

Guia de aplicação para Tecnologia EasyQuench

Conhecimento básico sobre a tecnologia EasyQuench
da Streamer para redes MT de 6 a 40 kV

3ª Edição

2018



POSITRON

Ostreamer



Fujian RuiSen



Distribuidor Autorizado no Brasil



中国电建



Sichuan Yilin
Global Group



Suzhou Porcelain
Insulator Works



CYG 高能



CNBM
sinoma

Primeira edição: Janeiro de 2014

Segunda edição: Novembro de 2016

Terceira edição: Fevereiro de 2018

Todos os direitos reservados.

Nem o folheto completo nem qualquer parte dele deve ser copiada, reproduzida, transmitida de qualquer forma ou traduzido para outros idiomas sem o consentimento expresso por escrito da Streamer AG.

Autores:

Étienne Cook

Matthieu Zinck

Revisores:

Mikhail Zhitenov

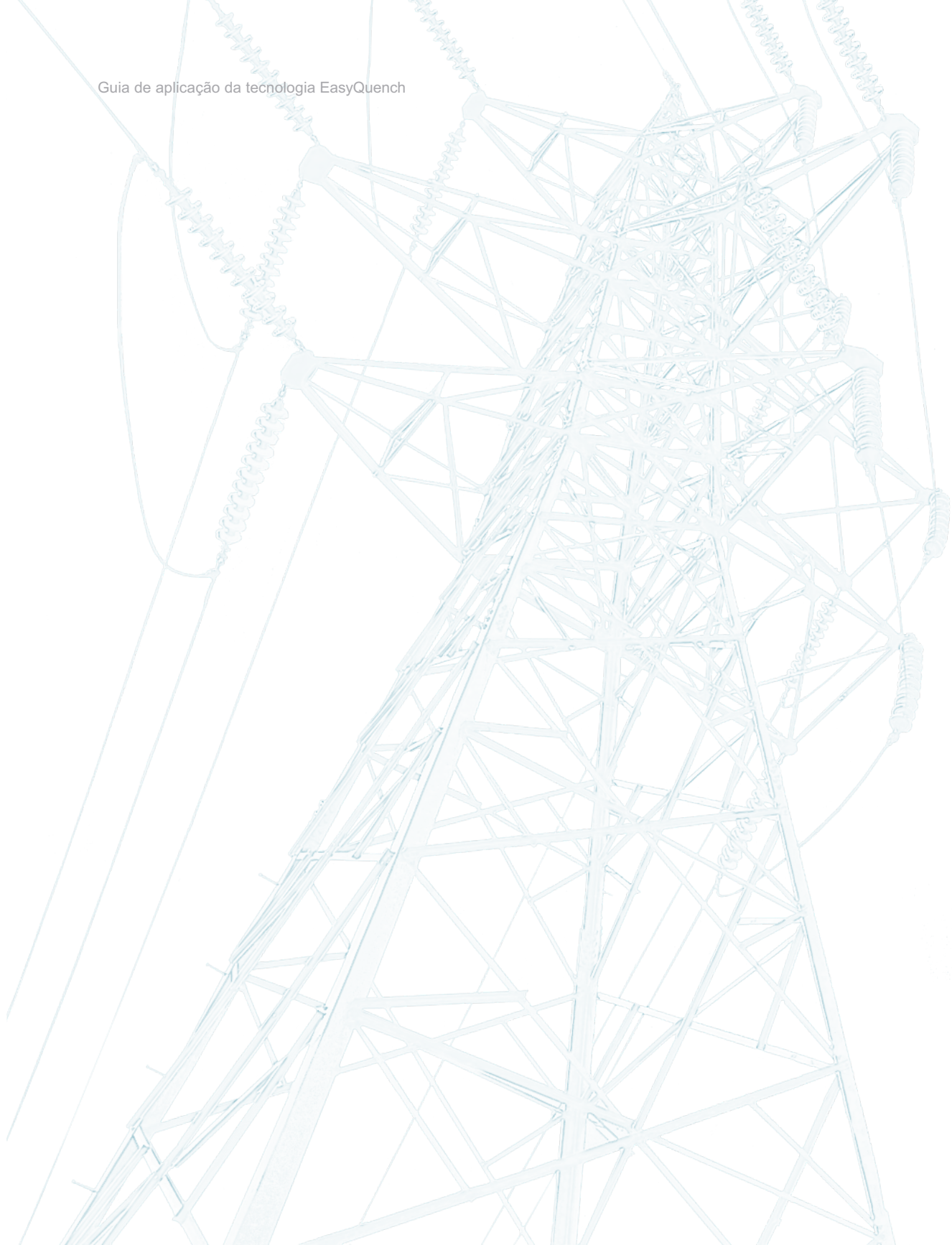
Vladimir Zhitenov

Matthieu Zinck



Distribuidor Autorizado no Brasil





Distribuidor Autorizado no Brasil



Índice

Resumo	6
1. Raios: Definições e Vocabulário	7
1.1 Raios	7
1.2 Impactos do Raio	11
1.2.1 Informações Gerais Sobre Queda de Raios	11
1.2.2 Impacto de Curta Duração / Impulso	13
1.2.3 Impacto de Longa Duração	14
1.3 Composição da Descarga Atmosférica e Parâmetros de Correntes	14
2. Raios: Ameaça para Redes Aéreas	17
2.1 Etapa A: De Impactos Diretos de Raios a Impulso Atmosférico, Descarga Disruptiva e Curto Circuito de Retorno	18
2.2 Etapa B: De Impacto Indiretos à Sobretensão Induzida e Descarga Disruptiva	20
2.3 Etapa C: De Descarga Disruptiva a Corrente de Curto e Arco de Potência	22
2.3.1 Corrente de Curto	22
2.3.2 Arco de Potência	28
2.4 Etapa D: Consequências do Raio na Rede	29
2.4.1 Quebra / Dano aos Isoladores	29
2.4.2 Interrupções e Desligamentos	30
2.4.3 Quebra / Dano a Condutores	31
2.4.4 Quebra / Dano a Transformadores de Força	33
2.4.5 Quebra / Dano a Para-raios	34
3. Tecnologia Streamer EasyQuench	36
3.1 Princípio de Operação	36
3.2 Tipologia: Dispositivos de Proteção Indireta e Direta Contra Raios em Redes	38
3.2.1 Dispositivo de Proteção Indireta Contra Raios (I-LLPD - "Line Lightning Protection Device")	39
3.2.2 Dispositivo de Proteção Direta Contra Raios em Redes (D-LLPD)	42
3.2.3 Conclusão sobre a Proteção Proporcionada pelos LLPDs	48
3.3 Parâmetros e Desempenho	49
3.3.1 Corrente Presumida de um Circuito	51
3.3.2 Impulsos Atmosféricos Padronizados, Correntes Nominais de Descarga e Ensaio de Impulso Atmosféricos	52
3.3.3 Tecnologia EasyQuench e Extinção na Passagem por Zero	54
3.3.4 Máxima corrente de Descarga Atmosférica para Extinção de Falhas	56
3.3.5 Tensão Residual e de Centelhamento	56
3.3.6 Redução da Magnitude do Impulso do Raio	58
3.3.7 Expectativa de Vida	59
3.4 Influências Ambientais e Cuidados Específicos	59
3.4.1 Temperatura e Salinidade	59
3.4.2 Altitude	60
3.4.3 Vibração	60
3.4.4 UVs	60
3.4.5 Arcos Elétricos	60

4. Análise da Rede e Aplicação dos Produtos Streamer	61
4.1 Divisão da Rede em Trechos Equivalentes	62
4.2 Análise das Ameaças por Raios	63
4.2.1 Análise da Densidade Isocerâmica da Região	64
4.2.2 Análise das Descargas Atmosféricas Diretas na Rede (DLS – “Direct Lightning Strike”).	66
4.2.3 Análise das Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas na Rede (LIO – “Lightning Induced Overvoltage”).	69
4.2.4 Número Total de Interrupções na Rede Devido a Raios e Exemplo	71
4.3 Implantação de LLPDs	72
4.3.1 Trechos Equivalentes e 3km da Subestação AT/MT	74
4.3.2 Postes Especiais	76
4.3.3 Conclusão Sobre a Proteção Adicionada pelos LLPDs	78
4.4 Seleção de Produtos	79
4.4.1 Como Verificar a Corrente Presumida de Curto Circuito (CPCC)	80
4.4.2 Como verificar a Correta Dimensão do GAP do Centelhador	82
5. Metodologia de Teste para os LLPDs	84
5.1 Seleção do Segmento	84
5.2 Obtenção dos Dados Segmento	87
5.3 Instalação	88
5.4 Durante a Temporada de Raios e Monitoramento	88
5.5 Coleta dos Dados	88
5.6 Análise e Conclusão.	89
Referências	90
Léxico	92
Anexos	96
Anexo 1: Descarga Disruptiva e Curto Circuito de Retorno	96
Anexo 2: Propagação da Descarga Atmosférica	98
Anexo 3: Rompimento e Danos aos Condutores	99
Anexo 4: Determinação do GAP dos Centelhadores	100
Anexo 5: A Tecnologia Streamer em Comparação aos Para-raios	103
Anexo 6: A Tecnologia Streamer em Comparação a Blindagem / Aterramento / Cabos de Terra	108

Resumo

Este guia de aplicação destina-se a engenheiros, projetistas, cientistas e usuários de redes aéreas que desejam entender como a tecnologia Streamer EasyQuench funciona e pode ser aplicada para proteger redes aéreas contra raios.

- É dedicado a redes aéreas de média tensão (MT) de 6 a 40,5 kV.
- Qual é a ameaça de raio para uma rede MT?
- Como a tecnologia Streamer EasyQuench pode oferecer a melhor proteção contra raios?

As respostas a essas perguntas são fornecidas neste documento.

Os produtos Streamer EasyQuench não são compostos de óxidos metálicos nem de zinco e nenhum padrão específico foi definido até o momento. No entanto, é dada especial atenção à ponte entre a tecnologia Streamer EasyQuench e os padrões atuais de proteção contra raios.

A tecnologia EasyQuench pode proteger as redes contra a ameaça de raios diretos e indiretos (como sobretensão induzida) e oferece muitas vantagens:

- Alta capacidade de descarga, verdadeiramente adaptada aos requisitos da rede;
- Operabilidade com alto nível de resistência de passo;
- Capacidade de resistir a raios diretos e indiretos;
- Os dispositivos são autoprotégidos;
- Alta confiabilidade e vida útil;
- Fácil instalação;
- Não exige manutenção.

Esta versão do guia de aplicação apresenta detalhes e explicações sobre as operações e características do EasyQuench e propõe um método para analisar rapidamente a ameaça de raios, a fim de implementar eficientemente dispositivos Streamer. Também descreve a metodologia de testes empregada pela Streamer ao instalar seus produtos.

O guia de aplicação também está disponível nas versões curta e mini.

Esperamos que as informações a seguir forneçam mais clareza sobre esta tecnologia já promissora. Como as configurações de redes aéreas são muitas, sinta-se à vontade para entrar em contato com o escritório Streamer mais próximo para discutir a aplicação de nossos produtos com mais detalhes.

Além disso, agradecemos quaisquer sugestões sobre como este documento pode ser melhorado para melhor atender às necessidades dos nossos clientes.

1. Raios: Definições e Vocabulário

Esta seção foi projetada para fornecer um conhecimento básico sobre a atividade de raios.

O vocabulário e as definições fornecidas são baseados nas **normas IEC 62305-1** (referência [1]) e no **CIGRE working group C4.407** (referência [2]). Veja estas referências para mais detalhes.

A referência [3] também pode ser consultada para mais informações sobre parâmetros e valores de descargas atmosféricas.

1.1. Raios

O termo raios refere-se à totalidade do evento da do impulso atmosférico, desde a formação da descarga elétrica na atmosfera até a dissipação da carga elétrica, que podem ocorrer dentro de uma nuvem, entre duas nuvens (figura 1) ou em direção a terra (figura 2).

Este artigo trata apenas das características e consequências dos **raios em direção a terra**.



Figura 1: Raio nuvem a nuvem



Figura 2: Raio em direção a terra

Raios em direção a terra, definição da (IEC 62305-1): descarga atmosférica de eletricidade que ocorre entre uma nuvem e o solo, resultando em um raio que conduz corrente elétrica possuindo uma ou mais ramificações.

Nas páginas seguintes, “**raio**”, ou “**impulso atmosférico**” referem-se a um **raio em direção a terra**. Todas as definições e vocabulário são fornecidos no léxico.

Um raio em direção a terra pode ser definido por diferentes características (as definições são fornecidas abaixo):

- **Duração do raio** (em milissegundos)
- **Carga do raio** (em coulomb)
- Pode ser um raio **para cima** ou **para baixo** (veja a figura 3)
- Pode ser um raio **positivo** ou **negativo** (ver figura 3)
- **Valor da corrente pico** (em k amperes)
- Pode ser composto **por uma ou mais ramificações** (ver seção 1.2)

Duração do raio, definição: Quantidade de tempo que a corrente leva para fluir através do raio.

Carga do raio, definição (da IEC 62305-1): descarga elétrica de origem atmosférica entre a nuvem e a terra, consistindo em uma ou mais ramificações.

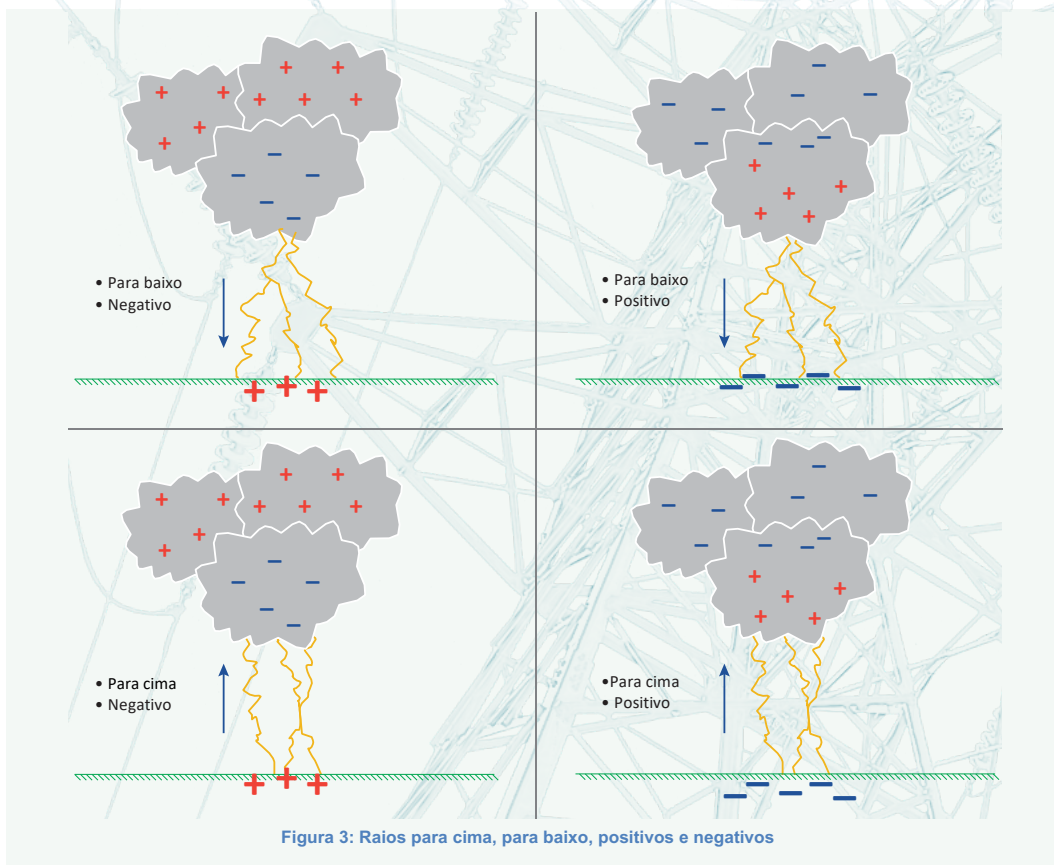
Raio ascendente, definição (da IEC 62305-1): Raio iniciado por um líder ascendente de uma estrutura aterrada em direção a uma nuvem, ver (figura 3).

Raio descendente, definição (da IEC 62305-1): raio iniciado por um líder descendente, da nuvem para a terra, ver (figura 3).

Raios positivos e negativos: Raios direcionados à terra ocorrem como resultado de um acúmulo de cargas positivas ou negativas na seção descendente de uma nuvem e (respectivamente) um acúmulo de cargas negativas ou positivas na terra sob a nuvem. Na (figura 3) no primeiro caso falamos de raios positivos, no segundo falamos de raios negativos. Supõe-se na referência [2] que **90% dos raios são negativos para baixo**, embora este valor dependa da localização:

- **Os raios positivos** são mais prováveis de ocorrer durante o inverno, com tempestades severas e nuvens de trovoadas formando-se sobre incêndios florestais, contaminadas por fumaça como na referência [2], por exemplo.
- **Os raios ascendentes** ocorrem com mais frequência em objetos altos (mais de 100 m), ou de altura moderada localizados no topo de montanhas (referência [2]).

A (figura 3) ilustra os diferentes casos de raios ascendentes/descendentes e positivos/negativos:



Valor de Pico de um Raio:

A (tabela 1) apresenta a probabilidade de que a corrente de pico de um determinado impulso atmosférico seja superior ao valor de corrente de pico fornecido.

Por exemplo: a probabilidade de um raio ter uma corrente de pico superior a 100 kA é de 3%, o que significa que apenas 3% dos relâmpagos têm uma corrente de pico superior a 100 kA.

Valor atual de pico (kA)	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	600
Probabilidade	1	0,999	0,98	0,90	0,80	0,68	0,56	0,38	0,25	0,16	0,11	0,07	0,05	0,03	0,006	0,001	0,001

Tabela 1: Probabilidade de que a corrente de pico de um raio exceda o valor determinado

A (tabela 2) e a (figura 4) apresentam os valores da (tabela 1) de uma forma diferente: mostrando a probabilidade de que a corrente de pico de um raio pertença a um determinado intervalo de valores.

Por exemplo: 23% dos impulsos atmosféricos têm um valor de pico entre 20 e 30 kA. A (figura 4) mostra a distribuição desses valores (seguindo uma **distribuição lognormal**).

É importante ressaltar que se a corrente de pico de um raio pode chegar a 200 kA, os equipamentos e dispositivos de proteção terão que suportar um valor bem inferior porque a **corrente é distribuída de forma desigual entre as fases e postes**; quando ocorre a descarga de um raio, a forma de onda é “dividida” pelos vários caminhos disponíveis com diferentes níveis de corrente. Por exemplo, quando um impulso atmosférico de 20 kA atinge um condutor, ele se dividirá em duas formas de onda, uma subindo a rede e outra descendo. Cada uma dessas formas de onda pode medir 10 kA. Assim que a forma de onda chegar ao poste, ela se dividirá novamente. Isto explica porque o nível médio da corrente de descarga atmosférica e o valor real registrado na rede diferem consideravelmente.

A referência [3] fornece informações para a avaliação desta distribuição.

Intervalo de intensidade (kA)	Probabilidade
0-10	0,024
10-20	0,18
20-30	0,233
30-40	0,188
40-50	0,129
50-60	0,084
60-70	0,055
70-80	0,035
80-90	0,023
90-100	0,015

Tabela 2: Probabilidade de que a corrente de pico de um raio esteja incluída em um determinado intervalo de corrente

Distribuição dos valores da corrente de pico dos raios direcionados a terra

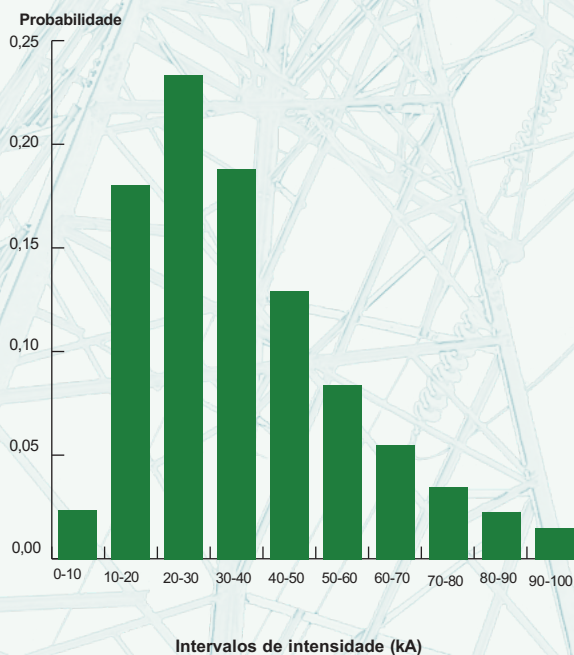


Figura 4: Ilustração da (tabela 6), probabilidade de que a corrente de pico de um raio esteja incluída em um determinado intervalo de corrente

1.2 Impactos do Raio

Um raio pode ser composto por **um ou mais pontos de impacto**, cada ponto de impacto pode conter uma **Impacto de curta duração** (nas páginas seguintes, “**Impacto do raio**” ou “**impulso**” refere-se a uma descarga curta, consulte a (seção 1.2.2)) ou um **impacto de longa duração**. Ver (seção 1.2.3).

Ponto de Impacto Raio, definição (da IEC 62305-1): Refere-se a uma única corrente elétrica que flui entre duas regiões de carga elétrica opostas, ou seja, são as descargas individuais de energia elétrica que compõem o raio.

1.2.1 Informações Gerais Sobre Queda de Raios

Número de pontos de impacto em um raio negativo descendente:

Geralmente, um raio negativo descendente é composto de 3 a 5 pontos de impacto, mas já foram registrados até 26 pontos no México (referência [2]).

A (tabela 3) da referência [2] fornece uma visão geral do número dos pontos de impacto em um raio.

Localização	Número médio de pontos de impacto por descarga	Porcentagem de raios com apenas um ponto de impacto	Tamanho da amostra
Novo México	6.4	13%	83
Flórida	4.6	17%	76
Suécia	3.4	18%	137
Sri Lanka	4.5	21%	81
Brasil	4.6	17%	883
Arizona	3.9	19%	209
Malásia	4.0	16%	100

Tabela 3: Número de pontos de impacto causados por um raio negativo descendente

Diferentes pontos de queda atingidos:

Os impactos causados por um raio podem ocorrer em diferentes locais, (ver referência [2] para uma explicação deste fenômeno).

Em média, um **raio tem de 1,5 a 1,7 pontos de impacto**; este número raramente excede 4.

A distância entre dois pontos de impacto pode variar de centenas de metros a vários quilômetros (ver referência [2]).

A (tabela 4 da referência [2]) fornece informações sobre o número de pontos de impacto em um raio.

A referência para cada afirmação é dada na (referência [2]).

Localização	Número médio de pontos de impacto por descarga	Porcentagem de raios com mais de 1 ponto de impacto	Tamanho da amostra
Novo México	1.7	49%	72*
Novo México	1.6	42%	83
Flórida	1.7	50%	76
França	1.5	34%	2995
Arizona	1.4	35%	386
Planícies Centrais dos EUA	1.6	33%	103
Brasil	1.7	51%	138
Arizona	1.7	48%	206

(Aplica-se apenas a descargas com múltiplas ramificações)

Tabela 4: Número de pontos de impacto em uma descarga atmosférica

Quedas de Raios Diretos e Indiretos:

Como uma descarga atmosférica pode ter várias ramificações e pontos de impacto, todos ou partes deles podem atingir direta ou indiretamente a rede.

Descarga Atmosférica Direta na Rede (DLS), definição: Descargas atmosféricas que atingem uma estrutura de rede que requer proteção, ver (figura 5).

Descarga Atmosférica Indireta na Rede (ILS): Descargas atmosféricas que atingem algo suficientemente próximo a uma estrutura de rede que requer proteção, pode causar uma sobretensão potencialmente perigosa, consulte a (figura 6).

Estrutura, definição: Poste, torre, cruzeta, cabo, condutor, subestação.

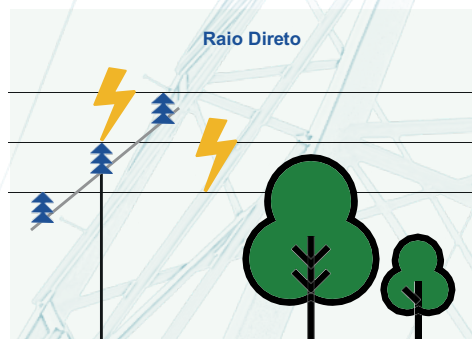


Figura 5: ilustração do impacto de um raio direto

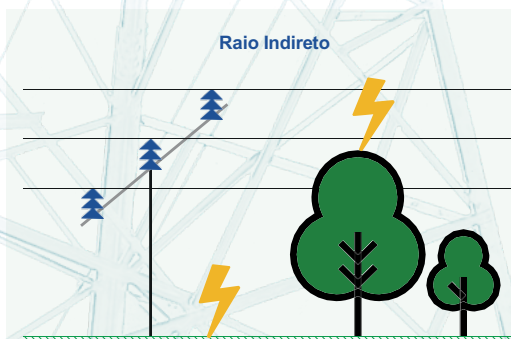


Figura 6: ilustração do impacto de um raio indireto

1.2.2 Impacto de Curta Duração / Impulso

1.2.2 Impacto de Curta Duração definição (da IEC 62305-1): Parte do relâmpago que corresponde a uma corrente de impulso.

Assim como acontece com os raios, impactos de raios podem ser definidas usando vários parâmetros. Alguns parâmetros são mais convenientes para cursos de curta duração e outros para cursos de longa duração. Depende particularmente da forma como essas descargas impactam as estruturas.

Um curso de curta duração pode ser definido através dos seguintes termos:

Tempo de avanço da corrente de impulso, definição (da IEC 62305-1): Parâmetro virtual definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes em que são atingidos, 10 e 90% dos valores de pico, ver (figura 7). Os valores de pico referem-se aos valores máximos que a corrente de impulso atinge durante sua ocorrência. O intervalo de tempo entre os instantes em que são atingidos 10% e 90% dos valores de pico é uma medida do tempo que a corrente leva para aumentar de 10% para 90% do seu valor máximo. Multiplicar esse intervalo de tempo por 1,25 resulta no tempo de avanço da corrente de impulso.

Tempo até metade do valor na cauda da corrente de impulso, definição (da IEC 62305-1): Parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante em que a corrente diminuiu para metade do valor de pico na cauda (ver Figura 7).

Carga do impulso, definição (da IEC 62305-1): Valor resultante da integral temporal da corrente do raio num impulso (ver Figura 7).

Inclinação da frente da corrente de impulso, definição (da IEC 62305-1): Mudança de corrente dentro do tempo inicial e frontal da corrente de impulso ver (figura 7).

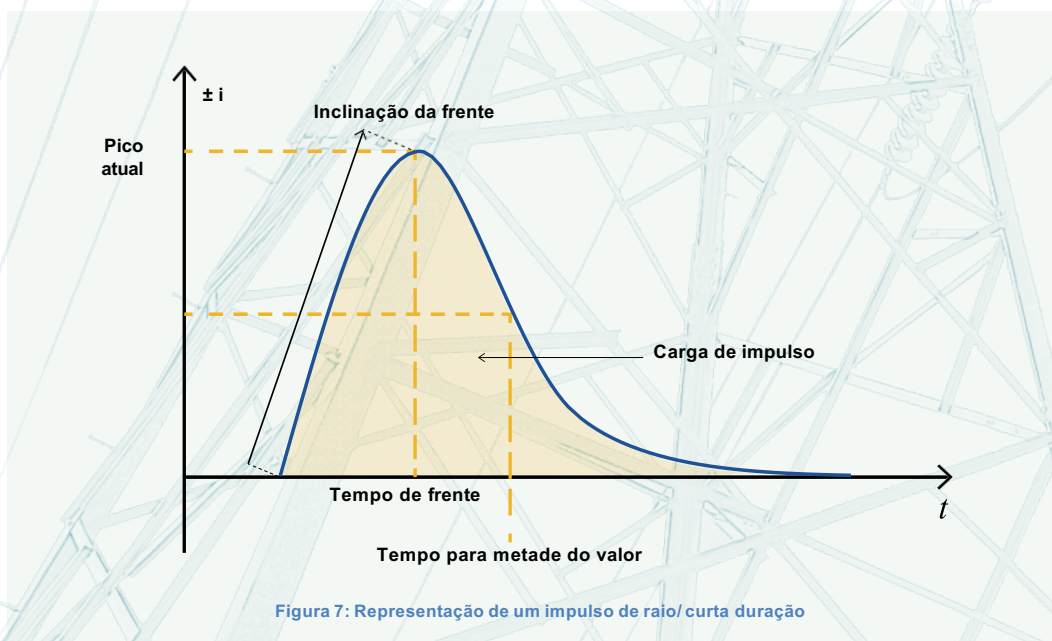


Figura 7: Representação de um impulso de raio/ curta duração

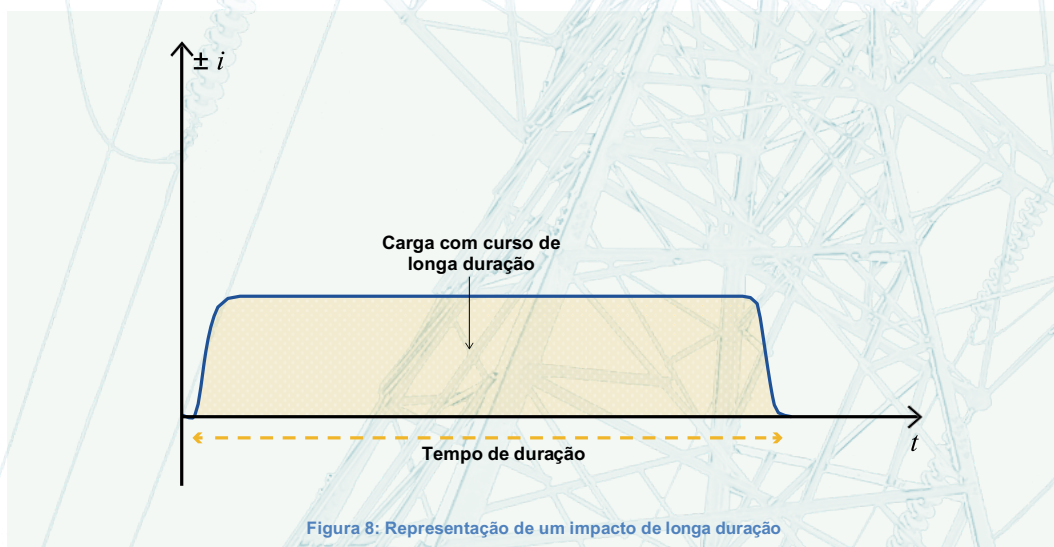
1.2.3 Impacto de Longa Duração

Impacto de Longa Duração, definição (da IEC 62305-1): Parte do raio corresponde a uma corrente contínua.

Um raio pode conter um ou mais cursos longos, entre 30 e 50% de todos as descargas negativas contêm cursos de longa duração (referência [2]). Um curso de longa duração pode ser definido pelos seguintes termos:

Duração da corrente com curso de longo, definição (da IEC 62305-1): Período de tempo cujo a corrente em um curso está entre 10% do valor de pico durante o aumento, e em 10% do valor de pico durante a diminuição da corrente contínua, ver (figura 8).

Carga com curso de longa duração, definição (de IEC 62305-1): valor resultante da integral temporal da corrente do raio em curso longo, ver (figura 8).



1.3 Composição da Descarga Atmosférica e Parâmetros de Correntes

Uma **Descarga Atmosférica** pode ser composta por um ou **mais pontos de impacto**, cada ponto de impacto pode ser um **impacto de curta ou longa duração**.

Várias combinações possíveis de impulsos são definidas na IEC 62305-1 ([1]). **O intervalo de tempo entre 2 impactos é geralmente cerca de 60ms** e pode chegar a várias centenas de milissegundos ([2]). A Tabela 5 de [2] mostra alguns registros de intervalos de tempo entre 2 impactos:

Localização	Média Geométrica do intervalo de tempo entre 2 impactos (ms)	Tamanho da amostra
Flórida e Novo México	60	516
Brasil	62	624
Arizona	61	598
Malásia	67	305

Tabela 5: Intervalos médios de tempo

As Figuras 9 e 10 mostram exemplos de composições típicas de raios (deve-se notar que os impactos curtos subsequentes só podem aparecer em descargas negativas):

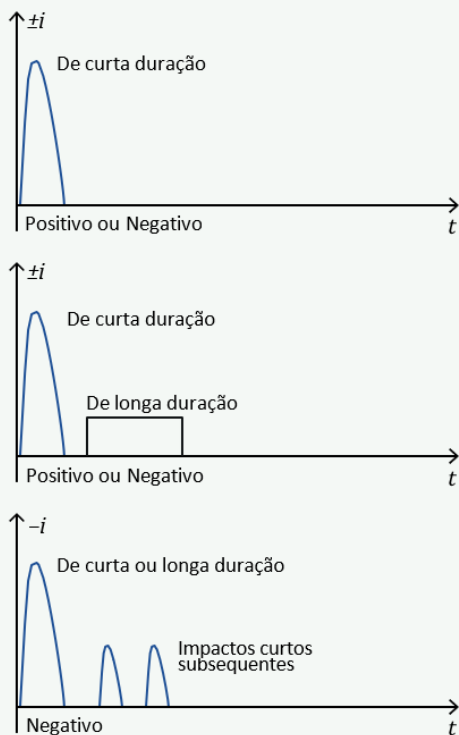


Figura 9: Possibilidade de composição para um relâmpago

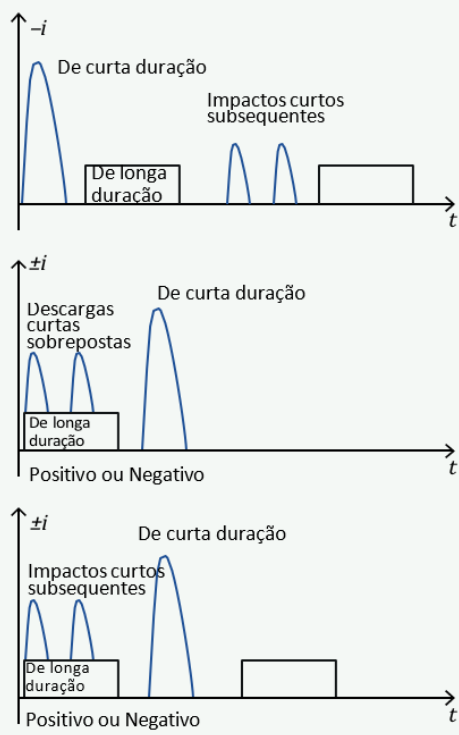


Figura 9: Possibilidade de composição para um relâmpago

A Tabela 6 (da referência [1]) fornece números sobre os parâmetros dos raios e dos impactos discutidos até agora. Assim como na (tabela 1), um valor de 90 kA para corrente de pico em 5% significa que, por exemplo, apenas 5% dos primeiros impactos negativos têm um valor de corrente de pico acima de 90 kA.

Parâmetros	Valores			Tipos de Impacto
	95%	50%	5%	
Corrente de pico (kA)	4 *	20*	90	Primeiro negativo curto
	4,9	11,8	28,6	Negativa curto subsequente
	4,6	35	250	Primeiro curto positivo (único)
Carga do flash (C)	1,3	7,5	40	Descarga negativa
	20	80	350	Descarga positiva
Carga de impulso (C)	1,1	4,5	20	Primeiro negativo curto
	0,22	0,95	4	Negativa curto subsequente
	2	16	150	Primeiro positivo curto (único)
Inclinação da frente (kA/μs)	9,1	24,3	65	Primeiro negativo curto
	9,9	39,9	161,5	Negativa curto subsequente
Inclinação da frente (kA/μs)	0,2	2,4	32	Primeiro positivo curto
	4,1	20,1	98,5	Negativa curto subsequente
Duração da frente (μs)	1,8	5,5	18	Primeiro negativo curto
	0,22	1,1	4,5	Negativa curto subsequente
	3,5	2222	200	Primeiro positivo curto (único)
Duração do impacto (μs)	30	75	200	Primeiro negativo curto
	6,5	32	140	Primeiro negativo subsequente
	25	230	2000	Primeiro positivo curto (único)
Intervalo de tempo (ms)	7	33	150	Múltiplos traços negativos
Duração total do flash (ms)	0,15	13	1100	Descargas negativas (múltiplos)
	31	180	900	Descarga negativo (somente pisca com múltiplos toques)
	14	85	500	Descarga positiva

Tabela 6: Valores estatísticos de diferentes parâmetros de descarga atmosférica

S

Assim como na distribuição dos valores de corrente de pico para relâmpagos em direção à terra (Figura 6), estes têm uma distribuição lognormal. Parâmetros para a lei lognormal (média e desvio padrão) de cada variável são fornecidas na referência [1].

Mais informações sobre a consideração das estatísticas de relâmpagos também podem ser encontradas na referência [3].

2. Raios: Ameaça para Redes Aéreas

Os relâmpagos que fazem parte das descargas atmosféricas podem provocar danos, rupturas, desarme de disjuntores, curtos e interrupções em redes devido a:

- Correntes medindo milhares de amperes
- Alta tensão medindo milhões de volts
- Altas frequências em megahertz
- Durações curtas; de microssegundos a milissegundos

Esses problemas podem ser causados de duas maneiras: Descargas diretas e indiretas, correspondendo tanto a DLS quanto a ILS.

A (figura 11) mostra a cadeia de causa e efeito, desde descargas atmosféricas diretas e indiretas, até rupturas e danos a equipamentos e desarme de disjuntores. Estas etapas, referidas como A, B, C e D, são descritas em profundidade nas seções seguintes (2.1 a 2.4).

