

## Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas

*A resiliência das Linhas de Transmissão (LTs) também é testada pelo seu desempenho frente às descargas atmosféricas. A partir desta edição, trataremos deste assunto sob a coordenação do Eng. Eletricista Rafael Alipio, que é doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG e professor do CEFET-MG, onde coordena o Laboratório de Transitórios Eletromagnéticos (LabTEM). Possui ampla experiência em desempenho de linhas de transmissão e desenvolve pesquisas e consultorias técnicas na área.*



# Capítulo 1

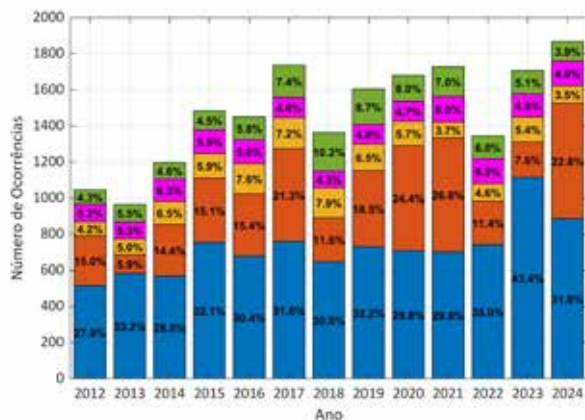
## Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: uma visão geral

A disponibilidade de energia elétrica é um dos pilares fundamentais do desenvolvimento socioeconômico de qualquer país. No Brasil, o setor energético desempenha um papel estratégico, especialmente diante do crescimento constante da demanda. Nos últimos anos, os leilões de transmissão têm acelerado a expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN), promovendo a construção de novas linhas de transmissão (LTs) de 230 kV ou tensão superior. Além das LTs de alta tensão, os níveis de subtransmissão, como 138 kV e 69 kV, são utilizados para transportar energia a distâncias moderadas e desempenham uma função essencial no suporte a subestações industriais, grandes consumidores e na distribuição local de energia.

As vastas dimensões do território brasileiro, combinadas com fenômenos climáticos extremos, como a alta incidência de descargas atmosféricas, e a necessidade de construção de linhas de transmissão

em regiões de alta resistividade, como áreas de relevo acentuado e próximas à costa litorânea, tornam as LTs particularmente vulneráveis. A figura 1 apresenta a contribuição das principais causas de desligamentos registrados entre os anos de 2012 e 2024, de acordo com dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [1]. Observa-se que, dentre as principais causas identificadas, as condições meteorológicas adversas – com destaque para o papel das descargas atmosféricas – são responsáveis pela maior parte das perturbações em LTs da rede básica. Os desligamentos de linhas de transmissão resultam em perdas econômicas, como a interrupção de processos produtivos industriais, e problemas sociais, incluindo o impacto no fornecimento de energia residencial e o comprometimento do funcionamento de sistemas de saúde e segurança nas grandes cidades.





**Figura 1 – Contribuição das principais causas de desligamentos em linhas de transmissão da rede básica registradas entre 2012 e 2024. Para referência, o número total de perturbações em cada ano foi: 1848 (2012), 1760 (2013), 1976 (2014), 2355 (2015), 2237 (2016), 2407 (2017), 2105 (2018), 2272 (2019), 2381 (2020), 2358 (2021), 2122 (2022), 2573 (2023) e 2801 (2024)**

O cálculo da taxa de desligamentos de uma LT por descargas atmosféricas é realizado antes de sua implantação para verificar se, considerando os valores de distância de segurança e a resistência de aterramento média propostos no estudo de coordenação de isolamento, essa taxa atende aos limites máximos permitidos pelos órgãos reguladores – vide Tabela 1 [2]. No caso dos níveis de subtransmissão, as taxas de desligamento são definidas pelo administrador da linha e dependem do nível de confiabilidade requerido. A taxa de desligamento de uma LT é monitorada durante a sua operação com o objetivo de implementar, quando superados os limites de qualidade, ações de melhoria de desempenho.

