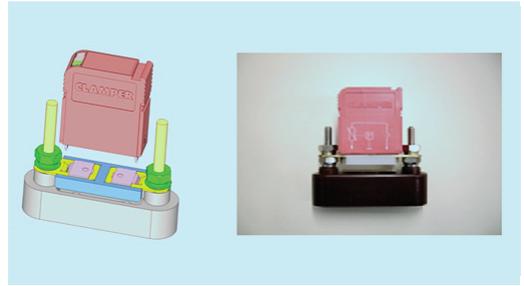


Fig. 10.36 – DPS tipo plugável adequado para fixação em conector padrão AREMA [8].

Um abrigo pode receber uma quantidade expressiva de sinais vindos do campo, o que demandará a instalação dos DPS em painéis com superfície equipotencial de baixa impedância. A Fig. 10.37 mostra uma prática não recomendada de cabeamento, porém muito encontrada nas instalações, que pode comprometer a performance da proteção. Os DPS com comprimentos de cabos mais longos até a barra de equipotencialização terão tensões residuais mais elevadas, podendo ser adicionadas tensões de até 2kV devido à queda de tensão indutiva nos cabos.

A Fig. 10.38 mostra uma forma mais adequada de se fazer a conexão de aterramento dos DPS. Cada DPS é ligado diretamente na estrutura metálica de sustentação do bastidor, que serve de superfície equipotencial de baixa impedância.

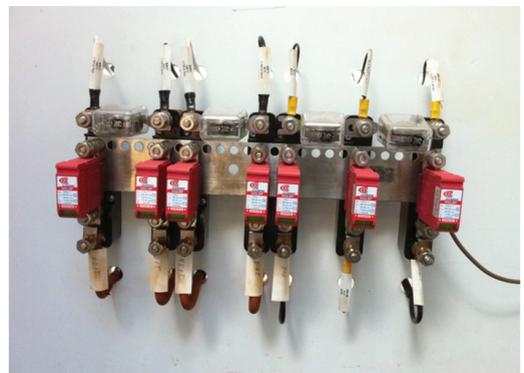


Fig. 10.38 – DPS conectados ao plano equipotencial de baixa impedância.

10.4 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As seguintes conclusões podem ser formuladas com base no exposto ao longo deste capítulo:

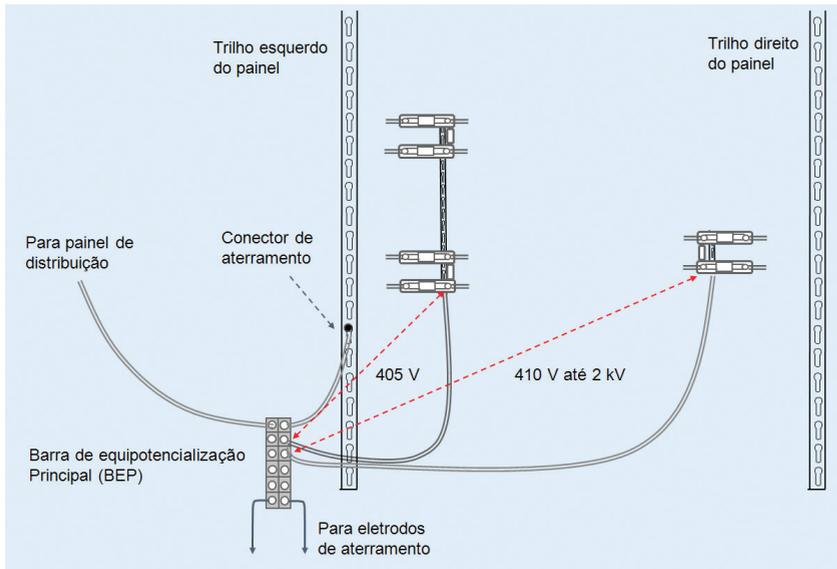


Fig.10.37 – Prática típica de cabeamento não recomendável devido ao grande comprimento dos cabos de aterramento. Adaptado de [6].