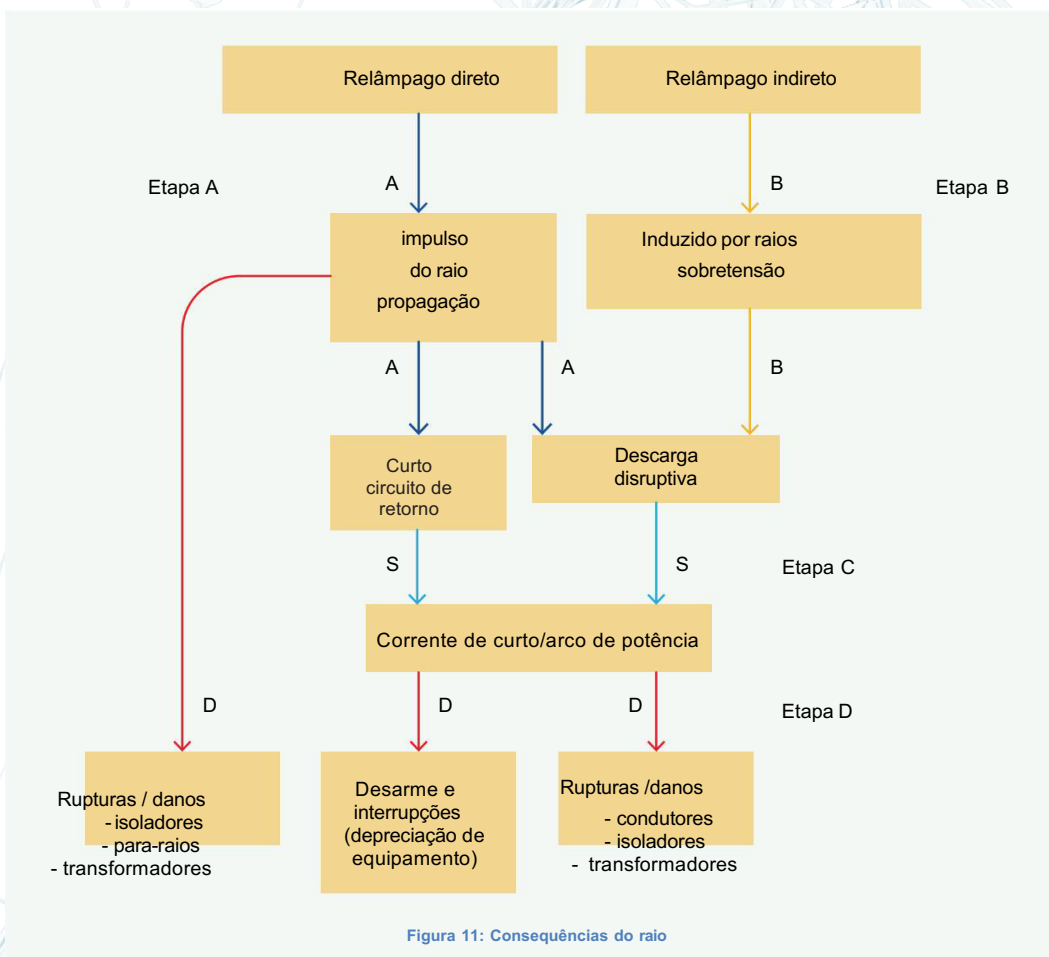


Figura 11: Consequências do raio

2.1 Etapa A: De Impactos Diretos de Raios a Impulso Atmosférico, Descarga Disruptiva e Curto Circuito de Retorno

Quando um DLS (*“Direct Lightning Stroke”* Descarga Atmosférica Direta na Rede) atinge **diretamente** uma torre ou cabo, os raios se propagam pela instalação e causaram danos. Podemos identificar a ocorrência de três fontes de danos:

1. Propagação do impulso atmosférico
2. Descarga disruptiva de isoladores (Flashovers)
3. Curto Circuito de Retorno (Back flashovers)

1. Propagação do impulso atmosférico: A propagação do impulso atmosférico é um fenômeno que causa danos e rupturas diretas aos componentes. Devido às propriedades de propagação do impulso, alguns pontos da rede, como os transformadores de potência (ver o lexical para a definição de transformador de potência), podem enfrentar uma sobretensão de duas vezes o valor do pico do impulso do raio (mais explicações são fornecidas no anexo 2).

De acordo com o **Vocabulário Eletrotécnico Internacional (IEV)** relativo aos padrões IEC, as seguintes definições são fornecidas para **descarga disruptiva e curto-circuito de retorno**:

2. Descarga disruptiva (de um isolador), definição: Refere-se ao fenômeno em que ocorre uma descarga elétrica anormal de alta tensão entre dois condutores ou entre um condutor e um objeto próximo, resultando na quebra do isolamento dielétrico.

Uma descarga atmosférica direta na rede (DLS) não tem dificuldade em fazer uma descarga disruptiva dos isoladores: Quando atinge a rede, o impulso do raio se divide e se propaga ao redor do ponto de impacto, causando o rompimento dos isoladores em seu caminho. De acordo com o exemplo dado na referência [3], uma descarga atmosférica de 10 kA produziria uma sobretensão de cerca de 2.000 kV; muito superior ao nível de isolamento das redes aéreas de distribuição que operam até 69 kV. Conforme dito na referência [3], sem qualquer proteção específica contra raios, mais de 99% dos DLS causarão descargas elétricas fase a fase nas redes de distribuição, independentemente do nível de isolamento, espaçamento dos condutores ou aterramento.

Uma descarga elétrica pode ocorrer entre um cabo e a cruzeta, ao longo do isolador, conhecida como **descarga elétrica do isolador**, veja a (figura 12). Também pode acontecer entre duas fases, conhecido como **Descarga disruptiva fase a fase**, ver (figura 13).

3. Curto Circuito de Retorno (BFO), definição: Descarga disruptiva de um isolamento rede-terra resultante de uma descarga atmosférica na parte do sistema que normalmente está no potencial de terra, ver (figura 14).

Os curto-circuitos de retorno são mais comumente encontrados em redes equipadas com **cabo blindado**. Consequentemente, esta questão tem um efeito maior nessas redes. Mais explicações e informações sobre descarga disruptiva de retorno são fornecidas no (anexo 1).

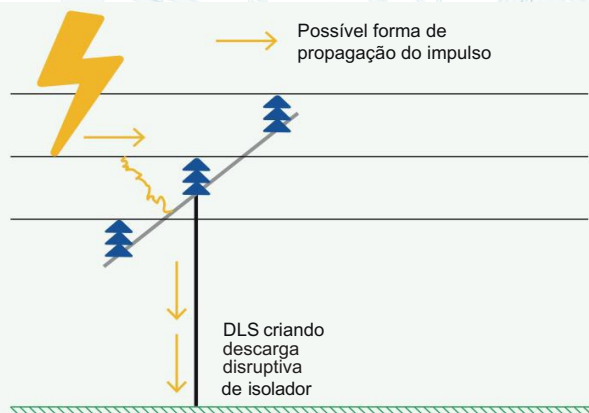


Figura 12: Quebra de um isolador por um DLS

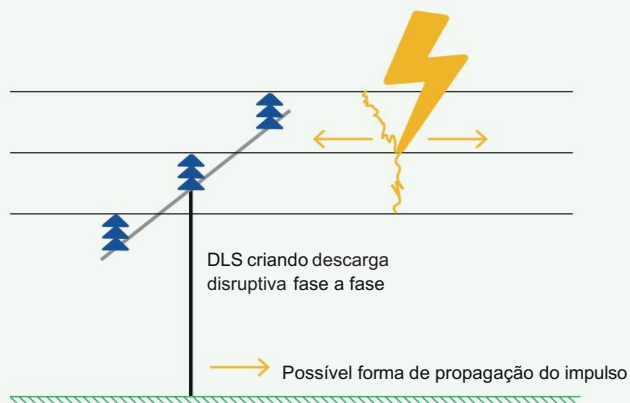


Figura 13: Descarga disruptiva fase a fase por um DLS

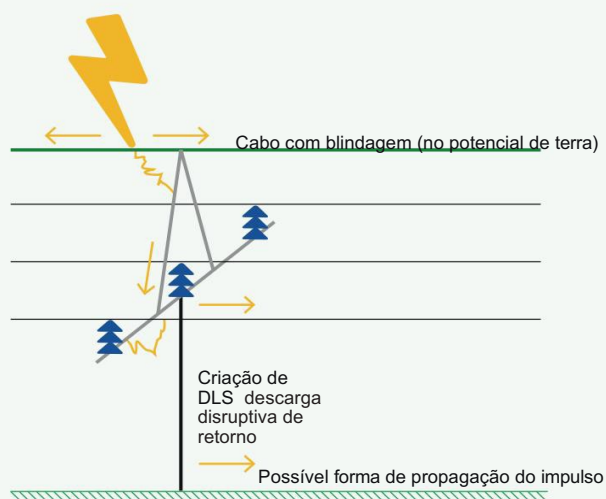


Figura 14: Curto circuito de retorno causada por um DLS

2.2 Etapa B: De Impacto Indiretos à Sobretensão Induzida e Descargas Disruptivas

No caso de descargas atmosféricas indiretas na rede (ILS), pode ocorrer a **Sobretensão Induzida por Descarga Atmosférica na Rede ((LIO) (lightning-induced overvoltage))**, uma vez que os relâmpagos criam **LEMPs (Impulsos Eletromagnéticos do Raio ou do inglês “Lightning Electromagnetic Impulses”)** propagados do ponto de impacto do raio até os condutores, levando a **ondas** como as LIO. Veja abaixo as definições:

LEMP (Impulso Eletromagnético do Raio), definição (da IEC 62305-1): Todos os efeitos eletromagnéticos da corrente atmosférica através do acoplamento resistivo, indutivo e capacitivo, criando surtos e campos eletromagnéticos irradiados.

Ondas, definição (da IEC 62305-1): Fenômeno transitório criado pelo LEMP, aparecendo como sobretensão e/ou sobrecorrente.

LIO (Sobretensão Induzida por descarga atmosférica na rede), Definição: Surtos de tensão criado por LEMP devido a um raio indireto.

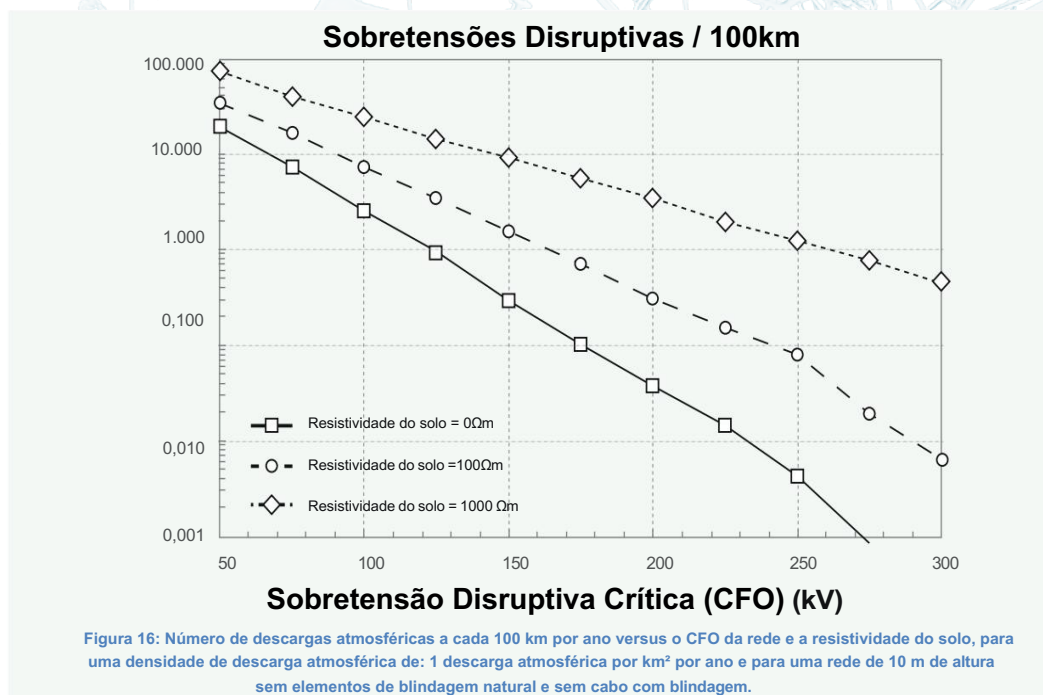
Sobretensão induzida por raios levando a **descargas elétricas**. Na Figura 15 da referência [4], podem ser vistas descargas elétricas nos isoladores, embora o raio não esteja atingindo a rede.



Figura 15: Descarga disruptiva causada por uma LIO

Existem vários modelos para cálculo de sobretensão induzida por raios. A sobretensão induzida por raios que acertam a rede indiretamente (LIO causada por ILS), contém **correntes e energias muito mais baixas do que as ondas de uma descarga atmosférica direta na rede (DLS)**. Na referência [3] assume-se que **a maioria das sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIO) estão abaixo de 300 kV**. No entanto, a LIO é um fenômeno frequentemente subestimado. Segundo a referência [5], espera-se que em média sejam **responsáveis por 60 a 80% dos desligamentos, interrupções e desarme de disjuntores nas Redes Aéreas ((OHLs) do inglês “Overhead Lines”)**. Na prática, estes valores variam consideravelmente de uma rede para outra: Se as descargas atmosféricas diretas ou as sobretensões induzidas por raios são mais ou menos responsáveis, depende do tipo de rede, seu nível de isolamento e como ela é naturalmente protegida pelos elementos naturais circundantes ou por elementos de origem humana.

A (figura 16 da referência [3]) mostra a taxa de sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIO) para uma rede com postes de 10m, com uma densidade de descarga sendo (descarga/km²/ano X a **sobretensão disruptiva crítica (CFO)** da rede e a resistividade do solo (ver o lexical para definições)). Neste caso, nenhuma blindagem está presente.



Os resultados mostrados na (figura 16) são para uma rede de distribuição em terreno aberto sem árvores ou edifícios próximos. O número de descarga disruptiva por sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIO) também depende da presença de objetos próximos que possam proteger a rede de uma descarga atmosférica direta na rede (DLS). Isto pode aumentar a proporção de descargas disruptivas por sobretensões induzidas por raios (LIO): Menos impactos diretos de raios (DLS), mas mais impactos indiretos (ILS) próximos. Portanto, em áreas blindadas, as descargas elétricas por sobretensões induzidas (LIO) são mais preocupantes. Este aspecto é considerado mais detalhadamente na referência [3].

Um estudo realizado na Ásia pela Streamer registrou **de 28 a 69% de descargas elétricas devido a sobretensão induzida descarga atmosférica (LIO)**. Além disso, **quanto maior o a capacidade resistiva a sobretensão disruptiva crítica (CFO) da rede, menor será o número de descarga disruptiva devido a impactos indiretos de raios (ILS)**, conforme representado na (tabela 7):

É, portanto, importante notar que **as redes com baixos níveis de isolamento são muito mais impactadas por sobretensões induzidas sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO)**: Números da referência [3] são confirmados pelo estudo da Streamer. Além disso, a resistividade do solo é um parâmetro importante que influencia a taxa de descargas geradas através de (LIO).

Aumentar a resistividade a sobretensão disruptiva crítica (CFO) da rede utilizando condutores revestidos com maior isolamento pode ser uma boa solução. No entanto, a deterioração dos condutores cobertos devido a DLSs faz com que o isolamento diminua ao longo do tempo.

Este fato é discutido na (seção 2.4.3.)

CFO da Rede	% de Flashovers Devido a (ILS)
125	69%
180	58%
250	46%
380	28%

Tabela 7: CFO da rede e percentual de flashovers do estudo realizado na Ásia

2.3 Etapa C: Da Descarga Disruptiva a Corrente de Curto e Arco de Potência

2.3.1 Corrente de Curto

As descargas no isolador e no isolamento do condutor levam a uma diminuição acentuada no isolamento e ao estabelecimento de corrente de curto. Na verdade, o ar ionizado pela descarga fornece um caminho para a corrente de curto.

Corrente de curto, definição (do IEC): A corrente de curto é definida como a "corrente elétrica que flui por caminhos não intencionais entre condutores ou entre condutores e a terra." Em sistemas elétricos, a corrente de curto pode ocorrer devido a uma variedade de fatores, como isolamento defeituoso, danos aos condutores ou equipamentos, ou vazamento de corrente em circuitos elétricos.

A corrente de curto é uma fonte de danos, assim como o próprio impulso do raio. Um fato importante é que a corrente de curto não é uma corrente de descarga atmosférica: É uma **corrente alimentada pela rede**, estabelecendo-se como consequência de descargas atmosféricas diretas e indiretas.

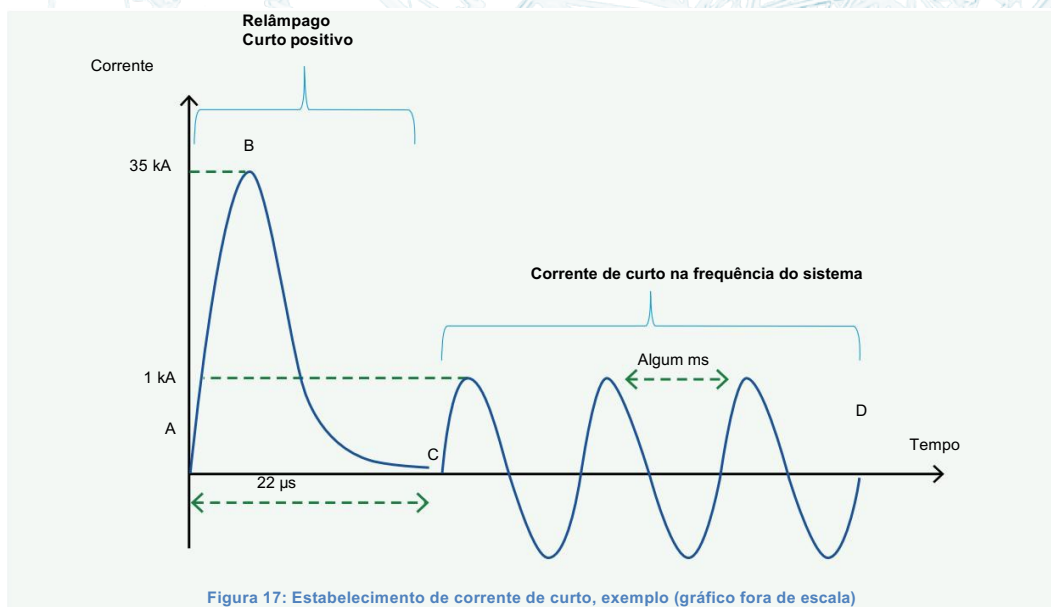
A frequência da corrente de curto é a mesma da rede, conhecida como **frequência do sistema de potência**. No próximo parágrafo são fornecidos detalhes sobre o estabelecimento de uma corrente de curto.

Estabelecimento de corrente de curto:

A (figura 17) e a (tabela 8) resumem um exemplo de estabelecimento de corrente de curto e seu término.

A (figura 21) descreve o fenômeno: Representa a medição da **corrente na fase da rede no local da ruptura do isolamento**.

As etapas descritas na (figura 17) e (tabela 8) também se referem à (figura 11).



Descrição da etapa

- | | |
|---|--|
| A | Um surto na rede ocorre devido a DLS |
| B | A tensão de pico do raio excede o isolamento do isolador e do condutor, que se rompe. O flashover ocorre e a descarga atmosférica flui através do caminho de isolamento rompido. |
| C | Após a descarga, o ar é ionizado no caminho do raio, criando um canal de plasma de baixa impedância entre os condutores e/ou terra. Um arco de potência (ver Seção 2.3.2) e uma corrente de curto são estabelecidos. |
| D | A corrente de curto flui, ela será interrompida por: <ul style="list-style-type: none"> • Quebra de um componente da rede; • Desligamento automático do equipamento de manobra; • Auto-extinção se a impedância de curto for alta o suficiente. |

Tabela 8: Estabelecimento de corrente de curto, exemplo

Tipos de corrente de curto:

A forma como a corrente de curto ocorre depende de onde o isolamento diminui e do desenho da rede. Nos casos principais, aparece como um curto fase-terra.

Nas páginas seguintes descrevemos como a corrente de curto pode ser estabelecida de acordo com a presença de cabo de aterramento /terra/blindagem.

No caso de não haver cabo de aterramento / terra/ blindagem:

Podemos dar **6 exemplos de tipos de correntes de curto**, que podem ocorrer devido a LIO ou DLS, veja a (figura 18). Como pode ser visto na (figura 18), um **DLS leva aos casos 1, 3 e 5** e um **ILS 2, 4 e 6**.

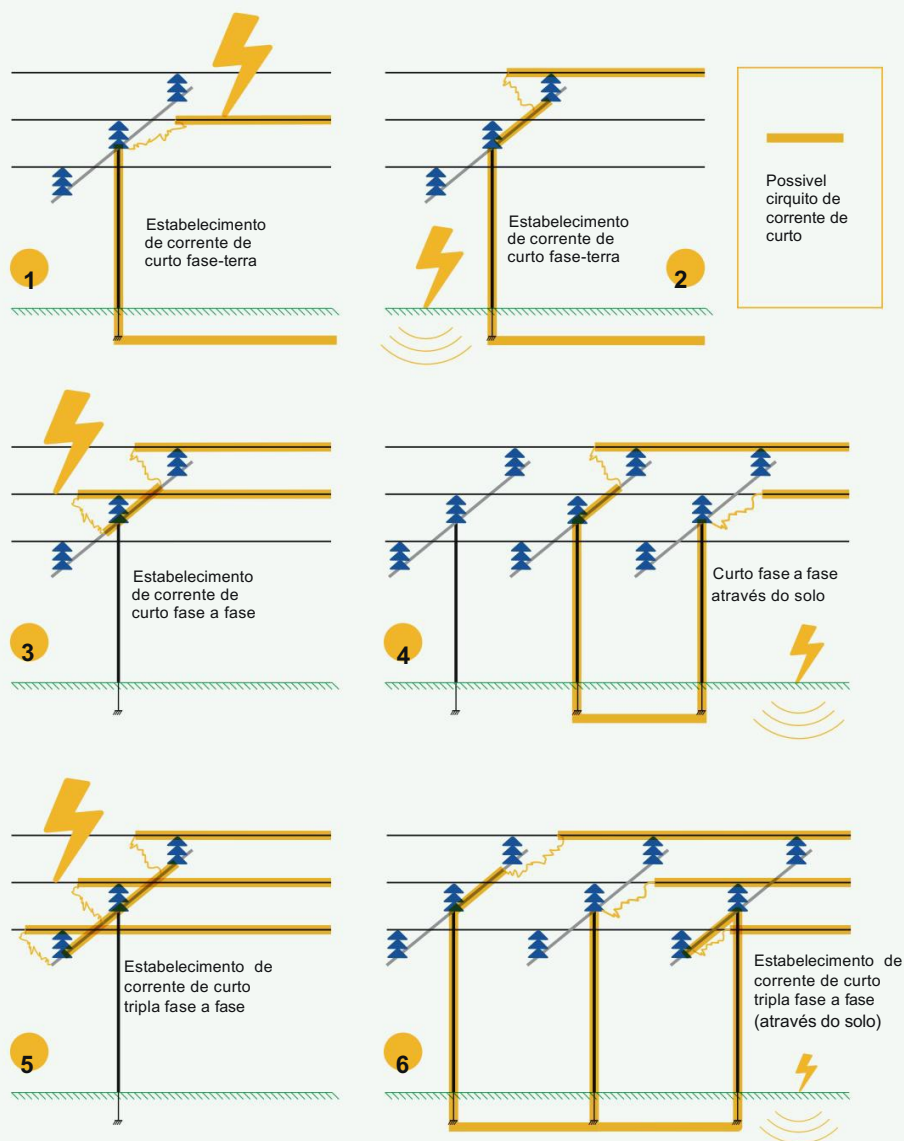


Figura 18: Exemplos de estabelecimento de corrente de curto

No caso de cabo de aterramento/ terra/ blindagem:

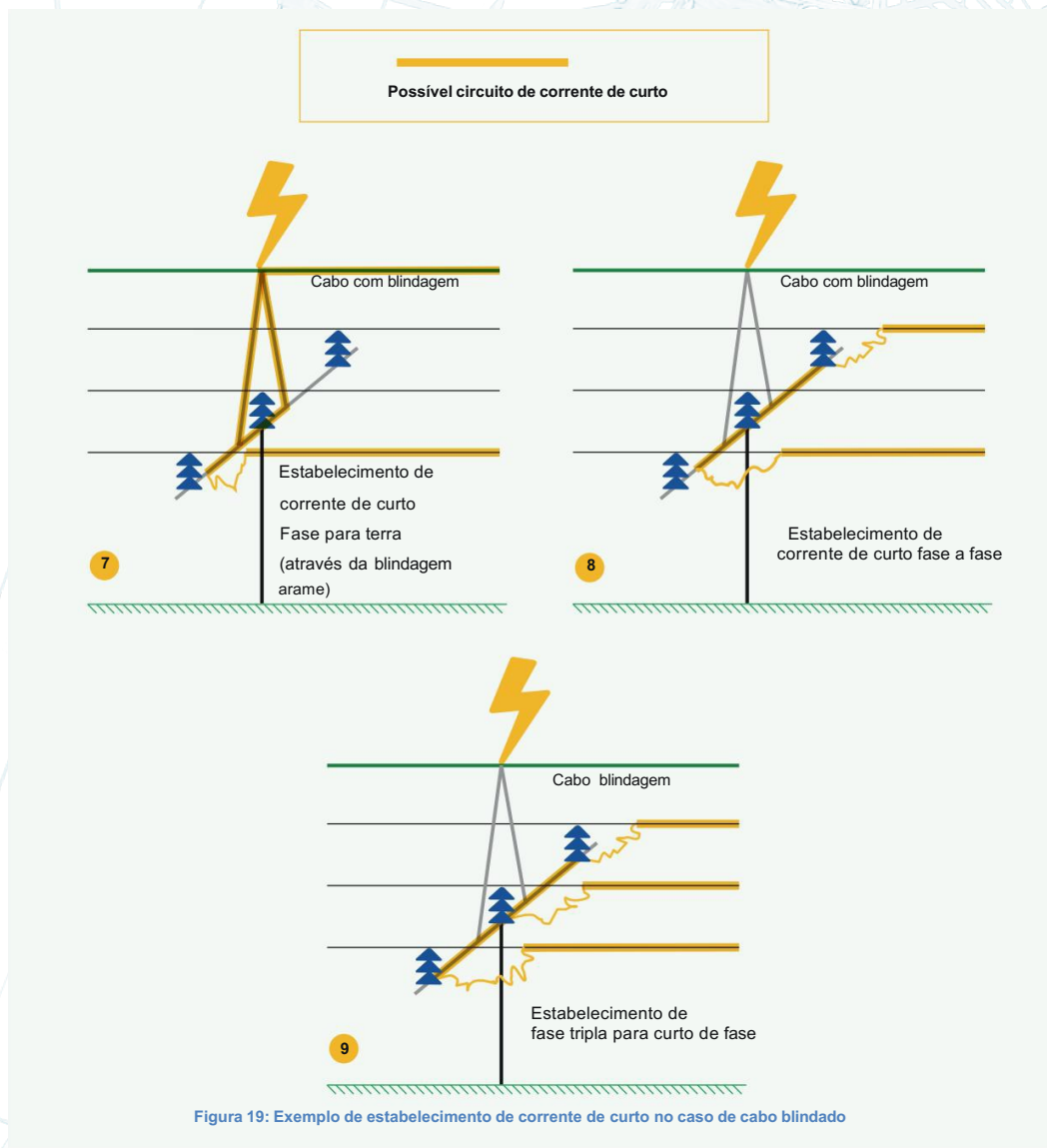
A terra e o cabo de aterramento descrevem o mesmo elemento.

Consulte o (anexo 6) para obter mais informações sobre cabos de aterramento/blindagem.

O estabelecimento de uma corrente de curto é semelhante tanto para o cabo de aterramento quanto para o cabo blindado.

Aqui **tomamos o exemplo do cabo blindado**.

No caso do cabo blindado, podem ocorrer **curto à terra, curto fase-fase ou trifásica** (ver Figura 19).



O nível da corrente de curto depende de muitos parâmetros, incluindo:

- Como se estabelece (curto fase-terra, curto fase-fase, curto trifásico etc.)
- O arranjo de aterramento (no caso de curto fase-terra)
- A potência da subestação
- A distância da subestação

Nos próximos parágrafos descrevemos a influência desses parâmetros.

Nível de corrente de curto e disposição de aterramento:

Nos casos maiores, a corrente de curto é estabelecida como um curto fase-terra (casos 1, 2 e 7). No caso 7, o cabo de aterramento/ blindagem fornece um caminho direto para a subestação.

O nível de corrente de curto no caso de corrente de curto fase-terra (casos 1, 2 e 7) é influenciado principalmente pelo arranjo de aterramento. A (tabela 9) resume esses níveis de curto.

HV/MV	Tipo de sistema de aterramento	Nível de corrente de curto à terra
	Neutro solidamente aterrado e distribuído (impedância zero)	Muito alto
	Neutro solidamente aterrado (impedância zero) e não distribuído	Muito alto
	Neutro aterrado através de resistor: Baixa impedância	Alto
	Neutro aterrado através de impedância: Alta impedância	Médio
	Neutro isolado do solo	Baixo
	Neutro aterrado através do reator (resistência de aterramento neutro, bobina de supressão de arco, etc.)	De acordo com as configurações

Tabela 9: Valor do curto à terra de acordo com o arranjo de aterramento

Nível de Corrente de Curto, Subestação e Distância de uma Subestação de AT/MT:

(Veja definições e termos para as definições de transformadores e subestações de AT/MT, MT/BT)

A corrente de curto varia fortemente com a configuração da rede e o tipo de curto que ocorre.

No entanto, um fato importante é que **quanto mais próxima a subestação de AT/MT, maior será a corrente de curto**. Além disso: **quanto maior a corrente fornecida pelo transformador de MT/BT, maior será a corrente de curto**. Vamos considerar dois exemplos para ilustrar esses valores:

- Exemplo 1: Um DLS acerta uma rede de 22 kV, equipada com cabo neutro e cabos de fase de 95 mm².
- O DLS cria descarga disruptiva fase-fase, levando a curtos triplos fase-fase (caso 5).
- O valor da corrente de curto depende do transformador e da distância dele, ver (figura 20).

Valor da corrente de curto de acordo à distância do transformador e tipo de transformador (exemplo 1)



Figura 20: Valor da corrente de curto versus distância do transformador e tipo de transformador, no caso de corrente de curto triplo fase-fase por DLS

- Exemplo 2: A descarga atmosférica indireta (ILS) ocorre em uma rede de 22 kV, equipada com neutro e cabos de fase de 95mm², a resistência de passo é de cerca de 3 Ω.
- A sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO) pode levar a um flashover de dois isoladores em dois postes diferentes, por sua vez levando a um curto fase-fase (caso 4).
- O valor da corrente de curto depende do transformador e da distância dele, ver (figura 21).

Valor da corrente de fuga de acordo à distância do transformador e tipo de transformador (exemplo 2)

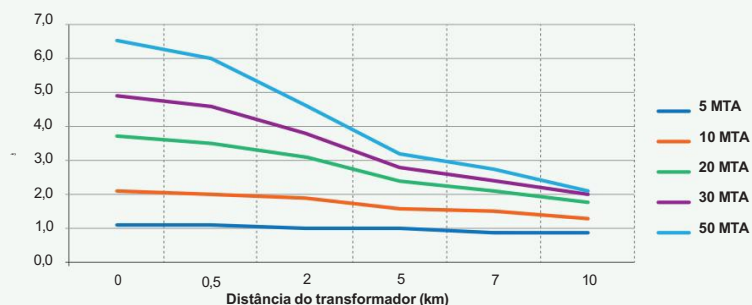


Figura 21: Valor da corrente de fuga versus distância do transformador e tipo de transformador, no caso de corrente de fuga fase-terra por LIO

2.3.2 Arco de Potência

Como visto anteriormente, DLS e LIO levam a descargas disruptivas no isolador. A corrente de curto na frequência do sistema flui através do arco de potência, fornecendo-lhe energia e fazendo-o durar.

Arco de potência, definição: Arco elétrico que se estabelece entre uma fase e outra, ou entre uma fase e um ponto de potencial zero.

Conforme descrito na referência [6], o comportamento e os danos do arco de potência variam fortemente de acordo com o isolamento do condutor como segue:

- No caso de um condutor desencapado, conforme ilustrado na (figura 22): **um arco de potência se move ao longo do condutor.** Devido ao efeito das **forças magnéticas**, o arco se move ao longo dos condutores, do isolador em direção à carga. Os arcos deslizam em direção ao lado da carga entre os condutores sob o acionamento de forças magnéticas até o desarme / quebra de equipamentos de rede. Como o **arco sempre se move e não queima de forma estável no mesmo ponto**, os condutores desencapados não queimam facilmente.
- No caso de condutores revestidos, o processo de desenvolvimento do arco de curto-circuito não é o mesmo. Conforme mostrado na (figura 23), durante o período inicial, o arco queima entre seus condutores correspondentes e a cruzeta, mas como a camada de isolamento envolve o ponto raiz do arco no condutor da rede coberta, a camada de isolamento bloqueia o livre movimento **do arco que continua a queimar no mesmo ponto** do condutor, embora seja afetado pela força magnética. Em outras palavras, o arco de potência encontra o caminho mais fácil (menos isolado) para o condutor e permanece em apenas um ponto do condutor coberto: Ele é **incapaz de se mover ao longo do condutor e queima no local da quebra do isolamento até a interrupção.**

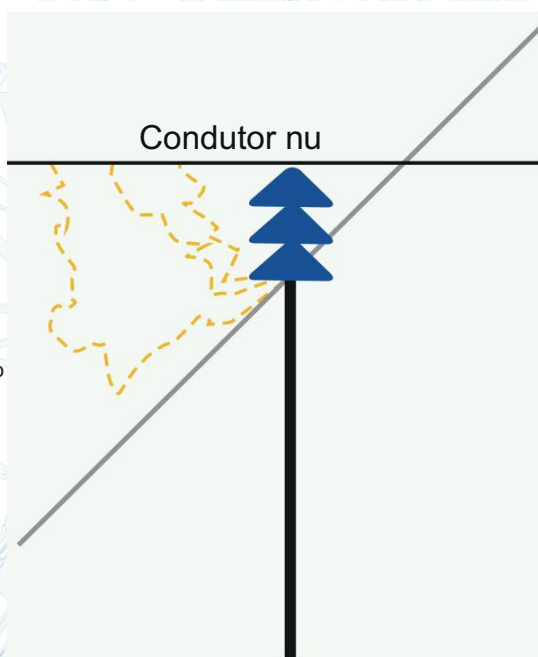


Figura 22: arco de potência movendo-se ao longo de um condutor

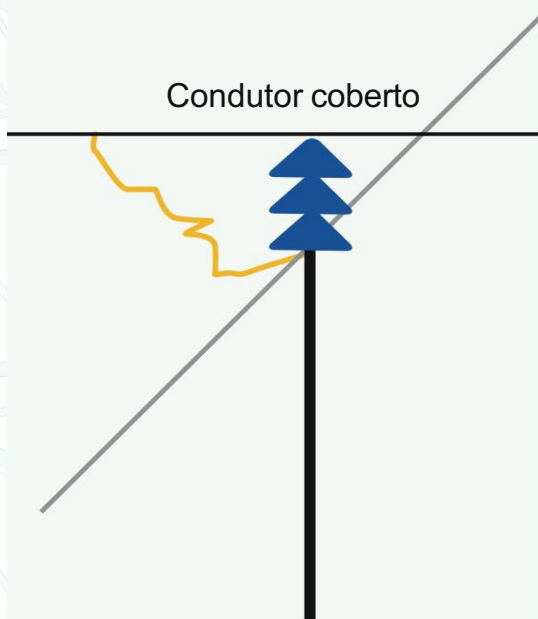


Figura 23: queima do arco de potência permanecendo no mesmo ponto do condutor

2.4 Etapa D: Consequências do Raio na Rede

2.4.1 Quebra/Dano aos Isoladores

Existem **três maneiras diferentes de danificar um isolador** após a queda de um raio:

- Um **impacto direto de um raio (DLS) fraco descarregando ao longo dele**: Um DLS fraco, correspondente a uma pequena sobretensão, não é suficiente para quebrar o GAP do centelhador entre o braço de cruzeta e o cabo, mas pode fazer com que ele descarregue ao longo da superfície do isolador fazendo-o superaquecer
- Uma **forte descarga direta de um raio (DLS) sobre ele**: O choque térmico leva diretamente à ruptura do isolador.
- **Estabelecimento de corrente de curto** (caso mais comum): A forte corrente de curto queima a superfície do isolador, causando rachaduras e deterioração de sua capacidade de isolamento.

A (figura 24) mostra um **isolador danificado por uma corrente de curto**.

A (figura 25) mostra isoladores danificados pelo(s) surto(s) de uma (DLS). À medida que um isolador sofre com raios, por conta de correntes de descarga, o pico de tensão pode causar perfurações nos discos dos isoladores, mas não nas hastes longas.

Este é o caso dos isoladores de cerâmica e vidro, não dos compostos.



Figura 24: Isolador danificado por corrente de curto

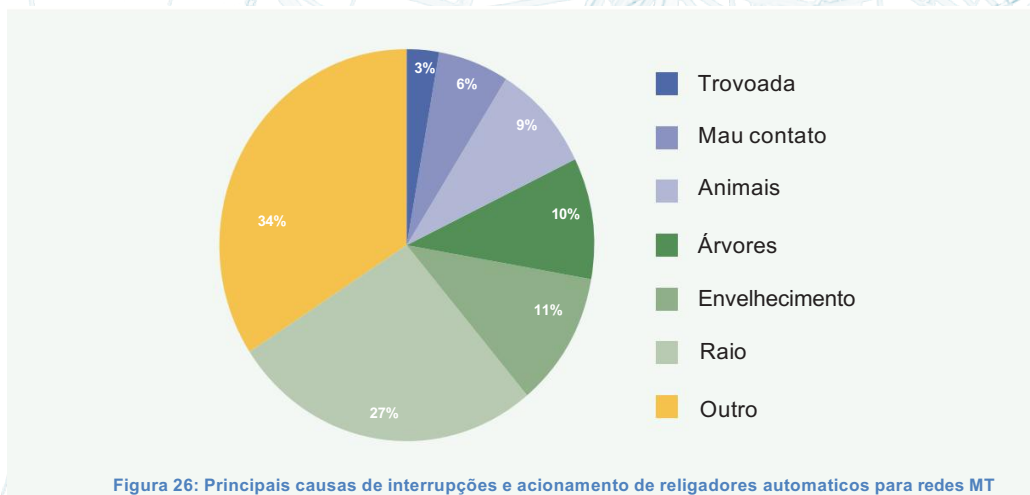


Figura 25: Isoladores danificados por DLS

2.4.2 Interrupções e Desarmes de Disjuntores

As interrupções de rede e os desarmes de disjuntores são as principais consequências da **corrente de curto**. Devido ao nível de corrente, um dispositivo de proteção (disjuntor, fusível ou religador automático) interromperá o circuito por pelo menos alguns segundos. Também pode ser observado que cada interrupção se gera depreciação do equipamento devido à erosão dos contatos, aos choques eletrodinâmicos e ao estresse térmico.

