



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS**

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: UM
ESTUDO DO ESTADO DA ARTE.**

André Assaid Simão

DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: UM ESTUDO DO ESTADO DA ARTE.

Trabalho apresentada como requisito parcial para a Conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Me. Ítalo Arthur João Wilson Silva Meireles

Prof. Dr. Israel Teodoro Mendes

Prof. Me. Márcio Wladimir Santana

Nepomuceno, 14 de Dezembro de 2022

DEDICATÓRIA

A Deus, por ser extremamente paciente e piedoso comigo. Aos meus pais que foram companheiros em todas as horas, e aos meus amigos e professores, por me fazer companhia nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. MSc. Ítalo, pela oportunidade, paciência e dedicação, com palavras amigas em todas as etapas deste trabalho.

A minha família, pela confiança e motivação.

Aos amigos e colegas, pela força e pela vibração em relação a esta jornada.

Aos professores e colegas de Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Você vai longe na vida, a medida em que é afetuoso com os jovens, paciente com os idosos, tolerante com os fracos e com os fortes, por que em algum momento de sua vida você terá sido todos eles.”

George W. Carver

RESUMO

O principal fator responsável pelas interrupções não programadas nas linhas de transmissão aéreas de energia elétrica é causado pelo fenômeno natural das descargas atmosféricas, denotando sua importância em analisar o desempenho das linhas de transmissão frente a esse fenômeno da natureza. Este trabalho elucidará os principais resultados de uma pesquisa voltada para o estudo do estado da arte sobre o comportamento das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Com o objetivo de apresentar um compilado de métodos e modelos atualmente utilizados para caracterização do evento da descarga e também do comportamento da linha de transmissão.

Palavras-chave: Modelo; Descargas Atmosféricas; Desempenho de Linhas de Transmissão.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo Geral	8
2.2 Objetivos Específicos	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 Modelo de caracterização do fenômeno de descarga atmosférica.	9
3.1.1 Etapas da formação de uma descarga nuvem-solo.....	10
3.1.2 Modelagem do canal de descarga.....	11
3.1.3 Representação da onda de corrente pela curva de Heidler.....	12
3.2 Avaliação das funções que relacionam o nível cerâmico às densidades de descargas.	14
3.2.1 Parâmetros de Incidência geográfica.....	14
3.2.2 Parâmetros da onda de corrente.....	17
3.2.3 Estimativa do número de descargas atmosféricas que incidem em uma linha de transmissão.....	23
3.3 Comportamento da cadeia de isoladores mediante o <i>flashover</i> e <i>backflashover</i>.	27
3.3.1 Flashover	27
3.3.2 Backflashover	30
3.3.3 Parâmetros de influência na amplitude da sobretensão resultante.....	34
3.4 Modelos de incidência e de transitório.	36
3.4.1 Modelo eletrogeométrico (MEG)	36
3.5 Método para cálculo de desempenho de linhas frente a descargas diretas.	41
3.5.1 Abordagem determinística	41
3.5.2 Abordagem probabilística	42
3.6 Investigação dos modelos para cálculo de desempenho, no software <i>Flash</i> desenvolvido pela IEEE.....	43
4. METODOLOGIA	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 Parâmetros de incidência geográfica.....	46
5.2 Sensibilidade do T_d	47
5.3 Impedância do canal	50
5.4 Ângulo de referência	51
5.5 Modelo Eletrogeométrico	53
5.6 Análise comparativa em CIGRÉ e CEMIG	54

6. CONCLUSÃO.....	57
7. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	59
8. BIBLIOGRAFIA.....	60

1. Introdução

Para que a energia chegue até as fontes consumidoras, ela precisa ser transportada da usina por meio de linhas de transmissão (LT's). As LT's são basicamente constituídas por cabos condutores metálicos suspensos em torres, também metálicas, por meio de isoladores cerâmicos ou de outros materiais altamente isolantes. As linhas de transmissão possuem grande importância e precisam funcionar corretamente diante as adversidades que ela possa sofrer. Este trabalho abordará a descarga atmosférica, também conhecida popularmente como raio, que consiste em um intenso fluxo de elétrons, da nuvem para o solo, podendo atingir as linhas e torres neste percurso.

Entre os parâmetros utilizados para a verificação da qualidade de energia fornecida pelas concessionárias, denota-se o número médio de interrupções e a média de tempo para o restabelecimento do sistema após uma falta. A linha de transmissão é um componente elementar para a transferência da energia elétrica das fontes geradoras aos centros de carga, o desempenho relacionado a estes parâmetros, são um dos fatores cruciais na determinação da performance do sistema elétrico de potência.

A descarga atmosférica é um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e de curta duração. Diante deste fenômeno, faz-se necessário conhecer o desempenho das linhas de transmissão quando nela incide uma descarga atmosférica. Assim, esse trabalho tem a proposta de analisar quais são os métodos mais utilizados para o cálculo do desempenho de uma linha de transmissão, elucidando tipos de modelos para incidência e transitório para uma linha de transmissão, por exemplo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Devido à natureza aleatória das descargas atmosféricas e sua incidência sobre as linhas de transmissão, apresenta-se com um cenário com muitas variáveis para o cálculo de desempenho das LT's. Pretende-se destacar as modelagens mais consistentes para os componentes da linha, que são mais adequadas para representar as condições de incidência do evento transitório. A otimização de modelos e algoritmos de avaliação consistentes reflete diretamente na análise de desempenho das linhas e, conseqüentemente, na definição de práticas e procedimentos na área. (JÚNIOR, 2001).