- ☑ Os sistemas de iluminação LED são bastante eficientes, mas também são muito sensíveis aos surtos. Especial atenção deve ser dada à proteção dos sistemas de iluminação instalados em área externa.
- ☑ As tubulações metálicas enterradas (dutos) utilizadas para transporte de líquidos e gases precisam de proteção contra os efeitos das descargas atmosféricas e também contra os efeitos das correntes de 60Hz induzidas nas tubulações, nos casos de paralelismo com linhas de transmissão de energia elétrica.
- ☑ Os sistemas ferroviários modernos possuem elevado grau de automação que exige a instalação de dispositivos de comando e sinalização ao longo de toda a via. Devido à importância destes elementos para garantir a operação segura das ferrovias, é mandatório instalar arranjos de proteção contra surtos em todos os componentes do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPÍTULO 1

1. Ruibran J. dos Reis. Mapeando a climatologia das descargas atmosféricas em Minas Gerais, utilizando dados de 1989 a 2002 - uma análise exploratória. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geografia. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
2. ABNT NBR 5419-1, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais”, maio de 2015.
3. ABNT NBR 5419-2, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco”, maio de 2015.
4. K. B. McEachron, “Lightning to the Empire State Building”. Transactions AIEE, September 1941, VOL. 60.
5. M. Guimaraes, P.R.R. Sobreiro, S. Visacro, “Lightning Measurements at Morro do Cachimbo Station: new results”. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China.
6. K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, “Parameters of lightning flashes”, *Electra* 80, pp. 23-37, 1975.
7. Cigré TB 549, “Lightning Parameters for Engineering Application”, WG C4.407, Aug. 2013.
8. Saint Privat d’Allier Reaearch Group, “Eight years of lightning experiments at Saint Privat D’Allier”, *RGE* 9, pp. 561-582, 1982.
9. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, C.; I.J.S. Lopes, G.C. de Miranda; “Time-Domain Analysis of Rocket-Triggered Lightning-Induced Surges on an Overhead Line,” *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 51, Issue 3, Part 2, August 2009, pp. 725-732.
10. Kleber P. Naccarato, Osmar Pinto Jr., “Lightning detection in Southeastern Brazil from the new Brazilian Total Lightning Network (BrasilDAT) - Tracking severe storms using total lightning information”. In: Proceedings of the ICLP 2012 – 28th International Conference on Lightning Protection, 2-7 September, Vienna, Austria.
11. R.B. Anderson and A.J. Eriksson, “Lightning parameters for engineering applications”. *Electra*, no. 69, pp. 65–102, Mar. 1980.
12. Lightning and insulator subcommittee of the T&D committee, “Parameters of lightning strokes: a review”. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp.346-358, January 2005.
13. D. Morgan, C. J. Hardwick, S. J. Haigh and A. J. Meakins, “The Interaction of Lightning with Aircraft and the Challenges of Lightning Testing”. *AerospaceLab Journal*, Issue 5 - December 2012.
14. Osmar Pinto Jr., Antônio C. V. Saraiva, Gisele Zepka, “A New Tool to Avoid Lightning Tragedies Like in Praia Grande in December 2014”. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, Brazil, 28th Sept. – 2nd Oct. 2015.
15. J.O.S. Paulino. Proteção de cercas e currais contra descargas atmosféricas. Manual técnico. Contrato Belgo Bekaert e Fundação Christiano Ottoni. Junho de 1994.
16. Afonso Ferreira Ávila. Estudo do desempenho de redes de distribuição rural

utilizando dados do sistema de localização de tempestades e da operação do sistema – uma abordagem de engenharia. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. Dezembro de 2005.

17. E. Philip Krider, “Franklin, Ingen-Housz, and Protecting Gunpowder From Lightning in the 18th Century”. 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria.

18. ABNT NBR 5410, “Instalações elétricas de baixa tensão”, setembro de 2004.

CAPÍTULO 2

1. ABNT NBR 5419-1, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais”, maio de 2015.

2. ABNT NBR 5419-2, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco”, maio de 2015.

3. ABNT NBR 5419-3, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida”, maio de 2015.

4. ABNT NBR 5419-4, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura”, maio de 2015.

5 - ABNT NBR 5410, “Instalações elétricas de baixa tensão”, setembro de 2004.

CAPÍTULO 3

1. C. F. Barbosa e J. O. S. Paulino, “A closed expression for the lightning induced voltage in short

loops”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 58, n. 1, pp. 172-179, 2015.

2. A. K. Agrawal, H. J. Price e S. H. Gurbaxami, “Transient response of a multiconductor transmission line excited by a non-uniform electromagnetic field”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 22, n. 2, pp.119-129, 1980.