A (figura 26) representa as taxas de falhas de origem nas redes MT para a empresa TNB na Malásia (extraído da referência [7]). De acordo com esses números, os raios são responsáveis por 27% das interrupções. Aqui, as estatísticas referem-se às redes de 11, 22 e 33 kV.



Se raios diretos ou sobretensões induzidas contam mais ou menos depende de vários fatores (lista não exaustiva):

- Como a rede é naturalmente protegida pelos elementos circundantes, sejam eles naturais ou de origem humana
- Sobretensão disruptiva crítica (CFO) da rede
- Resistividade do solo (reseistência de passo)

Na (seção 4) é proposto um método para estimar aproximadamente o número de interrupções a cada 100 km de rede por ano (a partir de DLS ou LIO).

2.4.3 Quebra/Dano a Condutores

Os e as sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIO) desencadeiam o estabelecimento de correntes de curto, levando subsequentemente a desligamentos e acionamento do religador automático. O religamento bem-sucedido não significa que o condutor esteja ileso. **Rupturas e danos ao cabo são causados pelo arco de potência da corrente de curto que fora estabelecida.** Condutores descobertos e cobertos não têm o mesmo comportamento em relação a arcos de potência, ver (seção 2.3.2). No caso de condutores cobertos, isto pode provocar rupturas e danos, queima do isolamento do condutor, danos no isolador da rede e queima do condutor.

Quanto mais forte for o surto (de um DLS ou LIO), mais forte e mais longa será a corrente de curto e mais significativo será o dano causado ao condutor. Conforme analisado em [8], a partir de 80 kV, uma descarga atmosférica converte as árvores de água dentro do revestimento isolante XLPE (em inglês, "cross-linked polyethylene") em cavidades, provocando descarga parcial. À medida que a descarga parcial faz o seu trabalho, especialmente sob uma ligação pré-formada, a propriedade de isolamento do XLPE diminui.

As (figuras 27 e 28 vindas da referência [9]) mostram exemplos de danos causados por raios em um condutor com isolamento XLPE.



Figura 27: Danos superficiais dos condutores observados na Indonésia

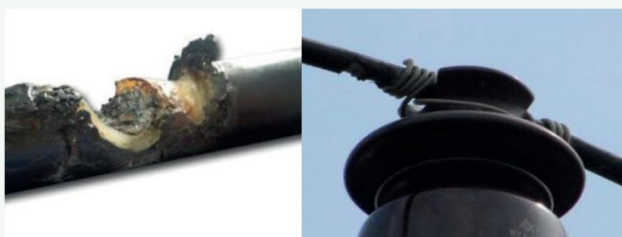
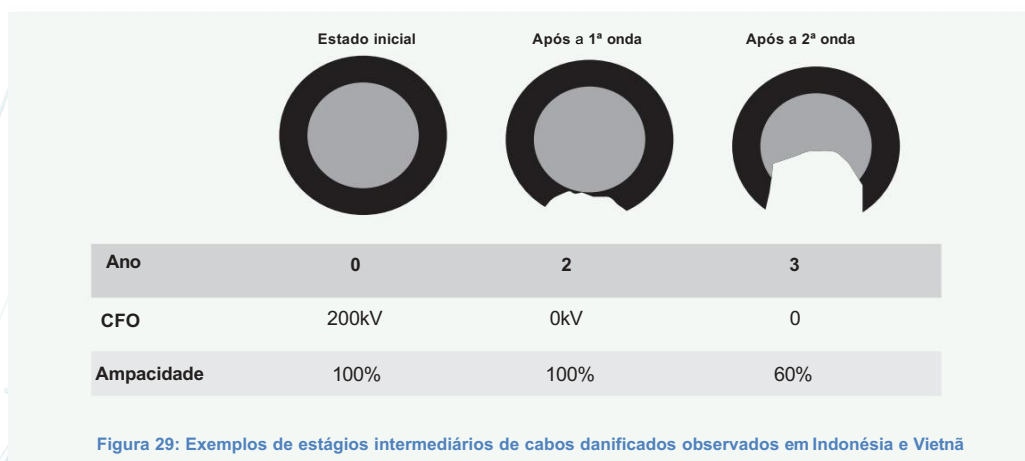


Figura 28: Danos profundos em condutores observados no Vietnã

A (figura 29) mostra exemplos de estágios intermediários de dano para cobertura de condutores.



Consequências de danos aos condutores cobertos:

Para os condutores cobertos, a **primeira consequência** do raio é uma jaqueta furada (danos a cobertura, revestimento, isolamento), levando à **perda de isolamento** e à diminuição de sua sobretensão disruptiva crítica (CFO), ver (figura 29). Além disso, desgaste dos condutores, como visto em [9].

Na Ásia o isolamento por vezes contribui para mais de 50% da capacidade de suporte a impulsos atmosféricos nas redes. Este é especialmente o caso de redes compactas, onde as distâncias entre os condutores são menores do que o normal.

À medida que o isolamento da rede resiste a impulsos de raios ao longo dos anos e causado a diminuição da sobretensão disruptiva crítica (CFO), consequentemente o **número de desligamentos aumenta fortemente**, ver (figura 30).

A (figura 30) mostra os resultados de um estudo da Streamer envolvendo uma rede de 11 kV. Ao longo do ano há um aumento na quantidade de postes com cabos deteriorados consequência do acúmulo do número de descargas na rede. Na verdade, um cabo deteriorado aumenta a probabilidade de um raio viajar por ele.

Mais informações sobre este estudo são fornecidas no (anexo 3).

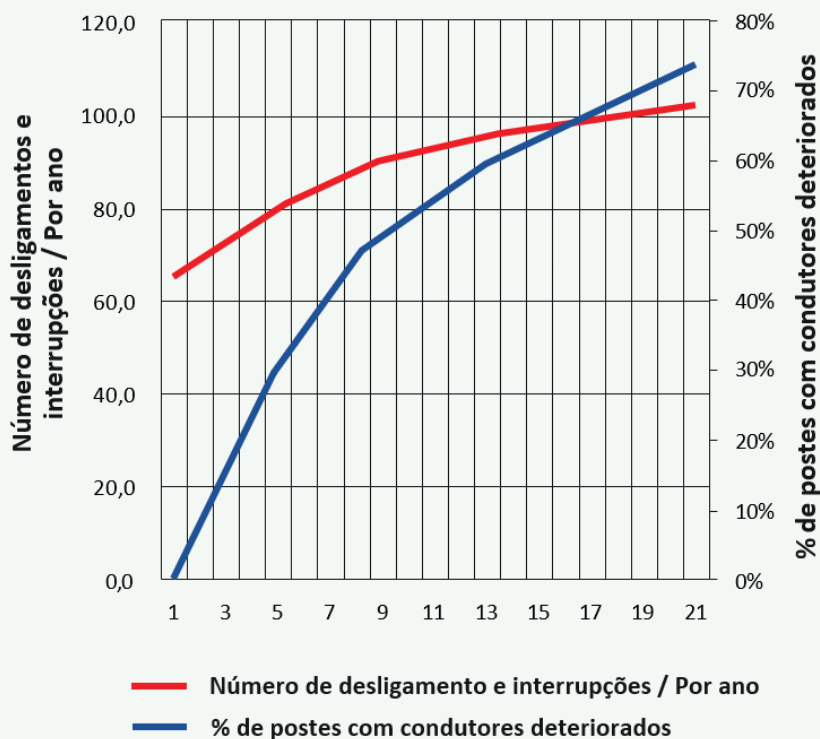


Figure 30: Deterioração dos condutores e número de interrupções por ano

A **segunda consequência** é a redução da seção do condutor (figura 29), como sua **ampacidade neste local é reduzida**, pode ocorrer **superaquecimento** (devido à uma maior resistência do condutor).

Às vezes, a seção é fortemente reduzida, mas não quebra após o relâmpago, principalmente porque a corrente nominal em operação normal não atinge o limite de superaquecimento. No entanto, algumas horas depois, quando o consumo máximo for atingido, o condutor poderá quebrar.

Outras causas de danos e rupturas nos condutores cobertos:

O estudo acima considera apenas a deterioração dos cabos causada por raios. No entanto, outros fatores podem levar à deterioração dos cabos, aumentando assim o número de interrupções na rede a cada ano que se passa:

- Forças mecânicas: Peso da rede na borda de um isolador, vento e árvores
- A poluição aplica tensão de fase à cobertura do condutor, causando descarga parcial, arborização e finalmente perfuração do isolamento
- Umidade e deterioração do isolamento

2.4.4 Ruptura/Dano à Transformadores de Força

Rupturas e danos aos transformadores de AT/MT e MT/BT podem ocorrer como resultado dos dois fenômenos discutidos nas seções anteriores:

- Propagação do impulso do raio atingindo diretamente um transformador (DLS em um transformador)
- Estabelecimento de corrente de curto (devido a um DLS ou LIO)

Propagação da Sobretensão do Impulso Atmosférico e Transformadores:

Conforme visto na (seção 2.1) e no (anexo 2), a **propagação da tensão do impulso atmosférico leva a uma forte sobretensão** (até duas vezes o valor de sobretensão do pico do impulso atmosférico) quando atinge um ponto da rede, como um transformador. Isto pode levar à **falha de isolamento do equipamento**. A (figura 31) da referência [10] mostra a falha no isolamento do transformador após o impulso atmosférico o atingir.

Esta questão depende, obviamente, do nível de isolamento e do próprio impulso.



Figura 31: Falha de isolamento em um transformador

Corrente de curto e transformadores:

A corrente de curto que flui através de um transformador ocasiona **estresse mecânico e térmico**. Estas questões dependem, portanto, do nível da corrente de curto. Conforme visto na (seção 2.3.1), quanto menor a distância do local do curto na subestação de AT/MT, maior será a corrente de curto. As correntes de curto próximas à subestação de AT/MT têm valores elevados e criam fortes forças mecânicas medindo centenas de toneladas (devido a forças magnéticas), bem como aumentos de temperatura nos transformadores (devido ao aquecimento resistivo). No geral, isso leva à **deformação dos enrolamentos de cobre e envelhecimento precoce do isolamento do transformador**, o que pode levar ao **curto do transformador**. A (figura 32) da referência [10] mostra exemplos de consequências da corrente de curto em transformadores.



Figura 32: Transformadores danificados

2.4.5 Quebra/Dano a Para-raios

Protetor de Surtos (Surge Arrester), definição (da referência [3]): É um dispositivo de proteção para limitar a tensão de surto no equipamento, desviando a corrente de surto e retornando o dispositivo ao seu status original. É capaz de repetir essas funções conforme especificado.

Neste artigo o termo “**para-raios**” também pode ser usado para designar um dispositivo Protetor de Surtos.

Para-raios convencionais, projetados para proteger equipamentos contra sobretensão, **também podem ser afetados pelo impacto direto de um raio (DLS)**. Quando o **impulso do raio excede a capacidade de descarga de um para-raios convencional**, as unidades varistoras podem falhar, levando a um curto à terra. Basicamente, é raro que a corrente do raio exceda a descarga nominal dos para-raios convencionais. No entanto, o valor da corrente de pico não é o único parâmetro relevante:

As correntes nominais de descarga de um para-raios convencional são fornecidas para uma forma de onda de 8/20 μ s (as formas de onda padrão são descritas na (seção 3.3.2)).

As correntes dessas formas de onda padrão durarão de 20 a 30 μ s, enquanto os impulsos causados por um DLS podem facilmente ultrapassar 75 μ s.

De acordo com a (seção 1.3), (tabela 6): 5% dos cursos negativos duram mais de 200 μ s, o que está muito além da capacidade dos para-raios padrão testados de acordo com a **norma IEC 60099-4**.

Além disso, é ainda pior quando um para-raios enfrenta múltiplos impactos.



Distribuidor Autorizado no Brasil

Assim, “uma porcentagem significativa de descargas atmosféricas diretas nos para-raios resulta em uma taxa de energia que excede tanto a capacidade especificada pelo fabricante, como a onda de teste de descarga de 4/10 μ s (referência [3]).”. Para mais informações sobre falhas em para-raios, consulte a (referência [3]).

Deve-se observar que o padrão para para-raios de rede, **IEC 60099-8**, inclui um teste de capacidade de descarga para formas de onda de 200 a 230 μ s. Os testes de capacidade de descarga realizados nos LLPDs Streamer, são feitos de acordo com a norma IEC 60099-8 ver (seção 3.3.2) para mais informações.

A (figura 34) da (referência [7]) mostra um exemplo das principais causas de falha do para-raios na Malásia: O raio está na primeira posição.

A (figura 33) mostra um exemplo de para-raios quebrado.



Figura 33: Para-raios quebrado

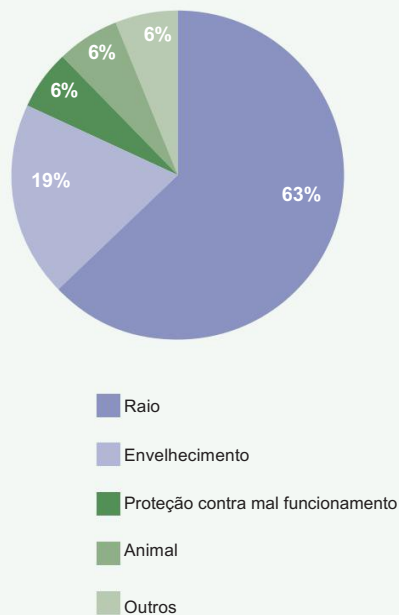


Figura 34: Principais causas de falha do para-raios

3. Tecnologia Streamer EasyQuench

Conforme descrito na (secção 2), o impacto dos raios é um problema sério para as empresas de serviços públicos. Por isso, a Streamer desenvolveu produtos inovadores, **proporcionando a proteção mais eficiente para as redes MT do mercado.**

A tecnologia Streamer apresenta muitas vantagens:

- Capacidade de **prevenir os efeitos de DLSS e LIOS**
- **Suporta DLSS e LIOS**
- **Alta confiabilidade e vida útil, o dispositivo é autoprotetido**
- **Alta capacidade de descarga, verdadeiramente adaptada aos requisitos da rede**
- **Fácil instalação, sem necessidade de manutenção**
- **Capacidade de operar com um alto nível de resistência de passo**

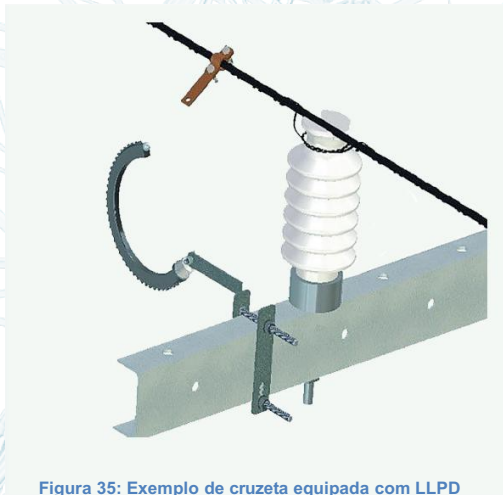


Figura 35: Exemplo de cruzeta equipada com LLPD

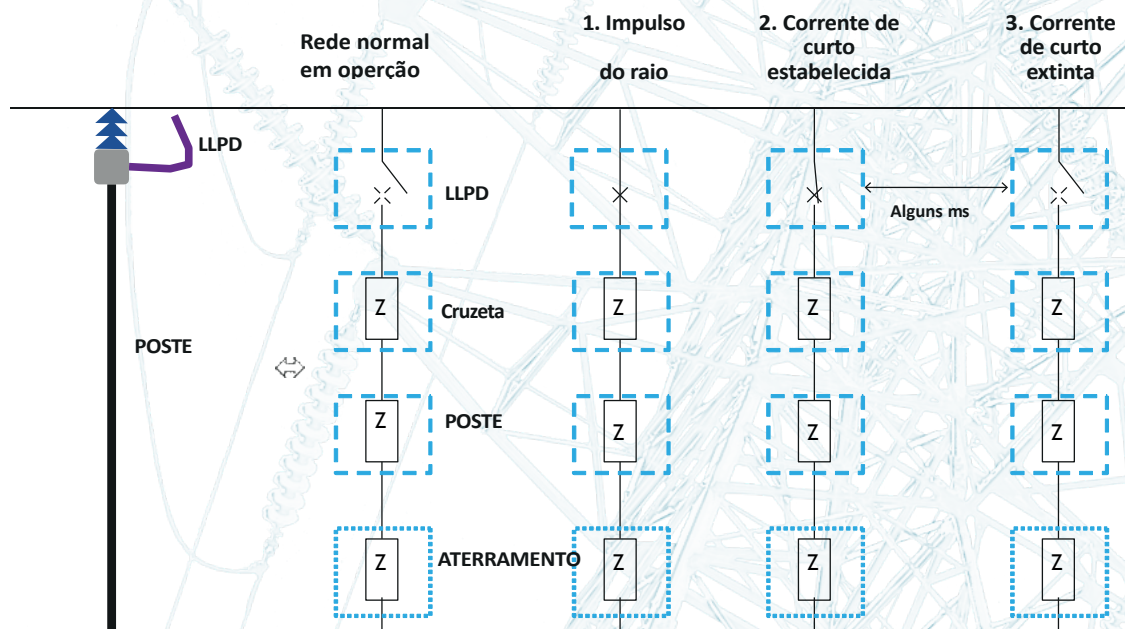
A Figura 35 mostra um LLPD (Lightning Line Protection Device - Dispositivo de Proteção de Redes Contra Raios) desenvolvido pela Streamer, equipado na rede.

3.1 Princípio de Operação

A (figura 36) descreve brevemente a operação de um LLPD.

É semelhante à operação de um para-raios: Em condições normais da rede, funciona como um circuito aberto.

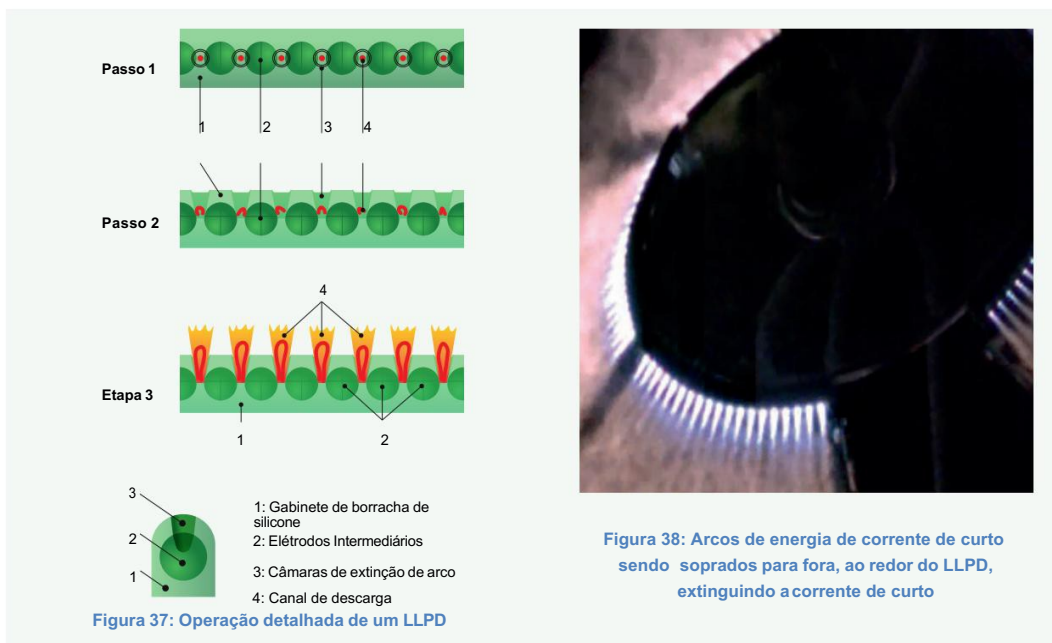
1. Quando ocorre um surto, uma vez que a sobretensão disruptiva crítica (CFO) entre o LLPD e a rede é inferior a sobretensão disruptiva crítica (CFO) entre o isolador e a rede, o LLPD dispara, parte do surto (dependendo da resistência de passo) é descarregada através do LLPD e, portanto, através do poste até o chão.
2. A corrente de curto é estabelecida por alguns milissegundos.
3. A corrente de curto é extinta pelo LLPD, sem que o cabo nem o isolador sejam danificados e evitando que ocorram desarmes ou cortes na rede.



O sistema EasyQuench da Streamer consiste em um grande número de elétrodos montados em um invólucro de borracha de silicone. Existem orifícios entre os elétrodos levam para fora do invólucro esses furos, e formam câmaras de descarga de gás em miniatura veja o princípio de funcionamento na (figura 37):

- Etapa 1: A sobretensão do raio encontra o dispositivo de proteção contra sobretensão de baixa pressão (LLPD); as lacunas entre os elétrodos se rompem, fornecendo assim um caminho pré-estabelecido ionizado (canal de descarga) para o estabelecimento da corrente de curto dentro das câmaras.
- Etapa 2: O canal de descarga se expande com o aumento do valor de retenção, criando alta pressão nas câmaras. Além disso, ocorrem arcos elétricos entre os elétrodos intermediários dentro das câmaras de baixo volume, e as faíscas entre os elétrodos se movem para a superfície do corpo isolante devido à alta pressão.
- Etapa 3: na sequência se propagam para fora ao redor do LLPD. Sob o impacto do sopro e alongamento dos canais entre os elétrodos, ocorre um resfriamento intensivo com aumento da resistência elétrica. A resistência total do produto aumenta, permitindo a extinção da corrente de curto antes de passar pela primeira vez por zero. Esse tipo de extinção da corrente de curto é chamado condicionalmente de extinção em zero consulte a (seção 3.3.3) para obter mais informações.

A Figura 38 Mostra uma Imagem da Etapa 3.



3.2 Tipologia: Dispositivos de Proteção Indireta e Direta Contra Raios em Redes

Conforme descrito na (seção 2), os impactos dos raios provêm basicamente de dois fenômenos: Impulsos causados pelos impactos diretos e indiretos de raios nas redes (DLS) e (ILS).

A Streamer desenvolveu dispositivos específicos para cada questão, selecionados de acordo com os parâmetros técnicos e econômicos mais adequados: **Dispositivos de proteção indireta de rede contra raios (i-LLPDs)** e **dispositivos de proteção direta de rede contra raios (d-LLPDs)**. A (tabela 10) resume brevemente as características de cada dispositivo. A (tabela 39) mostra as ações dos LLPDs para prevenção de problemas.

Fatos	i-LLPDs	d-LLPDs
Proteção contra DLS	Somente impacto positivo	✓
Proteção contra ILS	✓	✓
Suporta DLS e ILS	✓	✓
Altas capacidades de descarga, verdadeiramente adaptadas às necessidades da rede	✓	✓
Dispositivos autoprotégidos	✓	✓
Alta confiabilidade e vida útil	✓	✓
Fácil de instalar	✓	✓
Não requer manutenção: Posicione e esqueça!	✓	✓
Capacidade de operar com alto nível de resistência de passo	✓	✓

Tabela 10: Fatos sobre i-LLPDs e d-LLPDs

Ações dos LLPDs:

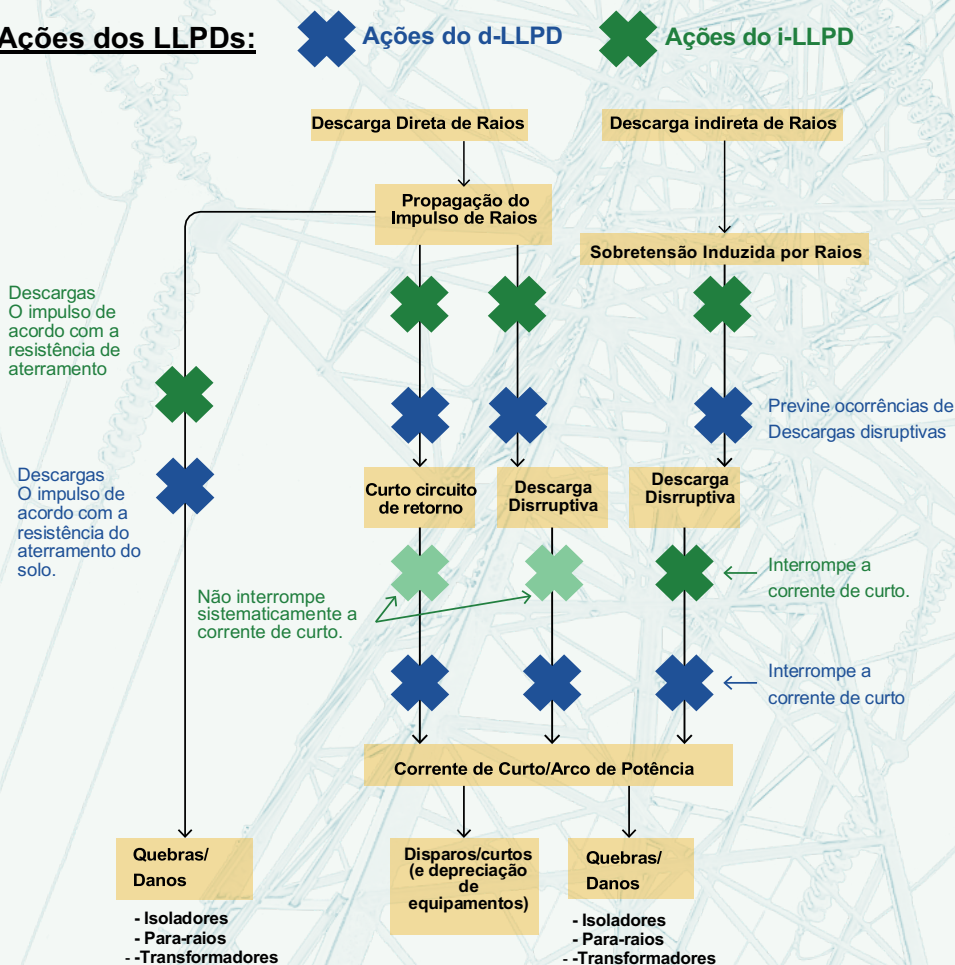


Figura 39: Ação dos LLPDs

3.2.1 Dispositivo de Proteção Indireta Contra Raios (i-LLPD I - “Line Lightning Protection Device”)

Os i-LLPDs da Streamer são usados apenas em **redes MV** que são mais vulneráveis a as sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIO). Isto geralmente diz respeito a redes com baixo isolamento ou rodeadas por elementos de blindagem naturais.

As sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIOs) impactam fortemente as redes MV conforme explicado na (seção 2.2), na (referência [5]), estima-se que eles sejam responsáveis, em média, por 60 a 80% das quedas nestas redes. Esses números variam consideravelmente com as características e localizações da rede. Em alguns locais onde a proteção natural (árvores, edifícios) está disponível, até 100% das interrupções podem ser devidas à sobretensões induzidas por descarga atmosférica na rede (LIO). Assim, para este problema específico, a Streamer responde com um dispositivo específico: **Os i-LLPDs fornecem uma proteção muito boa contra LIO.**

www.streamer-electric.com



Ostreamer



Distribuidor Autorizado no Brasil



Instalação de alternância de fases:

A alternância de fase consiste na instalação de um LLPD por poste por circuito, cada um alternando a fase. Exemplo (veja a Figura 40):

- Poste n°1: i-LLPD instalado na fase C
- Poste n°2: i-LLPD instalado na fase B
- Poste n°3: i-LLPD instalado na fase A
- Poste n°4: i-LLPD instalado na fase C
- Poste n°5: i-LLPD instalado na fase B
- Poste n°6: i-LLPD instalado na fase A

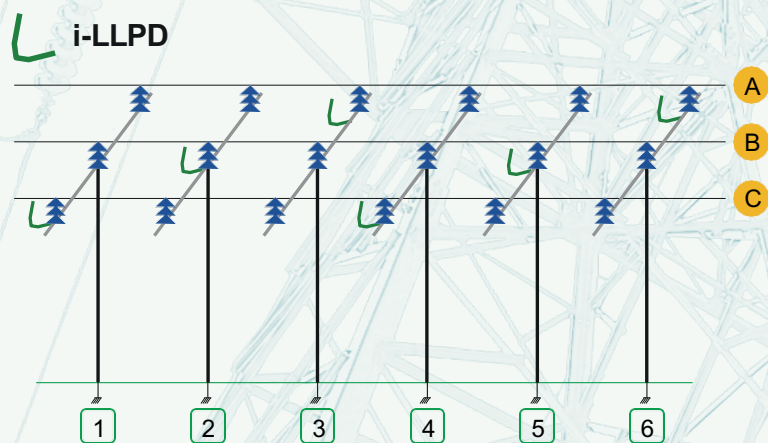


Figura 40: Instalação do i-LLPD

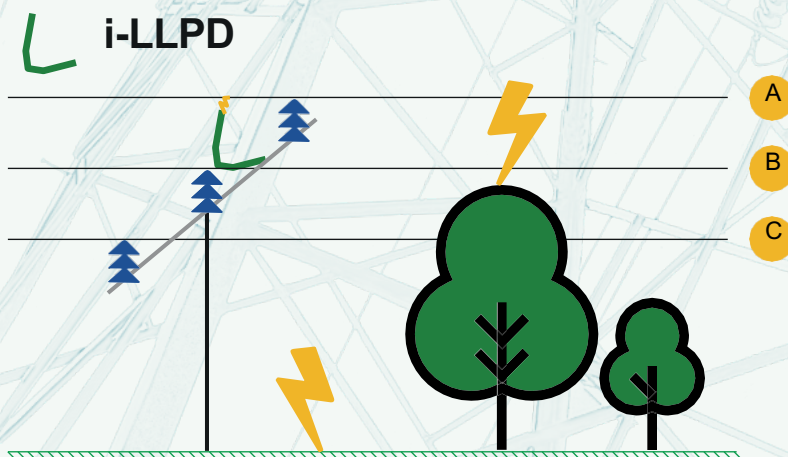


Figura 41: Operação i-LLPD

Principais vantagens da alternância de fases (veja detalhes abaixo):

1. Quando o i-LLPD opera em uma fase, ele evita a descarga do isolador em todas as três fases localizadas na mesma cruzeta, e até certo ponto nos isoladores da mesma fase em dois postes adjacentes.
2. A rede mantém uma tensão disruptiva crítica (CFO) fase a fase mais alta do que quando dois ou mais i-LLPDs são instalados no mesmo poste. Reduzindo o risco de corrente de curto fase a fase.
3. O nível do surto da corrente de curto é reduzido em comparação com dois i-LLPDs instalados no mesmo poste. Ao limitar a corrente de curto, o sistema também limita o estresse na rede e no equipamento, aumentando assim a longevidade de todos os componentes da rede. Além disso, um i-LLPD por poste torna a solução muito mais econômica.

1. Prevenção contra descargas atmosféricas para os isoladores em todas as três fases:

Quando um poste está equipado com um i-LLPD na fase A (ver figura 41) e uma descarga atmosférica indireta (ILS) incide próximo a rede, ocorre o impulso eletromagnético do raio (LEMP) causando uma sobretensão induzida (LIO). Como a sobretensão disruptiva crítica (CFO) do i-LLPD é inferior ao dos isoladores, o i-LLPD irá acender e trazer o alto potencial para a cruzeta. Como resultado, não ocorre mudança de potencial entre as fases desprotegidas e as cruzetas, evitando descargas disruptivas do isolamento e fases desprotegidas. Por isso:

- Os isoladores são protegidos contra descargas disruptivas, e não haverá o estabelecimento de um arco de potência de curto neles: eles estarão protegidos contra qualquer dano.
- O arco de potência da corrente de curto não pode ser estabelecido e os cabos não serão danificados.
- De acordo com a (seção 3.3.3), os i-LLPDs extinguirão a corrente de curto na passagem por zero.

Portanto serão evitadas interrupções na rede e danos ao transformador.

2. Aumentando a tensão disruptiva crítica (CFO) fase a fase:

- No caso de um LLPD por poste (figura 42, poste 1): A sobretensão disruptiva crítica (CFO) entre as fases A e B resulta da sobretensão disruptiva crítica (CFO) do LLPD na fase B e do isolador na fase A.
- No caso de dois LLPD por poste (figura 42, poste 2): O CFO entre as fases A e B resulta da sobretensão disruptiva crítica (CFO) do LLPD na fase A e do LLPD na fase B. (a sobretensão disruptiva crítica (CFO) do LLPD é, por definição, inferior ao do isolador, caso contrário não o protegeria). Então no primeiro caso a sobretensão disruptiva crítica (CFO) fase a fase é maior. No primeiro caso, como a sobretensão disruptiva crítica (CFO) fase a fase é maior, o risco de curto-circuito fase a fase é reduzido.

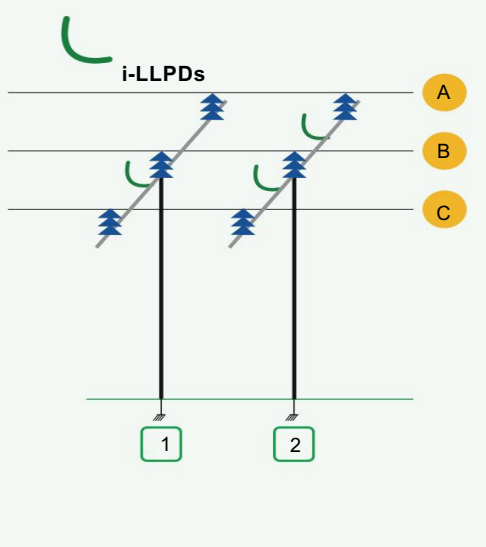


Figura 42: Um e dois LLPDs por poste

3. Redução no nível de corrente de fuga:

- No caso onde um LLPD é instalado em alternância de fase (figura 43): Como a corrente de curto dos 2 i-LLPDs se estabelecem conforme mostrado na (figura 43), a corrente é limitada pela resistência de passo dos postes 2 e 3: O caminho da corrente de curto é alongada com maior resistência. Portanto, **o estabelecimento da corrente de curto é menos importante** (e será extinto alguns microssegundos depois).

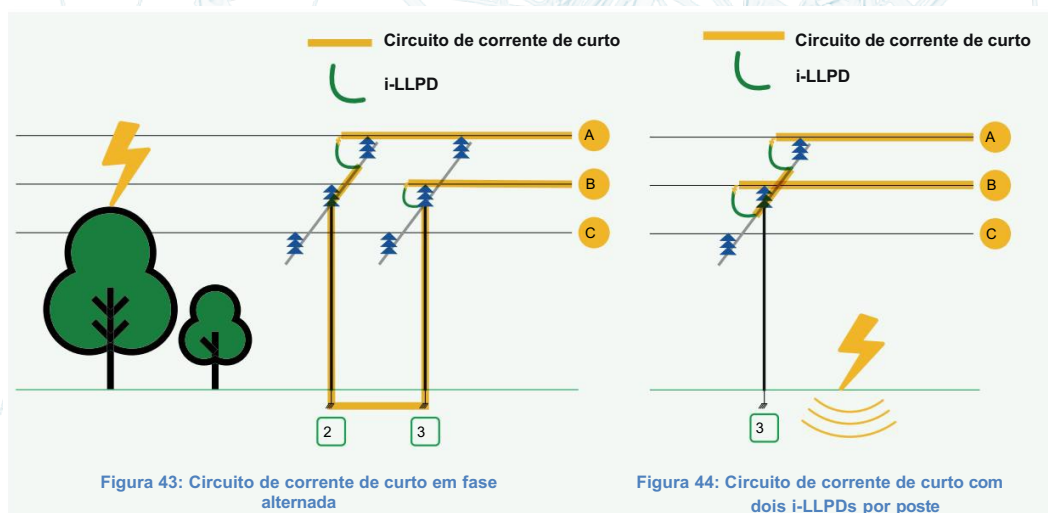
No caso de dois LLPDs por poste (figura 44):

O caminho da corrente de curto é mais curto e não encontra resistência além da cruzeta.

O estabelecimento da corrente de curto é, portanto, maior do que no caso 1.

Deve-se notar que quanto maior a resistência de passo, menor será a corrente de curto. Portanto, **uma maior resistência de passo é benéfica para o i-LLPD.**

Nota: Estas considerações são verdadeiras apenas na ausência do quarto cabo e do cabo com blindagem.



3.2.2 Dispositivo de Proteção Direta Contra Raios em Redes (d-LLPD)

Ao contrário dos i-LLPDs, que são instalados apenas em alternância de fases, **os d-LLPDs podem ser instalados de diferentes maneiras:**

Para proteger a rede contra descargas atmosféricas diretas na rede (DLS): Caso de uso 1

Com cabo blindado: Caso de uso 1.1

Neste caso, -LLPDs são usados para **evitar descarga disruptiva, curto circuito de retorno e estabelecimento de corrente de curto a partir de descarga atmosférica direta na rede (DLS) e sobretensão induzida por descarga (LIO).** A associação de cabo blindado e d-LLPD proporciona a melhor proteção contra descargas atmosféricas diretas.

Conforme explicado na (seção 2.1), o cabo blindado provoca descargas reversas. Neste caso, como o raio atinge diretamente o cabo com blindagem, o **impulso de corrente é muito maior do que para uma sobretensão induzida por descarga (LIO)**.

Além disso, como o cabo blindado fornece um caminho de baixa resistência, a **corrente de curto será maior**. É por isso que os d-LLPDs são necessários para **evitar o curto circuito de retorno e a corrente de curto Das descargas atmosféricas diretas na rede (DLSs)**.