**Tabela 1 – Desempenho de uma LT aérea frente a descargas atmosféricas**

Tipo de LT	Classe de tensão (kV)	Número máximo de desligamentos de um circuito por 100 km por ano	
		Por falha de blindagem	Total
LTA-CA	≥ 345	10–2	1
	230	10–2	2
LTA-CC	Todas	10–2	1

Apesar da relevância do tema para os setores elétrico e industrial, o assunto ainda gera discussão entre profissionais da área, e alguns conceitos fundamentais para a solução de problemas relacionados à proteção contra descargas atmosféricas continuam não sendo plenamente compreendidos. A abordagem multidisciplinar exigida pelo tema, sua complexidade estatística e a evolução constante das práticas e tecnologias de proteção contribuem significativamente para esses desafios. Por essa razão, o presente conjunto de fascículos a ser publicado sobre o tema tem

como objetivo oferecer uma abordagem simultaneamente abrangente e prática. Serão explorados: os principais passos no cálculo de desempenho de LTs, os parâmetros críticos – incluindo aqueles obtidos por medições –, as ferramentas computacionais utilizadas e as melhores práticas para melhoria/adequação do desempenho das LTs, tanto convencionais quanto não convencionais.

### EFEITOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As descargas atmosféricas que atingem as linhas de transmissão podem resultar na ruptura do isolamento dessas linhas, ocasionando interrupções no fornecimento de energia. Em condições mais severas, podem também causar danos permanentes aos seus componentes. No entanto, a maior preocupação para a operação das linhas está relacionada às interrupções no fornecimento de energia elétrica. Este tema será o foco principal da discussão, embora aspectos relacionados a possíveis danos também sejam considerados em contextos específicos. Cabe ainda mencionar que, embora as linhas de transmissão sejam geralmente restabelecidas quase imediatamente pelos religadores automáticos dos sistemas de proteção, os órgãos fiscalizadores monitoram os indicadores de qualidade. Dessa forma, um desempenho não satisfatório frente a descargas atmosféricas pode resultar em processos de fiscalização e até mesmo na aplicação de multas.

Para avaliar o desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, é necessário analisar três principais tipos de interação [3]:

1 - Falha de blindagem. Esse fenômeno ocorre quando uma descarga atinge diretamente os condutores fase, seja porque a linha não está protegida por cabos de blindagem ou porque a descarga transpõe os cabos de blindagem instalados (em outras palavras, quando os cabos de blindagem falham em blindar os condutores fase). Caso a corrente da descarga que “vazou” a blindagem produza uma sobretensão suficiente para provocar a ruptura do isolamento, é estabelecido um arco elétrico conectando o condutor fase à estrutura aterrada. A taxa de falha de blindagem é determinada considerando a presença, posição e configuração dos cabos de blindagem em relação aos condutores fase. Para um arranjo específico, essa taxa corresponde ao número de descargas que atingem diretamente os condutores fase com corrente suficiente para provocar a ruptura do isolamento.

2 - Backflashover. Nesse caso, a descarga atinge os cabos de blindagem ou a torre de transmissão. A corrente é direcionada para o sistema de aterramento de pé de torre e dispersada para o solo, produzindo uma elevação de potencial que é transmitida para a torre e suas mísulas, resultando em sobretensões nas cadeias de isoladores. Se a sobretensão provocar a ruptura do isolamento, configura-se o fenômeno de backflashover, com o estabelecimento de um arco elétrico conectando a estrutura aterrada e o condutor fase. A taxa de backflashover é

influenciada, sobretudo, pela resistência de pé de torre e nível de isolamento das cadeias de isoladores, sendo calculada com base no número total de descargas que atingem os componentes aterrados da linha e que provocam sobretensões com amplitude e taxa de crescimento suficientes para romper o isolamento. O backflashover é o principal mecanismo de desligamento por descargas atmosféricas para LTs de até 500 kV.

3 - Tensão induzida. Descargas atmosféricas que atingem o solo ou objetos próximos à linha podem induzir sobretensões nos condutores fase devido ao acoplamento entre os campos eletromagnéticos gerados pela descarga e os condutores da linha. No entanto, essas sobretensões raramente excedem 250–300 kV e, por isso, geralmente não representam um risco significativo para linhas de transmissão, que possuem níveis de suportabilidade a impulso superiores a 350 kV. Esse tipo de sobretensão é mais relevante para sistemas de média e baixa tensões.

### METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA TAXA DE DESLIGAMENTOS DE LTS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Uma visão geral da metodologia para cálculo da taxa de desligamentos de uma linha de transmissão devido a descargas

atmosféricas é apresentada na Figura 2. Esse processo é aplicado separadamente para as falhas de blindagem e para os desligamentos devido a backflashover. A soma dessas taxas resulta na taxa total de desligamentos por descargas atmosféricas da linha. De forma simplificada, a metodologia pode ser descrita conforme a seguir.