2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, alguns objetivos específicos devem ser atingidos:

- a. Estudo das diversas metodologias, para o cálculo de desempenho, disponíveis na literatura.
- b. Estudo dos principais modelos para os componentes do sistema de potência em estudos de sobretensões atmosféricas.
- c. Estudos de sensibilidade em uma configuração típica de linha de transmissão, com relação aos parâmetros que afetam o desempenho de maneira mais expressiva.

3. Referencial Teórico

Para a compreensão do desempenho de descargas atmosféricas faz-se necessário conhecer os principais parâmetros que compõem este cálculo, que estão dispostos neste referencial, abarcados nos itens e subitens.

3.1 Modelo de caracterização do fenômeno de descarga atmosférica.

Uma descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica transitória de curta duração, com uma alta corrente associada, que usualmente atinge extensões da ordem de quilômetros [UMAN. 1984]. A descarga acontece quando as nuvens ficam carregadas eletricamente, gerando campos elétricos com intensidade suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar, gerando a ruptura. Dadas as diversas condições que propiciam este fenômeno, como tempestades de neves, dentre outros, será estudado as nuvens de tempestades (cúmulo-nimbus) (SOARES, 2001).

Há quatro categorias para as descargas atmosféricas considerando as nuvens de tempestade: descargas entre nuvem e estratosfera, dentro da nuvem, entre nuvens e entre nuvem e solo. Dados seus efeitos instalações terrestres, será estudado a descarga entre nuvem e solo. A descarga entre nuvem e solo pode ser identificada em quatro categorias. Segundo a direção de evolução do canal que faz o fechamento do percurso ionizado, podem ser descendentes ou ascendentes. Segundo a polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo por este percurso, negativas ou positivas, logo, têm-se as descargas atmosféricas descendentes positivas e negativas e as descargas ascendentes negativas e positivas (SOARES. 2001).

Estudos apontam que 90% das descargas são descendentes negativas. Dado este alto índice de incidência de descargas atmosféricas descendentes negativas nas linhas de transmissão, os estudos de desempenho de linhas de transmissão consideram somente esse tipo de descarga (SOARES, 2001).

3.1.1 Etapas da formação de uma descarga nuvem-solo

Dada à descarga nuvem-solo negativa descendente a mais comum, são mostradas as etapas de formação de uma descarga, vide (GOLDE. 1977; UMAN. 1984). Quando campos elétricos no interior da nuvem ultrapassam a rigidez dielétrica, se estabelece a ruptura elétrica local, originando um canal ionizado. Assim, a ruptura acaba por movimentar novas cargas elétricas, conseqüentemente, formando uma coluna negativa que é direcionada ao solo. Este percurso pode evoluir, com novas rupturas, com formação de percursos ionizados novos, em que se acumula uma quantidade e carga negativa considerável. Desse modo, caracterizando o canal precursor de descarga, normalmente apresentando muitas ramificações (SOARES, 2001).

Ao se aproximar do solo, o canal precursor faz com que o campo elétrico total naquela região seja tão intenso que é capaz de induzir um ou mais canais de descarga ascendente, tendendo a se aproximar do canal precursor descendente (SOARES, 2001).

Caso a distância entre os canais seja inferior a do valor crítico (distância de salta final) sucederá uma descarga de conexão, fechando assim o percurso. Por conseguinte, uma parte carregada da nuvem está conectada ao potencial da terra, nesse momento, uma corrente de descarga de retorno se constitui pelo canal ionizado, anulando o excesso de carga previamente encontrado na região do canal (SOARES, 2001).

Esta descarga de retorno é configurada por um alto pico de corrente (da ordem de kA), em uma forma de onda impulsiva. Se novas cargas forem inseridas no topo do canal, isto pode acarretar em uma ou mais descargas de retorno, chamadas de descargas subsequentes, isto só é possível se uma corrente de amplitude moderada atravessar o percurso, ionizando ainda mais o canal, depositando cargas no percurso. Esta corrente é nomeada como corrente de reacendimento do canal. Após o fluxo desta corrente ocorre uma nova descarga de retorno. Passado um tempo, se não existir novo fluxo desta corrente, o canal se extingue (SOARES, 2001). A Figura 1 ilustra a evolução temporal da formação de uma descarga.

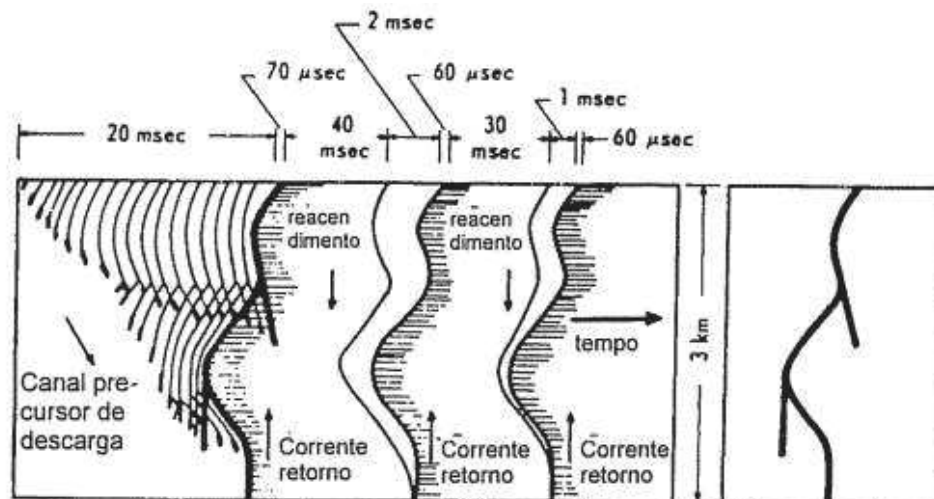


Figura 1 - Evolução temporal da descarga atmosférica (adaptada de [UMAN, 1984]).