Portanto, os d-LLPDs podem ser aplicados de três maneiras diferentes de acordo com os objetivos almejados:

	Um d-LLPD por poste	Dois d-LLPDs por poste	Três d-LLPDs por poste
Instalação	Um d-LLPD é instalado por poste, em alternância de fase (ver Figura 45)	Dois d-LLPDs são instalados por poste, um na fase mais distante do cabo de blindagem e outro na alternância de fases. (ver Figura 46).	Três d-LLPDs são instalados por poste, um em cada fase (ver Figura 47).
Proteção Geral Nota contra DLS	● ●	● ● ●	● ● ● ● ●
Proteção Geral Nota contra LIO	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●

Tabela 11: Possíveis instalações para d-LLPDs (com cabo blindado)

Nota: A Tabela 11 representa a apreciação geral do desempenho dos LLPDs. Consulte-nos para uma avaliação mais precisa de acordo com o desenho da rede.

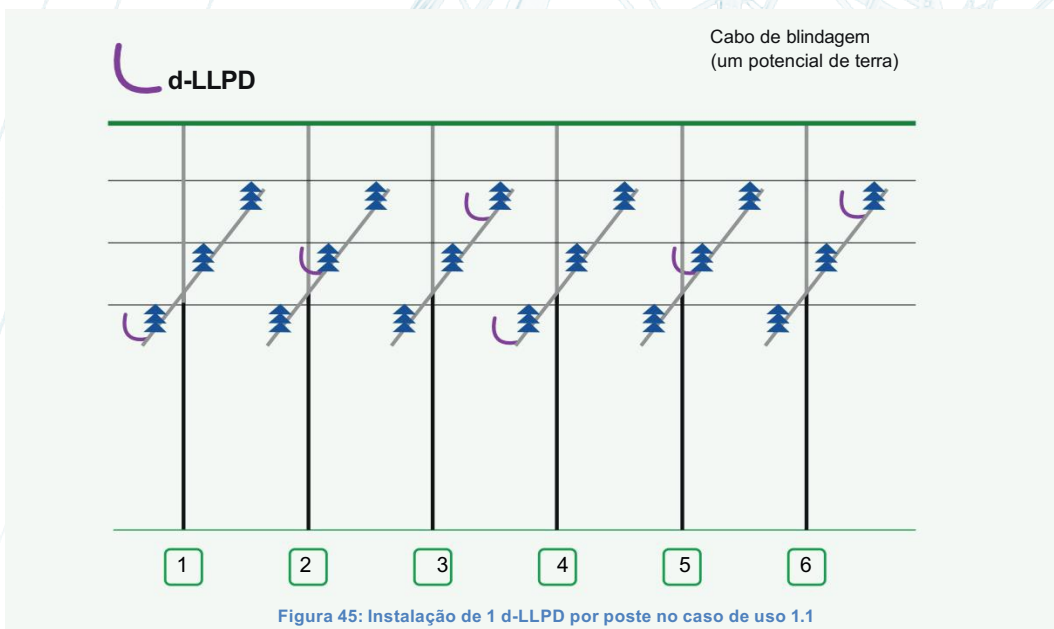


Figura 45: Instalação de 1 d-LLPD por poste no caso de uso 1.1

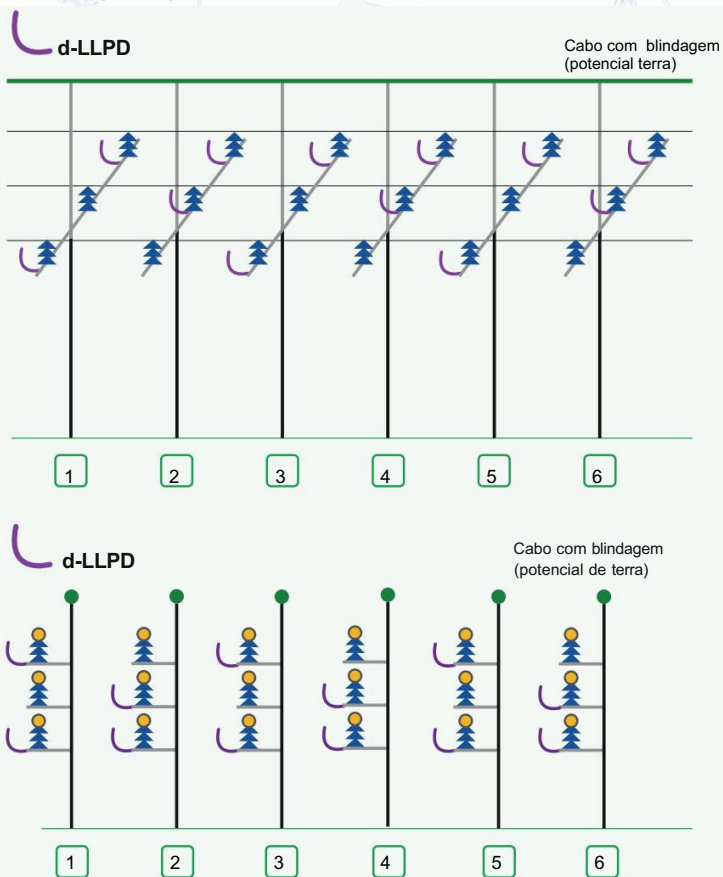


Figura 46: Instalação de dois d-LLPDs por poste no caso de uso 1.

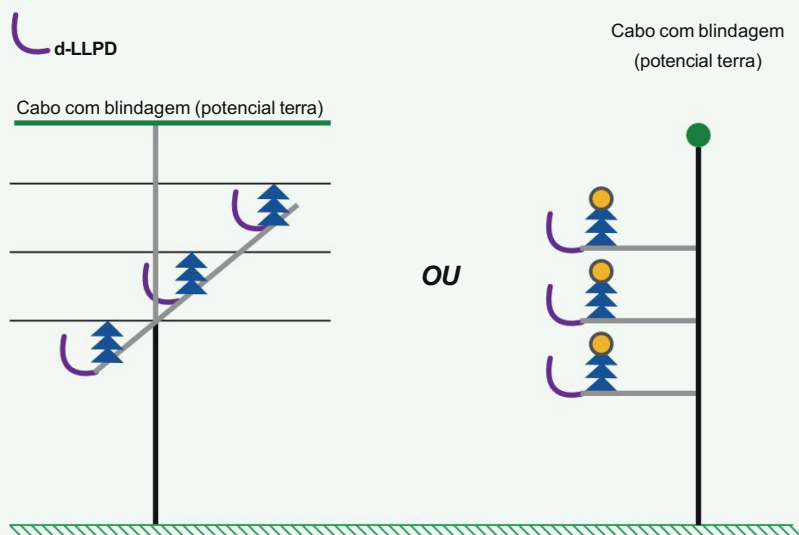


Figura 47: Instalação de três d-LLPDs por poste no caso de uso 1.1

Sem cabo blindado: Caso de uso 1.2

Neste caso, d-LLPDs são usados para **evitar descargas disruptivas e estabelecimento de correntes de curto provenientes de uma descarga atmosférica direta na rede (DLS)**. Isto é especialmente usado nas redes que mais sofrem com o impacto, as são expostas a uma DLS onde não há cabo de blindagem presente.

	Um d-LLPD por poste	Dois d-LLPDs por poste	Três d-LLPDs por poste
Instalação:	Um d-LLPD é instalado por poste, em alternância de fase, assim como os i-LLPDs (ver figura 40).	Dois d-LLPDs são instalados por poste, em alternância de fases.	Três d-LLPDs são instalados por poste, um em cada fase.
Proteção geral:			
Nota contra DLS	●	● ● ◐	● ● ●
Proteção Geral:	● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●	● ● ● ● ● ●
Nota contra LIO			

Tabela 12: possíveis instalações para d-LLPDs (sem cabo blindado)

Nota: A Tabela 12 representa a apreciação geral do desempenho dos LLPDs.

Consulte-nos para uma avaliação mais precisa de acordo com o desenho da rede.

A principal diferença entre d-LLPDs e i-LLPDs é que os d-LLPDs são mais capazes de evitar descarga disruptiva e correntes de curto de uma descarga atmosférica direta na rede (DLS), o que nem sempre é o caso dos i-LLPDs.

Porém, neste caso particular, o desempenho dos d-LLPDs varia consideravelmente com vários parâmetros da rede (não limitado a: Disposição do aterramento, resistência de passo, distância entre dois postes, etc.). Portanto, **consulte-nos** para obter a melhor proteção disponível.

Para Fornecer Proteção Especial para Equipamentos e Postes Vulneráveis: Caso de Uso 2 (com Aterramento)

Os d-LLPDs também são usados localmente para fornecer proteção especial para para-raios, transformadores, chaves e postes mais vulneráveis (como postes de seção, postes finais, postes de elevação, etc.).

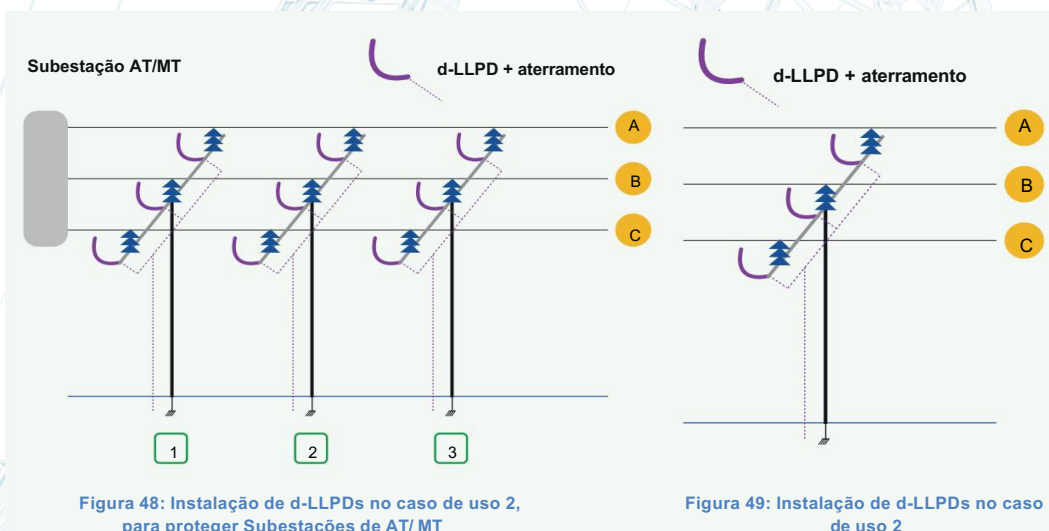
Neste caso, os d-LLPDs são usados para evitar a propagação do impulso atmosférico e proteger equipamentos como para-raios e transformadores, ver (seções 2.4.4 e 2.4.5). Além disso, são capazes de evitar descargas disruptivas (descargas disruptivas de retorno "BFO" no caso de cabo blindado) e estabelecimento de corrente de curto a partir de DLS e LIO.

Instalação de d-LLPDs no caso de uso 2:

No caso de uso 2, os d-LLPDs são instalados em cada fase e precisam de aterramento para que o impulso atmosférico possa descarregar através do solo e evitar danos causados pela propagação direta do impulso atmosférico. Uma baixa resistência de passo é então necessária, conforme ilustrado na (figura 49).

O caso da subestação AT/MT é um pouco incomum e geralmente aconselhamos que os d-LLPDs sejam equipados nos últimos três postes antes da subestação, ver (figura 48). Na verdade, os LLPDs nem sempre conseguem descarregar todo o impulso para o solo e esta capacidade depende da resistência de passo da região em questão, ver (secção 3.3.6). Consequentemente, a Streamer geralmente recomenda que os últimos três postes antes da subestação sejam protegidos com d-LLPDs (caso de uso 2). Tal ação garante uma proteção muito confiável ao transformador.

Deve-se observar que os para-raios devem ser equipados para proteger diretamente o transformador. Na verdade, os d-LLPDs protegem os para-raios e depois o transformador indiretamente, ver (anexo 5).

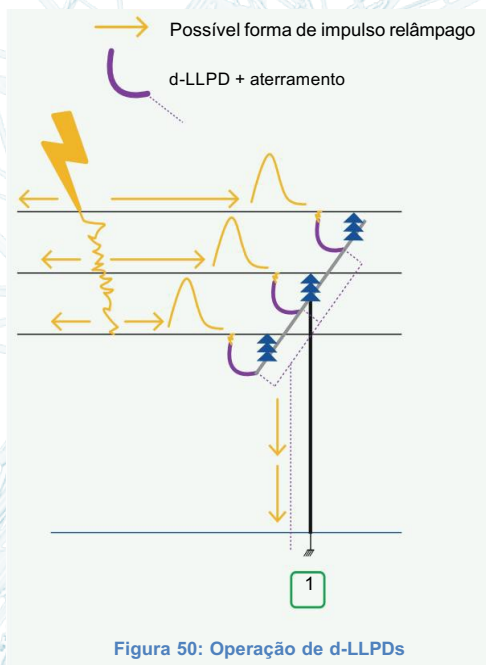


Distribuidor Autorizado no Brasil



A Figura 50 mostra um exemplo de operação d-LLPD. No que diz respeito à resistência de passo, o impulso do raio é descarregado através do cabo de aterramento, ver (seção 3.3.6) para mais informações.

A corrente de curto estabelecida pela descarga atmosférica será extinta após alguns microssegundos, ver (seção 3.3.3).



3.2.3 Conclusão Sobre a Proteção Proporcionada pelos LLPDs

A Tabela 13 apresenta um resumo sobre a proteção conferida pelos LLPD nos diferentes casos para os quais podem ser utilizados.

Tipo de LLPD	Caso de uso	Requerimentos ou equipamento adicionais	Nível de proteção contra		
			DLS		LIO
			Impulso do Raio	Corrente de curto	Corrente de curto
i-LLPD			●	●	●●●●●
d-LLPD	Caso de uso 1.-1, um LLPD por poste	Cabo com blindagem	●●	●●	●●●●●
	Caso de uso 1.-1, dois LLPDs por poste	Cabo com blindagem	●●●	●●●	●●●●●
	Caso de uso 1.-1, três LLPDs por poste	Cabo com blindagem	●●●●	●●●●●	●●●●●
	Caso de uso 1.2, um LLPD por poste	Nenhum	●	●	●●●●●
	Caso de uso 1.-2, dois LLPDs por poste	Nenhum	●●	●●●	●●●●●
	Caso de uso 1.2, três LLPDs por poste	Nenhum	●●●	●●●●●	●●●●●
	Caso de uso 2	Baixa resistência de passo (menos de 10 Ohms) + aterramento	●●●●●	●●●●● (sem cabo blindado) ●●●●● (com cabo blindado)	●●●●●

Tabela 13: Nível geral de proteção fornecido pelos LLPDs

Nota: A Tabela 13 mostra a valorização geral do desempenho dos LLPDs. Consulte-nos para uma avaliação mais precisa de acordo com o desenho da rede.

3.3 Parâmetros e Desempenhos

Como nenhum padrão é especificamente dedicado à tecnologia Streamer, pode ser difícil definir seu desempenho. No entanto, as normas relativas aos para-raios podem ajudar a qualificar os LLPDs.

A Tabela 14 fornece uma visão geral do desempenho dos LLPDs Streamer. Mais detalhes explicativos são fornecidos nas seções a seguir.

A terminologia utilizada na Tabela 14 é definida da seguinte forma:

Tensão demasiada alta para equipamentos AT (Alta Tensão ou do inglês “High Voltage Equipment (HVE)”): Valor quadrático médio da tensão fase a fase mais alta que a tensão cujo equipamento fora projetado para operar, levando em referência seu isolamento e outras características.

Frequência nominal: Frequência de potência operacional a qual um LLPD foi projetado.

Tolerância de frequência: Margem de tolerância para a frequência nominal de um LLPD.

Operação mínima suportável: Número mínimo de operações que um LLPD pode realizar durante sua vida útil. Para um i-LLPD, uma operação corresponde à extinção de uma corrente de curto após uma sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO). Para um d-LLPD, corresponde à extinção de uma corrente de curto em seguida a uma descarga atmosférica direta na rede (DLS) e conduzindo ao solo.

Características	d-LLPDs	i-LLPDs
LLPDs e parâmetros de rede		
Maior tensão para equipamentos (HVE)	De 6 a 40,5 kV	De 6 a 24 kV
Corrente de curto prospectiva máxima da rede (ver seção 3.3.1)	Até 5 kA	Até 1.5 kA
Corrente de seguimento prospectiva máxima (ver seção 3.3.1)	3.5 kA	NA
Resistência de passo necessária	De 1 a 130 Ω em uso caso 1.	De 1 a 130 Ω
	De 1 a 10 Ω em uso caso 2.	
Frequência nominal	50 Hz	
Frequência de tolerância	± 12 Hz	
LLPDs e relâmpagos		
Corrente de descarga nominal: 8/20 μs (ver Seção 3.3.2)	Corrente de pico de 20 kA	Corrente de pico de até 20 kA
Carcaça resistente ao impulso: 1,2/50 μs (ver Seção 3.3.2)	Tensão de pico de 70 kV	
Suporta impulso de alta corrente: 4/10 μs (ver Seção 3.3.2)	Corrente de pico de 65 kA	
Capacidade de descarga atmosférica: 200 μs (ver Seção 3.3.2)	2.4 C	1.2 C
Operação de resistência mínima	10	
Corrente máxima de descarga atmosférica de falta (ver Seção 3.3.4)	20 kA	3 kA
Redução do impulso de iluminação	Ver Seção 3.3.6	
Tensão residual/faísca	Ver Seção 3.3.5	
Extinção Zero	Ver Seção 3.3.3	
Perdas de energia	0%	
Confiabilidade		
Taxa anual de falhas do produto (em áreas com 10 flashes nuvem-solo por km² por ano)	0%	
Esperança média de vida (ver Seção 3.3.7)	20 a 30 anos	
Esperança		
Tempo de instalação/poste	80 a 100 minutos de uso caso 2 (inclui aterramento)	10 a 20 minutos
Equipamento Adicional Necessário	Encaixe de braço cruzado e braçadeira perfurante	
Fio terra	Cabo de aterramento necessário apenas no caso de uso 2	Não é necessária ligação terra
Manutenção	1 verificação visual por ano	
Peso	2.5 kg a 3.5 kg	1.0 kg a 2.6 kg

Tabela 14: Características do LLPD

Tabela 14: Características do LLPD

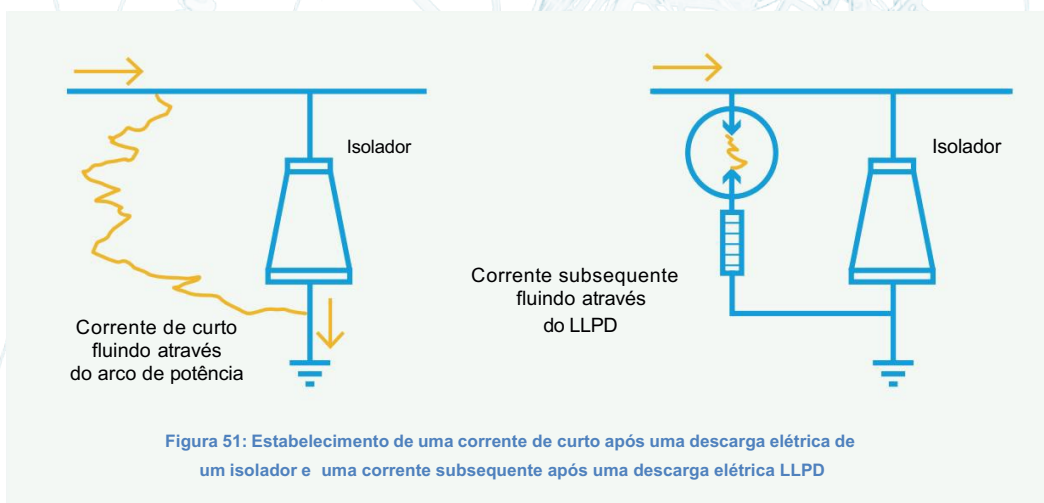
3.3.1 Corrente Presumida de Curto de um Circuito

Primeiro de tudo, a distinção deve ser feita entre correntes de curto e correntes subsequentes:

Corrente de curto, definição (da IEC): corrente que flui em um determinado ponto em uma rede, resultante de um curto em outro ponto desta rede. Consulte a Seção 2.3.1 para obter mais informações.

Corrente subsequente, definição: corrente de curto limitada pela impedância dos LLPDs da Streamer.

A (figura 51) ilustra a diferença entre as correntes de curto e subsequentes. No caso de centelhamento do LLPD, a corrente de curto é limitada pela impedância dos LLPDs e é posteriormente chamada de corrente subsequente.



A diferença entre a corrente de curto de máxima prospecção e a corrente de subsequente prospectiva máxima é mostrada abaixo:

Corrente de curto de máxima prospectiva, definição: corrente máxima de curto que pode ser estabelecida em uma rede (podendo ser fase-fase ou fase-terra, ver seção 4.4.1), na localização do LLPD sem qualquer dispositivo de proteção dos quais um LLPD pode ser equipado.

Assim: A instalação de um d-LLPD Streamer deve ser realizada em locais com valores de corrente de curto inferiores a 5 kA para proteger a rede contra ela, ver (seção 4.4.1).

Corrente máxima prospectiva subsequente, definição: Corrente máxima de seguimento que um LLPD pode extinguir e suportar, de acordo com os ensaios de tipo.

Assim: Se a corrente subsequente estabelecida através do i-LLPD for superior a 1,5 kA, o i-LLPD pode não ser capaz de extingui-la e pode acabar sendo danificado.

3.3.2 Impulsos Atmosféricos Padronizados, Correntes Nominais de Descarga e Ensaios de Impulso Atmosféricos

Os LLPDs da Streamer podem ser avaliados graças às **correntes nominais de descarga**, conforme definido nas normas IEC 60099-4.

Os ensaios de tipo descritos na norma IEC 60099-4 são aplicáveis para para-raios de classe de estação: Isso explica parcialmente as falhas dos para-raios em campo (quando equipados na rede).

Os LLPDs da Streamer **são testados de acordo com as normas IEC 60099-8**. Na verdade, os ensaios de tipo das normas IEC 60099-8 representam melhor o que os LLPDs devem enfrentar e suportar na rede.

Todos estes testes são definidos com impulsos atmosféricos padronizados, conforme descrito no próximo parágrafo.

Correntes nominais de descarga e testes de tipo das normas IEC 60099-4 e 60099-8 também são descritos mais adiante.

Impulsos Atmosféricos Padronizados:

Os impulsos atmosféricos padronizados são definidos com os seguintes elementos, ver (figura 52):

- Valor de pico da corrente
- Duração do Tempo de Subida (Frontal)
- Duração até que o valor da tensão ou corrente caia para 50% do seu pico

Por exemplo, um impulso com **forma de onda de corrente de 8/20 μ s** significa que o valor de pico da corrente é atingido em 8 μ s e o pulso fica abaixo de 50% do seu valor de pico em 20 μ s.

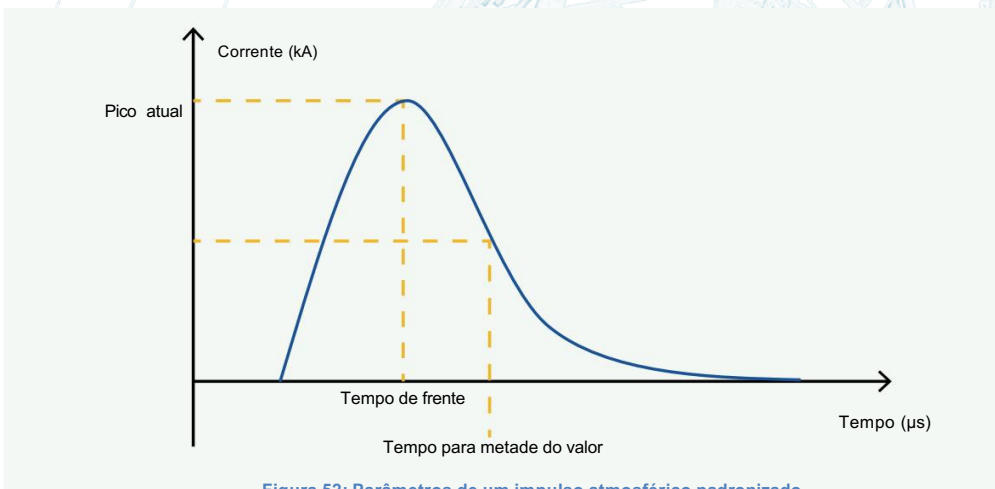


Figura 52: Parâmetros de um impulso atmosférico padronizado

Correntes nominais de descarga:

As correntes nominais de descarga das normas IEC 60099-4 e 60099-8 são usadas para classificar para-raios. Eles também podem ser usados para caracterizar os LLPDs da Streamer. Os valores nominais de descarga da corrente são fornecidos de acordo com os impulsos atmosféricos padronizados.

Corrente nominal de descarga de um para-raios (de IEC 60099-4), definição: Valor de pico de um impulso de descarga atmosférica usado para classificar um para-raios.

O termo "corrente de impulso do raio" refere-se a uma corrente em forma de onda de 8/20 μ s.

Norma IEC 60099-4:

Para avaliar o desempenho de um para-raios de óxido metálico, a IEC 60099-4 inclui:

O “Teste de Serviço Operacional de Impulso de Alta Corrente” que consiste na seguinte sequência:

- ✓ Primeiro, a aplicação de 20 descargas elétricas de corrente em forma de onda de 8/20 μ s.
- ✓ Em segundo lugar, a aplicação de duas descargas elétricas de corrente em forma de onda de 4/10 μ s.

Conforme afirmado anteriormente, esta norma é mais aplicável para **para-raios de classe de estação**.

Norma IEC 60099-8:

A IEC 60099-8 inclui **dois testes de condicionamento contra raios** para avaliar para-raios de rede:

- O “Teste de Resistência a descargas elétricas de Alta Corrente”: **Dois descargas elétricas com correntes em forma de onda de 4/10 μ s** (a segunda descarga elétrica é aplicada 50 a 60 segundos após a primeira).

Este teste simula **curtos curtos**, portanto é definida pela forma de onda da corrente e pela corrente de pico, ver (seção 1.2.2).

- Para o “Teste de capacidade de descarga atmosférica”: São efetuadas **18 descargas de 200 a 230 μ s**. Este teste é composto por seis grupos de três operações. O intervalo de tempo entre estas duas operações é de 50 a 60s.

Este teste simula **curtos longos**, portanto é definido por um tempo de duração de descarga e carga em coulomb, ver (seção 1.2.3).

LLPDs da streamer:

Os LLPDs da Streamer **podem ser testados de acordo com as normas IEC 60099-8 parágrafos 8.5 e 8.6. Esta norma é muito mais adaptável para suportar descargas atmosféricas diretas na rede (DLS) especialmente com cursos longos**. Conforme indicado na (seção 1.3, tabela 6): 5% dos cursos negativos duram mais de 200 μ s.

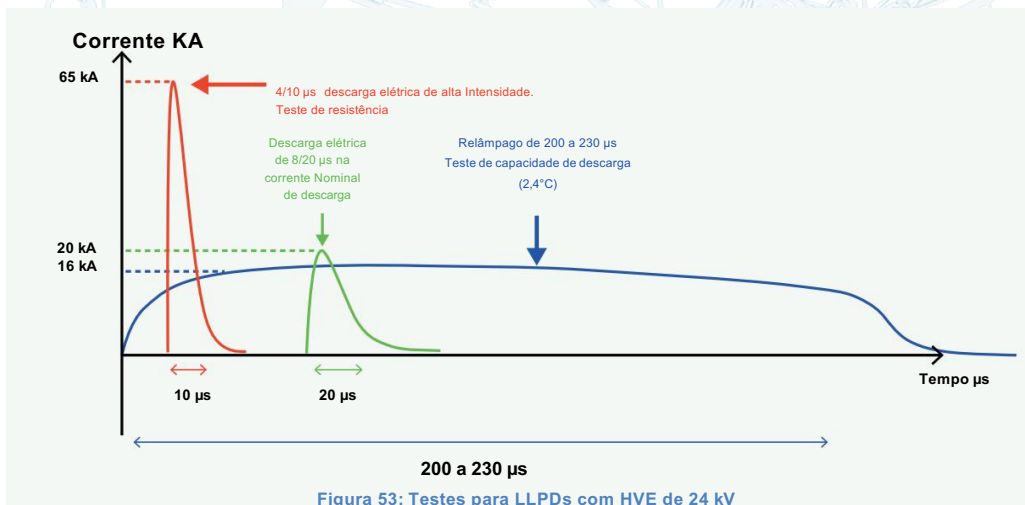
Os parágrafos 8.5 e 8.6 da IEC 60099-8 incluem os **dois testes de condicionamento contra raios** a seguir:

- O “Teste de resistência a descargas elétricas de alta corrente”: **duas descargas elétricas com corrente em forma de onda de 4/10 μ s**.

Os LLPDs da Streamer para 6 a 40 kV são testados de acordo com este teste com **corrente de pico em formato de onda de de 65 kA**.

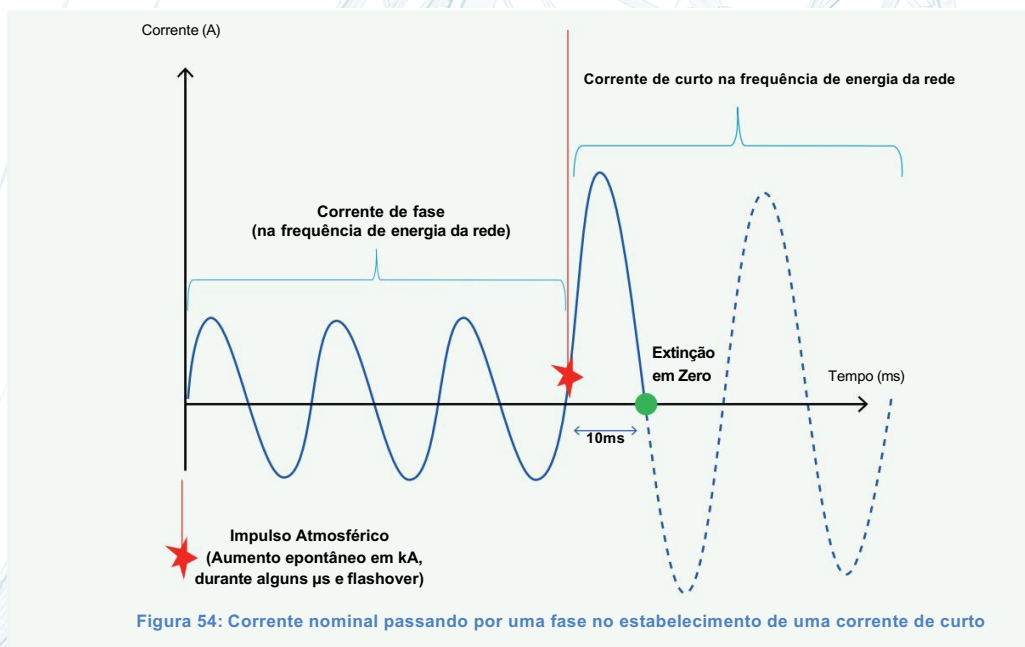
- O “Teste de capacidade de descarga atmosférica”: **18 descargas de 200 a 230 μ s**.
- Os LLPDs da Streamer para 6 a 40 kV são testados com **descargas de 2,4 coulomb**

A figura 53 mostra as descargas elétricas usadas para testar os LLPDs da Streamer.



3.3.3 Tecnologia EasyQuench e Extinção na Passagem por Zero

O termo “Extinção a Zero” representa a capacidade do LLPD de extinguir a corrente de curto antes de sua primeira passagem por zero, ver (figura 54). Na (figura 54) a corrente nominal é mostrada fluindo através de uma fase. Após o estabelecimento de uma corrente de curto, o LLPD irá extingui-la antes de seu primeiro cruzamento pela linha de zero. Isso garante que não haverá interrupções na rede da subestação: Os disjuntores começam a operar após a primeira metade do ciclo da corrente de curto. Além disso, garante que as máquinas motorizadas não serão afetadas por interrupções.



A (figura 55) mostra um **zoom na corrente de impulso do raio fluindo pela fase, bem como uma sobretensão nos terminais dos LLPDs** ocorrendo ao mesmo tempo. Ao contrário da (figura 54), a escala de tempo está em microssegundos e a escala de corrente está em kA.

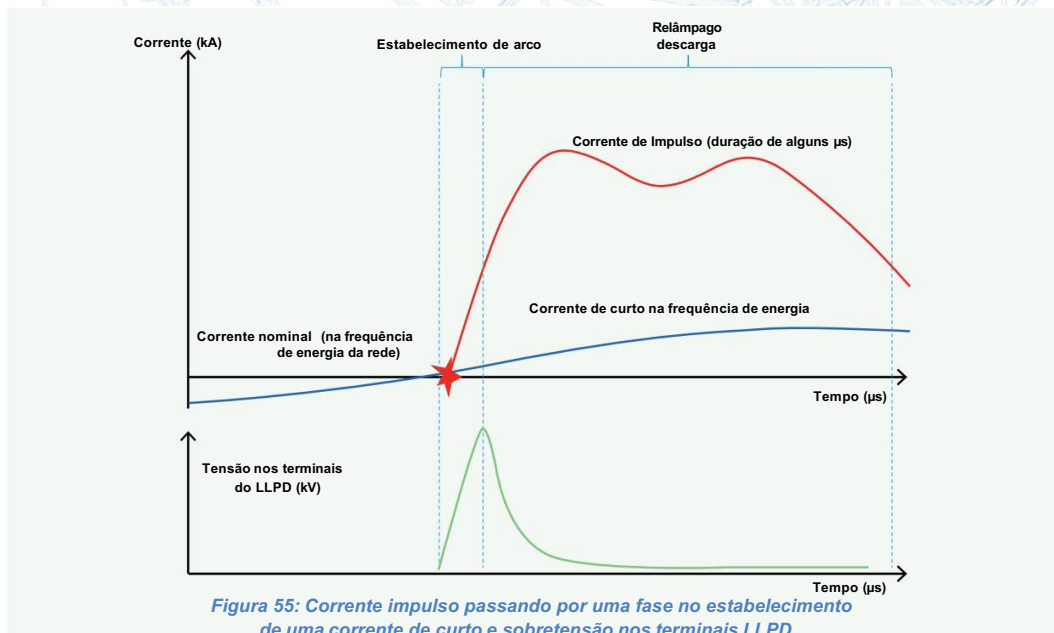


Figura 55: Corrente impulso passando por uma fase no estabelecimento de uma corrente de curto e sobretensão nos terminais LLPD

Extinção a zero, princípio de operação:

A (seção 3.1) explica o processo de têmpera na câmara do LLPD. Na linha seguinte é descrito o fenômeno de extinção de zero do ponto de vista elétrico.

À medida que a descarga atmosférica é direcionada ao LLPD, a corrente que flui para ele aumenta até alguns quiloampères, veja a (figura 55). Após a descarga atmosférica, a corrente diminui rapidamente (em algumas dezenas de microssegundos), assim a resistência do LLPD aumenta de acordo com a seguinte relação (obtida por simulação, as constantes podem variar de acordo com as configurações):

$$R = \frac{1400}{i^{0.8}}$$

Onde **R** é a resistência do LLPD e **i** a corrente que flui por ele.

À medida que a resistência aumenta em alguns microssegundos, a corrente de curto será extinta antes de sua primeira passagem por zero (alguns milissegundos após a descarga atmosférica).

3.3.4 Máxima Corrente de Descarga Atmosférica para Extinção de Falhas

Corrente máxima de descarga atmosférica de curto, definição: Corrente máxima de uma descarga atmosférica fluindo através de um LLPD, na qual a corrente de curto resultante pode extinguir-se.

Esta corrente máxima gerada por descargas atmosféricas explica por que os i-LLPDs não conseguem extinguir sistematicamente a corrente de curto de uma descarga atmosférica direta na rede (DLS) e os d-LLPDs conseguem:

A corrente de descargas atmosféricas de uma descarga atmosférica direta (DLS) são muito maiores do que a de uma sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO). Na verdade, a capacidade de um LLPD de extinguir a corrente de curto é limitada.

Os impulsos de corrente padrão usados para determinar a corrente máxima de descarga atmosférica são formas de onda de corrente de 8/50 μ s.

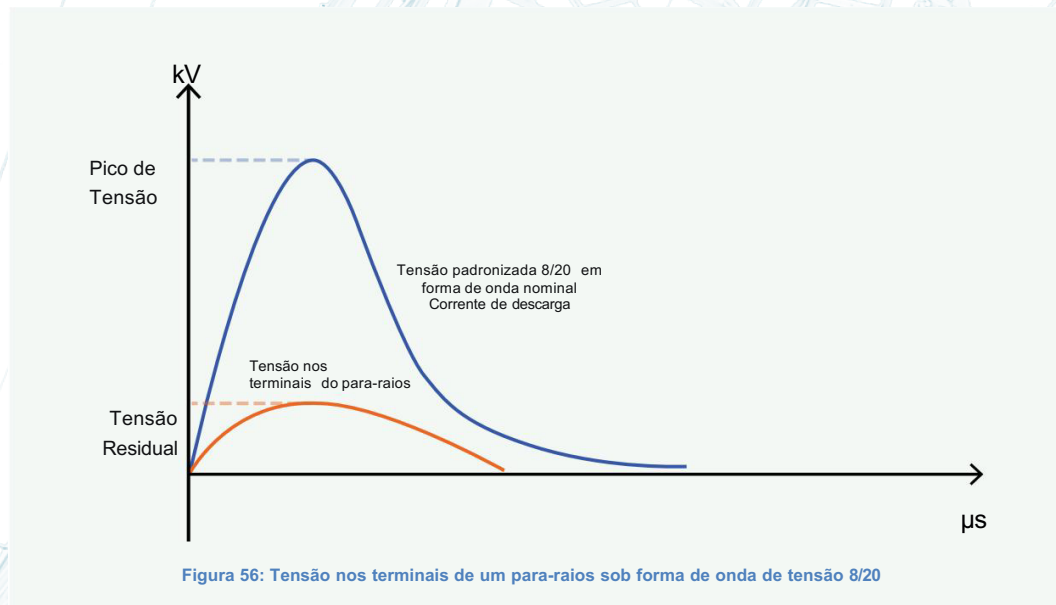
A corrente máxima de descargas atmosféricas para d-LLPDs é de 20 kA. Conforme mostrado na (seção 1.1), pode ser avaliado na (referência [3]) e este valor é adequado para a grande maioria dos casos enfrentados pelos LLPDs.