A taxa de desligamentos da linha (representada pela Caixa A na Figura 2) corresponde, essencialmente, ao número de descargas atmosféricas que atingem a linha e que provocam a ruptura do isolamento. Para calcular essa taxa, o primeiro passo é determinar o número total de descargas atmosféricas que atingem a linha (Caixa B) e, em seguida, avaliar a porcentagem dessas descargas que resultariam na ruptura do isolamento da linha (Caixa C). O cálculo do número de descargas que atingem a linha é realizado pelo produto da área de atração ou exposição da linha (Caixa D) pela densidade de descargas da região (Caixa E). A probabilidade de ruptura do isolamento é determinada por dois fatores principais: a amplitude e a taxa de crescimento das sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas, e a suportabilidade das cadeias de isoladores da linha. As sobretensões geradas pelas descargas dependem, fundamentalmente, das propriedades da corrente de descarga e das características da linha de transmissão. Considerando

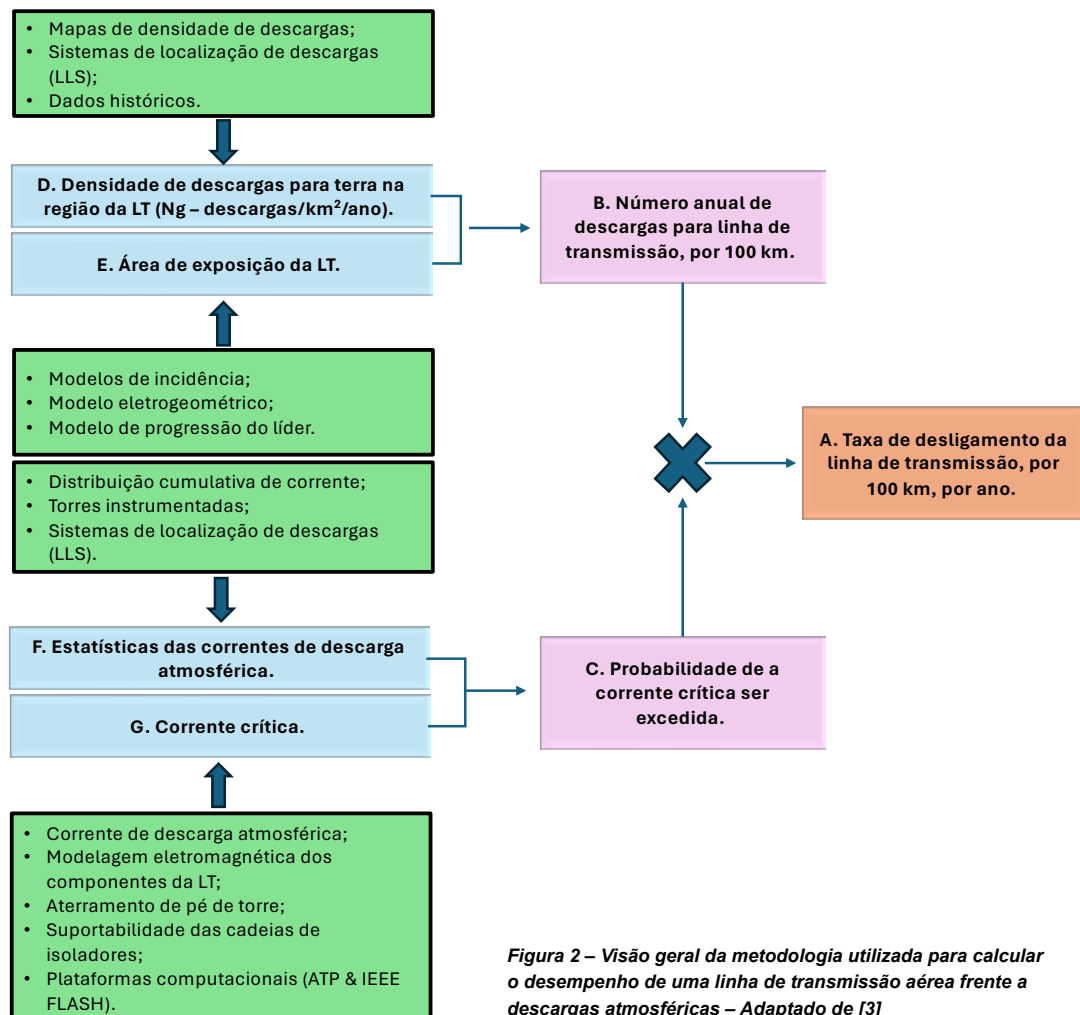


Figura 2 – Visão geral da metodologia utilizada para calcular o desempenho de uma linha de transmissão aérea frente a descargas atmosféricas – Adaptado de [3]

# Cobrecom

## Sua marca de **confiança**



Quando falamos de fios e cabos de cobre, trabalhar com uma marca de confiança não pode ser uma opção, e sim regra, já que apenas um erro pode ser fatal.