3. C. A. Nucci, “The Lightning Induced Over-Voltage (LIOV) code”, IEEE PES Meeting, vol. 4, pp. 2417-2418, Jan. 2000.

4. J. O. S. Paulino, C. F. Barbosa, I. J. S. Lopes, e G. C. Miranda, “Time-domain analysis of rockettriggered lightning-induced surges on an overhead line,” IEEE Trans. on Electromagn. Compat., vol. 51, no. 3, Part II, pp. 725-732, 2009.

5. A. Andreotti, A. Pierno e V. A. Rakov, “A new tool for calculation of lightning-induced voltages in power systems—Part I: Development of circuit model”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 30, n. 1, pp. 326-333, Jan. 2015.

6. E. Hallén, “Electromagnetic Theory”, New York, Wiley, 1962.

7. ABNT NBR 5419-1, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais”, maio de 2015.

8. Al-Asadi, M. M., Duffy, A. P., Willis, A. J., Hodge, K. e Benson, T. M., “A simple formula for calculating the frequency-dependent resistance of a round wire”, Microwave and optical technology letters, vol. 19, n.2, pp-84-87, 1998.

9. ITU-T K.20, “Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunication centre to overvoltages and over-currents”, Genebra, 2015.

10. ABNT NBR 5419-4, “Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura”, maio de 2015.

11. M.A. Uman e D.K McLain, “Magnetic field of the lightning return stroke”, J. Geophys. Res., 74:6899-910, 1969.

12. S. Rusck, “Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks,” Ph.D. thesis, Royal Inst. Tech., Stockholm, Sweden, 1957.

13. A. Zeddani e P. Degauque, “Current and voltage induced on a telecommunication cable by a lightning stroke”, Lightning Elec-

tromagnetic, R.L. Gardner Ed., Hemisphere Public. Corp., pp.377-400, 1990.

14. A. Sommerfeld, "Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie", *Ann. d. Phys.*, vol.28, n.4, 1909.

15. M. Rubinstein, "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate and long range", *IEEE Trans. on EMC*, vol.38, n.3, 1996.

16. V. Cooray, "Horizontal fields generated by return strokes", *Radio Sci.*, vol.27, pp.529-537, 1992.

17. F. Rachidi, C. A. Nucci, and M. Ianoz, "Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground," *IEEE Trans. PWDR*, vol.14, pp. 294-302, 1999.

18. C.A. Nucci, "Lightning-induced voltages on distribution systems: Influence of ground resistivity and system topology", *Proc. of the VIII Intern. Symp. on Lightning Protection*, São Paulo, Brazil, pp.761-773, 2005.

19. E. Petrache, F. Rachidi, M. Paolone, C. A. Nucci, V. A. Rakov, and M. A. Uman, "Lightning-induced voltages on buried cables—Part I: theory," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 4, Aug. 2005.

20. C. F.Barbosa e J.O.S. Paulino, "An approximate time domain formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, pp. 593-601, Agosto de 2007.

21. C. F. Barbosa and J. O. S. Paulino, "A time-domain formula for the horizontal electric field at the earth surface in the vicinity of lightning," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 3, pp. 640-645, Agosto de 2010.

22. V. Cooray, "Horizontal electric field above and underground produced by lightning flashes," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 936-943, Nov. 2010.

23. C. Caligaris, F. Delfino, e R. Procopio,

"Cooray-Rubinstein formula for the evaluation of lightning radial electric field: Derivation and implementation in the time domain," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 50, no. 1, pp. 194-197, Feb. 2008.

24. F. Delfino, P. Girdinio, R. Procopio, M. Rossi, e F. Rachidi, "Time-domain implementation of Cooray-Rubinstein formula via convolution integral and rational approximation," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 53, no. 3, pp. 755-763, Aug. 2011.

25. A. Andreotti, F. Rachidi, e L. Verolino, "A new formulation of the Cooray-Rubinstein expression in time domain," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 3, pp. 391-396, Jun. 2015.

26. Y. Baba e V.A. Rakov, "Electromagnetic Computation Methods for Lightning Surge Protection Studies", John Wiley & Sons, 2016.

27. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, C.; I.J.S. Lopes, G.C. de Miranda; "Time-Domain Analysis of Rocket-Triggered Lightning-Induced Surges on an Overhead Line," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 51, Issue 3, Part 2, August 2009, pp. 725-732.