3.3.5 Tensão Residual e de Centelhamento

A tensão residual é comumente usada para definir as características de um para-raios.

No entanto, não é adequado descrever os LLPDs da Streamer: A noção de **tensão de centelhamento** é muito mais indicativa.

Tensão residual para para-raios de óxido metálico padrão (figura 56), definição (do IECV): Valor de pico da tensão que aparece entre os terminais de um para-raios ao imprimir uma corrente de raio é de 8 μ s de tempo de frente virtual, 20 μ s de tempo virtual para metade valor na cauda e um valor de pico igual à sua corrente de descarga nominal, consulte a (seção 3.3.2) para obter mais informações sobre impulsos padronizados e correntes de descarga nominais.



Tensão de Ignição e LLPDs:

Os LLPDs reagem de maneira muito diferente aos surtos por raios em comparação aos para-raios: (figura 57) mostra a tensão no terminal no LLPD quando ocorre uma descarga atmosférica:

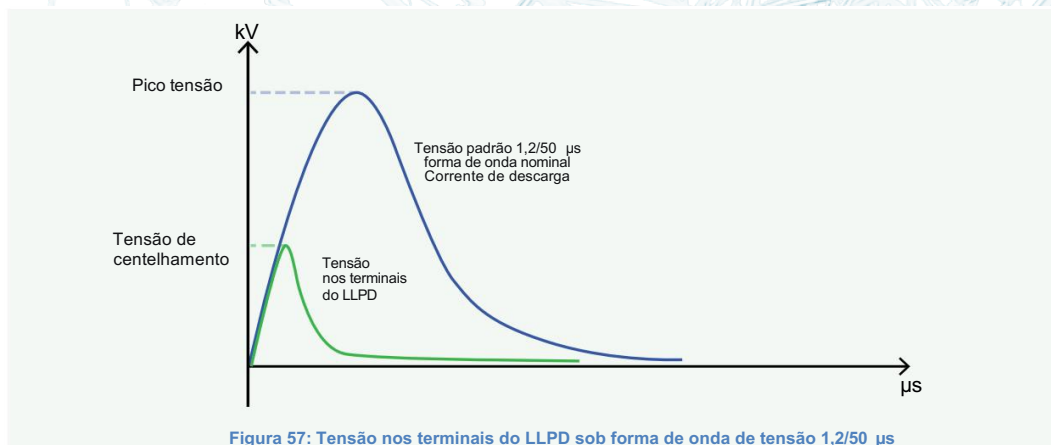


Figura 57: Tensão nos terminais do LLPD sob forma de onda de tensão 1,2/50 μ s

A tensão residual fornece bons critérios para definir o nível de proteção de um para-raios porque descreve a tensão máxima aplicada ao componente para proteção durante o evento de descarga atmosférica (ver anexo 5 para mais detalhes). No entanto, este não é o caso dos LLPDs: a tensão máxima aplicada ao componente para proteção durante um evento de raio é a **tensão de centelhamento** (definição abaixo).

Tensão de centelhamento, definição: tensão na qual o LLPD dispara (ver figura 57). É a sobretensão disruptiva crítica (CFO) do LLPD.

Um fato importante é que a **tensão de centelhamento varia com a inclinação da frente do impulso e, portanto, com o seu tempo de frente**. Para garantir uma boa proteção, é necessário verificar se a **tensão de centelhamento de um LLPD (e, portanto, de seu sobretensão disruptiva crítica (CFO)) é inferior a sobretensão disruptiva crítica (CFO) do isolador**, independentemente do tempo de frente do impulso, para que sempre o proteja. Para tanto, a Streamer estabeleceu a curva apresentada na (figura 58).

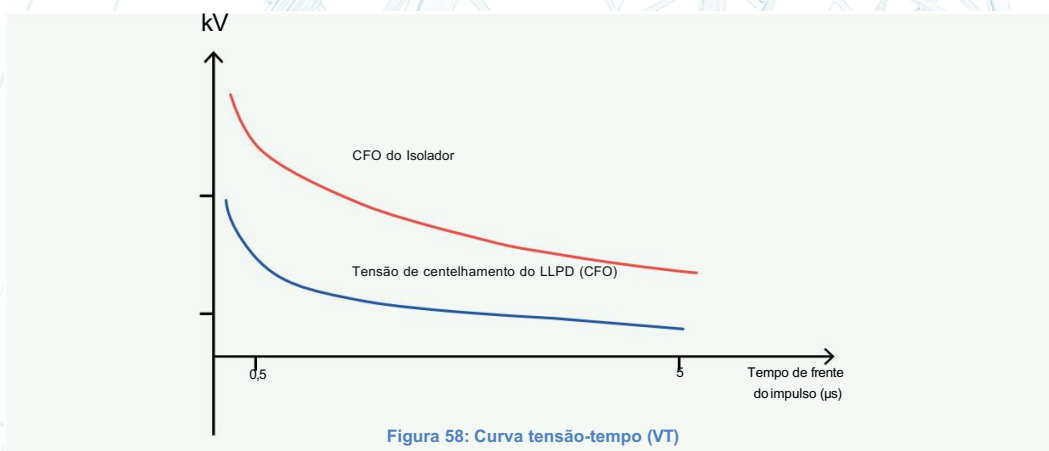


Figura 58: Curva tensão-tempo (VT)

3.3.6 Redução da Magnitude do Impulso do Raio

Quando um impulso de raio encontra o LLPD, parte do impulso será descarregada no solo e outra parte continuará seu caminho no cabo.

Esta redução depende principalmente da resistência de passo. (Tabela 15 e figuras 59 e 60) mostre como a tensão de pico de um impulso de sobretensão é reduzida após atingir o LLPD.

A redução do impulso do raio é importante especialmente para d-LLPDs no caso de uso 2 (o cabo de aterramento necessário neste caso reduz a resistência de passo). Na verdade, neste caso, a principal função dos d-LLPDs é descarregar o impulso para o solo.

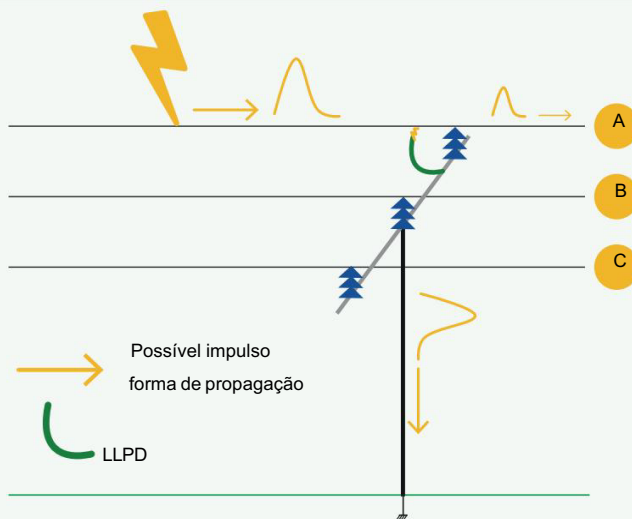


Figura 59: Descarga do impulso do raio para o solo

Resistência de passo (Ohm)	Redução de pico	Exemplo de sobretensão de 300 kV (correspondente a um LIO): Tensão de Pico Após redução (kV)
5	92,23%	23,3
10	91,17%	26,5
20	89,07%	32,8
30	87,33%	38
50	83,20%	50,4
100	73,27%	80,2
200	60,67%	118
500	40,00%	180
1000	26,00%	222
2000	16,67%	250

Tabela 15: Redução de pico do impulso de acordo com a resistência de passo

Redução da tensão de pico de um impulso de raio De acordo com a resistência de passo

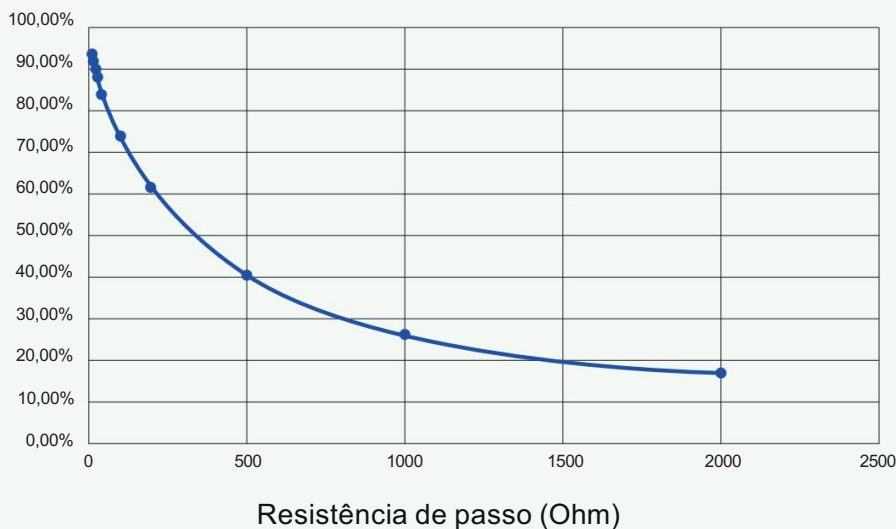


Figura 60

3.3.7 Expectativa de Vida

LLPDs são chamados de **autoprotetidos**. Na verdade, quando um impulso é maior que a capacidade das câmaras, o arco flui para fora, evitando danos ao dispositivo.

De 1999 a 2014, foram vendidos 1 000 000 LLPDs. Durante o mesmo período, entre as reclamações dos clientes da Streamer sobre seus LLPDs, nenhuma apresentou falha devido a descarga atmosférica excessiva. A expectativa de vida dos LLPDs Streamer é igual à da rede: **20 a 25 anos**.

Testes realizados no laboratório CESI na Itália o "Teste de Capacidade de Descarga por Relâmpago", ver (seção 3.3.2). Os LLPDs podem suportar até 20 descargas de 200 μ s a 16 kA, o que é muito além do que os LLPDs podem suportar durante um período. (Período de 20 anos)

3.4 Influências Ambientais e Cuidados Especiais

3.4.1 Temperatura e Salinidade

Os testes do CESI mostraram que **nenhum problema específico ocorre quando os LLPDs da Streamer são submetidos a variações de temperatura e névoas salinas**. De acordo com o procedimento de teste parcialmente baseado na cláusula 8.10.3.1 da IEC 60099-8 e IEC 60099-4, a sobretensão disruptiva crítica (CFO) de alteração do LLPD não excedeu mais de +5%.

3.4.2 Altitude: Cuidados Específicos

A altitude influencia a pressão que por sua vez influencia na **tensão de ruptura do ar**. A tensão de ruptura do ar tem um papel importante a desempenhar na definição do Gap do centelhador (ver seção 4.4.2). Nossos LLPDs são projetados para serem usados em configurações de altitude padrão de 0 a 1000 m. Para altitudes superiores a 1000 m consulte-nos.

3.4.3 Vibração

Os testes do CESI mostraram que **nenhum problema específico ocorre quando os LLPDs da Streamer são submetidos à vibração**. De acordo com o procedimento de teste, parcialmente baseado na cláusula 8.9.2 da IEC 60099-8, as alterações da sobretensão disruptiva crítica (CFO) dos LLPDs não excederam +5%.

3.4.4 UVs

Os LLPDs da Streamer foram testados de acordo com a ISO 4892-2, método A, IEC 62217. Este teste mostrou que eles têm uma **resistência UV de 1000 h**. Então, basicamente, os LLPDs da Streamer não sofrerão com UVs.

3.4.5 Arcos Elétricos

Os produtos Streamer são testados de acordo com um procedimento de teste de produção de arcos elétricos rigoroso e específico. Os testes demonstraram que o número de arcos elétricos e o seu tamanho não excederam os valores máximos especificados para a produção de **Arcos Elétricos Classe A** de acordo com a norma australiana AS 1307.2-1996".

Os produtos estão rodeados por algodão (material altamente inflamável). Verifica-se que a partir de **1500 mm**, as faíscas produzidas pelos LLPDs não são capazes de iniciar um incêndio.

Como resultado, é pouco provável que os produtos instalados nas redes aéreas, normalmente a pelo menos 5 m acima do solo, causem qualquer dano.

- A Streamer instalou, em 2013, 700.000 MT LLPDs e nenhum relatório de incêndio foi arquivado.
- O padrão russo da FGS (principal empresa de serviços públicos na Rússia) especifica que, durante mais de uma década, nenhum problema foi observado no uso de LLPDs da Streamer em áreas urbanas onde rupturas em condutores cobertos são um risco alto.

4. Análise da Rede e Aplicação dos Produtos Streamer

Esta seção fornece um **método rápido** para avaliação e criação do projeto de proteção contra raios em redes aéreas. Quaisquer dados disponíveis relativos às interrupções na rede podem ser utilizados para mitigar os resultados teóricos e fornecer uma análise mais precisa.

Cada caso é específico e não pode ser discutido neste artigo. **A Streamer pode fornecer estudos analíticos mais profundos** para clientes que desejam determinar a melhor maneira de economizar e preservar o desempenho de sua rede. O acesso aos dados de campo ajudará a melhorar o nível de precisão dos estudos de desempenho da rede. Após uma extensa análise da ameaça de raios e da configuração da rede, a Streamer pode sugerir soluções para garantir o melhor nível possível de confiabilidade da rede.

Por favor, consulte-nos para mais informações.

A (figura 61) mostra um processo passo a passo para implementação de proteção contra raios em uma rede aérea.

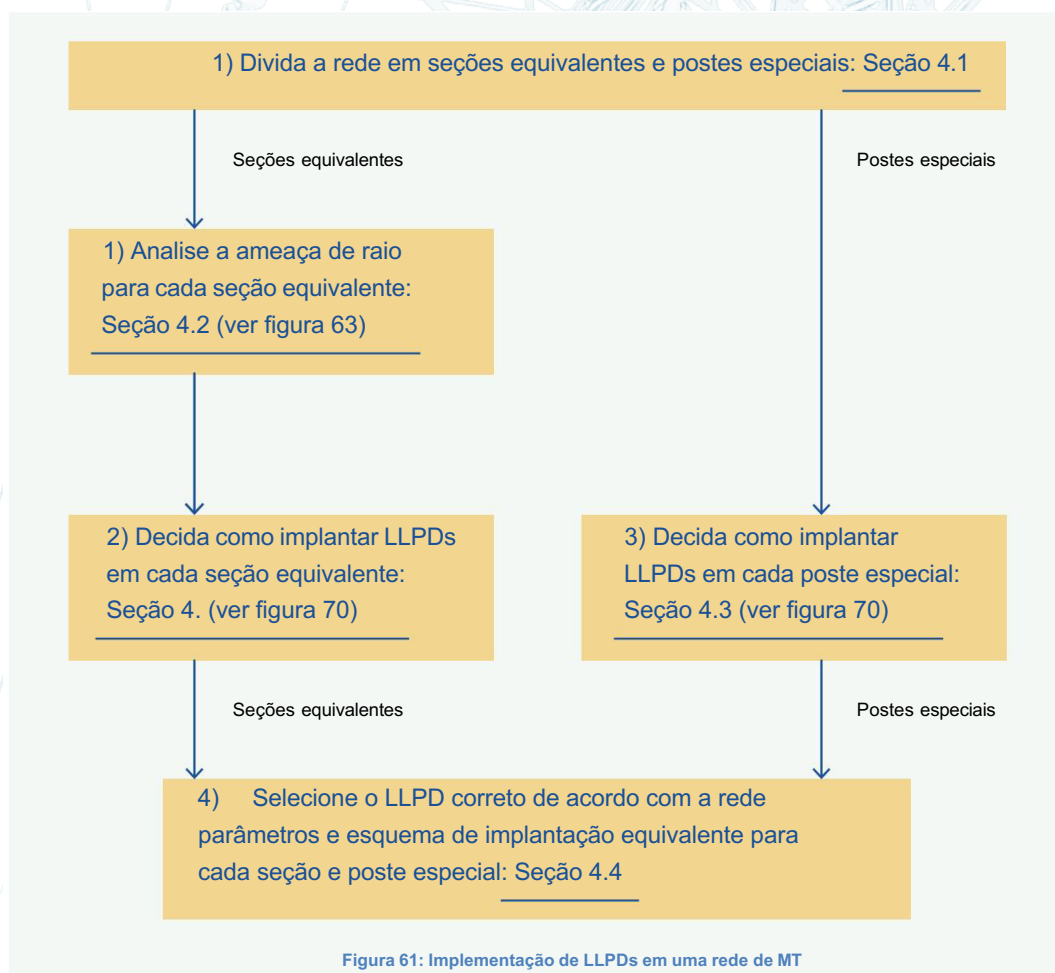


Figura 61: Implementação de LLPDs em uma rede de MT

4.1 Divisão da Rede em Trechos Equivalentes

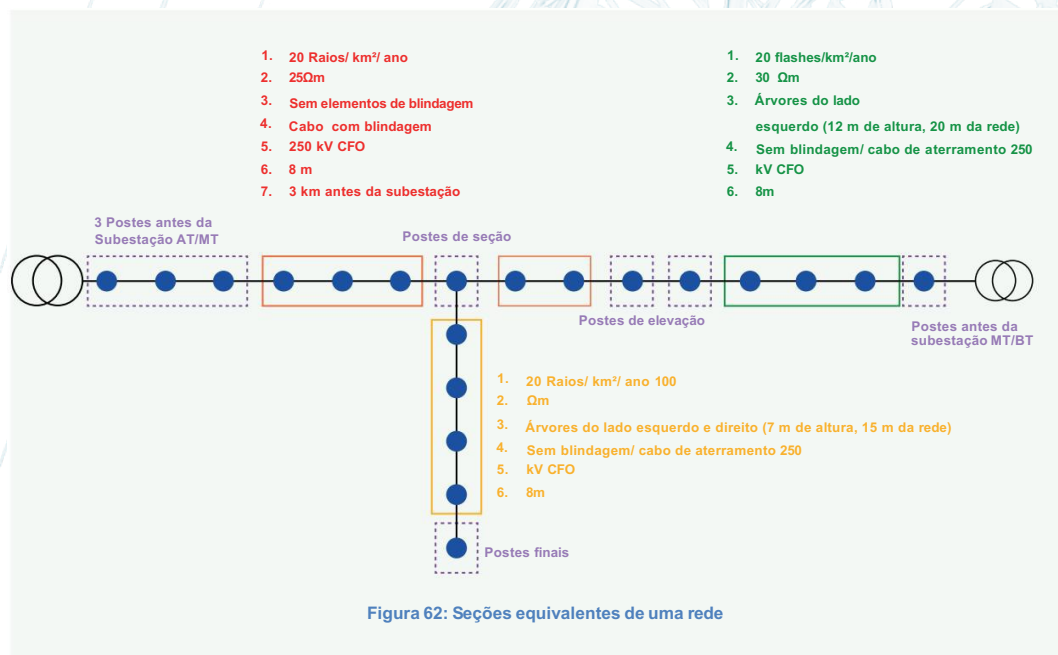
Além dos diversos parâmetros que influenciam no impacto do raio em uma rede, é aconselhável dividir a rede em seções que apresentem as mesmas características globais.

As seguintes características são levadas em consideração nesta seção:

1. Densidade de descargas atmosféricas no solo, ver (seção 4.2.2)
2. Resistividade do solo
3. Presença de elementos de blindagem
4. Presença de cabo com blindagem
5. Sobreensão disruptiva crítica (CFO) da rede (isoladores e condutores)
6. Altura dos postes ao longo da rede
7. Se o trecho está ou não a menos de 3 km da subestação de AT/MT

Além disso, deixaremos **de lado postes específicos**, como os três postes antes da subestação AT/MT, postes de seção, postes finais, postes de elevação e o poste antes da subestação MT/BT. Estes postes específicos são frequentemente mais vulneráveis e são discutidos na (seção 4.3.2).

A (figura 62) mostra um exemplo de divisão de rede em seções equivalentes.



4.2 Análise das Ameaças por Raios

Esta seção foi elaborada para fornecer uma avaliação geral da ameaça de raios para a rede aérea (OHL). Atualmente consideramos apenas redes OHL sem cabos de blindagem/terra. Consideramos também que os para-raios são utilizados apenas para proteger transformadores e postes de elevação. A questão do cabo blindado é discutida na (seção 4.3). Os efeitos dos cabos com blindagem e dos para-raios são discutidos nos (anexos 5 e 6 e em artigos como a referência [3]).

A (figura 63) mostra o procedimento utilizado nas seções seguintes para estimar o número de interrupções numa rede em cada 100 km por ano.

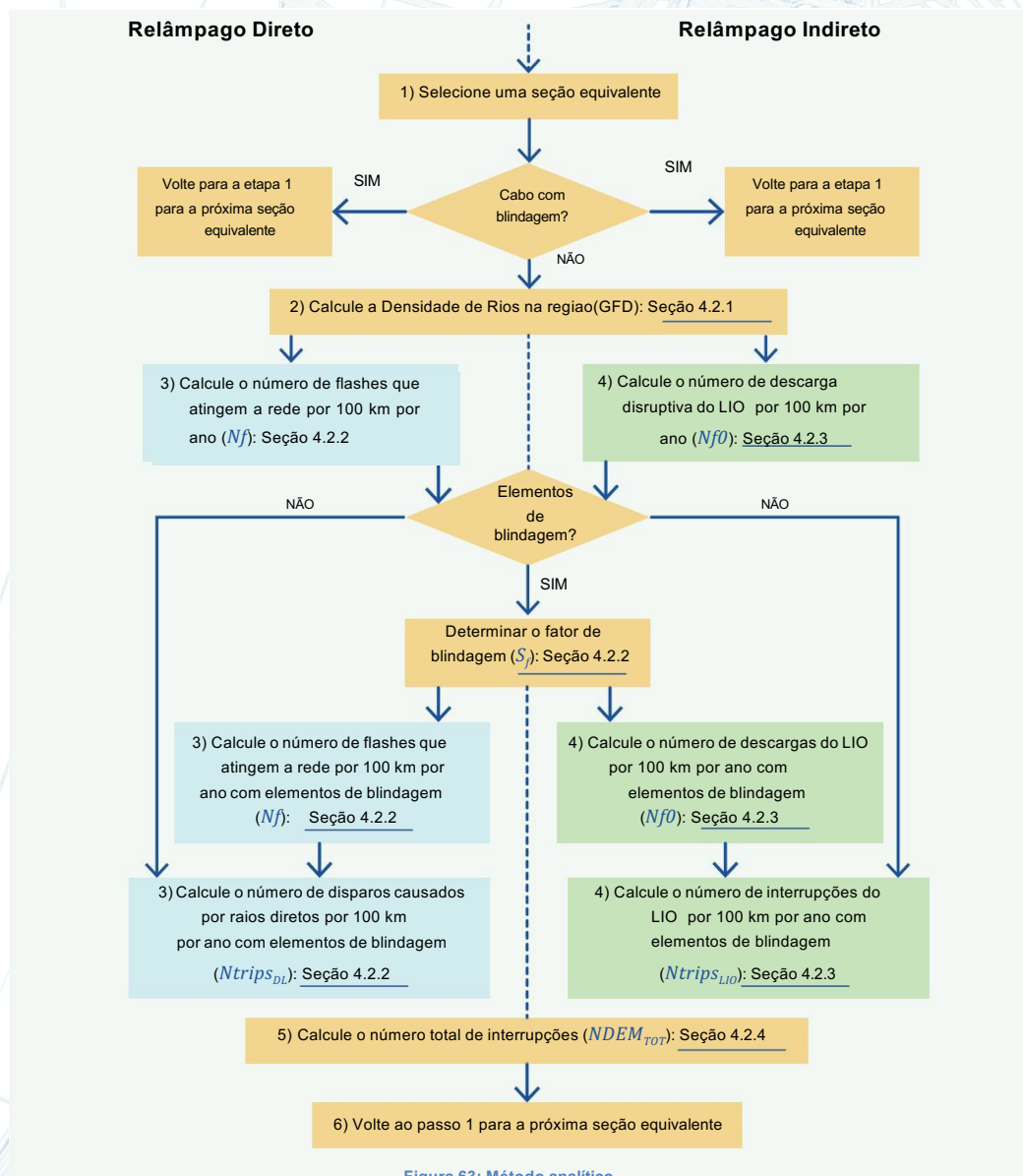


Figura 63: Método analítico

4.2.1 Análise da Densidade Isoceràunica da Região

Densidade isoceràunica da região (GFD): É a densidade de descargas atmosféricas no solo de uma determinada região, é o número de descargas atmosféricas no solo por km² por ano.

A (figura 64) mostra a densidade isoceràunica do solo em ambito global entre setembro de 1995 e agosto de 1996.

Esses dados são **fundamentais para avaliar o impacto dos raios nas redes aéreas (OHL).**

É claro que este valor varia dentro das regiões e estações.

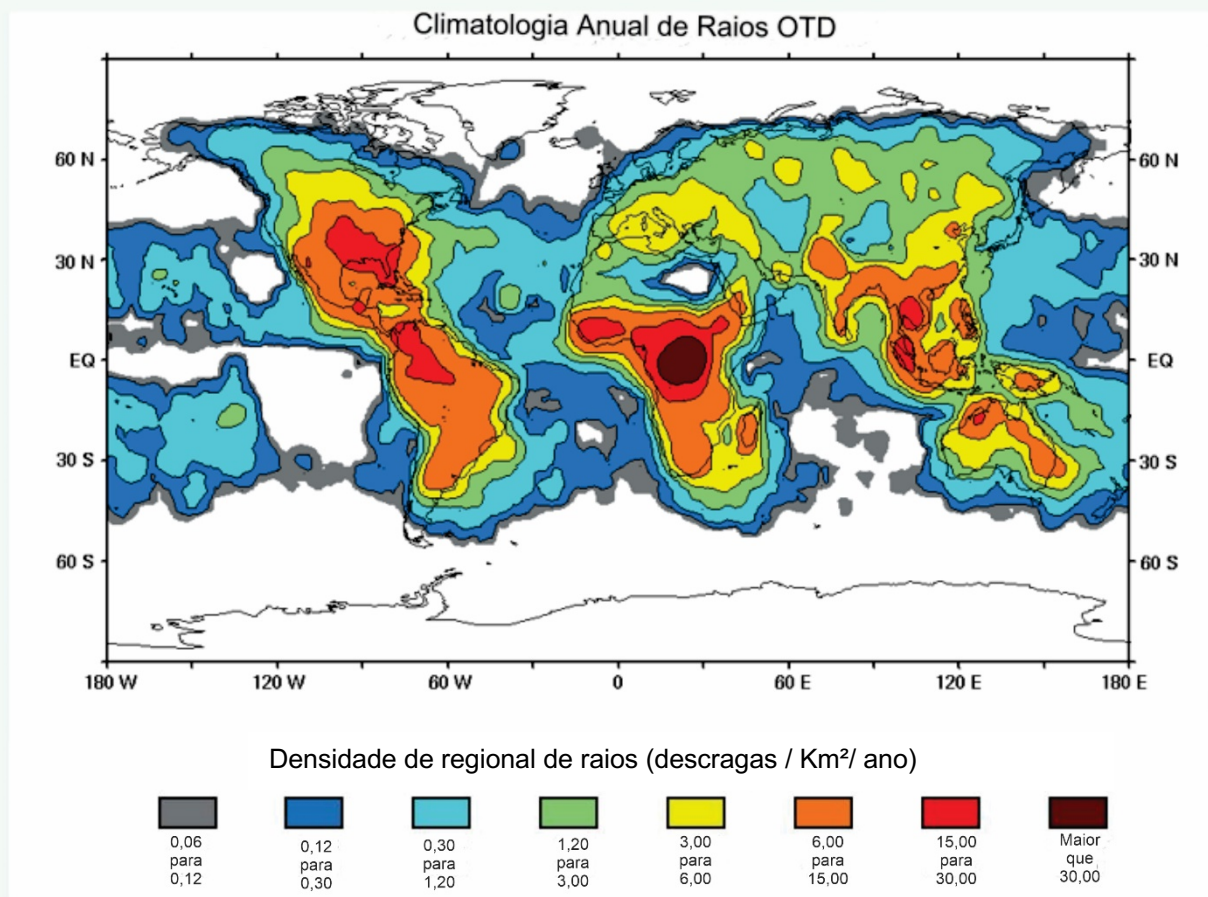


Figura 64: Densidade global de descargas atmosféricas registradas pelo Detector Óptico Transiente (ODT) espacial entre setembro de 1995 e agosto de 1996

É importante notar que o desvio padrão para a medição anual de raios varia de 20 a 50% da média. É claro que as regiões menores têm maior probabilidade de estar sujeitas a desvios-padrão mais elevados do que as maiores. Portanto, é **difícil produzir previsões precisas**.

Em [3], diferentes métodos são fornecidos para avaliar a densidade isocerâmica da região, incluindo o seguinte:

1. A densidade de raios (FD) pode ser estimada usando a densidade total (da nuvem para o solo e da nuvem para a nuvem) de descargas por km² por ano. A densidade isocerâmica pode ser obtida graças a **sensores posicionados em satélites, frequentemente chamados de detectores ópticos transientes (ODTs)**. A proporção geral de raios da nuvem para o solo deve então ser determinada. Como essa proporção pode variar dentro de uma região, um valor de um terço é recomendado em [3] e [2] para regiões tropicais e temperadas.

$$GFD = FD / 3$$

Onde:

GFD é a densidade isocerâmica da região: Número de descargas no solo por km² por ano

FD é densidade de raios: Número total de flashes por km² por ano (nuvem para terra e nuvem para nuvem).

2. O GFD também pode ser coletado diretamente de **dados da rede de detecção de raios ou de contadores de raios**. Como o desvio padrão das medições de raios pode ser muito alto, recomenda-se em [3] dispor de pelo menos **400 registros** para definir a densidade de descargas atmosféricas de uma região (uma região é definida como um quadrado dentro de uma determinada área). Se tal condição for atendida, **este método será o mais preciso para definir o GDF**.

4.2.2 Análise dos Impactos do (DLS – “Direct Lightning Strike”).

Determinação do número de raios atingindo a rede:

O número aproximado de raios que atingem a rede pode ser obtido com a seguinte expressão da referência [3]:

$$Nf = GFD * \frac{28 * h^{0.6}}{10}$$

Onde:

Nf é o número de raios que atingem a rede por 100 km por ano

GFD é a densidade isocerâmica do solo de uma região

h é a altura dos postes em metros

Determinação do número de interrupções de rede:

Uma vez definido o número de raios que atingem a rede a cada 100 km por ano, podemos considerar que **todos esses flashes levarão a descargas disruptivas**. Na verdade, conforme mostrado na referência [3], independentemente do espaçamento dos condutores, do nível de isolamento ou do aterramento, mais de 99% dos raios que atingem a rede causarão descargas disruptivas (flashover).

É claro que um raio atingindo a rede causará muitas descargas disruptivas em torno de seu ponto de impacto. Conforme observado na (seção 2.4), a descarga disruptiva pode levar à corrente de curto danificando cabos, transformadores e causar quedas na rede. Além disso, a própria propagação do impulso do raio pode danificar transformadores, para-raios, condutores e isoladores. Estas consequências são difíceis de quantificar porque dependem de muitos fatores.

Consideramos que uma vez que ocorre uma queda de raio diretamente na rede (DLS), independentemente de quantas descargas disruptivas ele levará, a ocorrência ou não de um disparo depende do seguinte:

$$Ntrips_{DL} = K * Nf_{sh}$$

Onde:

Nf_{sh} : é o número de quedas de raio diretamente na rede (DLS) que atingem a rede a cada 100 km por ano com elementos de blindagem naturais (use Nf se nenhum elemento de blindagem natural estiver presente)

$Ntrips_{DL}$: é o número de interrupções na rede devido a raios diretos (DLS) a cada 100 km por ano

K : é o fator de rede fornecido abaixo

Na verdade, quando ocorre uma descarga elétrica, a probabilidade de que ela leve a uma corrente de curto depende do nível da corrente de potência no momento da descarga elétrica. Se o nível da corrente de potência estiver próximo de zero, não deverá ocorrer uma corrente de curto. Depende primeiro da tensão nominal da rede e posteriormente da distância da subestação. As ((figuras 20 e 21) da (seção 2.3)) ilustram o fenômeno.

Definição de K :

$$K = \text{Min}\left(\left(0.92 * \frac{Un}{L_{insu}} - 6\right) * 0.01; 1\right)$$

Onde:

K : é o fator de rede fornecido abaixo

Un : é a tensão nominal da rede (tensão fase a fase) em kV

L_{insu} : é o comprimento dos isoladores na seção, em metros

Com elementos de blindagem naturais:

Com elementos de blindagem naturais, o número de queda de raio diretamente na rede (DLS) que atingem a rede por 100 km por ano será menor, portanto o número de interrupções deve ser ajustado usando a seguinte fórmula de:

$$Ntrips_{DL}^{sh} = Ntrips_{DL} * (1 - Sf)$$

Onde:

$Ntrips_{DL}^{sh}$ é o número de interrupções devido a raios diretos por 100 km por ano, com elementos de blindagem natural entorno da rede

$Ntrips_{DL}$ é o número de interrupções devido a raios diretos por 100 km por ano (sem elementos de proteção natural)

Sf é o fator de blindagem dado pelo(s) elemento(s) de blindagem, definido abaixo

Determinação de Sf :

O fator de blindagem de um elemento de blindagem pode ser definido conforme (figura 65) da (referência [3]). Este valor foi concebido para uma rede de 10 m de altura (o valor real pode variar para outras alturas de poste, o valor pode ser adaptado em conformidade). Supõe-se que os elementos de blindagem estejam em uma fileira uniforme paralela à OHL e localizados em um dos lados dela, como uma fileira contínua de árvores ou edifícios.

Quando os elementos de blindagem estiverem localizados em ambos os lados da rede, o fator de blindagem pode ser definido da seguinte forma (o fator de blindagem não pode ser superior a 1):

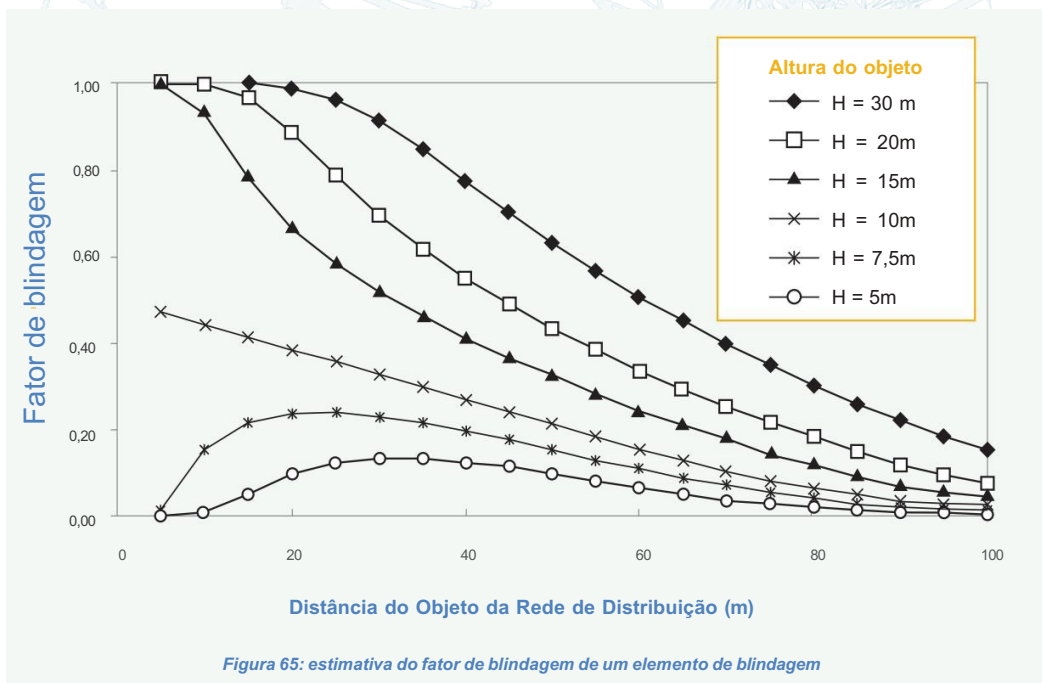
Onde:

$$Sf = \text{Min}(Sf_{right} + Sf_{left} ; 1)$$

Sf é o fator de blindagem dado pelo(s) elemento(s) de blindagem

Sf_{right} é o fator de proteção dos elementos localizados à direita da rede

Sf_{left} é o fator de blindagem dos elementos localizados à esquerda da rede



Determinação de S_f , exemplo:

Vamos considerar as duas fileiras de árvores paralelas à rede mostrada na (figura 66).

Usando a (figura 65), obtemos:

$$S_f = \text{Min}(0.3 + 0.35 ; 1) = 0.65$$

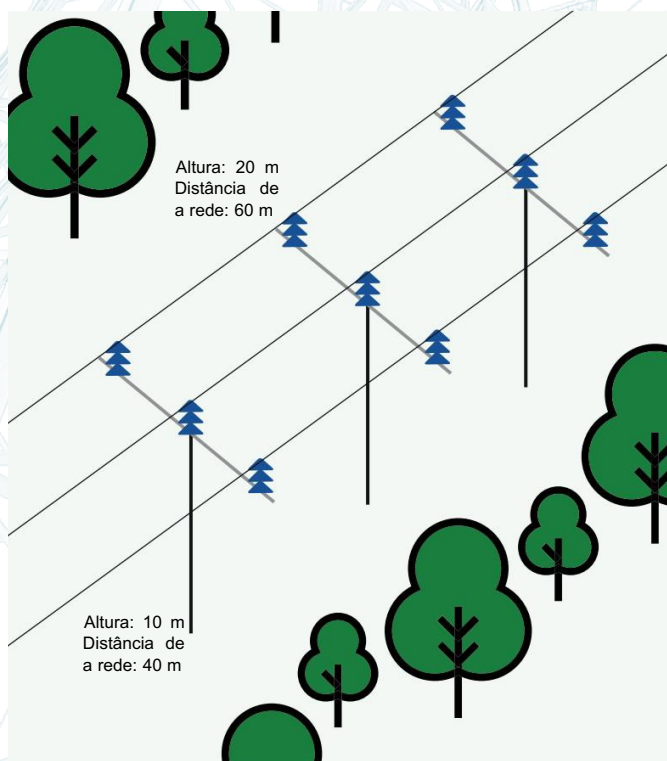


Figura 66: exemplo de elementos de blindagem

4.2.3 Análise das Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas na Rede (LIO – “ Lightning Induced Overvoltage”).