Escolha uma marca com história sólida, controles de qualidade nos processos de fabricação, garantia de pureza do cobre e muito mais. **Escolha Cobrecom.**



Acesse  
[www.cobrecom.com](http://www.cobrecom.com)  
ou escaneie o código  
para mais informações.

essas características, simulações computacionais são realizadas para determinar a menor corrente capaz de causar a ruptura do isolamento. Essa corrente – ou sua amplitude – é conhecida como “corrente crítica” (Caixa G). Finalmente, a probabilidade de a corrente de uma descarga que atinge a LT exceder esse valor crítico é obtida por meio de funções de distribuição estatística (Caixa F).

#### OS DADOS DE ENTRADA E SUBPROCESSOS DESTA METODOLOGIA SÃO:

- **Número de descargas incidentes na linha.** Esse valor é determinado calculando a área de atração ou de exposição, dentro da qual as descargas atmosféricas podem atingir a linha. Essa área de atração é então multiplicada pela densidade de descargas para a terra na região para calcular o número total de descargas que atingem a linha. A densidade de descargas é expressa em descargas/km<sup>2</sup>/ano (Ng, em que N indica 'number' e o subscrito g indica 'ground'). Para determinar a área de atração da linha, tipicamente, o Modelo Eletrogeométrico (MEG) tem sido amplamente utilizado, pois oferece uma maneira simples de estimar o número de descargas que atingem os cabos de blindagem e os condutores fase. No entanto, métodos mais detalhados, como os Modelos de Progressão do Líder (LPM, do inglês Leader Progression Model), são capazes de simular o desenvolvimento do canal descendente por passos consecutivos e de determinar o ponto de impacto da descarga atmosférica. A frequência de ocorrência de descargas atmosféricas aplicável ao sistema de transmissão é obtida por meio dos chamados mapas de densidade de descargas. Fontes de dados sobre a densidade de descargas incluem Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas (LLS, do inglês Lightning Location System) e outras bases de dados históricas. A determinação da área de exposição de linhas de transmissão e uma discussão sobre mapas de densidade de descargas, incluindo exemplos, serão abordadas em um fascículo específico desta série.

- **Corrente crítica.** O cálculo da corrente crítica é realizado utilizando técnicas de modelagem de transitórios eletromagnéticos de alta frequência. A descarga atmosférica é modelada como uma fonte de corrente, cuja amplitude e forma de onda determinam as sobretensões resultantes, e os componentes da LT são representados por seus modelos de alta frequência. A ocorrência da ruptura do isolamento da LT depende de sua suportabilidade, que é determinada pelas características das cadeias de isoladores, como o número de discos, o diâmetro e o passo entre eles. O cálculo das sobretensões atmosféricas e posterior determinação da corrente crítica é realizado utilizando plataformas de simulação de transitórios, como o Alternative Transients Program (ATP), ou plataformas dedicadas ao cálculo do desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas, como o IEEE FLASH. As discussões sobre o processo de cálculo da corrente crítica, os parâmetros das correntes de descarga importantes para a avaliação do desempenho de LTs, e as plataformas computacionais utilizadas serão abordadas em fascículos específicos desta série, incluindo exemplos práticos de cálculo.

- Sistema de aterramento de pé de torre. O cálculo da corrente crítica no fenômeno de backflashover – que constitui o principal mecanismo de desligamento por descargas atmosféricas para LTs

de até 500 kV – é fortemente influenciado pelo valor da resistência de pé de torre. Dada a importância do aterramento de pé de torre, fascículos específicos desta série serão dedicados à discussão do processo de medição de resistividade do solo ao longo do traçado da LT, do impacto da resistência de pé de torre nas sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores, e dos desafios envolvidos na medição da resistência de aterramento de pé de torre.