Fonte: (SOARES, 2001).

3.1.2 Modelagem do canal de descarga.

A definição de modelos que caracterizem adequadamente as solicitações impostas por descargas atmosféricas é de particular importância para a obtenção de resultados representativos na avaliação do desempenho de sistemas elétricos. Com relação à modelagem do canal de descarga podem ser identificadas quatro principais classes, com níveis específicos de detalhamento, cujas respectivas premissas e simplificações se adequam às aproximações determinadas pelo objetivo estabelecido (SARAN, 2009):

- a) Modelos físicos baseados na dinâmica dos gases.
- b) Modelos eletromagnéticos.
- c) Modelos a parâmetros distribuídos.
- d) Modelos de engenharia.

Os modelos físicos baseados na dinâmica dos gases são pautados na caracterização de parâmetros termodinâmicos, leis de conservação e equações de estado. Esta classe de representação é baseada na síntese de modelos fisicamente consistentes, capazes de descrever detalhadamente variáveis características, como por exemplo: pressão, temperatura e densidade de massa do canal. Entretanto, avaliando sua aplicação na solução de problemas de engenharia, esta abordagem apresenta algumas desvantagens, quais sejam: não consideração

da propagação do campo eletromagnético, do efeito corona e do aquecimento da massa de ar circundante (SARAN, 2009).

Nos modelos eletromagnéticos, o canal de descarga é aproximado por uma antena vertical reta, constituída por um condutor filamental com impedância longitudinal não nula. Esta representação é fundamentada na solução direta das Equações de Maxwell para a obtenção da distribuição de corrente ao longo do canal e, conseqüentemente, dos campos elétricos e magnéticos em pontos remotos (SARAN, 2009).

Alternativamente, os modelos a parâmetros distribuídos podem ser utilizados como uma aproximação dos modelos eletromagnéticos, assegurando uma estimativa razoável da progressão da corrente em função do tempo e da altura, de maneiras mais simples e com menor quantidade de parâmetros (SARAN, 2009).

Evidentemente, para aplicações de resultados práticos imediatos, os modelos de engenharia destacam-se por sua eficiência e simplicidade. Estes modelos são desenvolvidos com base em observações experimentais que caracterizem o fenômeno físico, nomeadamente: a corrente injetada na base do canal, a taxa de crescimento da frente de onda, a velocidade de propagação, o padrão de luminosidade etc. (SARAN, 2009).

3.1.3 Representação da onda de corrente pela curva de Heidler.

A curva de Heidler contempla a natureza côncava da onda nos seus instantes iniciais. Também, observa parcialmente o posicionamento adequado da derivada máxima próximo ao pico e tem, ainda, o decaimento de sua amplitude após a ocorrência do pico muito similar àquele das curvas medianas. A curva é obtida através da aplicação de uma expressão analítica, chamada de Função de Heidler. Esta permite o ajuste, de forma independente, da amplitude de corrente, da derivada máxima de corrente e da carga transferida, através da variação das constantes I_0 , τ_1 e τ_2 . A Equação 1 apresenta esta relação (VISACRO FILHO, 2005).

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} \quad \text{onde } \eta = e^{[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{1/n}]} \quad (1)$$

$I_0 \rightarrow$ Amplitude da corrente na base do canal.

$\tau_1 \rightarrow$ Constante relacionada ao tempo de frente da onda de corrente.

$\tau_2 \rightarrow$ Constante relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente.
 $\eta \rightarrow$ Fator de correção da amplitude.
 $n \rightarrow$ Expoente (2 a 10).

Geralmente, as correntes de descarga são representadas como a soma de duas funções de Heidler. A Figura 2 apresenta um exemplo de aplicação desta função para representação de ondas de corrente de descargas (VISACRO FILHO, 2005).

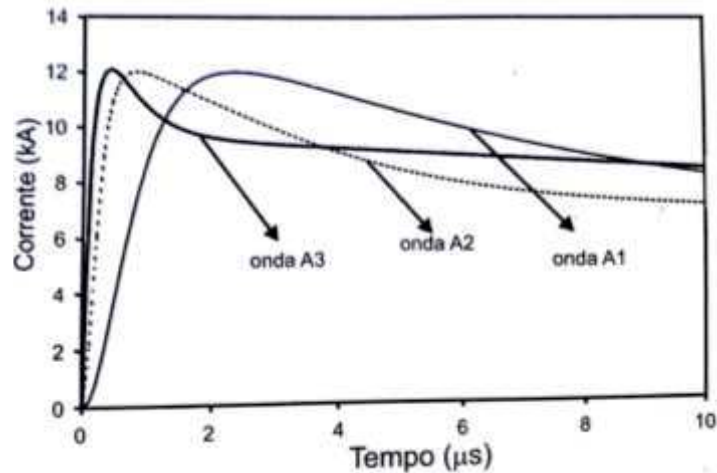


Figura 2- Exemplo de ondas de corrente obtidas pela aplicação da Função de Heidler.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Na figura pode-se perceber a versatilidade da Função de Heidler, empregado nesse caso específico, para representar três ondas típicas de descargas negativas subsequentes. Todas têm a mesma amplitude, 12 kA (valor mediano obtido das medições de Berger), com três diferentes tempos de frente de onda (aproximadamente 0,5 μs, 1 μs e 2 μs), associada a diferentes valores máximos de derivada de corrente, indicados na primeira tabela. Cada curva (A1, A2 e A3) é resultado da soma de duas curvas, cada qual obtidas da aplicação da Função de Heidler, considerando os parâmetros indicados na segunda tabela (VISACRO FILHO, 2005).