O seguinte método é usado para analisar o número de descargas disruptivas devido a Sobretensões Induzidas (LIO), é inspirado em [11] e [3].

Determinando o número de descargas disruptivas:

A (figura 67) da (referência [3]) fornece número de descargas disruptivas devido a sobretensões induzidas (LIO) por 100 km por ano versus a sobretensão disruptiva crítica (CFO) da seção e a resistividade do solo. Este valor considera uma densidade isocerâmica (GFD) de um raio no solo, por km², por ano e uma altura de rede de 10 m. Também não considera elementos de blindagem.

Observe que o método completo para determinar sobretensão disruptiva crítica (CFO) de um poste é fornecido na referência [3].

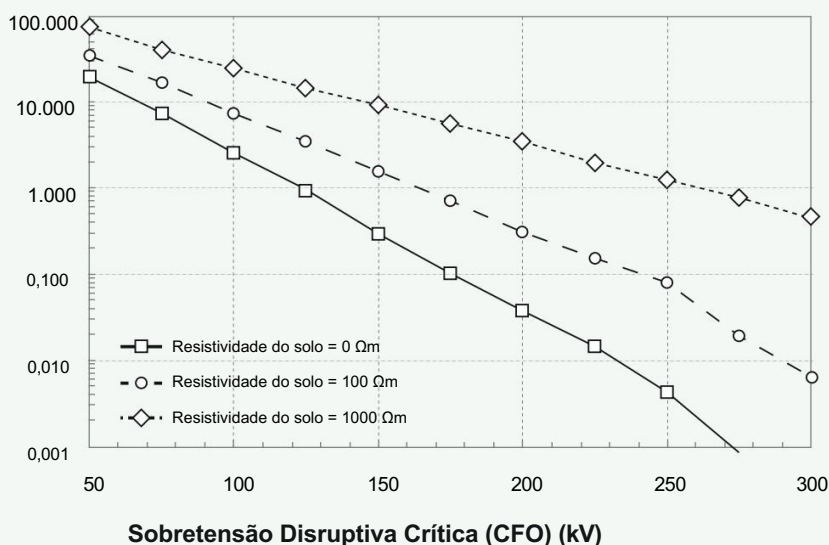


Figura 67: Número de LIOs por 100 km por ano versus o CFO da seção e a resistividade do solo, para uma densidade de descargas no solo de uma descarga por km² por ano e para uma rede de 10 m de altura.

O número de descargas atmosféricas por 100 km por ano para uma rede de 10 m de altura pode ser estimado usando a (figura 67) para uma densidade isocerâmica (GFD) de uma descarga atmosférica por km² por ano. A partir deste valor podemos estimar o número de descargas atmosféricas por 100 km por ano de uma determinada altura de rede e um GFD por referência à seguinte expressão:

$$\text{Onde: } N_{fo} = N_{fo_{figure}} * \frac{h}{10} * GFD$$

Nfo é o número de descarga disruptiva devido a sobretensões induzidas (LIO) na rede por 100 km por ano

Nfo_{figure} é o número de descarga disruptiva devido a sobretensões induzidas (LIO) da (figura 67) por 100 km por ano

h é a altura da rede, em metros

GFD é a densidade de isocerâmica da região

Na verdade, conforme explicado na referência [11], o número de descarga disruptiva por sobretensões induzidas (LIO) por 100 km por ano é proporcional à altura da rede e a densidade de isocerâmica da região (GFD).

Determinação do Número de Interrupções :

Tal como na (seção 4.2.2), é proposta a seguinte fórmula para avaliar o número de interrupções de rede devido à descargas disruptivas por sobretensões induzidas (LIO) a cada 100 km por ano:

Onde:

$Ntrips_{LIO}$ é o número de interrupções por LIO a cada 100 km por ano

Nfo é o número de descargas disruptivas devido a sobretensões induzidas (LIO) na rede por 100 km por ano considerando a resistividade do solo (sem elementos de blindagem natural); se houver elementos de blindagem, o valor

Nfo_{sh} pode ser usado

K é o fator dado na (seção 4.2.2)

O estabelecimento de uma corrente de curto que leva a quedas na rede também causa danos aos isoladores, cabos e às vezes transformadores, conforme observado na (seção 2.4). Estas consequências são difíceis de quantificar, uma vez que dependem de muitos fatores. Entretanto, as (figuras 18 e 19 da seção 2.3) podem dar uma ideia do valor da corrente de curto.

Com Elementos de Blindagem Naturais:

É difícil determinar os efeitos dos elementos de blindagem no número de quedas na rede devido à sobretensões induzidas (LIO). Na maioria dos casos, à medida que o elemento de blindagem capta uma descarga atmosférica direta na rede (DLS), ele reduz o número de raios que atingem a rede, mas aumenta o número de sobretensões induzidas (LIO) porque os impactos capturados pelo elemento de blindagem circundante a rede podem levar a uma sobretensão induzida (LIO). Contudo, em alguns casos, como em edifícios altos, a sobretensões induzidas (LIO) pode ser dispersada suficientemente longe da rede. Em âmbito mundial podemos dizer que os elementos de blindagem devem aumentar a quantidade de problemas por sobretensões induzidas (LIO).

O número de interrupções devido a sobretensões induzidas (LIO) causado por descargas que acertam **diretamente a blindagem natural circundante** a rede, será igual ao número estimado de interrupções devido a descargas atmosféricas diretas na rede (DLS) sem blindagem natural, que teriam captado estas descargas. A propósito este número é igual a zero. Portanto, por uma questão de simplicidade, assumimos que metade do número de descargas disruptivas devido a descargas atmosféricas diretas na rede (DLS) sem blindagem natural teriam sido captados por este elemento se ele estivesse presente.

Portanto, o número de descarga disruptiva devidos à LIO por 100 km por ano será:

Onde:

$Ntrips_{LIO}^{sh}$: é o número de interrupções devido a sobretensões induzidas (LIO) na rede a cada 100 km por ano com elementos de blindagem circundante

$Ntrips_{LIO}$: é o número de interrupções devido a sobretensões induzidas (LIO) na rede a cada 100 km por ano (sem elementos de blindagem natural)

Sf é o fator de blindagem, definido na (seção 4.2.2)

$Ntrips_{DL}$: é o número de interrupções devido a raios diretos a cada 100 km por ano (sem elementos de blindagem naturais)

Esta proporção depende das situações, por exemplo, em áreas urbanas, na maioria das vezes podemos assumir que os DLS capturados pelos edifícios não criam descarga disruptiva. Além disso, altos níveis de isolamento reduzirão enormemente o número de descargas causadas pelos DLSs que atingem os elementos de blindagem.

4.2.4 Número Total de Interrupções na Rede Devido a Raios e Exemplo

Número total de interrupções:

A (seção 4.2.2) define o número de interrupções na rede devido a descargas atmosféricas diretas, e a (seção 4.2.3) define o número de interrupções na rede devido a descargas atmosféricas indiretas para uma seção equivalente.

Podemos então calcular o número total de interrupções para esta seção equivalente:

$$Ntrips_{Tot} = Ntrips_{LIO}^{sh} + Ntrips_{DL}^{sh}$$

Onde:

$Ntrips_{Tot}$ é o número total de interrupções a cada 100 km de rede por ano

$Ntrips_{LIO}^{sh}$ o número de interrupções devido ao LIO na rede a cada 100 km por ano com elementos de blindagem natural

$Ntrips_{DL}^{sh}$ o número de interrupções devido a raios diretos na rede a cada 100 km por ano com elementos de blindagem natural

Exemplo:

Vamos considerar um exemplo de seção com os seguintes parâmetros:

- Rede de 20 kV
- Uma sobretensão disruptiva crítica (CFO) de 150 kV no trecho
- Isoladores de 300 mm de comprimento
- Postes de 8 m de altura
- Uma GFD de 20 raios/ km²/ ano
- Uma resistividade do solo de 100 Ωm
- Um fator de blindagem de 0,4

Aplicando a metodologia proposta nas (seções 4.1 e 4.2), obtêm-se os seguintes resultados:

$Ntrips_{DL}^{sh} \approx 65$ interrupções causadas por raios diretos a cada 100 km por ano

$Ntrips_{LIO}^{sh} \approx 34$ interrupções por LIO a cada 100 km por ano

$Ntrips_{Tot} \approx 99$ interrupções a cada 100 km por ano

4.3 Implantação de LLPDs

A (figura 68) mostra a divisão da rede em trechos e postes especiais.

A (seção 4.2) forneceu uma análise da ameaça de raios às seções.

Nas (seções 4.3.1 e 4.3.2) agora analisamos os trechos e postes especiais, e se devem ou não ser equipados.

O raciocínio é o seguinte:

Para cada trecho ou poste especial, avaliamos o **risco** considerando os possíveis **prejuízos** ocorridas como consequência direta de um raio e a **probabilidade** de que sigam a fórmula:

$$\text{Risco} = \text{nível de probabilidade} * \text{nível de prejuízos}$$

Este guia fornece um método para estimar quantitativamente o nível de probabilidade, e se está dentro da capacidade do cliente quantificar o nível de prejuízos em eventos de raio (como o custo de uma interrupção única). Assim, fornecemos uma **abordagem qualitativa nesta seção**, a (figura 69) ilustra o princípio.

Por exemplo, podemos conseguir prevenir riscos dos níveis C a A.

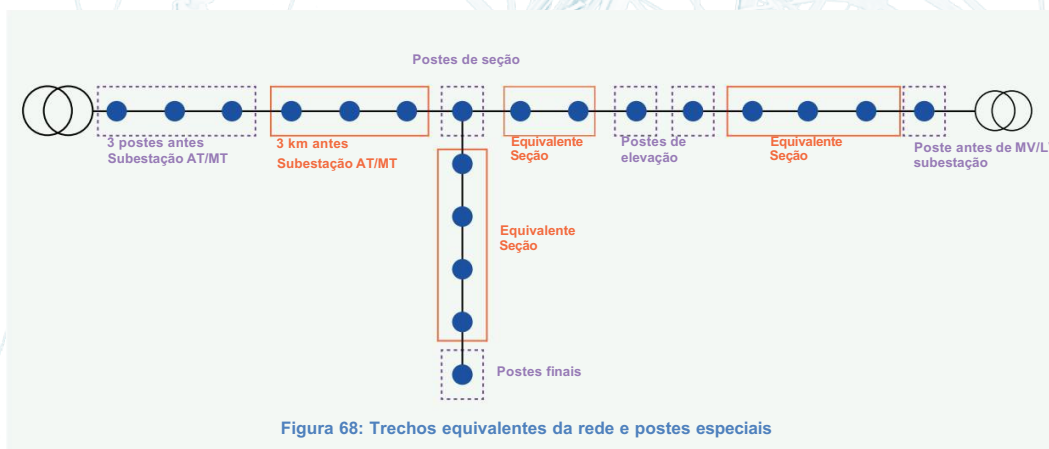


Figura 68: Trechos equivalentes da rede e postes especiais

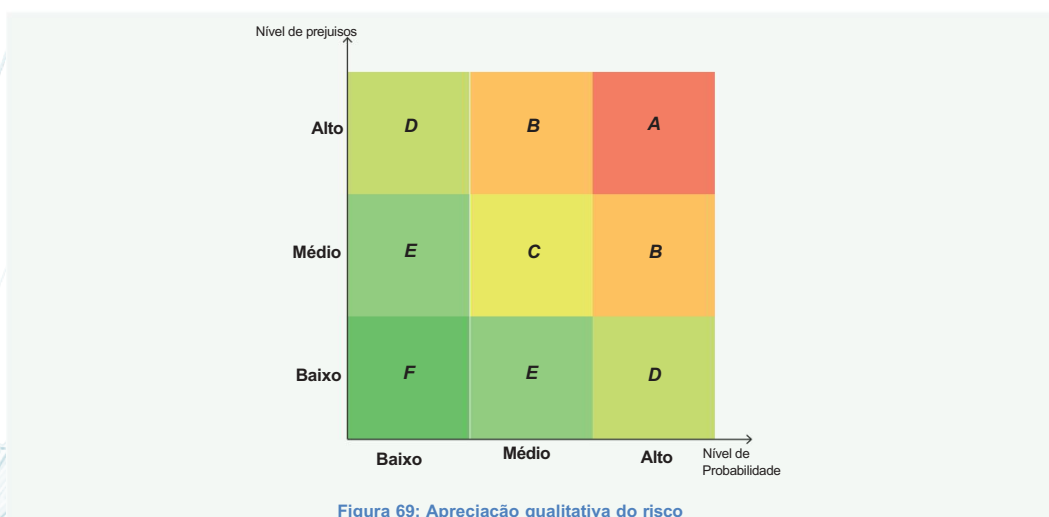


Figura 69: Apreciação qualitativa do risco

A Figura 70 resume o método de implantação do LLPD detalhado nas (seções 4.3.1 e 4.3.2).

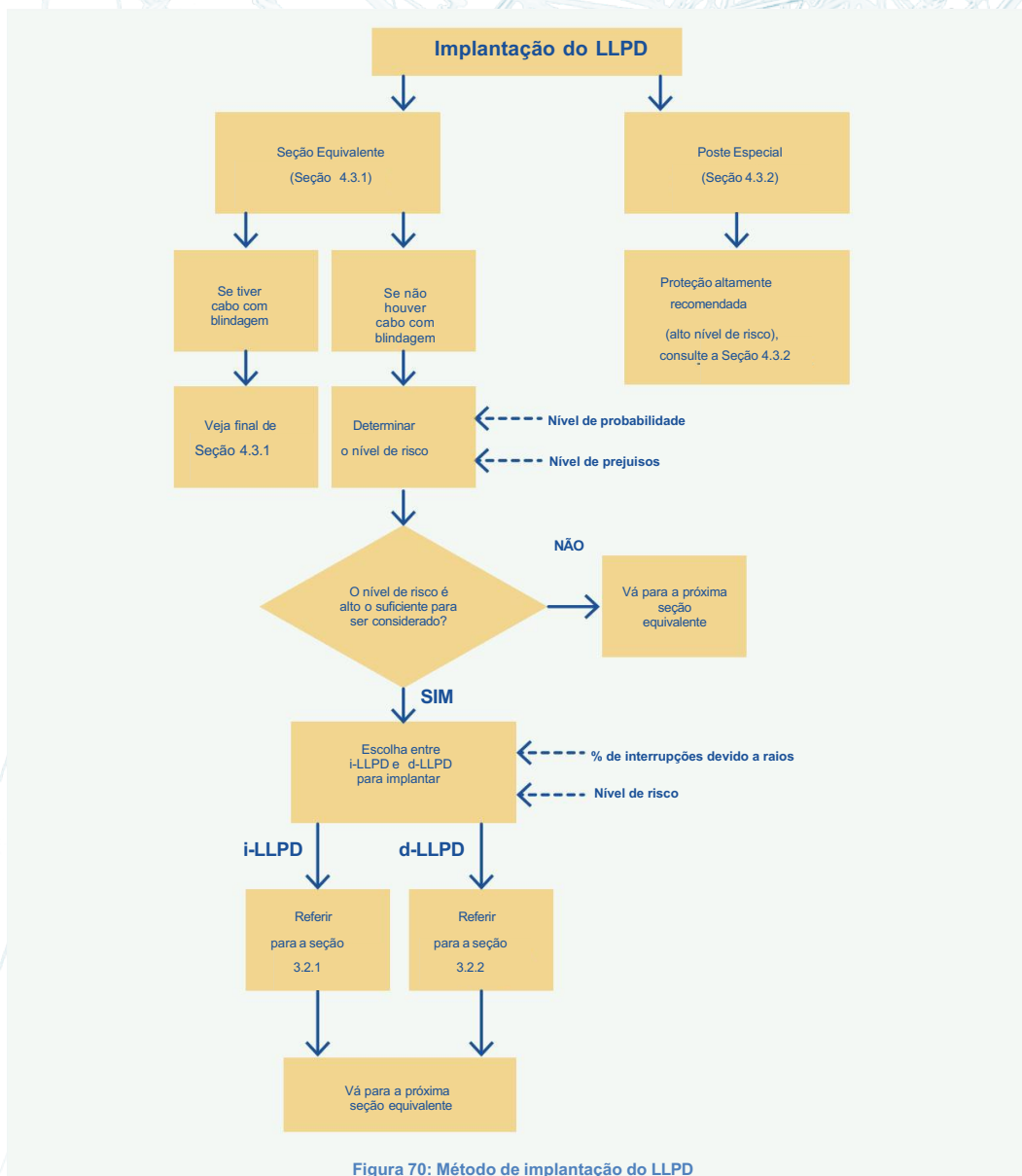


Figura 70: Método de implantação do LLPD

4.3.1 Trechos Equivalentes e 3 km antes da Subestação AT/MT

A (figura 71) mostra as seções relevantes da rede.

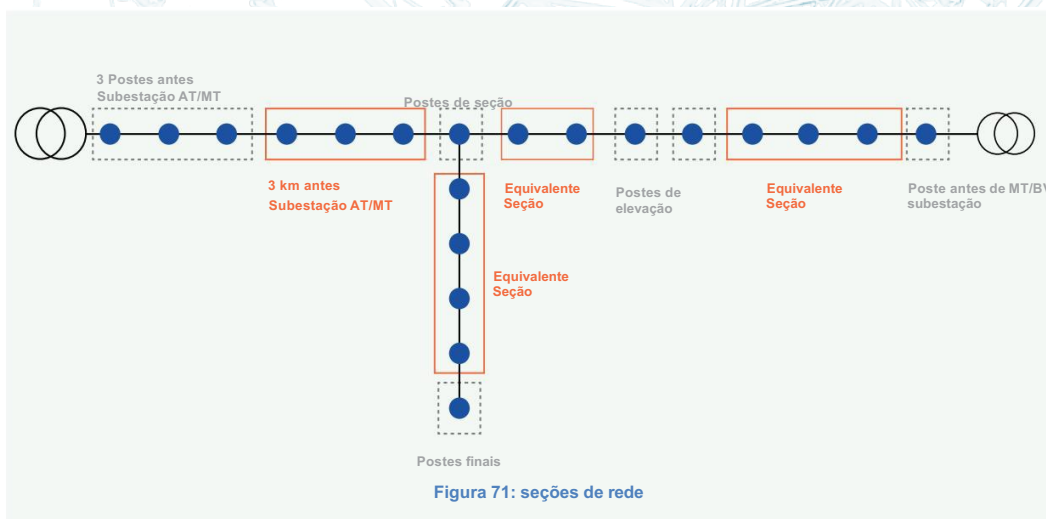


Figura 71: seções de rede

A seção 4.2 mostra um cálculo do **número de interrupções por sobretensões induzidas por descargas atmosféricas (LIO) por 100 km da rede por ano ($N_{tripsLIO}$)**, e do **número de interrupções por descarga atmosférica direta (DLS) por 100 km da rede por ano ($N_{tripsDLS}$)** para um determinado trecho, em caso de não haver cabo com blindagem. Aqui são consideradas as redes com e sem cabo blindado. Os seus níveis de risco são definidos e é fornecida uma explicação sobre como equipá-los.

No caso de não haver cabo com blindagem:

1. Nível de probabilidade:

O nível de probabilidade é determinado pelo número total de interrupções computado na Seção 4.2.4.

A Tabela 16 propõe um exemplo de níveis de probabilidade em relação ao número total de interrupções por 100 km por ano.

Esta é uma avaliação arbitrária do nível de risco.

$N_{trips_{tot}}/100 \text{ km} / \text{year}$ (ver Seção 4.2.4)	De 0 a 10	De 10 a 100	Acima 100
Nível de probabilidade	Baixo	Médio	Alto

Tabela 16: estimativa do nível de probabilidade

2. Nível de prejuízos:

O nível de prejuízos é determinado pelas consequências dos raios no trecho. Está dentro da capacidade de o cliente determinar o nível de prejuízos (alto, médio ou baixo). No entanto, podemos listar os vários fatores que aumentam o nível de prejuízos em um evento de descarga atmosférica (seja LIO ou DLS):

- No caso de danos na rede representarem uma **ameaça à vida e a segurança humana** (por exemplo, por quebra de condutores).
- O **alto custo da interrupção, disparo ou interrupção/min.**
- Se os danos na rede representarem uma **ameaça ao tráfego rodoviário ou ferroviário** (por exemplo, pela ruptura de condutores).
- Nos casos em que o trecho esteja **a menos de 3 km antes da subestação AT/MT**. Na verdade, por estar próximo da subestação de AT/MT, a corrente de curto estabelecida é consequentemente alta, ver (figuras 20 e 2) na (seção 2.3). Isso pode danificar a subestação de AT/MT, os isoladores e os cabos muito rapidamente e sempre leva a um desarme, consulte a (seção 2.4). Cada uma dessas características é uma razão para estimar que o **nível de prejuízos é alto**. A proteção é, portanto, fortemente recomendada.

3. Nível de risco e implementação do LLPD:

Ao reconhecer os níveis de probabilidade de prejuízos, podemos **estimar o nível de risco** com referência à (figura 67).

Se o nível de risco for suficientemente elevado para ser considerado (acima do nível C, por exemplo), então os LLPDs deverão ser equipados. A instalação de i-LLPDs ou d-LLPDs depende da proporção do número de interrupções causadas por descarga atmosférica direta (DLS) e sobretensão induzida (LIO). Para isso consideramos o percentual de interrupções por LIO:

Onde:

%Ntrips_{LIO} é a porcentagem de interrupções devido a sobretensão induzida (LIO)

Ntrips_{LIO} é o número de interrupções por sobretensão induzida (LIO) a cada 100 km de rede por ano

Ntrips_{tot} é o número total de interrupções a cada 100 km de rede por ano

A (tabela 17) fornece um exemplo de como o trecho equivalente deve ser equipado considerando o percentual de disparos por sobretensão induzida (LIO) e o nível de risco de um evento atmosférico. Na verdade, os LLPDs apenas reduzirão o nível de probabilidade. Assim, se o nível de risco for elevado, deverá ser dada especial atenção à secção equivalente.

Nível de risco / %Ntrips _{LIO}	De 0% a 25% das interrupções por LIO	De 25% a 50% das interrupções devido a LIO	De 50% a 75% das interrupções devido a LIO	De 75% a 110% das interrupções devido a LIO
C ou B	Instale o d-LLPD conforme usado no caso de uso 1 (ver Seção 3.2.2)		Instale o i-LLPD (consulte a Seção 3.2.1)	
A	Instale o d-LLPD conforme usado no caso de uso 1 (consulte a Seção 3.2.2)			Instale o i-LLPD (Ver Seção 3.2.1)

Tabela 17: Conselhos do streamer para implementação de LLPD de acordo com o nível de risco e proporção de interrupções devido a LIO

No caso de cabo blindado:

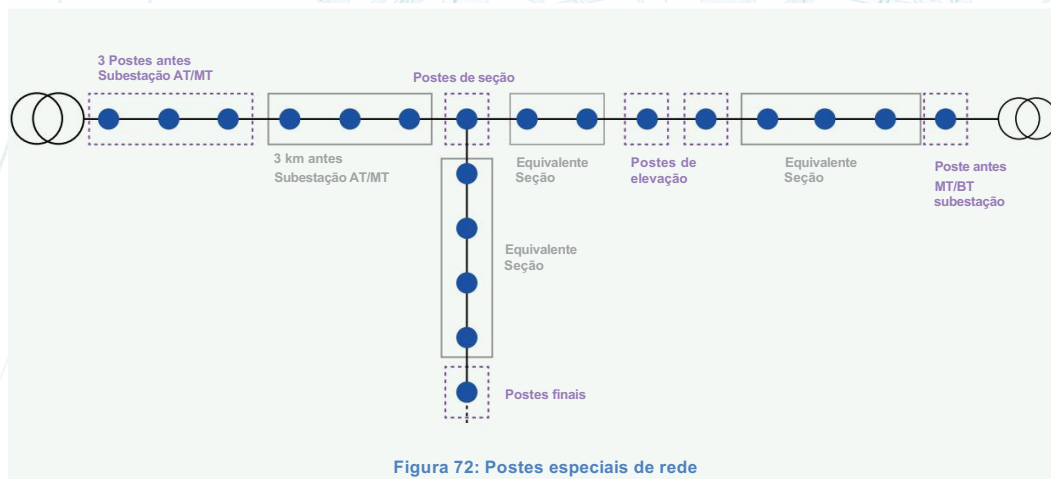
A análise fornecida na (seção 4.2) não cobre o caso do cabo blindado. No entanto, as redes equipadas com cabo blindado ainda podem ser melhoradas com os LLPDs do Streamer. A proteção LLPD deve ser considerada nos seguintes casos:

- Se o **número de curto-circuitos de retorno for elevado na seção equivalente**, ver (seção 2.1) e (anexo 1) para informações sobre **curto circuitos de retorno**.
- Se a rede sofre um elevado número de interrupções e se a seção equivalente foi identificada como uma das principais fontes de tais interrupções.
- Se o **nível de dano por um raio for alto** (veja acima a definição do nível de prejuízos).
- Nos casos em que o **trecho esteja a menos de 3 km antes da subestação AT/MT**. Na verdade, como é o caso da subestação AT/MT, a corrente de curto estabelecida é consequentemente alta, ver (figuras 20 e 21) na (seção 2.3). Isso pode danificar a subestação de AT/MT, os isoladores e os cabos muito rapidamente e sempre leva a um desarme, consulte a (seção 2.4). Nesse caso, para a maioria das redes, o Streamer estima que o **nível de prejuízos seja médio a alto** e recomenda proteção mesmo que esteja equipado com cabo blindado.

Se a proteção LLPD for necessária, a seção blindada equivalente deverá ser equipada com d-LLPDs conforme usado no **caso de uso 1.1**, ver (seção 3.2.2). Para obter mais informações sobre cabo blindado, consulte o Anexo 6.

4.3.2 Postes Especiais

A Figura 72 mostra os postes considerados.



Esses casos são destacados na (seção 4.1).

Na verdade, esses postes apresentam características particulares, e a Streamer recomenda a proteção em qualquer caso pelos seguintes motivos:

- Estes postes têm frequentemente **um nível de isolamento mais baixo** e são, portanto, mais vulneráveis a descargas atmosféricas (como é o caso dos postes seccionados), levando a mais descargas destrutivas e, conseqüentemente, a mais interrupções.
- A configuração destes postes torna-os **mais vulneráveis aos impulsos atmosféricos**; a mudança na impedância destes postes significa que a reflexão do impulso do raio é uma ameaça aos equipamentos equipados nestes postes: Isoladores, para-raios, transformadores, etc. Ver (anexo 2) para mais explicações.

1. Nível de probabilidade:

Tal como explicado acima, estes postes são particularmente vulneráveis e qualificados em um **nível de probabilidade médio a elevado**.

2. Nível de prejuízos:

Tal como na (seção 4.3.1), está dentro da capacidade de o cliente determinar o nível de prejuízos. No entanto, podemos fornecer uma lista de diversos fatores que contribuem para um nível aumentado de prejuízos durante um evento de raio:

- Se o dano a este poste for uma **ameaça à vida e à segurança humana**
- O **alto custo da inoperação, interrupções ou interrupção/min**
- O alto preço dos equipamentos (como transformadores de AT/MT ou mesmo cabos de aterramento)
- Se o dano a este poste for uma **ameaça ao tráfego rodoviário ou ferroviário**

3. Nível de risco e implementação de d-LLPDs:

Para todos estes postes, o nível de risco é suficientemente elevado e os d-LLPDs devem ser equipados conforme mostrado no **caso de uso 2**, ver (seção 3.2.2).

4.3.3 Conclusão sobre a Proteção Adicionada pelos LLPDs

A (tabela 18) apresenta um resumo da proteção conferida às seções equivalentes e postes especiais pelos LLPDs.

Mais detalhes sobre o desempenho dos LLPD podem ser encontrados no final da (seção 4.3).

		Prevenção de... ... consequências da propagação do impulso do raio			Prevenção de... ... consequências da propagação da corrente de curto		
		Falha do transformador e outros equipamentos por falha de isolamento	Quebra do pára-raios	Quebra do isolador	Quebra do condutor	Cortes	Falha do transformador por estresse mecânico e aumento de temperatura
Tipo de LLPD	localização do LLPD						
i-LLPD	Seções Equivalente						
d-LLPD Caso de uso 1.1 e 1.2				✓	✓	✓	
i-LLPD	3 km antes Subestação AT/MT			✓	✓	✓	
d-LLPD Caso de uso 1.1 e 1.2				✓	✓	✓	✓
d-LLPD+ aterramento Caso de uso 2	3 Poste antes Subestação AT/MT	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1 Poste antes Subestação AT/MT	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Postes de elevação		✓	✓	✓	✓	
	Postes finais			✓	✓	✓	
	Postes de seção			✓	✓	✓	

Principal razão pela qual o LLPD está instalado
 Proteção adicional oferecida pelos LLPDs

Tabela 18: proteção conferida pelos LLPDs em seções equivalentes e postes especiais

4.4 Seleção de Produtos

As (seções 4.1, 4.2 e 4.3) mostram como implantar LLPDs em uma rede.

A presente seção foi desenvolvida para ajudar o cliente a selecionar o produto certo para adaptação aos parâmetros de sua rede.

A (tabela 19) resume os parâmetros a ter em conta ao selecionar um LLPD para instalação num poste.

LLPD	d-LLPDs	i-LLPDs	Rede Parâmetros em Localização do LLPD	Verificando
1. Maior Tensão do Equipamento (HVE)	De 6 a 40.5kV	De 6 a 40.5kV	Tensão nominal (tensão quadrática média fase-fase)	Verifique se o HVE do LLPD é superior à tensão nominal da Rede ver Seção 3.3 ou léxico para a definição de HVE)
2. Corrente Máxima de Curto Prospectiva (MPFC)	5 kA	Acima de 1.5 kA	Corrente Máxima de Curto Prospectiva	Verifique se o MPFC é menor que o LLPD. Consulte a Seção 4.4.1
3. Taxa de frequência	50 Hz 12 Hz		Frequência nominal da Rede	Verifique se a frequência nominal da Rede está dentro da frequência nominal do LLPD
4. Resistência de passo	De 1 a 130 Ω no caso de uso 1 De 1 a 10 Ω no caso de uso 2	De 1 a 130 Ω	Resistência de passo	Verifique se a resistência da base no poste está dentro da resistência de base exigida do LLPD
5. Altitude	1000 m		Altitude do poste	Se a altitude for superior a 1000m favor consultar-nos (ver Sessão 3.4.2)
6. Entreferro	Ver Seção 4.4.2		Tensão nominal (fase a fase. tensão quadrática média) e o CFO do isolador	Verifique se existe uma declaração de entreferro para os parâmetros da linha (tensão nominal e CFO do isolador) Consulte a Seção 4.4.2

Tabela 19: parâmetros a verificar antes de escolher e instalar um LLPD

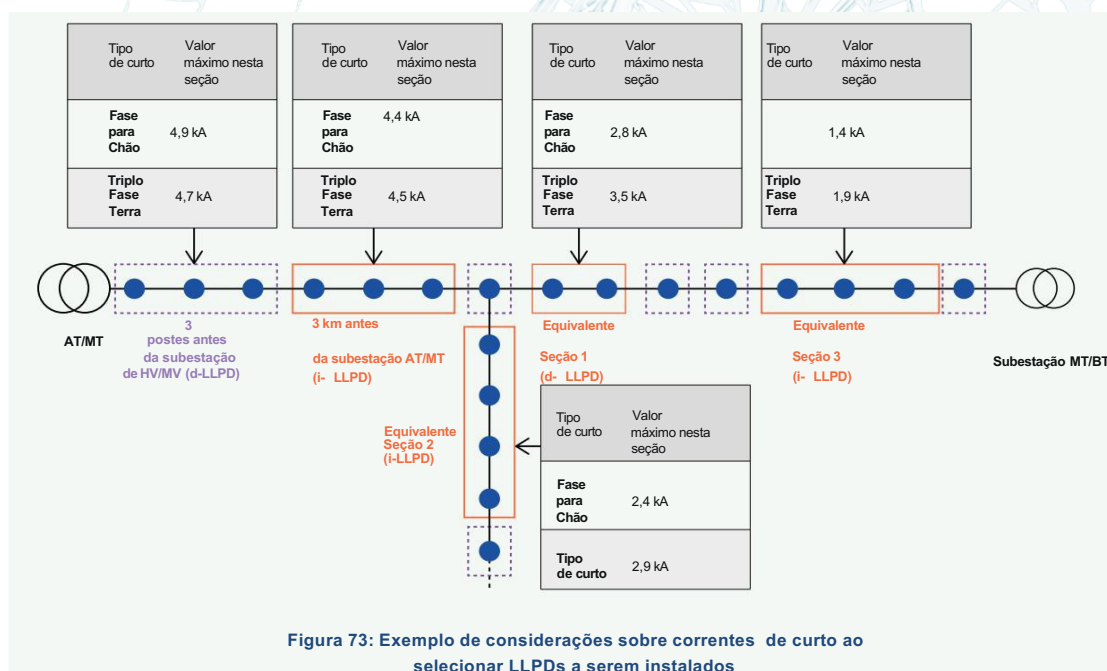
4.4.1 Como Verificar a Corrente Presumida de Curto Circuito (CPCC)

Antes de instalar um LLPD, é necessário verificar se a corrente de curto máxima que o LLPD suporta é inferior ao seu CPCC (informações gerais sobre corrente de curto são fornecidas na seção 2.3.1). O nível da corrente de curto depende fortemente da distância da subestação, portanto consideramos os níveis de curto seção por seção.

Tomemos o exemplo descrito na (figura 73): Após a implantação do LLPD ver (seção 4.3) foi decidido equipar:

- d-LLPDs, 3 postes antes da subestação AT/MT
- i- LLPDs, 3 km antes da subestação AT/MT
- d- LLPDs na Seção 1 equivalente
- i- LLPDs na Seção 2 equivalente
- i- LLPDs na Seção 3 equivalente

Nos dois parágrafos seguintes, explicamos que tipo de corrente de curto deve ser considerada e fornecemos uma comparação com o CPCC do LLPD.



Para d-LLPDs:

Os d-LLPDs são projetados para prevenir os efeitos das descargas atmosféricas diretas na rede (DLS). Assim, deve-se verificar que a corrente máxima de curto que se estabelece na rede nos casos de um DLS é menor que o CPCC do d-LLPD.

Como na (seção 2.3.1), no caso das descargas atmosféricas diretas (DLS), podem ocorrer curtos fase-terra, fase-fase ou tripla fase-fase. Aqui, apenas curtos fase-terra e curtos tripos fase-fase são considerados porque eles levam à corrente de curto mais alta que pode ser estabelecida na rede. Por exemplo, na (figura 73), na seção equivalente 1, o CPCC do d-LLPD escolhido para equipar esta seção precisa ser superior a 3,5 kA.

Curtos fase-terra: se a rede estiver equipada com cabo blindado, considere curtos fase-terra através do cabo blindado, ver caso (figura 74).

Caso contrário, considere faltas básicas entre fase e terra, veja (figura 7).

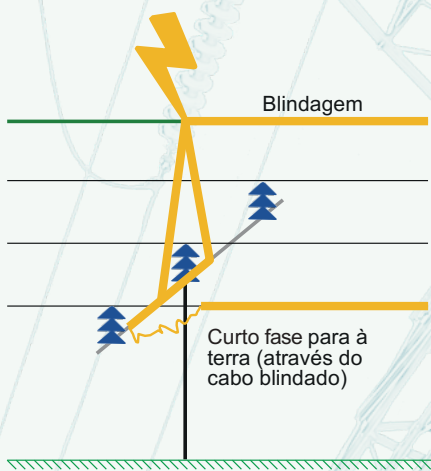


Figure 74

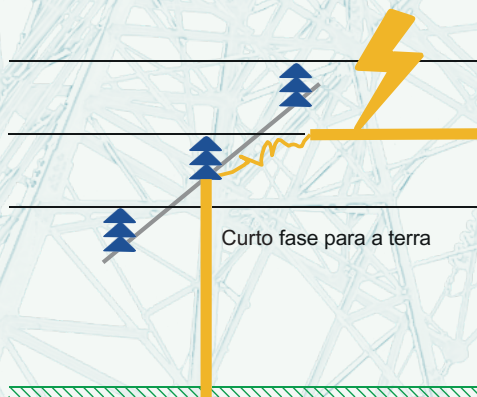


Figure 75

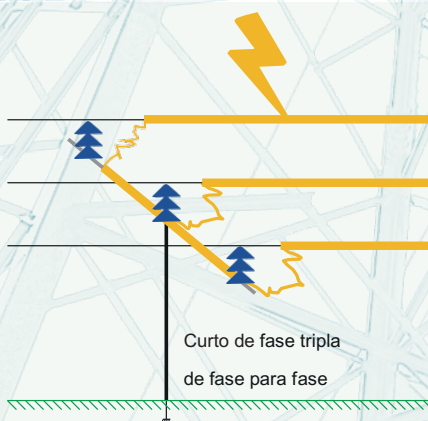


Figure 76

Seleção de i-LLPDs:

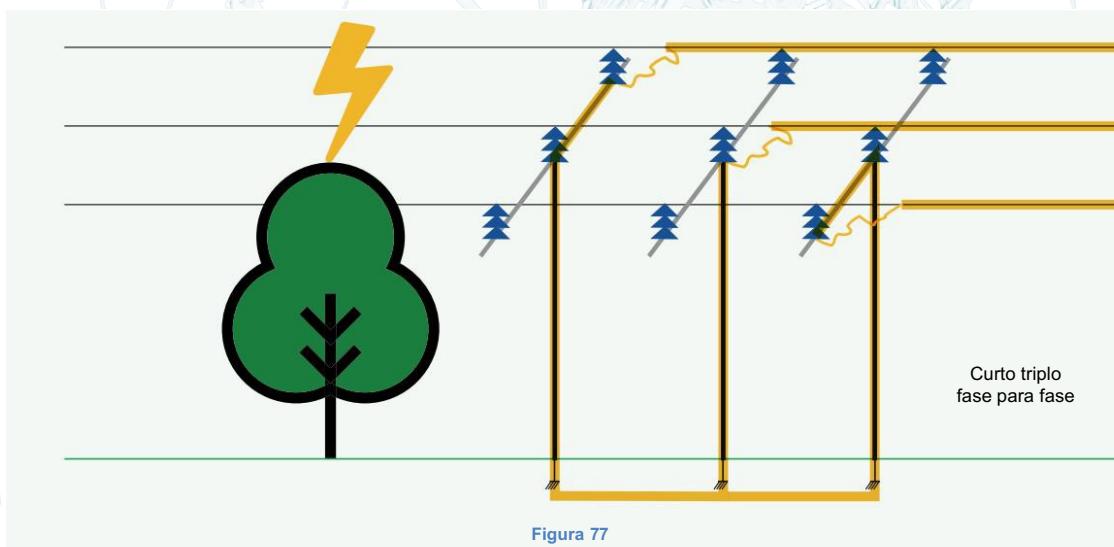
Os i-LLPDs são projetados para prevenir os efeitos das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas na rede (LIO). Portanto, eles precisam suportar correntes de curto no caso de curtos fase-terra, fase-fase ou triplo fase-fase ver (seção 2.3.1).