- A redução da resistência de pé de torre constitui a principal prática para melhorar o desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas, considerando o mecanismo de backflashover. No entanto, no caso de linhas que atravessam regiões de solo de elevada resistividade, essa prática pode ser tecnicamente inviável. A discussão de técnicas convencionais para a melhoria do desempenho de LTs, como a otimização do sistema de aterramento, e de técnicas não convencionais e complementares – aplicáveis, por exemplo, a regiões de alta resistividade –, como o uso de para-raios de óxido de zinco e a instalação de cabos underbuilt, será abordada em fascículo específico desta série.

- **Probabilidade de que a corrente associada à descarga atmosférica exceda a corrente crítica.** Essa probabilidade é calculada com base em distribuições estatísticas de correntes de descargas atmosféricas e no valor da corrente crítica previamente determinado. A descrição das distribuições que definem a probabilidade de uma determinada amplitude de corrente ser excedida – incluindo referências internacionais e nacionais –, a origem dessas distribuições (torres instrumentadas para medição de corrente ou sistemas LLS) e exemplos de aplicação serão o foco de um fascículo específico desta série.

#### COMENTÁRIOS FINAIS

O cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é uma tarefa desafiadora, que exige uma abordagem multidisciplinar e rigor técnico. Esse processo envolve hipóteses e simplificações, além de lidar com incertezas associadas a alguns dados de entrada.

Os fascículos desta série têm como objetivo oferecer uma abordagem prática e acessível, adequada às demandas do setor, sem abrir mão do rigor científico essencial ao tema. Serão explorados, de maneira abrangente, os diversos aspectos do cálculo de desempenho de LTs, incluindo os dados necessários, o impacto das incertezas relacionadas a esses dados nas estimativas de desempenho, e as principais práticas – convencionais e não convencionais – para a melhoria do desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas.

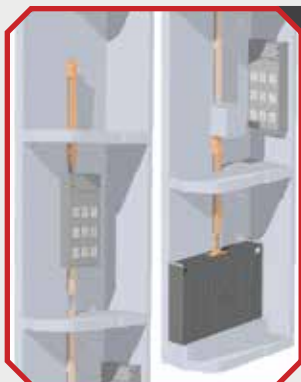
#### REFERÊNCIAS

- [1] Operador Nacional do Sistema (ONS), “<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/qualidade-do-suprimento-paineis.aspx>”, Operador Nacional do Sistema (ONS).
- [2] Operador Nacional do Sistema (ONS), “Procedimentos de Rede: Submódulo 2.7 - Requisitos mínimos para linhas de transmissão”, Rio de Janeiro, 2022.
- [3] Working Group C4.23, “CIGRE TB 839: Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines – New Aspects”, Paris, 2021.

# CONFIABILIDADE EM CADA CONEXÃO!

**GPB**  
GIMI POGLIANO  
BARRAMENTOS BLINDADOS  
DESDE 2014

Member Of  
*Asim* *PPE*  
SOLUÇÕES EM ENERGIA DESDE 1971 POGLIANO BRASIL



## Sistema de Medição Eletrônica Centralizada

É composto por quadro de distribuição compacto (QDC) ou cabine de barramentos, caixas de leitura local e remota, e caixas tipo MEC.



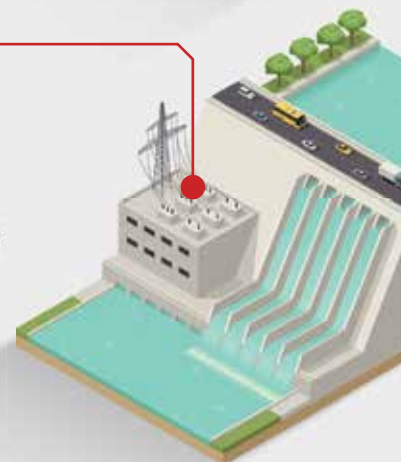
## Barramento Blindado de baixa tensão LINHA BX-E

Linhas elétricas pré-fabricadas com capacidade de 320A a 6.300A 3P+N+PE, em alumínio ou cobre, preparado para o monitoramento de temperatura e vibração. De acordo com a norma NBR-IEC-61.439.




## Barramento Blindado de média tensão LINHA BX-MT

É utilizado para o transporte de energia em 17,5kV, 24kV e 36kV, produzido de acordo com a norma NBR-IEC-62.271-200, grau de proteção IP 55, e fornecido nas correntes de 630A, 1250A e 2500A, para sistemas de fases segregadas e não segregadas.



 (11) 4752-9900

 vendas@gimi.com.br

 gimi pogliano

 gimipogliano.com.br

PARA MAIORES  
INFORMAÇÕES