Tabela 1- Valores de pico e máxima derivada na frente de onda das correntes adotadas.

	Correntes		
	A1	A2	A3
$I_{pico}[kA]$	12	12	12
$(di/dt)_{max}[kA/\mu s]$	12	40	120

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Tabela 2- Parâmetros da função de Heidler para reprodução das correntes indicadas.

	Correntes		
	A1	A2	A3
$I_{01}[kA]$	10,7	10,7	7,4
$\tau_{11}[\mu s]$	0,95	0,25	0,063
$\tau_{12}[\mu s]$	4,7	2,5	0,5
$I_{02}[kA]$	6,5	6,5	9
$\tau_{21}[\mu s]$	4,6	2,1	0,27
$\tau_{22}[\mu s]$	900	230	66
n	2	2	2

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

3.2 Avaliação das funções que relacionam o nível cerâmico às densidades de descargas.

3.2.1 Parâmetros de Incidência geográfica.

Os índices de incidência geográfica traduzem a assiduidade com que as descargas atmosféricas solicitam determinado local ou região. Estes parâmetros podem ser influenciados por diversos fatores, dos quais se pode citar: distribuição pluviométrica na região, relevo e latitude. Em regiões altas, como em montanha, tendem a apresentar índices mais elevados de descargas atmosféricas em relação às regiões mais baixas e planas (ALVAREZ, 2011).

Historicamente, o primeiro parâmetro de incidência utilizado foi o número de trovoadas ouvidas por um ano, que representa o nível cerâmico (T_d). Este critério quantifica o número de dias de um ano em que tempestades com trovoadas são ouvidas, logo, é uma medida indireta do fenômeno. Comumente, eram utilizadas estações meteorológicas já existentes para registro

e observação das trovoadas. Por se tratar de uma aferição indireta, estão presentes muitos erros, como:

- i. Independente do número de trovoadas que são ouvidas em um dia, somente um registro para esse dia é contado.
- ii. Limitação do observador.
- iii. Impossibilidade de reconhecimento de descarga dentro da nuvem, entre nuvens e nuvem e solo.

A Tabela 3 quantifica os níveis ceráunicos típicos de algumas regiões do mundo.

Tabela 3 - Nível ceráunico de algumas regiões.

Local	Nível Ceráunico - T_d (dias de trovoadas por ano)
África do Sul	5 - 100
Alemanha	15 - 35
Austrália	5 - 107
Finlândia	17
França	20 - 30
Itália	11 - 60
Minas Gerais (Brasil)	50 - 90

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Com o avanço da tecnologia, foram desenvolvidas antenas especiais, com o objetivo de medir o número de descargas atmosféricas por km^2 por ano, índice denominado de densidades de descargas atmosféricas para o solo (N_g). Estas antenas, também chamadas de contadores de descargas são sintonizadas a uma frequência de 10 kHz, que se refere tipicamente à frequência dos sinais de campo elétrico característico de descargas atmosféricas (ALVAREZ, 2011).

Vale destacar que as informações de T_d e N_g referem-se às descargas atmosféricas plenas, não fazendo distinção da primeira descarga de retorno e descargas de retorno subsequente. A Tabela 4 mostra o N_g típico de algumas regiões (ALVAREZ, 2011).

Tabela 4- Densidade de descarga para o solo típicas de algumas regiões.

Local	$N_g(\text{descargas} / \text{km}^2 / \text{ano})$
África do Sul	0,5 a 14
Alemanha	1 a 1,5
Austrália	0,2 a 4
Áustria	1 a 6
Brasil (Minas Gerais)	1 a 12
Estados Unidos	0,1 a 14
França	0,1 a 14
Itália	1 a 5
México	1 a 10

Fonte: (ALVAREZ, 2011)

Com os levantamentos de T_d e N_g foram construídas, em diversas partes do mundo, curvas isoceraúnicas e de isodensidades, respectivamente. Adicionalmente, com os dados de T_d e N_g foram realizados diversos trabalhos de determinação, por meio de análises de regressão linear simples, de relações entre T_d e N_g , tomando T_d como a variável aleatória preditora. A Tabela 5 mostra diversas dessas relações. Essa tabela ilustra, também, os valores de N_g para um T_d específico igual a 70 (valor médio de Minas Gerais). Os resultados esboçam as diferenças significativas entre as diversas formulações, denotando, assim, que não é possível aplicar de forma generalizada relações desta natureza (ALVAREZ, 2011).

A NBR-5419 recomenda a utilização da relação $N_g = 0,04T_d^{1,25}$. Já estudos realizados pela CEMIG recomendam para a seguinte relação: $N_g = 0,03T_d^{1,12}$. Esta relação gera resultados distintos ao proposto pela NBR-5419 (ALVAREZ, 2011).

Tabela 5 - Relação entre T_d e N_g .