É, portanto, necessário verificar se o CPCC do i-LLPD é superior à corrente máxima de curto que pode estabelecer na rede nos casos de curto à terra e curto triplo fase-fase (estes dois casos levam à correntes de curto com níveis mais elevados, então são os únicos considerados).

Por exemplo, na (figura 73), na seção equivalente 2, o CPCC do i-LLPD escolhido para equipar esta seção precisa ser superior a 2,9 kA.

Curto fase-terra: Veja a figura 75.

Curto triplos entre fases: Veja a (figura 77).



4.4.2 Como Verificar a Corrente Dimensão do GAP do Centelhador

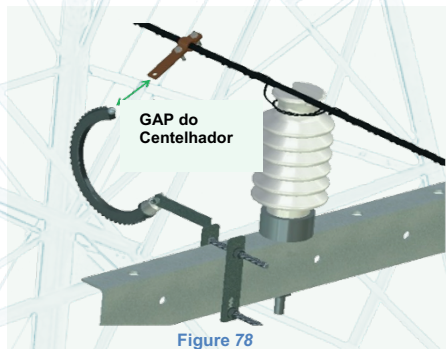
O comprimento do GAP do Centelhador (ver figura 78) garante uma boa coordenação do isolamento LLPD com a rede.

Deve-se verificar se o LLPD escolhido tem a capacidade de ser devidamente coordenado com o isolador no local de instalação.

A Streamer fornece tabelas de coordenação de comprimento do GAP do Centelhador.

As Tabelas 20 e 21 fornecem exemplos de i-LLPDs típicos.

Caso não exista configuração do GAP do Centelhador considerando os parâmetros da rede (tensão nominal e sobretensão disruptiva crítica (CFO) do isolador), selecione outro produto ou consulte-nos.



CFO do Isolador (kV)	24 kV i-LLPD: GAP do Centelhador em mm	
	Tensão nominal da rede de 6 a 17 kV (tensão fase a fase)	Tensão nominal da rede de 18 a 24 kV (Tensão fase a fase)
< 100	Consulte-nos	Consulte-nos
100	40	Consulte-nos
110	45	60
125	55	60
150	65	75
180	80	90

Tabela 20: Exemplos de GAP do Centelhador recomendados para um i-LLPD de 24kV

CFO do Isolador (kV)	12kV i-LLPD: GAP do Centelhador em mm	
	Tensão nominal da rede de 6 a 12 kV (tensão fase a fase)	Tensão nominal da rede de 13 a 15 kV (tensão fase a fase)
< 80	Consulte-nos	Consulte-nos
80	40	Consulte-nos
90	45	50
100	50	55
125	60	65
150	70	75

Tabela 21: Exemplos de GAP do Centelhador recomendados para um i-LLPD de 12 kV

Como o GAP do Centelhador é determinado?

A coordenação depende de vários fatores, incluindo o comprimento do GAP do Centelhador. Portanto é um parâmetro importante para sua instalação. Como **a coordenação é ajustada através do comprimento do GAP do Centelhador**, ela é limitada principalmente por dois fatores:

- O GAP do Centelhador não deve ser demasiado pequeno, caso contrário o nível de isolamento será demasiado baixo.
- Ocorrerão descargas disruptivas devido a sobretensão da rede.
- O GAP do Centelhador não deve ser muito grande, caso contrário a tensão de centelhamento do LLPD será muito alta e a sobretensão causada por raios causará centelhas no isolador, tornando o LLPD inútil.

Assim, precisamos definir os comprimentos máximo e mínimo do GAP do Centelhador para evitar tais inconvenientes.

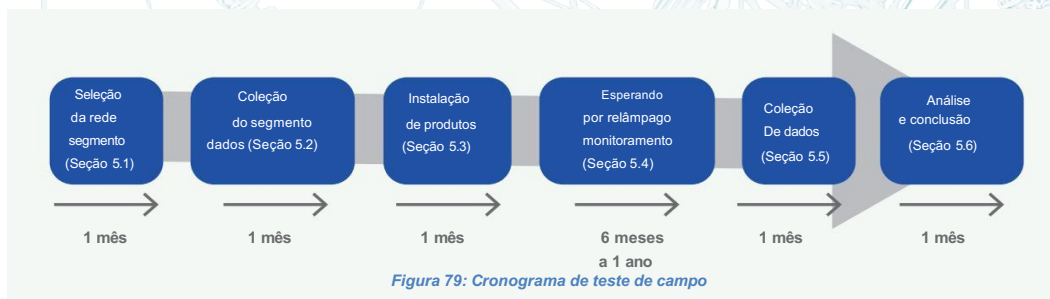
Diferentes fatores devem ser levados em consideração. Consulte o Anexo 4 para obter mais explicações.

Através de cálculos, podemos reduzir o número de fatores para três:

- Tensão nominal (fase a fase, raiz quadrada média)
- Sobretensão disruptiva crítica (CFO) do componente protegido pelo LLPD
- Características do LLPD

5. Metodologia de Teste para LLPDs

Esta seção fornece uma ideia de como é o processo da Streamer para avaliar a **eficiência dos LLPDs assim evitando disparos**. A (Figura 79) mostra o cronograma e o processo do teste de campo:



5.1 Seleção de Segmento

Antes desta etapa, a rede deve ser dividida em seções equivalentes conforme descrito na (seção 4.1).

Além disso, o número total de interrupções a cada 100 km por ano ($N_{trips_{tot}}$) deve ser calculado para cada seguimento equivalente, assim como o nível de prejuízos devido ao impacto de raios, ver (seção 4.2).

Para prosseguir com o teste de campo, o **segmento da reta deverá ser definido**. Um **segmento é definido como a definição de uma ou mais seções e postes especiais** ver (seção 4.1).

A Figura 80 mostra um exemplo de segmento.

Requisitos de estudo para seleção de um segmento:

O segmento deverá fornecer dados suficientes para uma análise precisa da eficiência dos LLPDs.

A quantidade total de interrupções por ano no segmento deve ser superior a 10.

Por exemplo, considerando o segmento da Figura 80, devemos ter:

$$\frac{N_{trips_{tot}}^{Section 2}}{100} * l_2 + \frac{N_{trips_{tot}}^{Section 3}}{100} * l_3 \geq 10$$

Onde:

- $N_{trips}^{Section 2}$: é o número total de interrupções por 100 km por ano calculado para a Seção 2,
- l_2 : é o comprimento da Seção 2 (em km),
- $N_{trips}^{Section 3}$: é o número total de interrupções por 100 km por ano calculado para a Seção 3,
- l_3 : é o comprimento da Seção 3 (em km).

Conselhos na seleção de um segmento:

- Os trechos equivalentes do segmento deverão apresentar elevado número médio de viagens por 100 km por ano; na verdade, um maior número de ocorrências proporcionará uma análise mais precisa.

Número médio de viagens por 100 km por ano no exemplo da (figura 80):



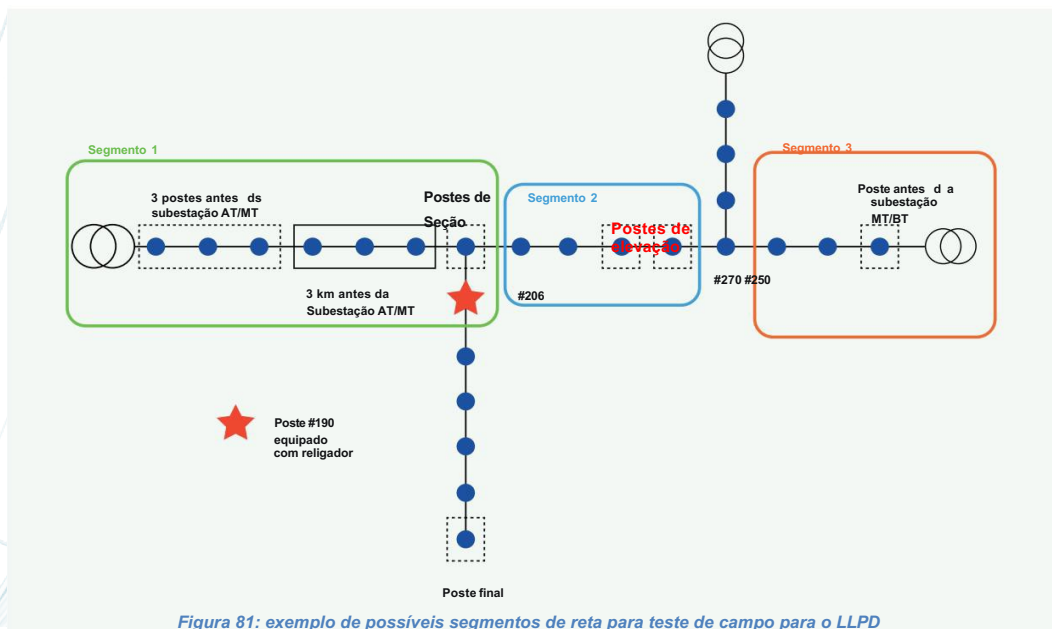
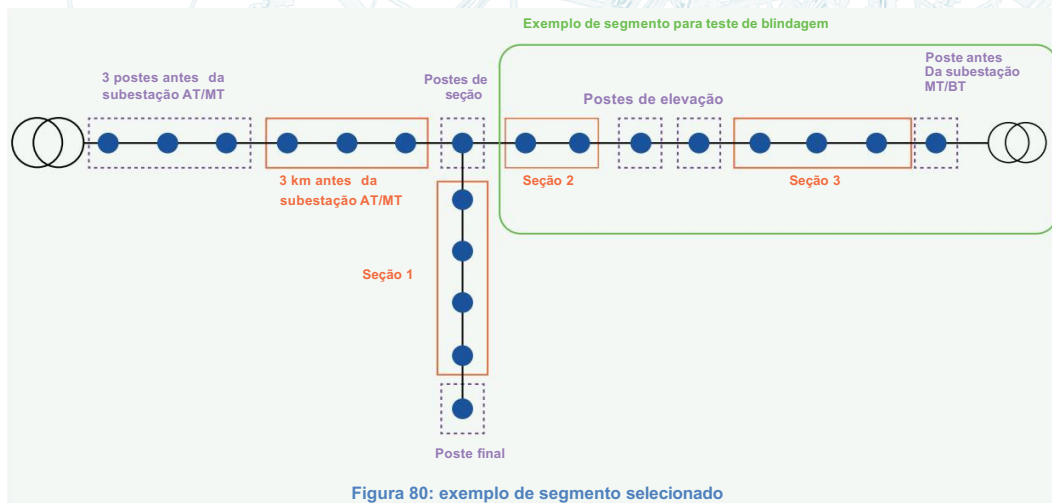
Distribuidor Autorizado no Brasil

- As secções equivalentes do segmento devem apresentar níveis globais elevados de prejuízos devido às consequências dos raios, conforme definido na (seção 4.3) (alto custo de uma única viagem, equipamento caro ou onde danos na rede constituem um perigo para o tráfego rodoviário e ferroviário, bem como para a segurança humana).
- O segmento deverá apresentar um elevado número de postes especiais (que são mais vulneráveis e muitas vezes apresentam um elevado nível de prejuízos).
- O segmento deve ser fácil de isolar (deve ser fácil determinar se a viagem vem deste segmento ou de outro, conforme mostrado no exemplo abaixo).

Exemplo de seleção de segmento e consequências:

A (figura 81) mostra um exemplo de rede e diferentes segmentos que podem ser selecionados para teste de campo.

A (tabela 22) apresenta as consequências de cada escolha.



Seleção de Segmento	Número Médio de Interrupções / 100 km / ano	Níveis Globais de Dissipação na Seção Equivalente do Segmento	Potes Especiais do Segmento	Isolamento do Restante da Rede
Segmento 1	80	Alto (Conforme visto na Seção 4.3.1, o nível de dissipação do raio 3 km antes da subestação AT/MT é frequentemente ELEVADO. Ele será maior que o nível de dissipação do Segmento).	3 postes antes da subestação AT/MT (Alta tensão / Média tensão) Postes antes da seção	O Poste #190 está equipado com um religador, assim sabemos se o curto ocorre entre o poste #190 e o poste final. Então, precisamos instalar um registrador de curtos no poste #206 para determinar se o curto provém de um poste que está depois do poste #206. Neste caso, se ocorrer um curto na subestação AT/MT, saberemos que ela provém do Segmento 1 se nem o religador do poste #190 nem o registrador de curtos do poste #206 forem acionados. => 1 Registro de curto a ser adicionado
Segmento 2	100	Médio	Poste de elevação	Os postes #206 e #270 precisam ser equipados com registradores de curtos. neste caso, se ocorrer um curto na subestação AT/MT, saberemos que ela provém do segmento 2 se o poste #206 registrar um curto, mas o poste #270 não => 2 registros de curto a serem adicionados
Segmento 3	80	Médio	Poste antes da subestação AT/BT	Os postes #250 precisa ser equipados com religador de curtos. neste caso, se ocorrer um curto na subestação AT/MT, saberemos que ela provém do segmento 3 se o poste #250 registrar um curto. => 1 registro de curto a ser adicionado

Tabela 22: Exemplo de Parâmetros para Auxiliar na Escolha de um Segmento

Conclusão: o segmento 1 tem um elevado número médio de interrupções por 100 km por ano, o nível de prejuízos é elevado, apresenta postes especiais particularmente vulneráveis, ver (seção 4.3.2) e apenas um religador de curtos precisa ser adicionado.

Assim, **o Segmento 1 deve ser selecionado.**

5.2 Obtenção dos Dados Segmento

Para conduzir a análise, são necessários dados relativos à própria rede:

Dados de construção de rede:

- Diagrama unifilar da rede
- Tipo e especificação dos isoladores instalados na rede
- Tipo e especificação do condutor instalado na rede
- Seção de condutores
- Número de postes de tensão, postes intermediários e postes de seção

Dados do registrador de curtos do equipamento de manobra, ver (tabela 23):

- Coletar os registros de curtos (sobrecorrente e curtos à terra)
- Coletar registros de data e hora e valores de pico

Dados relâmpago

Os dados de relâmpagos devem ser fornecidos com no mínimo as seguintes informações:

- Carimbo de hora da descarga atmosférica
- Localização da descarga atmosférica, idealmente com precisão de 500 m
- Qualificação: Nuvem para terra ou nuvem para nuvem

Exemplo de conjunto de dados:

Data	Tempo	Latitude*	Longitude**	Altura(km)	Tipo***	Corrente (kA)	Erro 2D(km)
20140824	08:16:12,782	+13,5340	+101.3210	00,0	1	-020,0	00.060
20140824	08:16:12,899	+13,5341	+101.3210	00,0	1	-013,0	00.060
20140824	08:18:16,572	+13,5191	+101.3880	00,0	1	-027,2	00.116
20140824	08:18:29,169	+13,5337	+101.3600	13,8	2	-006,4	00.160
20140824	08:18:54,224	+13,5550	+101.3990	00,0	1	-020,9	00.055
20140824	08:23:47,976	+13,5432	+101.3550	00,0	1	-023,6	00.057
20140824	08:23:48,056	+13,5596	+101.3570	00,0	1	-026,4	00.258
20140824	08:25:17,064	+13,5397	+101.3520	00,0	1	-024,3	00.058

*Latitude: (+) Norte (-) Sul

**Longitude: (+) Leste (-) Oeste

***Tipo: (1) nuvem-solo; (2) Internuvem

Os dados podem ser obtidos em:

- Centro Meteorológico Nacional ou qualquer outra organização de previsão do tempo
- Site da Vaisala (www.vaisala.com)
- Aeroporto mais próximo (os aeroportos geralmente são equipados com sensores de raios)
- Sistemas locais de detecção de raios

Data	Tempo	Tipo de Falta	Correntes em Ampères				G
			Linha A	Linha B	Linha C		
06/11/2013	17:47:01	67N					164
06/11/2013	18:41:51	67N					164
12/03/2014	06:29:29	67N					167
04/04/2014	12:41:31	67N					40
04/04/2014	12:42:07	67N					39
04/04/2014	12:49:25	67N					43
27/04/2014	18:22:22	51L	1802	1486	600		
28/04/2014	18:33:30	67N					158
28/04/2014	18:51:48	67N					157
28/04/2014	21:36:43	67N					162
29/04/2014	20:46:53	51L	48	2322	2208		77
29/04/2014	20:51:41	67N					109
29/04/2014	22:15:17	67N					112
13/06/2014	14:35:36	67N					157
13/06/2014	22:19:41	67N					173
15/06/2014	14:00:42	67N					152
15/06/2014	17:08:31	67N					166
17/06/2014	13:45:41	67N					155
18/06/2014	15:26:11	67N					134
24/06/2014	12:00:42	67N					145
27/06/2014	15:56:12	67N					146
27/06/2014	16:06:11	67N					152

Tabela 23: Exemplo de conjunto de dados

5.3 Instalação

Os LLPDs deverão ser instalados no segmento na forma definida na (seção 4.3) para os trechos e postes especiais que compõem o segmento.

Logs de curtos devem ser instalados para isolar o segmento, ver exemplo na (seção 5.1).

5.4 Durante a Temporada de Raios e Monitoramento

- Os LLPDs na rede devem ser observados durante uma estação de iluminação.
- Podem ser realizadas verificações periódicas em cada LLPD para verificar se o indicador de funcionamento único disparou, e se o produto ainda está instalado corretamente.
- Também é recomendado que os dados sejam coletados periodicamente do registrador de falhas.

*Para testes de campo, a Streamer fornece um componente extra (**indicador de operação única**) para LLPDs para verificar se ele opera pelo menos uma vez.

5.5 Coleta dos Dados

No final da temporada de relâmpago ou após um ano, devem ser coletados:

- Dados de registro de curtos (se instalados)
- Registros de painéis de subestação
- Número de indicadores de operação única que mostram a operação de um LLPD ver (seção 5.4)
- Dados de raios durante o período de instalação ver (seção 5.2)

5.6 Análise e Conclusão

A Tabela 24 mostra a finalidade de cada coleta de dados. A Tabela 25 dá um exemplo de análise de dados.

Esta análise ajudará a responder às seguintes questões:

- Os LLPDs estão instalados corretamente?
- Os LLPDs estão funcionando adequadamente?
- A aplicação dos LLPD é relevante?
- A aplicação dos LLPD é eficiente?

Dados	Objetivo
Registros de curtos do painel de subestação	Ajudará a qualificar o número de interrupções na rede no ano 1 em comparação com o ano 2 e fornecerá uma visão geral abrangente.
Registros de curtos	Ajudará na qualificação de qual trecho da rede é responsável pelo disparo na subestação ou religador.
Indicador de operação única que mostra a operação	Mostrará que os LLPDs funcionaram e quais funcionaram ou não. Se forem feitas visitas periódicas à rede, o funcionamento dos LLPDs poderá ser determinado.
Dados relâmpago	Ajudará a diferenciar um disparo na subestação ou religador devido a raios ou outras causas e comparará a atividade de raios de um ano com o nível tomado para comparação.

Tabela 24: Objetivos de coleta de dados

Datas de desarme do disjuntor de subestação: Houve interrupção?	Datas de descargas elétricas: Havia presença de raios?	Dados de interrupções registrados: O curto ocorreu na seção protegida?	Indicador de operação única: Algum indicador quebrou na zona do raio?	Conclusão
2014 14 de janeiro 20:34:54	N / D	SIM	NÃO	Não é origem de relâmpago
2014 18 de janeiro 14:25:14	2014 18 de janeiro 14:25:14	NÃO	NÃO	Nenhuma preocupação com a seção protegida
2014 05 de março 07:11:34	2014 05 de março 07:11:34	SIM	NÃO	LLPD não funcionou. Investigação necessária para determinar o porquê
N / D	2014 27 de junho 17:03:55	NÃO	SIM	Operação bem-sucedida do LLPD

Tabela 25: Exemplo de análise de dados

Referências

- [1] IEC, *International Standard, Protection against Lightning – Part 1: General principles*, IEC 62305-1, 2010-12, 67 pages
- [2] Working group C4.407, *Lightning Parameters for Engineering Applications*, CIGRE, 2013
- [3] IEEE, *Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*, 2004
- [4] F. Rachidi, CA Nucci, MV Lanoz, C Mazzetti, *Lightning-induced voltages on overhead lines*, IEEE, 1993
- [5] E. Cinieri, F. Muzi, *Lightning induced overvoltages, improvement in quality of service in MV distribution lines by addition of shield wires*, IEEE, 2002
- [6] J. He, S. Gu, S. Chen, R. Zeng, *Discussion on Measure Against Lightning Breakage of Covered Conductors on Distribution Lines*, IEEE, 2008
- [7] M. F. Ariffin, *TNB Malaysia Session 1 Paper ID 0674*, CIRED, 2009
- [8] S. Boggs, J. Densley, J. Kuang, *Mechanism for Impulse Conversion of Water Trees to Electrical Trees in XLPE*, IEEE, 1998
- [9] M. Zinck, J.B. Frain, *Multi-Chamber Arrester Field Test Experience on Medium Voltage Overhead Line in Asia*, Streamer, 2013
- [10] A. Ray, *Residual life Assessment of Transformers*, CIRED, 2014
- [11] P. Chowdhuri, *Estimation of Flashover Rates of Overhead Power Distribution Lines By Lightning Strokes to Nearby Ground*, IEEE, Center for Electric Power Tennessee Technological University, 1989
- [12] T. Miyazaki, S. Okabe, *Experimental Investigation to Calculate the Lightning Outage Rate of a Distribution System*, IEEE, 2010
- [13] P. Yadee and S. Premrudeepreechacharn, *Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System*, Electricity Generation Authority of Thailand, Chiang Mai University, 2007
- [14] Schneider Electric, *Les parafoudres en MT*, 1999, 14 pages
- [15] Siemens, *Metal Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems*, 2011, 128 pages
- [16] Working group n°01 of study committee n°33, *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, CIGRE, 1991, 64 pages

[17] T. Miyazaki, S. Okabe, S. Sekioka, *An Experimental Validation of Lightning Performance in Distribution Lines*, IEEE, 2008

[18] G. V. Podporkin, E. YU. Enkin, V. E. Pilshikov, *Lightning Protection of Overhead Distribution and Transmission Lines by Multi-Chamber Insulators-Arresters of a Novel Design*, CIGRE SC C4 Hakodate Colloquium, 2012

[19] T. Miyazaki, S. Okabe, *A Detailed Field Study of Lightning Stroke Effects on Distribution Lines*, IEEE, 2009

[20] G. V. Podporkin, Senior Member, IEEE, E. YU. Enkin, E. S. Kalakutsky, V. E. Pilshikov, A. D. Sivaev, *Overhead Lines Lightning Protection by Multi-Chamber Arresters and Insulator-Arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, N°1, January 2012

DEFINIÇÃO DE TERMOS

Termo	Definição	Seção que pode ser consultada
BFO (Back Flashover) (Curto Circuito de retorno)	Definição da IEV: Descarga disruptiva do isolamento rede-terra resultante de uma queda de raio na parte do sistema que normalmente está no potencial de terra.	Anexo 1
Valor de pico atual	Definição da IEC 62305-1: Valor máximo da corrente do raio.	Seção 1
CFO (sobretensão disruptiva crítica)	É o valor de pico do surto que, sob condições específicas, causa descargas atmosféricas no meio circundante em 50% das aplicações (de [3]). É importante notar que este valor é válido na frequência do impulso atmosférico.	
Descarga Atmosférica Direta na Rede (DLS)	Raio atingindo diretamente uma estrutura a ser protegida.	Seção 1.2
Descarga descendente	Definição da IEC 62305-1: Raio iniciado por um líder descendente da nuvem para a terra.	Seção 1.1
Duração da corrente de curso longo	Definição da IEC 62305-1: período de tempo o qual a corrente em um curso longo está entre 10% do valor de pico durante o aumento e 10% do valor de pico durante a diminuição do fluxo contínuo.	Seção 1.2.3
Corrente de curto	Definição da IEC 62305-1: corrente que flui em um determinado ponto de uma rede resultante de um curto em outro ponto desta rede.	Seção 2.3.1
Flashover (Tensão disruptiva) (do isolador)	Definição da IEC 62305-1: descarga disruptiva externa ao isolador, e sobre sua superfície, conectando as partes que normalmente possuem tensão de operação entre elas.	Seção 2.1
Carga instantânea	Definição da IEC 62305-1: descarga elétrica de origem atmosférica entre a nuvem e a terra consistindo em um ou mais cursos.	Seção 1.1
Densidade de raios ou descargas (FD)	Número total de raios (nuvem para terra e nuvem para nuvem) por km ² por ano.	Seção 4.2.1
Duração do raio ou descarga	Definição da IEC 62305-1: tempo o qual a corrente o raio flui no ponto de impacto.	Seção 1.1

Corrente subsequente	Corrente de curto limitada pela impedância dos LLPDs do Streamer.	Seção 3.3.1
Resistência de passo	A resistência ôhmica entre um poste/torre e a terra, expressa em ohms.	
Tempo frontal da corrente de impulso	Definição da IEC 62305-1: parâmetro virtual definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes em que são atingidos 10 e 90% dos valores de pico.	Seção 3.3.2
Densidade Isoceraúnica da região (GFD):	O número de relâmpagos na terra por km ² por ano.	Seção 4.2.1
Transformador de potência AT/MT	Transformador de potência que fornece um sistema de média tensão e corrente alternada a partir de um sistema de alta tensão e corrente alternada. O termo "transformador AT/MT" pode ser usado.	Seção 2.3.1
Subestação de transformação AT/MT	Uma subestação contendo transformadores de potência HV/MV. O termo "subestação AT/MT" pode ser usado.	Seção 2.3.1
IEV	Vocabulário Eletrotécnico Internacional	
Carga de impulso	Definição da IEC 62305-1: valor resultante da integral temporal da corrente do raio em um impulso.	Seção 1.2.2
Descarga Atmosférica Inireta na Rede (ILS)	A descarga atmosférica atinge suficientemente perto de uma estrutura a ser protegida e pode causar sobretensão perigosa.	Seção 1.2.1
LEMP (Impulso Eletromagnético das Descargas Atmosféricas)	Definição da IEC 62305-1: todos os efeitos eletromagnéticos da corrente do raio através de acoplamento resistivo, indutivo e capacitivo, criando surtos e campos eletromagnéticos irradiados.	Seção 2
Raio para a terra	Definição da IEC 62305-1: descarga elétrica de origem atmosférica entre a nuvem e a terra consistindo em um ou mais pontos de impacto.	
Descarga atmosférica / Raio	Definição da IEC 62305-1: descarga elétrica única em um raio para a terra.	Seção 1.2
Corrente de curto de máxima prospecção	Corrente máxima de curto que pode ser estabelecida em uma rede sem nenhum dispositivo de proteção para na qual um LLPD pode ser equipado.	Seção 3.3.1
LIO (Sobretensão induzida por raio)	Surto de tensão criado por relâmpago indireto devido ao Impulso Eletromagnético das Descargas Atmosféricas (LEMP).	Seção 2.2

Curso longo	Definição da IEC 62305-1: parte do raio que corresponde a uma corrente contínua.	Seção 1.2.3
Carga de curso longo	Definição da IEC 62305-1: valor resultante da integral temporal da corrente do raio em um curso longo.	Seção 1.2.3
Corrente máxima de curto causado por um raio que pode ser extinta	Corrente máxima de raio na qual um LLPD pode extinguir a corrente de curto resultante.	Seção 3.3.1
Máximo Acompanhamento prospectivo Atual	Corrente máxima de seguimento que um LLPD pode extinguir e suportar quando equipado na rede, de acordo com testes de tipo.	Seção 3.3.1
MCOV (Tensão operacional máxima) de um para-raios	Tensão máxima fase-terra de uma rede na qual um para-raios pode ser aplicado.	Anexo 5
Operação mínima suportável	Número mínimo de operações que um LLPD pode realizar durante sua vida útil. Para o i-LLPD, uma operação corresponde à extinção de uma corrente de curto da sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO). Para o d-LLPD, corresponde à extinção de uma corrente de curto de uma Descarga Atmosférica Direta (DLS) e conduz esta descarga atmosférica direta para o solo.	Seção 3.3
Transformador de potência MT/BT	Transformador de potência que fornece um sistema de baixa tensão e corrente alternada a partir de um sistema de média tensão e corrente alternada. O termo "transformador MT/BT" pode, portanto, ser usado.	Seção 2.3.1
Subestação transformadora de MT/BT	Uma subestação contendo transformadores de potência MT/BT. O termo "subestação MT/BT" pode, portanto, ser usado.	Seção 2.3.1
Corrente de descarga nominal de um Dispositivo contra surtos	Definição (da IEC 60099-4): Valor de pico de um impulso de corrente atmosférica usado para classificar um para-raios. O termo "impulso de corrente atmosférica" refere-se a uma forma de onda de corrente 8/20.	Seção 3.3.2
Arco de potência	Arco elétrico que se estabelece entre uma fase e outra, ou entre uma fase e um ponto de potencial zero.	Seção 2.3.2
Transformador	Definição (do IEC): aparelho estático com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternada em outro sistema de tensão e corrente geralmente de valores diferentes e na mesma frequência com a finalidade de transmitir energia elétrica. Neste artigo podemos usar o termo "transformador".	

Frequência nominal	Frequência de potência para a qual um LLPD é projetado, associada à tolerância de frequência.	Seção 3.3
Tensão residual para para-raios de óxido metálico padrão	Definição (do IEV): valor de pico da tensão que aparece entre os terminais de um para-raios ao expressar uma corrente de raio de 8μs de tempo frontal virtual, 20μs de tempo virtual até meio valor na cauda e um valor de pico igual à sua descarga nominal atual.	Seção 3.3.5
Resistividade do solo	Resistência de uma área de solo de 1 metro de tamanho, medida entre quaisquer duas faces opostas, expressa em ohmímetros.	
Curso curto	Definição da IEC 62305-1: parte do raio correspondente a uma corrente de impulso.	Seção 1.2.2
Impulso de corrente padrão:		Seção 3.3.2
Sentelha sobre tensão	Tensão na qual o LLPD dispara. É a tensão disruptiva crítica (CFO) da rede.	Seção 3.3.5
Inclinação da frente da corrente de impulso	Definição da IEC 62305-1: mudança de corrente dentro do tempo inicial e frontal da corrente de impulso.	Seção 1.2.2
Estrutura	Poste, torre, cruzeta, cabo de aterramento, cabo, condutor, subestação.	
Surto	Definição da IEC 62305-1: fenômeno transitório criado pelo LEMP, aparecendo como uma sobretensão e/ ou sobrecorrente.	Seção 2
Para-raios	Definição de [3]: um dispositivo de proteção para limitar surtos de tensão em equipamentos, desviando a corrente de surto e retornando o dispositivo ao seu status original. É capaz de repetir essas funções conforme especificado.	
Tempo para metade do valor na cauda da corrente de impulso	Definição da IEC 62305-1: parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante em que a corrente diminuiu para metade do valor de pico na cauda.	Seção 1.2.2
Subestação transformadora	Definição do IEV: subestação contendo transformadores de potência interligando duas ou mais redes de tensões diferentes. Podemos então usar o termo "subestação".	
Raio ascendente	Definição da IEC 62305-1: relâmpago iniciado por um líder ascendente de uma estrutura aterrada até a nuvem.	Seção 1.1

Anexos

Anexo: Descarga Disruptiva e Curto Circuito de Retorno

A descarga disruptiva de retorno pode ocorrer quando um raio atinge (não diretamente no condutor, mas) em uma torre ou cabo com blindagem.

Quando uma carga de raio viaja ao longo do caminho aterrado dedicado (poste/torre e cabo com blindagem), ela cria dois fenômenos:

- Aumenta o potencial do poste/torre de acordo com a resistência de passo do local em questão.
- Induz sobretensão devido à propagação do impulso do raio.

Como consequência, nas redes de MT, dois fatos levam a curtos circuitos de retorno (BFO):

1. A resistência de passo da torre é muito alta.
2. O aterramento do cabo com blindagem está ausente em todos os postes/torres.

1. A resistência de passo do poste/ torre é muito alta:

O fato é que a resistência ser demasiado elevada é importante no que diz respeito às ocorrências de descargas disruptivas de retorno, conforme claramente estabelecido na referência [13]. A Figura 82 (referência [3]) mostra esta dependência.

2. O aterramento do cabo blindado está ausente em todos os postes:

Isso é comum em projetos de redes MT. Conforme mostrado nas referências [5] e [12], a instalação de cabo de aterramento aéreo, aterrado a cada 200 m (a cada três a cinco postes) com resistência de passo inferior a 5 ohms em redes de MT pode reduzir o número de interrupções em até 30%. As melhorias limitadas devem-se à ausência de ligação à terra em todos os postes. Na verdade, a referência [3] afirma que a eficácia da blindagem do cabo requer aterramento em todos os postes.

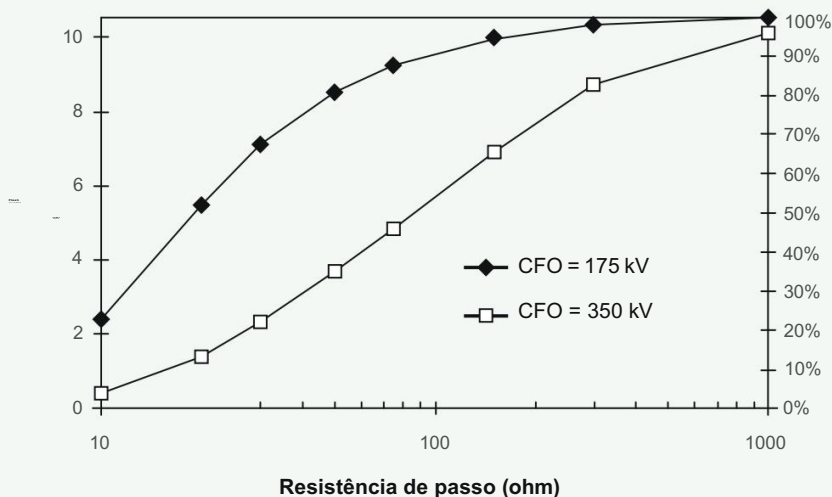
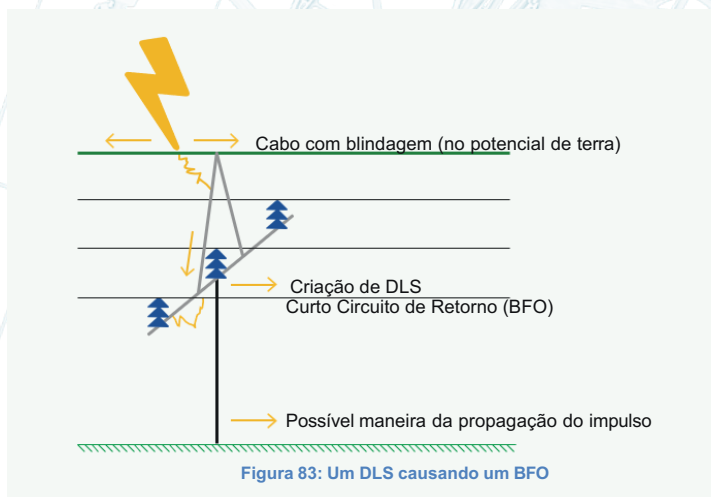


Figura 82: Efeito da resistência do passo no desempenho do cabo com blindagem (mostrado como taxa de interrupção e eficiência de proteção)

A questão é a seguinte ver (figura 83):

Quando um impulso de raio atinge a torre, como o cabo de aterramento está isolado da torre por um baixo nível de isolamento (geralmente um ou dois isoladores), a corrente do raio não tem dificuldade em passar por ele e passar pela torre. O potencial da torre aumenta. Se a resistência de passo da torre for baixa, toda a corrente do raio será aterrada e o potencial da torre diminuirá para zero. Se a resistência de passo da torre for alta (solo rochoso e arenoso), a corrente do raio não tem tempo de passar completamente para o solo e o potencial da torre aumenta acentuadamente acima do nível de isolamento do equipamento.

A descarga desruptiva (flashover) ocorre então posteriormente.



Um impulso de sobretensão de raio que leva a um curto-circuito de retorno (BFO) geralmente tem um pico de corrente do raio alto e um tempo de frente de corrente de impulso curto. Quando um raio atinge a estrutura, uma corrente de pico mais alta leva a uma maior probabilidade de descargas elétricas. Além disso, estudos mostraram que um curto tempo de frente de corrente de impulso ocasiona o aumento da sobretensão através dos isoladores e a subsequente probabilidade de disrupção ver (referência [11]). Assim, **os curto-circuitos de retorno (BFO) são geralmente difíceis de prevenir.**

Anexo 2: Propagação da Descarga Atmosférica

O comportamento da propagação do impulso é discutido neste anexo para entender como ele pode causar danos e rupturas.