28. J. O. S. Paulino, C. F. Barbosa, and I. J. S. Lopes, "An efficient timedomain method for lightning induced voltage calculation on a finite-length horizontal overhead conductor above lossy ground," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 24, no. 10, pp. 1493-1504, Oct. 2014.

29. J. O. S. Paulino, W. C. Boaventura e C. F. Barbosa, "Lightning induced voltage on an aerial wire above two-layer ground", *Proc. of the ICLP – 28th Int. Conf. on Lightning Protection*, September, Vienna, Austria, 2012.

30. M. Paolone, E. Petrache, F. Rachidi, C. A. Nucci, V. A. Rakov, M. A. Uman, D. Jordan, K. Rambo, J. Jerauld, M. Nyffeler e J. Schoene, "Lightning-induced voltages on buried cables - Part II: Experiment and model validation," *IEEE Trans. Elec. Compat.*, vol. 47, no. 3, pp. 509-520, Aug. 2005.

31. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, W.C. Boaventura. "Lightning-induced current in a cable buried in the first layer of a two-layer ground," IEEE Trans. on Electromag. Compatibility, vol. 56, n. 4, pp. 956-963, 2014.

32. IEEE Std. C62.41.1, "IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits", PES SPDC, New York, 2002.

33. IEEE Std. C62.41.2, "IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits, PES SPDC, New York, 2002.

34. IEEE Std. C62.45, IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits, PES SPDC, New York, 2002.

35. C. F. M. Carobbi e A. Bonci, "Elementary and ideal equivalent circuit model of the 1,2/50 - 8/20 μ s combination wave generator", IEEE Electromag. Compatibility Magazine, vol. 2, n. 4, 2013.

36. ITU-T Lightning Handbook, "The Protection of Telecommunication Lines and Equipment against Lightning Discharges - Chap. 10: Overvoltages and overcurrents measured on telecommunication subscriber lines", Genebra, 1995.

37. ITU-T K.67, "Expected surges on telecommunications networks due to lightning", Genebra, 2015.

38. ITU-T K.20, "Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunication centre to overvoltages and overcurrents", Genebra, 2015.

39. ITU-T K.44, "Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltages and overcurrents - Basic Recommendation", Genebra, 2012.

40. ITU-T K.45, "Resistibility of telecommunication equipment installed in the access and trunk networks to overvoltages and overcurrents", Genebra, 2015.

CAPÍTULO 4

1. ABNT NBR 5419-3, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida", maio de 2015.

2. ABNT NBR 5419-4, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura, maio de 2015.

3. ABNT NBR 5410, "Instalações elétricas de baixa tensão", setembro de 2004.

4. Paulo Fernandes Costa. Aterramento do neutro dos sistemas de distribuição brasileiros: uma proposta de mudança. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, dezembro de 1995.

5. International Standard IEC 62305-3, "Protection against lightning: Physical damage to structures and life hazard", Edition 2.0, 2010.

6. Earth conduction effects in transmission systems. Erling Ditlef Sunde. Dover Publications, 1968.

7. A. B. Lima, J. O. S. Paulino, W. C. B. , M. F. Guimarães, "A simplified method for calculating the tower grounding impedance by means of PSPICE". ICLP 2012 - 28th International Conference on Lightning Protection, 2-7 September, Vienna, Austria.

8. Resistividade média dos solos de Minas Gerais - 02.118-COPDEN-0346 - Arquivo Tecnológico da CEMIG, código 21233176, fevereiro de 1994.

9. Brandão, C.A.L.; Paulino, J.O.S., "Estudo do desempenho de sistemas de aterramento dos dispositivos de proteção contra sobretensões em redes de distribuição". Anais do IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica-SENDI, Salvador, Bahia, 23 a 28 de setembro de 1984, editora COELBA, 45 páginas.

10. James H. Scott. Electrical and magnetic properties of rock and soil. United States

Department of the Interior Geological Survey. Open-File Report 83-915. Prepared in cooperation with the U.S. Air Force, 1983.

11. Alipio R., Visacro, S.; "Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, volume 55, issue 1, pages 132-139, 2013.

CAPÍTULO 5

1. C.R. Paul. Introduction to Electromagnetic Compatibility. Ed. Prentice Hall, New York, 2006.

2. Henry W. Ott. Electromagnetic Compatibility Engineering. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.

3. R. Araneo, S. Celozzi, A. Tatematsu, F. Rachidi, "Time-Domain Analysis of Building Shielding Against Lightning Electromagnetic Fields". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 3, June 2015.