Local		Relação entre N_g e T_d	N_g ($T_d = 70$)
África do Sul		$N_g = 0,04T_d^{1,25}$	8,1
Brasil (Minas Gerais)		$N_g = 0,03T_d^{1,12}$	3,5
Estados Unidos		$N_g = 0,1T_d$	7
Itália		$N_g = 0,00625T_d^{1,55}$	4,5
México	Região Plana	$N_g = 0,044T_d^{1,24}$	8,5
	Região Costeira	$N_g = 0,026T_d^{1,33}$	7,4
	Região Montanhosa	$N_g = 0,024T_d^{1,12}$	2,8
Nova Guiné		$N_g = 0,01T_d$	0,7
Outros países		$N_g = 0,15T_d$	10,5

Fonte: (ALVAREZ, 2011)

As análises encontradas na literatura especializada utilizam o software *Flash* na versão 1.9 para o desenvolvimento do ambiente de simulações, *Flash 1.9* é um software livre, voltado para o tratamento acerca das linhas de transmissão, desenvolvido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). No *Flash* são utilizadas relações entre N_g e T_d como as apresentadas na Tabela 4. Mais especificamente, a Equação 2 é a utilizada na versão 1.9 do *Flash* (CIGRÉ, 1991) (ALVAREZ, 2011):

$$N_g = 0,04T_d^{1,25} \quad (2)$$

A Equação 3 também é utilizada no *Flash*, a qual relaciona N_g com o número de horas, em um ano, de tempestade com trovoada (T_h) (ALVAREZ, 2011):

$$N_g = 0,054T_h^{1,1} \quad (3)$$

3.2.2 Parâmetros da onda de corrente.

A medição da forma de onda completa das ondas de correntes típicas de descargas atmosféricas foram medidas diretamente em varias partes do mundo, graças às “torres instrumentadas”, em termos gerais estas estações são construídas em locais de elevada altitude e muito bem equipadas, são compostas por (ALVAREZ, 2011):

- Torres altas (55 m ~ 540 m) com transdutores de corrente especiais, instalados em sua base ou no topo, como por exemplo: *shunt* de corrente, bobina de *Rogowski* e bobina de *Pearson*.
- Abrigo blindado com equipamentos de medição e registro (osciloscópio, computadores, dentre outros).
- Transmissão do sinal de corrente (óptico ou elétrico) da torre instrumentada para o abrigo blindado, por meio de cabos coaxiais, ou fibra ótica.

Em 1985 a CEMIG instalou na *Serra do Morro do Cachimbo* uma estação de pesquisa de descarga atmosférica, a cerca de 15 km ao sul de Belo Horizonte, posicionada há 1.453 m acima do nível do mar, possui uma torre instrumentada de 60 m de altura. A medição é realizada por duas bobinas de *Pearson*, instaladas na base da torre. A Estação do Morro do Cachimbo gera uma significativa base de dados, sendo considerada a mais importante nas regiões tropicais. A Figura 3 ilustra a forma de onda típica das correntes associadas às primeiras descargas de retorno de descargas negativas descendentes (ALVAREZ, 2011).

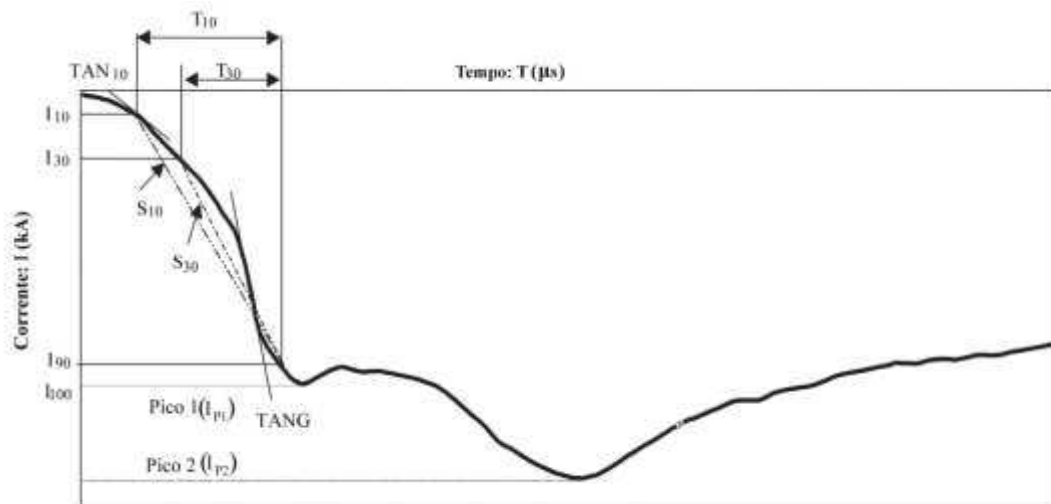


Figura 3 - Onda de corrente registrada no Morro do Cachimbo a primeira corrente de retorno de uma descarga negativa descendente.

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

Os principais parâmetros característicos, para fins de aplicação na engenharia contra descargas atmosféricas podem ser descritas a seguir (ALVAREZ, 2011):

- $I_p \rightarrow$ Valo de pico da onda de corrente.

- Geralmente as ondas de corrente relativas às primeiras descargas de retorno apresentam dois diferentes picos de corrente, sendo o primeiro (I_{P1}) normalmente será menor que o segundo (I_{P2}). Já as descargas de retorno subsequentes apresentam geralmente um único pico.
- Os parâmetros T_{10} , T_{30} , S_{10} , S_{30} e $TANG$ são definidos em termos de I_{P1} .
- O parâmetro de T_{50} é definido em função de I_{P2} .
- $T_{10} \rightarrow$ Intervalo de tempo entre as amplitudes de 10 e 90% (em relação a I_{P1}) da corrente na frente da onda.
- $T_{d10} \rightarrow$ Tempo de frente de equivalente ($T_{d10} = T_{10}/0,8$).
- $T_{d10} \rightarrow$ Tempo de frente de equivalente
- $T_{30} \rightarrow$ Intervalo de tempo entre as amplitudes de 30 e 90% (em relação a I_{P1}) da corrente na frente da onda. ($T_{d30} = T_{30}/0,6$).
- $T_{d30} \rightarrow$ Tempo de frente de equivalente ($T_{d10} = T_{10}/0,8$).
- $TAN_{10} \rightarrow$ Taxa de crescimento da corrente correspondente à tangente, na frente da onda, na amplitude de 10%.
- $S_{10} \rightarrow$ Taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 10 e 90% (em relação à I_{P1}) na frente de onda.
- $S_{30} \rightarrow$ Taxa de crescimento médio da corrente entre as amplitudes de 30 e 90% (em relação à I_{P1}) na frente de onda.
- $TANG$ (ou Sm) \rightarrow Máxima taxa de crescimento da corrente na frente da onda.
- $T_{50} \rightarrow$ Intervalo de tempo entre o ponto definido pelo valor de corrente de 2 kA na frente da onda e o ponto na cauda relativo ao valor 50% do pico de corrente (I_{P2}).
- $Carga \rightarrow$ Corresponde à integração da onda de corrente.
- *Energia por unidade de impedância* \rightarrow Corresponde à energia que seria dissipada pela onda de corrente fluído por resistor de 1Ω , ou seja:

$$\int [i(t)]^2 dt \quad (2)$$

Assim, corresponde a uma definição de energia por unidade de impedância, A^2s ou J/Ω .

A forma de onda típica ilustrada na Figura 3 é de difícil reprodução em termos experimentais, no entanto em termos analíticos já se consegue reprodução. Por este motivo, as seguintes representações matemáticas são utilizadas como aproximações desta forma de onda (ALVAREZ, 2011).

- **Forma de onda dupla exponencial:** De fácil reprodução em laboratório por meio de circuito composto por resistores, capacitores e diodos. Muito utilizada em testes de suportabilidade de equipamentos elétricos e, também, em análises computacionais. Apresenta duas principais desvantagens:
 - i. Não consegue reproduzir a frente de onda côncava das ondas de corrente associadas às descargas atmosféricas reais.
 - ii. Apresenta derivada máxima próxima do tempo zero, diferentemente das ondas de correntes de descargas atmosféricas, que possuem derivada máxima próxima do primeiro pico de corrente.
- **Formas de onda do tipo rampa:** Podem ser de dois tipos:
 - i. Rampa com tempo de frente (t_f) e tempo de cauda finita (t_c), denominada rampa triangular. (Figura 4 - a).
 - ii. Rampa com t_f finito e a partir daí um degrau (t_c infinito) denominada rampa retangular. (Figura 4 – b).

Em função da frente de onda côncava representada na Figura 4, T_{d30} é menor que T_{d10} . Assumindo, assim, uma postura conservadora, $t_f = T_{d30}$ e por outro lado, $t_c = T_{50}$ (ALVAREZ, 2011).

Estas formas de onda do tipo rampa apresentam a mesma desvantagem da dupla exponencial quanto à incapacidade de reprodução da frente côncava. Por outro lado, possui inclinação constante na frente de onda, que pode ser interpretada como conservadora. Em termos de cálculos de desempenho de linhas de transmissão, a forma de onda de corrente

representada na Figura 4-b é normalmente utilizada, sendo a implementada na versão 1.9 do *Flash* (ALVAREZ, 2011).

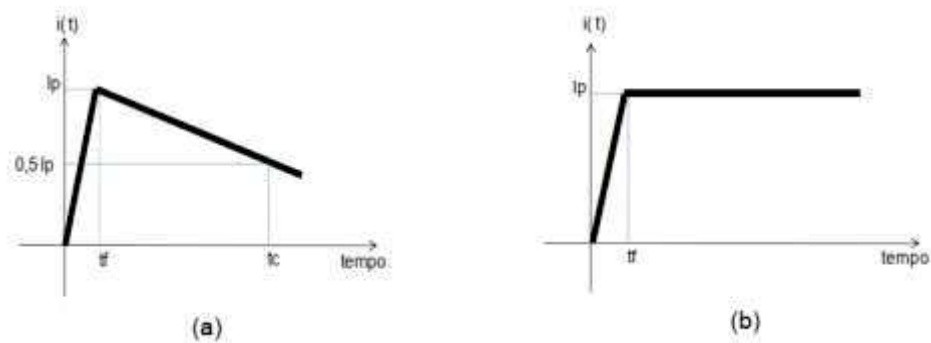


Figura 4 - Rampa triangular (a) e retangular (b).

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

- **Forma de onda de Heidler:** Recentemente, F. Heidler idealizou uma função matemática para a onda de corrente mais próxima da Figura 4, conseguindo inclusive superar as desvantagens apresentadas pelas formas de onda dupla exponencial e rampa.

Pelo exposto, percebe-se que os dois principais parâmetros da forma de onda de corrente típica de descargas atmosféricas para estudos de desempenho de linhas de transmissão correspondem ao valor de pico de corrente (I_p) e ao tempo de frente (t_f) [1-3, 5-7, 9, 10, 14-17, 22]. Por este motivo, a Tabela 6, a seguir, resume os resultados das principais medições, realizadas em diversas partes do mundo, destes dois parâmetros para as primeiras descargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes negativas. É importante mencionar que a distribuição de probabilidade cumulativa de todos os parâmetros associados à forma de onda de corrente típica das descargas atmosféricas descendentes negativas (tanto para as primeiras descargas de retorno, quanto para as subsequentes) é estatisticamente fornecida por uma distribuição do tipo log-normal. Assim, os logaritmos neperianos dos parâmetros seguem uma distribuição do tipo gaussiana (ou normal) (ALVAREZ, 2011).

No *Flash* (versão 1.9) são utilizados os seguintes parâmetros para a onda de corrente:

- Forma de onda → Rampa retangular (Figura 5-b).