É importante notar que a transmissão e a reflexão do impulso ocorrem cada vez que ele encontra uma mudança na impedância. Quando o impulso encontra outro componente, quanto maior a impedância, maior será a parte refletida dele. Em particular, os pontos abertos no circuito criam uma reflexão completa do impulso.

Exemplo de transformador da referência [14]:

Considerando sua alta impedância em relação à rede, o transformador pode ser considerado um ponto aberto na rede.

- No instante t (Figura 84), o impulso de sobretensão vem da rede aérea (OHL) para o transformador.
- No instante $t + \varepsilon$ (Figura 85), parte do impulso é refletida diretamente pelo transformador, e nesse momento a sobretensão submetida pelo transformador já é superior à sobretensão de pico do impulso.

Conforme mencionado na referência [14], em alguns casos, mesmo que o impulso tenha sido limitado por um para-raios, a sobretensão submetida pelo transformador pode exceder a sua sobretensão disruptiva crítica (CFO).

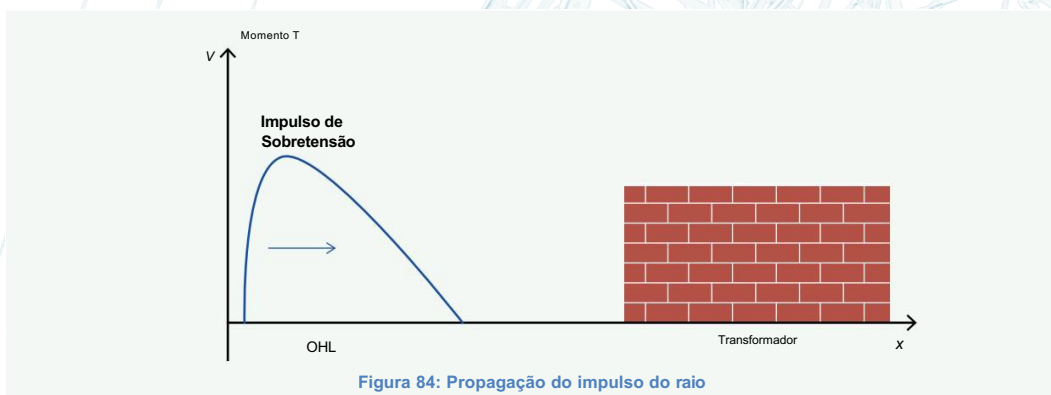


Figura 84: Propagação do impulso do raio

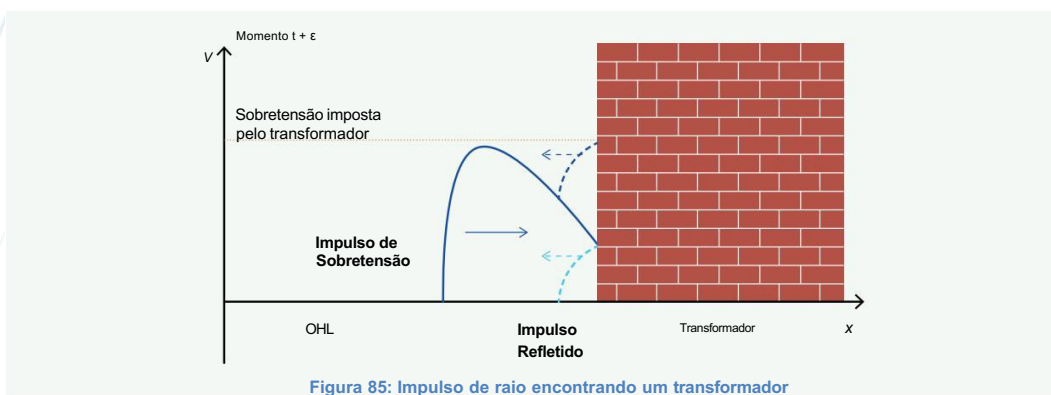


Figura 85: Impulso de raio encontrando um transformador

A mudança de impedância inclui todos os tipos de conexões, incluindo juntas de cabos, etc., bem como, por exemplo, a extremidade do condutor.

Anexo 3: Rompimento e Danos de Condutores

Estudo de caso de curtos na rede e deterioração de condutores na Malásia em redes cobertas e compactas:

Este estudo (2015-2016) fornece algumas informações sobre o impacto da deterioração dos condutores.

As taxas de descargas disrruptivas foram baseadas no modelo EGM e no método de cálculo LIOV.

O número esperado de curtos foi baseado em estatísticas e os parâmetros das redes foram baseados nas redes estudadas neste contexto.

O estudo cobriu muitos casos de configurações de rede e densidade de raios.

Neste anexo nos concentramos no seguinte caso:

- Rede coberta de 11 kV, cabos com isolamento XLPE
- Rede equipada com cabo blindado
- Densidade de raios de 30 descargas/ km²/ ano
- Sem blindagem natural
- Um poste a cada 50 m

Segundo as estatísticas, a probabilidade de ocorrer um surto por impulso do raio transmitido pela rede devido a o impacto de um raio direto (DLS) em um poste e o cabo se deteriorar dentro de um ano é de 6,52%. Uma vez deteriorado o condutor, o seu nível de isolamento cai, aumentando esta probabilidade para 11,52%. Assim, o número de interrupções aumenta ao longo dos anos porque cada vez mais cabos se deterioram.

A Figura 86 mostra o número de postes com condutores deteriorados e o número de desligamentos ao longo dos anos. **Após 10 anos, o número de suetos por impulsos do raio pela rede aumenta para mais de 38% e quase metade dos postes apresentam cabos deteriorados.**

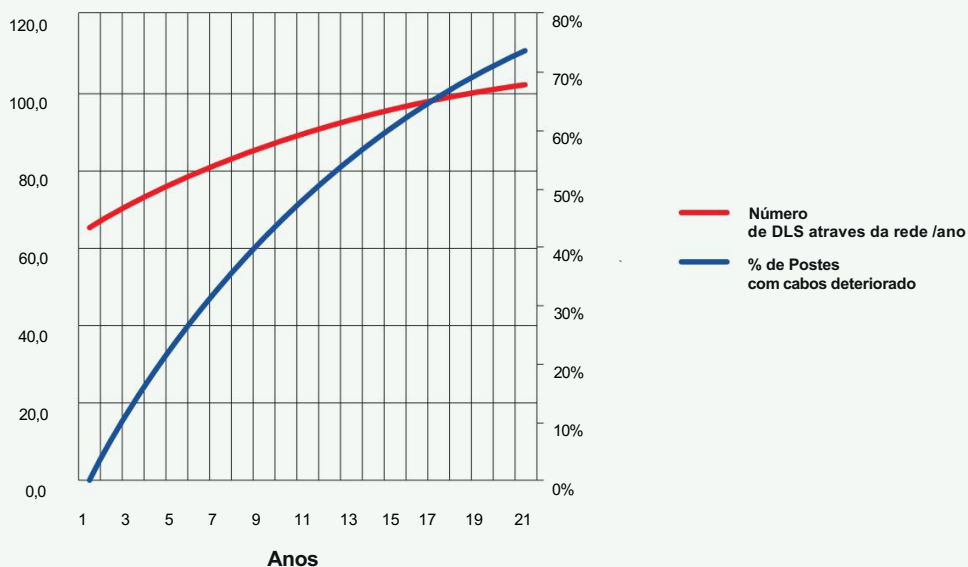


Figura 86: Deterioração da rede ao longo dos anos devido a um DLS

É importante observar que apenas a deterioração do condutor é considerada na avaliação do número de surtos por impulsos do raio pela rede. Outros fatores podem aumentar este número ao longo dos anos (ver Secção 2.4.3). Além disso, esta simulação considera apenas a primeira fase de deterioração apresentada na Figura 29 na Secção 2.4.3 (após um surto). Isto significa que, na realidade, a deterioração dos cabos é ainda pior porque, uma vez que um condutor tenha transmitido um surto causado por impulso do raio duas vezes, a probabilidade de encontrar outro é maior do que um cabo que tenha transmitido um surto apenas uma vez.

Concluindo, a deterioração dos condutores é uma questão real a ser considerada ao projetar uma rede aérea (OHL).

Anexo 4: Determinação de Gap dos Centelhadores

O método descrito para determinar o Gap dos Centelhadores para um LLPD é apresentado abaixo. Tomamos o exemplo de i-LLPDs equipados em uma rede de 24 kV (tensão nominal da rede (tensão fase a fase): $U_n = 24$ kV) em um isolador com tensão de desruptiva crítica (CFO) de 125 kV. A Figura 87 ilustra esse método.

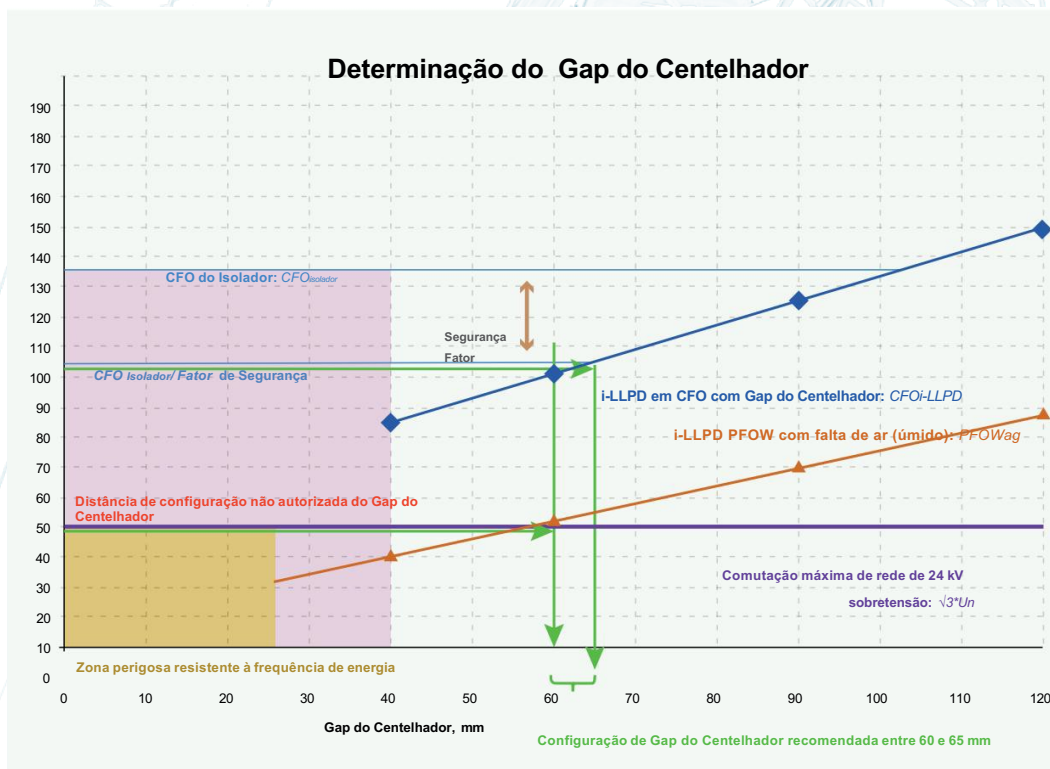


Figura 87: Determinação do Gap do Centelhador

Comprimento máximo do Gap dos Centelhadores:

O Gap do Centelhador não deve ser muito grande, caso contrário a operação de tensão do LLPD será muito alta e a sobretensão do raio causará descargas no isolador, tornando o LLPD inútil.

Em primeiro lugar, precisamos distinguir CFO do GAP do LLPD (CFO_{LLPD}^{gl}) e a tensão disrruptiva crítica CFO do ar. Esses dois valores são representados como:

$$CFO_{LLPD}^{ag} \approx CFO_{LLPD}^{gl} + ALIF * l \quad (1)$$

Onde:

$ALIF$ é a tensão de ruptura do ar em kV/mm na frequência de impulso do raio

l é o comprimento do Gap do Centelhador em mm

O CFO do LLPD deve ser inferior ao CFO de qualquer componente que o LLPD esteja protegendo. Na maioria dos casos, basta considerar o CFO do isolador. Então devemos garantir, ver (figura 87):

$$CFO_{LLPD}^{ag} \leq CFO_{insulator} \quad (2)$$

Fator de
segurança
:

A IEC 60071-2 recomenda um fator de segurança entre o CFO do equipamento e a sobretensão que ocorrerá, ou seja, entre a tensão de centelhamento do LLPD. Este fator de segurança, Sf , é definido pela norma IEC em 1,15. No geral, devido à variabilidade da centelha do Gap do Centelhador, a Streamer recomenda que o fator de segurança seja definido em 1,3.

Então devemos garantir, ver (figura 87):

$$CFO_{LLPD}^{ag} \leq CFO_{insulator} / Sf \quad (3)$$

Conclusão:

De acordo com (1), (2) e (3), o comprimento do Gap do Centelhador l deve verificar:

$$l \leq \frac{\left(\frac{CFO_{insulator}}{Sf} - CFO_{LLPD}^{gl} \right)}{ALIF} \quad (4)$$

Comprimento mínimo do Gap do Centelhador:

O Gap do Centelhador não deve ser muito curto, caso contrário, o nível de isolamento será muito baixo e ocorrerão centelhas do LLPD devido à tensão e sobretensão da rede. É importante notar que estes valores devem ser considerados na frequência industrial. Precisamos então determinar a maior **sobretensão na frequência de potência** que pode ocorrer entre a fase e a terra (de acordo com a posição do LLPD). A Figura 88 mostra diferentes tensões ocorrendo em uma rede e a maior sobretensão na frequência de potência que pode ocorrer é, portanto, $\sqrt{3} * U_n$:

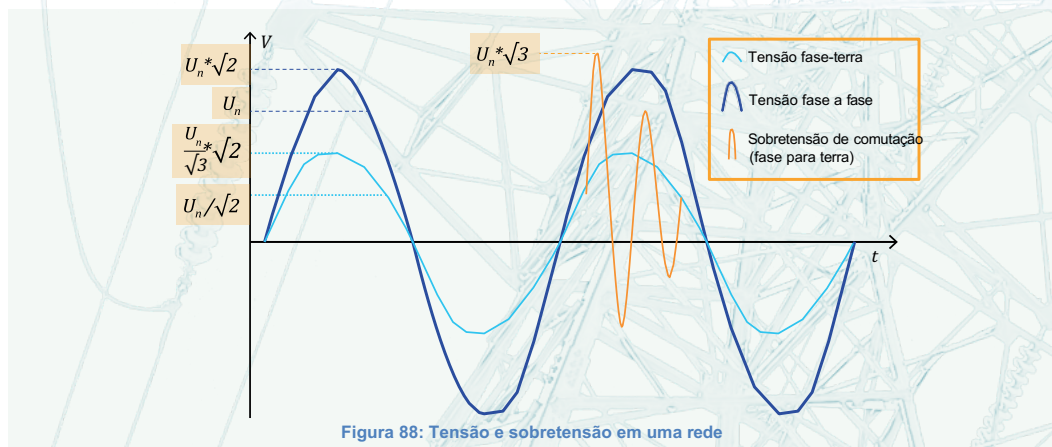


Figura 88: Tensão e sobretensão em uma rede

Devemos também definir o PFOV (Power Frequency Overvoltage Withstand) de um LLPD:

PFOV (Power Frequency Overvoltage Withstand), definição: tensão de frequência de potência que um LLPD pode suportar, sem produzir qualquer centelha, continuamente por um período de tempo indeterminado. Aqui é considerado em condições úmidas (que são mais restritivas).

Mais uma vez precisamos distinguir o valor da lacuna do LLPD (*PFOV_{gp}*) e do Gap do Centelhador (*PFOV_{ag}*).

O PFOV com Gap do Centelhador do LLPD deve ser então maior que a sobretensão máxima de frequência de energia que pode aparecer na rede. Assim deveríamos ter (ver Figura 87):

$$PFOV^{ag} \geq \sqrt{3} * U_n \quad (5)$$

Conforme descrito anteriormente, precisamos distinguir o valor da lacuna do LLPD (*PFOV_{gp}*) e do Gap do Centelhador (*PFOV_{ag}*). Esses dois valores são representados como:

$$PFOV^{ag} \approx PFOV^{gp} + A^{PF} * l \quad (6)$$

Onde:

A^{PF} é a tensão de ruptura do ar em kV/mm na frequência de descarga atmosférica

l é o comprimento do Gap do Centelhador em mm

Conclusão:

De acordo com (5) e (6), o comprimento do Gap do Centelhador *l* deve verificar:

(7)

Condições de umidade:

É claro que as características ambientais influenciam os cálculos, como condições úmidas ou secas.

A umidade influencia a tensão de ruptura do ar na frequência de descarga atmosférica (APF). Assim **consideramos o caso mais vinculativo das condições húmidas.**

Conclusão:

Este parágrafo mostra como determinar os Gaps dos Centelhadores mínimos e máximos possíveis para LLPDs. Globalmente, a determinação do **Gap do Centelhador depende de três fatores:**

-A tensão nominal (fase a fase) da rede: Un

-O CFO do componente a ser protegido: $CFO_{isolador}$

-O próprio LLPD: seu PFW sem intervalos: PFW^{gp} e seu CFO sem intervalos: CFO_{LLPD}^{gl}

Assim, a Streamer fornece tabelas de Gap do Centelhador em relação a esses três fatores.

Anexo 5: A Tecnologia Streamer em Comparação aos Pára-raios

Para-raios

As definições e informações relativas aos para-raios foram fornecidas na seção 2.4.5 (definição e ameaça de raios) e seção 3.3.5 (tensão residual e curvas de tensão/corrente).

Consulte também estas seções.

Os para-raios (como d-LLPDs) usam cabo terra para descarregar surtos de raios através do solo e para **proteger o equipamento contra a propagação e reflexão do impulso do raio**. Também pode ser usado para reduzir a quantidade de descargas disruptivas e estabelecimento de correntes de curto em uma rede, ver (referência [3]). Conforme explicado em [3], **em geral, nenhum para-raios pode sobreviver a um DLS**. Contudo, o compartilhamento de carga entre para-raios paralelos pode ser eficiente.

Para serem eficazes contra DLS e LIO, **os para-raios devem ser instalados três em um poste**. Eles podem ser instalados em cada poste (ou não), mas não devem ser espaçados mais do que um ou dois vãos de postes, conforme explicado na referência [3]: na verdade, a **eficiência dos para-raios diminui fortemente quando eles são espaçados** (mesmo que um vão de poste separado). Além disso, conforme indicado na referência [3], as taxas de descargas atmosféricas de um DLS ainda serão da ordem de 20%, mesmo com para-raios de alta resistência bem equipados.

Além disso, a **taxa de falhas dos para-raios deve ser levada em conta**. Para mais informações sobre para-raios e seu desempenho, consulte a referência [3].

Para-raios e LLPDs

A (tabela 26) mostra as capacidades de proteção dos para-raios e LLPDs. Se os LLPDs puderem ser comparados aos para-raios, é importante observar que, ao contrário dos para-raios, os LLPDs não podem ser usados para proteger a rede contra sobretensões de comutação, mas apenas contra descargas atmosféricas. Além disso, os LLPDs não podem proteger diretamente equipamentos como transformadores e cabos subterrâneos, mas podem proteger os para-raios que protegem esses equipamentos.

	Para-raios	LLPD do streamer
Princípio da Operação	O material não linear redireciona a descarga para o solo, evitando o estabelecimento de corrente de curto	Descarrega a sobretensão e evita a corrente de curto através do centelhador e das câmaras
Proteção contra sobretensão de comutação	✓	✗
Pode proteger equipamentos de rede diretamente, como: condutores, isoladores, cabos espaçadores	✓	✓
Pode proteger equipamentos de rede diretamente, como: transformadores, cabos subterrâneos	✓	✗ "(mas protege os para-raios que estão protegendo os equipamentos de rede)"
Pode ser usado para evitar o estabelecimento de corrente de curto na rede e preservar os transformadores	✓	✓
CONCLUSÃO	Pode ser usado para qualquer sobretensão	Especializada em proteção contra raios nas redes aéreas (OHL)

Tabela 26: LLPDs e para-raios, operações

Embora os para-raios possam ser usados para finalidades mais diversas, os LLPDs são mais eficientes em termos de proteção de redes contra raios. A (tabela 27) apresenta e compara algumas características de cada produto.

Produtos	Para-raios leves e normais equipados em cada poste, três para-raios por poste	Para-raios para serviço pesado equipado em cada poste, três para-raios por poste	i-LLPD com corrente de descarga nominal de 10 kA
Características de resistência elétrica e proteção			
Corrente de descarga nominal: 8/20 μ s (ver Seção 3.3.2)	5 kA **	10 ka**	10 kA
Suporta impulso de alta corrente: 4/10 μ s (ver Seção 3.3.2)	65 kA** (serviço normal) 45 kA** (serviços leves)	100 ka**	65 kA
Capacidade de descarga atmosférica: 200 μ s (ver seção 3.3.2)	0,5°C*	0,8°C*	2,4°C
Classe	1**	1 ou 2**	2
Proteção contra DLSs	80% do tempo com para-raios reforçados equipados em cada poste com aterramento adequado**		30% do tempo*
Resistência de DLSs (sem cabo blindado)	83% a 0% do tempo**	88% a 67% do tempo**	100% do tempo*
Proteção contra LIOs	100% do tempo com para-raios equipados em cada poste com aterramento adequado		99% do tempo*
Instalação e manutenção			
Resistência de paso necessária	1 a 10 Ohms		Até 130 ohms
Hora de instalar/produto	80 a 100 minutos		15 a 20 minutos
Instalação em redes antigas	Difícil		Fácil
Equipamento adicional necessário	Aterramento, cabo de aterramento, encaixe de braço transversal, conectores, cabos		Encaixe de braço da cruzeta, braçadeira de perfuração
Manutenção	Todos os anos: verificação do passo		Uma verificação visual por ano
Taxa anual de falha do produto (em áreas com 10 raios nuvem-solo por km ² por ano)	4%*	2%*	0%*
Dissipação de energia	Pequena		0%

Tabela 27: Características dos LLPDs e para-raios

Conforme mostrado na Tabela 27, os LLPDs da Streamer podem suportar um DLS muito melhor. Na verdade, conforme explicado na Seção 3.3.2, os LLPDs passaram no teste de “capacidade de descarga atmosférica”, que é muito mais adaptável para avaliar a resistência a uma DLS. Para-raios seguindo a norma IEC 60099-4 testes (testes de “suportação de impulso de alta corrente”) foram projetados para eventos de raios em subestações e não na rede (veja a próxima parte do Anexo 6 para mais informações).

Conclusão:

Os LLPDs da Streamer **são mais adaptáveis para proteger redes contra raios**, mas não podem completar a tarefa de evitar sobretensões de comutação ou proteger diretamente equipamentos como transformadores e cabos subterrâneos, como para-raios. Assim, **ambos os produtos devem ser utilizados em conjunto para garantir uma protecção ótima**. Na verdade, os d-LLPDs podem ser usados para proteger para-raios em subestações e perto de equipamentos como transformadores e cabos subterrâneos (ver Seção 4.3.2). Essa combinação de produtos proporciona então uma proteção eficiente.

Para-raios e norma IEC 60099-4

Por que a norma IEC 60099-4 inclui apenas um teste de condicionamento de raios de impulsos de 4/10 e 8/20 μ s.

As sobretensões de origem atmosférica em subestações podem ocorrer a partir de três fontes:

1. Descarga direta na rede aérea (DLS) próxima à subestação
2. Sobretensão induzida por raio na rede (LIO)
3. Descarga direta na rede (DLS) na subestação

1. Descarga direta na rede aérea DLS na rede aérea próxima à subestação

Como resultado da descarga direta na rede (DLS), uma sobretensão na rede aérea próxima à subestação tem uma duração bastante curta e uma amplitude muito menor e pode ser claramente comparada ao impulso nominal de 8/20 μ s.

A duração é bastante reduzida devido à descarga dos postes perto de onde o raio atingiu diretamente a rede. Na verdade, neste caso, quando um raio atinge a rede aérea, devido à sobretensão excessiva, ocorrerá uma descarga elétrica no isolador e grande parte dele será descarregada através do poste (no caso de postes condutores). No caso em que a descarga atmosférica através do “primeiro” poste não reduziu significativamente a sobretensão, o isolador subsequente no poste seguinte sofrerá descargas atmosféricas e alguma parte será descarregada através dele, e assim sucessivamente até a subestação.

2. Sobretensão Induzida por descarga atmosférica na rede (LIO)

A sobretensão induzida é muito inferior à da descarga atmosférica direta e sua duração é de cerca de 15 μ s.

3. Uma descarga direta (DLS) na subestação

Este caso é bastante raro e as subestações geralmente são protegidas contra descargas atmosféricas, o que reduz bastante a sobretensão em seus equipamentos.

Conclusão:

Os testes da norma IEC 60099-4 foram projetados para sobretensão de raios em subestações, e não para sobretensão de rede. Subestações onde a duração da sobretensão atmosférica não excede 30 μ s representam uma hipótese realista.

Para-raios e tensão residual

A tensão residual é um bom critério para definir o nível de proteção de um para-raios. Na verdade, vamos considerar um para-raios perfeito com uma tensão residual de 400 kV, submetido a um impulso atmosférico padrão 8/20. O para-raios atuará como um circuito aberto até que sua tensão suba para 400 kV, então ele atuará como um condutor perfeito (veja a Figura 89 para a curva tensão/corrente de um para-raios perfeito). Assim, a tensão aplicada ao componente a ser protegido não ultrapassará 400 kV em condições normais.

Na referência [15], a relação *tensão residual/ MCOV* (onde MCOV significa “Tensão Máxima de Operação Contínua”) é considerada um bom critério para definir o nível de proteção de um para-raios: quanto mais a relação for próxima de 1, melhor a proteção. Vamos considerar um para-raios clássico, a Figura 90 mostra sua curva tensão/corrente. Na verdade, quanto mais próximo o MCOV e a tensão residual, mais perfeito é o para-raios e mais ajustável é a proteção.

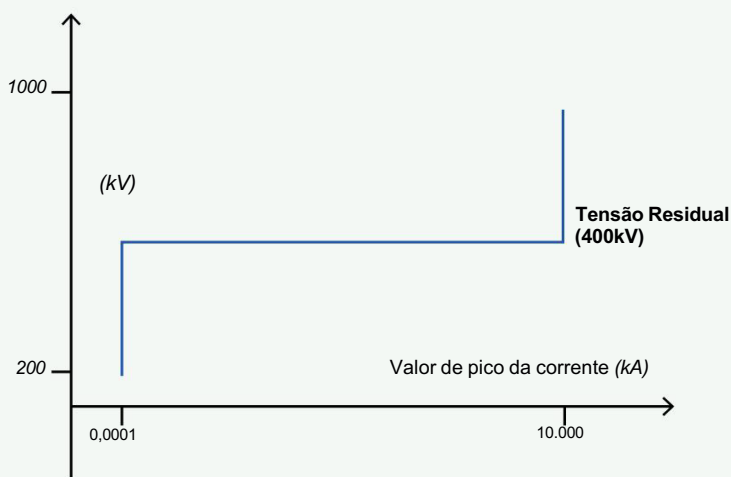


Figura 89: Curva tensão/corrente de um para-raios perfeito

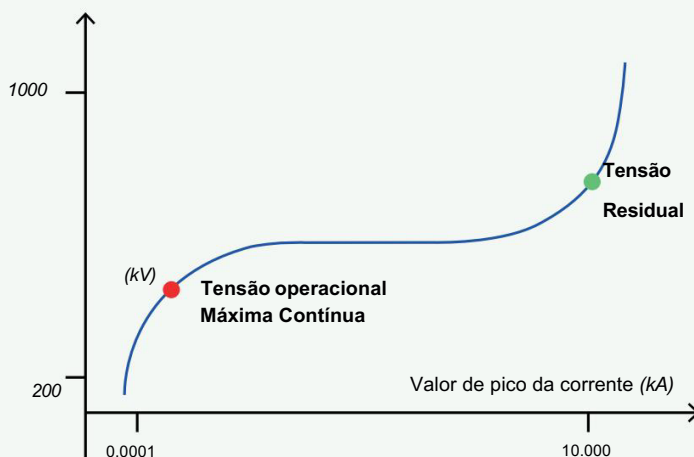


Figura 90: curva tensão/corrente de um para-raios

Anexo 6: A Tecnologia Streamer em Comparação a Blindagem / Aterramento / Cabos de Terra

Cabos de aterramento, terra e blindagem

Cabos de aterramento e terra:

Os cabos de aterramento e terra são o mesmos elemento. Para **equilibrar a resistência de passo ao longo da rede**, as concessionárias usam cabo de aterramento. Na raiz, o cabo de aterramento é projetado para uniformizar o curto através da terra ao longo da rede, para que o relé de disparo dispare em valores previsíveis e garanta a segurança de pessoas e equipamentos.

O cabo de aterramento pode ser instalado por seções (por exemplo, em locais onde a resistividade do solo é alta), ao longo de toda a rede ou próximo a uma subestação. Para funcionar corretamente, o cabo de aterramento é **aterrado separadamente**, através de haste própria de aterramento, por exemplo, a cada três a cinco postes em uma rede de MT com distância padrão (30 a 50 m) entre os postes.

Cabos com blindagem:

O cabo de aterramento pode ser instalado acima ou abaixo da rede. Quando instalado acima da rede também tem a função de melhorar o desempenho da proteção contra raios da rede, sendo por isso chamado de cabo com blindagem.

O cabo com blindagem nas redes de alta e média tensão tem uma função principal: Capturar **o raio que atinge diretamente a rede (DLS)** que, de outra forma, atingiria diretamente uma das fases. Quando um raio atinge diretamente o cabo com blindagem, a descarga percorre o cabo e é liberada nos locais de aterramento.

Sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO) e cabo com blindagem/ cabo de aterramento:

Um exemplo citado na referência [16] mostra uma **redução nos valores de pico da sobretensão induzida por descarga atmosférica na rede (LIO)** devido à presença de cabos de blindagem na faixa de 25 a 35%. Na verdade, o cabo blindado fornece um bom caminho para o aterramento da LIO.

Na referência [3] é explicado que **o cabo com blindagem precisa estar próximo dos cabos de fase** para obter melhor proteção. O cabo com blindagem ou cabo de aterramento deve estar localizado entre 0,5 e 1 m dos condutores. A blindagem ou cabo de aterramento funciona de maneira semelhante, desde que esteja a 0,5 a 1 m dos condutores.

Descarga atmosférica direta na rede (DLS) e cabo com blindagem:

Como visto na (Seção 2.1), o cabo blindado e uma descarga atmosférica direta na rede (DLS) leva a descargas reversas. Além disso, a eficiência para uma DLS pode ser vista principalmente como uma questão de resistência da passo, conforme explicado no Anexo 1: Uma **resistência elevada de passo ou uma ausência de ligação à terra em todos os postes conduzirão a uma elevada taxa de curto circuito de retorno (BFO)**, ver (Anexo 1). Assim, **o cabo com blindagem não é eficiente com alta resistência de base (e com solos de alta resistência) e precisa ser aterrado em todos os postes**.

Além disso, para capturar um descarga atmosférica direta na rede (DLS) de forma eficiente, **é necessário aumentar a altura do poste**. Portanto, o ângulo de blindagem cobre os cabos de fase (mais informações são fornecidas na referência [3] sobre o ângulo de blindagem). Tal aumento na altura do poste terá a seguinte consequência: **Atrairá mais DLS para a estrutura**.

É portanto importante manter um **bom nível de isolamento entre o cabo com blindagem e os condutores**.

Conforme concluído na referência [3]: “Deve-se ter cuidado para manter baixa resistência de passo e altos níveis de isolamento para evitar taxas de descargas anormalmente altas nos circuitos de distribuição”.

Consulte a referência [3] para obter mais informações sobre a proteção proporcionada pelo cabo blindado.

LLPDs e cabos com blindagem da Streamer

LLPDs comparados ao cabo com blindagem:

A Tabela 28 compara o cabo com blindagem e os i-LLPDs do Streamer.

Solução	Cabo com blindagem	i-LLPDs
Instalação		
Instalação em novas redes	Fácil, mas precisa de aterramento e poste de altura maior	Fácil em redes antigas ou novas
Instalação em redes antigas	Difícil	
Tempo de instalação	80 min / poste equipado	15 a 20 min / poste equipado
Resistência de passo necessária de 1 a 30 Ohm (em relação ao CFO da rede)*		Até 130 ohms
Características de proteção		
Proteção contra DLSs	80% do tempo*	30% do tempo**
Resistência a DLSs	100% do tempo**	100% do tempo**
Proteção contra LIOs	25% a 35% do tempo	99% das vezes**
Custos		

O cabo com blindagem é cerca de 15% mais caro que os LLPDs para uma resistividade média do solo de 30 a 50 Ohm

*Com um CFO de 350 kV, uma resistência de 30 Ohm levará a uma taxa de descargas elétricas de cerca de 20% (ver Figura 82 no Anexo 1)

Tabela 28: LLPDs e cabo com blindagem

LLPDs e cabo com blindagem, interações:

LLPDs e cabos com blindagem são elementos compatíveis no projeto de rede. Porém, com a presença de cabo com blindagem, como a maioria das descargas elétricas são descargas reversas provenientes de DLS, o **impulso de corrente é muito maior do que no caso do LIO**. Além disso, como o cabo blindado fornece um caminho de baixa resistência, a **corrente de curto será maior**. Portanto, os i-LLPDs podem não ter uma corrente máxima de descarga atmosférica de extinção de curto suficiente para extingui-la de forma eficiente. Neste caso particular, os d-LLPDs podem ser equipados conforme explicado na (Seção 3.2.2, no caso de uso 1.1.)

Conclusão:

O cabo com blindagem continua sendo em relação a raios ou outros fins, um recurso interessante e benéfico para uma rede. Nas redes de MT, devido ao seu desempenho inferior em LIO e ao fato de que LIO pode ser muito mais frequente que um DLS, ver (seção 2.2), o desempenho geral dos i-LLPDs é muito superior ao do cabo com blindagem.

Cabo com blindagem e LLPD podem ser usados juntos para fornecer melhor proteção contra raios em geral.

www.streamer-electric.com



Ostreamer

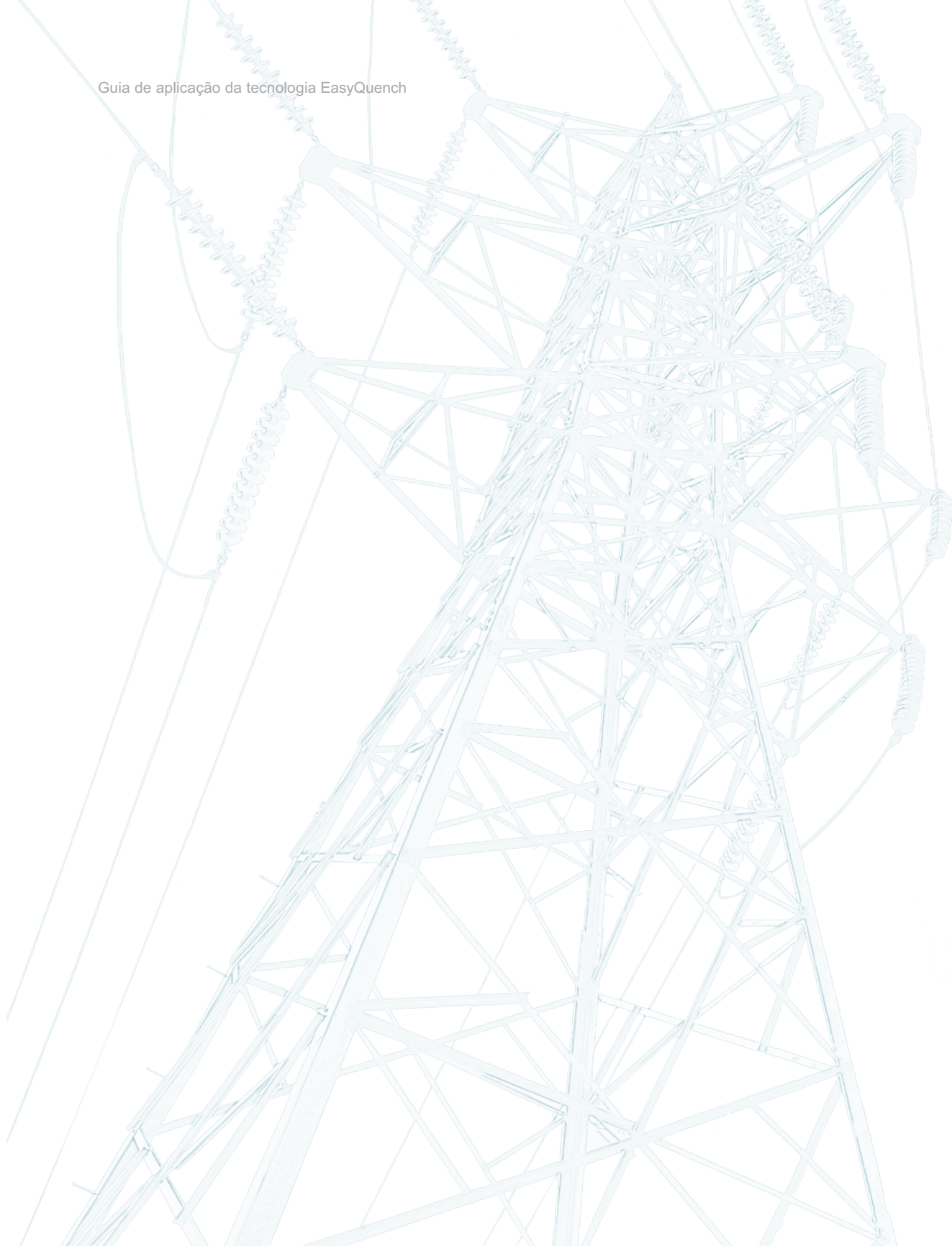


Distribuidor Autorizado no Brasil



CYG 高能





Distribuidor Autorizado no Brasil