4. ABNT NBR 5419-4, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura, maio de 2015.

5. A. R. Panicali, C. F. Barbosa, "Impulsive Currents and Voltages Induced into Loops due to Nearby Lightning". 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, October 3-7, 2011.

6. A. R. Panicali, C. F. Barbosa, "Impulsive Voltages Induced into Internal Cabling of Buildings Hit by Lightning". 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012.

7. R. B. Schulz, V. C. Plantz, D. R. Brush. "Shielding theory and practice". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 30, no. 30, August 1988.

8. H. K. Høidalen, "Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on Multi-conductor Overhead Lines Above Lossy Ground". IEEE Transactions on Electro-

magnetic Compatibility, vol. 45, NO. 1, February 2003.

9. IEC 61000-4-9, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-9: Testing and measurement techniques - Pulse magnetic field immunity test, 1993, revised 2000.

10. IEC 61000-4-10, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-10: Testing and measurement techniques - Damped oscillatory magnetic field immunity test, 1993, revised 2000.

11. IEEE Guide on Shielding Practice for Low Voltage Cables-1143, 1994.

12. E. F Vance, Coupling to Shielded Cables, John Wiley and Sons Inc., 1978.

CAPÍTULO 6

1. ABNT NBR 5419-4, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura, maio de 2015.

2. ABNT NBR 5410, "Instalações elétricas de baixa tensão", setembro de 2004.

3. Programa de simulação de circuitos - PSpice (orcad.com).

4. Resistividade média dos solos de Minas Gerais - 02.118-COPDEN-0346 - Arquivo Tecnológico da CEMIG, código 21233176, fevereiro de 1994.

5. ABNT NBR 5419-3, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida", maio de 2015.

6. ABNT NBR 5419-1, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais", maio de 2015.

7. Erling Ditlef Sunde. Earth conduction effects in transmission systems. Dover Publications, 1968.

8. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, C.; I.J.S. Lopes, G.C. de Miranda; "Time-Domain Analysis of Rocket-Triggered Lightning-Induced Surges on an Overhead Line". IEEE

Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, Issue 3, Part 2, August 2009, pp. 725-732.

9. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, C.; I. J. S. Lopes, W.C. Boaventura; "An Approximate Formula for the Peak Value of Lightning-Induced Voltages in Overhead Lines". IEEE Trans. on Power Delivery. Vol. 25, N^o.2, April 2010, pp. 843-851.

10. A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis". IEEE Trans. Power Del., vol. PWRD-2, no. 3, pp. 871-886, Jul. 1987.

11. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, I.J.S. Lopes, W.C. Boaventura, Assessment and analysis of indirect lightning performance of overhead lines, Electric Power Systems Research, v. 118, p. 55-61, 2014.

12. J.O.S. Paulino, C.F. Barbosa, W.C. Boaventura, "Lightning-Induced Current in a Cable Buried in the First Layer of a Two-Layer Ground". IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. Issue 4, 2014.

13. M. Paolone, E. Petrache, F. Rachidi, C. A. Nucci, V. A. Rakov, M. A. Uman, D. Jordan, K. Rambo, J. Jerauld, M. Nyffeler, and J. Schoene, "Lightning-induced voltages on buried cables-Part II: Experiment and model validation". IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 47, no. 3, pp. 509-520, Aug. 2005.

14. ITU-T K.67, "Expected surges on telecommunications networks due to lightning", Genebra, 2015.

15. ABNT NBR 5419-2, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco", maio de 2015.

16. C. F. Barbosa, F. E. Nallin, V. Cardinalli, N. Carnetta, J. Ribeiro, S. Person and A. Zeddami, "Current distribution on power conductors of an installation struck by rocket-triggered lightning". Proceedings of the VIII Int. Symposium on Lightning Protection, pp. 82-86, São Paulo, Nov. 2005.

17. Josef Birkl, Célio F. Barbosa, "Modeling the Current Through the Power Conduc-

tors of an Installation Struck by Lightning". 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, October 3-7, 2011.

CAPÍTULO 7

1. ABNT NBR 5419-4:2015, "Proteção contra descargas atmosféricas, Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura".

2. Ronaldo Moreira Kascher, "Estudos de protetores híbridos contra transitórios elétricos para aplicação em linhas de telecomunicações", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Outubro de 1997.