- Tempo de frente → 2 μs – as sobretensões nas cadeias de isoladores são avaliadas em dois instantes: 2 e 6 μs, conforme discutido nas próximas seções.
- Distribuição de probabilidade cumulativa para o pico de corrente – $P(I \geq I_p) \Rightarrow$ conforme Equação 3, ajustada à log-normal na faixa de 5 a 200 kA (CIGRÉ):

$$P_{(I > I_p)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^{2,6}} \quad (3)$$

A equação (4) é aquela sugerida pela Norma IEEE/1410 de 1997. A correspondente expressão ajustada para as medições realizadas no Morro do Cachimbo é representada na Equação 4 utilizada pela CEMIG (ALVAREZ, 2011):

$$P_{(I > I_p)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_p}{45}\right)^{4,7}} \quad (4)$$

Tabela 6 - Estatísticas de medição do valor de pico e tempo de frente das primeiras descargas de retorno de descargas atmosféricas descendentes negativas

Referências	Base de dados	Parâmetro			
		Valor de pico		Tempo de frente	
		I_p (kA)	σ_{ln}^*	t_f (μs)	σ_{ln}^*
[AIEE.1950 - 35]	2.721 medições: elos magnéticos em torres de linhas de transmissão	15	0,99	-	-
[POPOLANSKY.1972 - 36]	624 medições na Europa	25	0,99	-	-
[SARGENT.1972 - 37]	Medições no Monte San Salvatore	13	0,74	-	-
[ANDERSON.1975 - 38]	Reavaliação de [35]	46	0,55	-	-
[BERGER.1975 - 12]	101 medições no Monte San Salvatore**	30	0,53	5,5	0,7
[ERIKSON.1987 - 39]	22 medições na base de um mastro de 60 m de altura na África do Sul	36	0,71	-	-
[ANDERSON.1980 - 13, ANDERSON. 1980 - 40]	Reavaliação de [12]***	31,1	0,48	2,3	0,57
[CORTINA. 1980 - 41]	42 medições em torres de TV na Itália	33	0,58	9	0,92
[DINIZ.1996 - 42]	56 medições no topo de torres de linhas de transmissão no Brasil (Minas Gerais)	44,6	0,52	-	-

[CHAI.1997 - 43]	Medições de milhares de descargas por um SLT	30,9	0,54	-	-
[NARITA.2000 - 44]	36 medições no topo de torres de linhas de transmissão	39,2	0,76	3,6	0,37
[SCHROEDER.2001 - 8]	31 medições de descargas atmosféricas no Morro do Cachimbo, Brasil (Minas Gerais)	45,3	0,39	2,9	0,44

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

* Desvio padrão logarítimo.

** Os dados de K. Berger são os mais utilizados e investigados pelos pesquisadores ao longo dos anos.

*** A despeito de tal reavaliação, os parâmetros calculados por K. Berger [12] sempre foram bastante utilizados, provavelmente pelo reconhecido cuidado de Berger com as suas medições.

Observação: informações detalhadas sobre os resultados de medição resumidos nesta tabela, inclusive com estatísticas de outros parâmetros, podem ser obtidos, por exemplo, nas referências [3,8,11].

3.2.3 Estimativa do número de descargas atmosféricas que incidem em uma linha de transmissão.

Por meio de estudos empíricos e analíticos verificou-se que o número de descargas atmosféricas que incidem diretamente em uma linha de transmissão depende dos seguintes fatores (ALVAREZ, 2011):

- Densidade de descargas atmosféricas para o solo (N_g).
- Características geométricas das linhas de transmissão (altura em relação ao solo e espaçamentos horizontais entre condutores).
- Existência de objetos próximos à linha que constituem blindagens naturais (tais como árvores, estruturas metálicas, edificações próximas e existência de outras linhas de transmissão).

Considerando a linha de transmissão representada na Figura 5, onde “A”, “B” e “C” correspondem às fases e “P_{R1}” e “P_{R2}” aos cabos para-raios. As três fases possuem a mesma altura (h_f) bem como os dois para-raios (h_{PR}). Assume-se que os cabos para-raios, normalmente os condutores mais elevados dos sistemas de transmissão, exercem uma influência atrativa sobre as descargas atmosféricas que incidem na região onde a linha de transmissão está instalada, formando uma largura denominada “largura lateral de atração equivalente”. Quaisquer descargas atmosféricas que incidam nesta região são atraídas pela linha de transmissão. A Figura 6 ilustra a largura lateral, designada por “L”, percebe-se que $L = b + 2R_a$, onde R_a é denominado “raio de atração equivalente médio”, cuja definição é descrita a seguir, na Equação 2 (ALVAREZ, 2011).

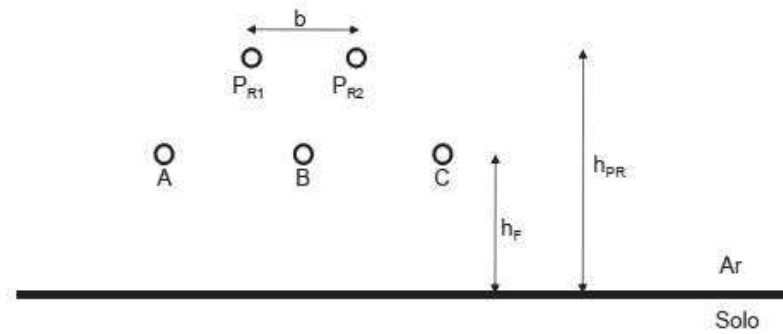


Figura 5- Linha de transmissão trifásica aérea genérica com dois cabos para-raios.