3. Norma IEC 61643-11:2011, "Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods".

4. ABNT NBR 5410:2004, "Instalações elétricas de baixa tensão".

5. Anatel Res. 442:2006, "Regulamento para certificação de equipamentos de telecomunicações quanto aos aspectos de compatibilidade eletromagnética", Regulamento anexo à Resolução 442:2006 da Anatel.

6. Catálogos CLAMPER: <http://www.clamper.com.br>

CAPÍTULO 8

1. ABNT NBR 5419-1, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios gerais", maio de 2015.

2. ABNT NBR 5419-2, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 2: Gerenciamento de risco", maio de 2015.

3. ABNT NBR 5419-3, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida", maio de 2015.

4. ABNT NBR 5419-4, "Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 4: Sistemas elé-

tricos e eletrônicos internos na estrutura, maio de 2015.

5. ABNT NBR 5410, "Instalações elétricas de baixa tensão", setembro de 2004.

6. Catálogos CLAMPER: <http://www.clamper.com.br>

7. IEC 61643-12 Low voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low voltage power distribution systems – Selection and application principles.

CAPÍTULO 9

1. ABNT NBR 5419-1, "Proteção contra descargas atmosféricas - Partes 1, 2, 3 e 4", maio de 2015.

2. Ronan Pereira Amaral, Carlos Alberto Branco, Alexandre Ribeiro de Almeida. Proteção de Transformadores de Distribuição Contra Sobretensões. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 21 a 25 de agosto de 2006, Belo Horizonte, MG.

3. Arshad Mansoor, François Martzloff. "The Effect of Neutral Earthing Practices on Lightning Current Dispersion in a Low-voltage Installation". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.

4. IEC 61643-32/Ed1: Low-voltage surge protective devices – Part 32: Surge protective devices for specific use including d.c. - Selection and application principles for SPDs connected to photovoltaic installations. 37A/283/CDV - COMMITTEE DRAFT FOR VOTE.

5. Shigeru Yokoyama. "Lightning protection of Wind turbine generation Systems". 2011 7th Asia-pacific International Conference on Lightning, November 1-4 2011, Chengdu, China.

6. Newman Malcolm, Raj Aggarwal. "Mitigation of transient overvoltages under lightning in networks with wind farms connection using MOV surge arresters". IEEE Power & Energy Society General Meeting, 21-25 July 2013, Vancouver, Canada.

7. Catálogos CLAMPER: <http://www.clamper.com.br>

CAPÍTULO 10

1. ABNT NBR 5419, "Proteção contra descargas atmosféricas, Partes 1, 2, 3 e 4", maio de 2015.

2. C62.41.1-2002 - IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1000V and less) AC Power Circuits.

3. ABNT NBR IEC 61643-1:2007. Dispositivos de proteção contra surtos em baixa tensão. Parte 1: Dispositivos de proteção conectados a sistemas de distribuição de energia de baixa tensão - Requisitos de desempenho e métodos de ensaio.

4. Norma Petrobras N-2298. Proteção Catódica de Dutos Terrestres, 2013.

5. ABNT NBR 5410, "Instalações elétricas de baixa tensão", setembro de 2004.

6. ABNT NBR 13184, "Sinalização ferroviária – Linhas elétricas de energia e linhas elétricas de sinal vital e não vital – Dispositivos de proteção contra surtos (DPS)", 2012.

7. Catálogos CLAMPER: <http://www.clamper.com.br>

8. AREMA C&S – Communication and Signal - Manual

PROTEÇÃO
DE EQUIPAMENTOS
ELÉTRICOS E
ELETRÔNICOS
CONTRA **SURTOS**
ELÉTRICOS
EM INSTALAÇÕES

1ª Edição
Lagoa Santa - MG
Editora Clamper
2016



Este livro foi redigido por professores, pesquisadores e engenheiros. Ele agrega a capacitação científica e acadêmica de universidades e centros de pesquisa à experiência profissional da equipe da CLAMPER, empresa mineira líder no mercado brasileiro do segmento da proteção contra surtos, com intensa atuação no mercado internacional.

Tendo como público alvo engenheiros, técnicos e instaladores, este trabalho objetiva explicar fenômenos complexos em uma linguagem simples e direta, bem como fornecer embasamento para o projeto do sistema de proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos instalados dentro de edificações contra surtos elétricos, em conformidade com a Norma Brasileira de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (NBR 5419), revista e reeditada em 2015 e com a Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (NBR 5410), de 2004.