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

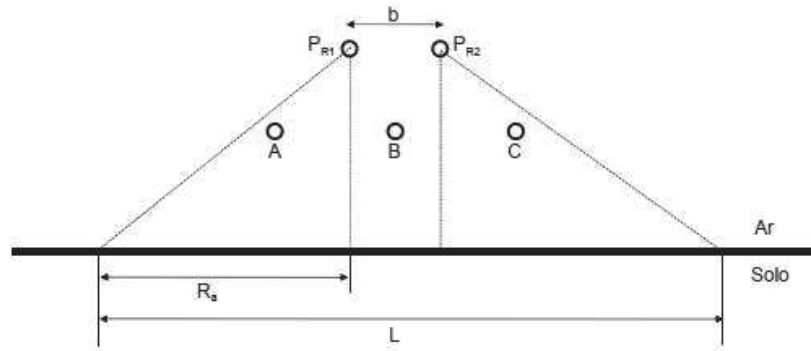


Figura 6- Ilustração da “largura lateral de atração equivalente”. $L = b + 2 R_a$.

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

Em seguida, determina-se a “área de atração equivalente”. Esta área corresponde a um retângulo, cujos lados correspondem a “L” e a 100 km ao longo da linha, conforme esboçado na Figura 7 (vista superior da linha de transmissão considerada) (ALVAREZ, 2011).

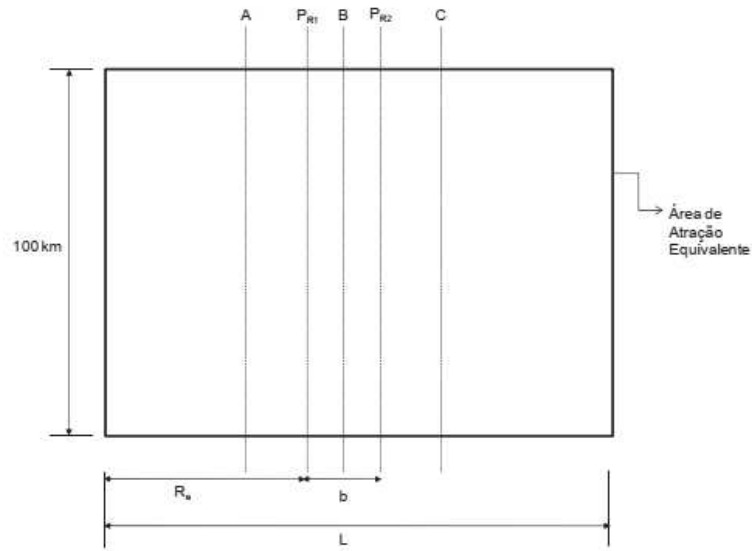


Figura 7- Ilustração da “área de atração equivalente” = $L \times 100 \text{ km}$

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

Logo, a estimativa do número de descargas que atinge a linha de transmissão é calculada pela equação 5, que fornece o número de descargas atmosféricas que atinge a linha de transmissão por 100 km de linha por ano (ALVAREZ, 2011):

$$N_{LT} = 0,1 \cdot N_g \cdot (b + 2R_a) \quad (5)$$

Temos que:

- N_{LT} → Número de descargas atmosféricas que atinge a linha de transmissão por 100 km de linha por ano [*descargas/(100 km × ano)*].
- Fator 0,1 → Corresponde a um fator de conversão de unidades, pois N_g é fornecido em [*descargas/(100 km × ano)*] e L , b e R_a em metros.
- R_a → Raio de atração equivalente médio em função da altura médio do condutor mais exposto da linha de transmissão e do pico de corrente médio da descarga atmosférica. Uma expressão comumente utilizada em estudos de desempenho de linhas de transmissão foi proposta por A. J. Eriksson, que corresponde à adotada no software *Flash*, representada na equação 6.

$$R_a = 14 \cdot H^{0,6} \quad (6)$$

Assim, N_{LT} é fornecida pela expressão 7.

$$N_{LT} = 0,1 \cdot N_g \times (b + 28 \cdot H^{0,8}) \quad (7)$$

Nas equações 6 e 7 tem-se que:

- $H \rightarrow$ Corresponde à altura média do condutor mais exposto em relação ao solo e é determinado da seguinte forma:

- i. Para um terreno com perfil plano:

$$H = H_{PR} - \left(\frac{2}{3}\right)f = H_{PR} - \left(\frac{2}{3}\right)(H_{PR} - H_{PRMV}) \quad (8)$$

- ii. Para um terreno com perfil ondulado:

$$H = H_{PR} \quad (9)$$

- iii. Para um terreno com perfil montanhoso:

$$H = 2H_{PR} \quad (10)$$

Para as equações 8, 9 e 10 têm-se que:

- $H_{PR} \rightarrow$ Corresponde a altura dos cabos para-raios.
- $f \rightarrow$ Corresponde à flecha dos cabos para-raios.
- $H_{PRMW} \rightarrow$ Indica a altura mínima do cabo para-raios no meio do vão.

É importante mencionar que, caso a linha de transmissão não possua cabos para-raios, H_{PR} nas equações acima deve ser substituídos pela altura do condutor mais exposto. Esta metodologia de cálculo do número de descargas que incidem em linhas de transmissão (N_{LT}) é utilizada, com algumas modificações, na determinação da taxa de flashover em linhas com cabos para-raios. Por outro lado, é também utilizada na íntegra para o levantamento da taxa de backflashover e para o cálculo da taxa de flashover em linhas sem cabos para-raios (ALVAREZ, 2011).

3.3 Comportamento da cadeia de isoladores mediante o *flashover* e *backflashover*.

3.3.1 Flashover

O mecanismo de ruptura do isolamento associado à incidência direta de descarga em uma linha é chamado *descarga disruptiva no isolamento (flashover)*. Para avaliar os aspectos básicos desse mecanismo, considera-se o caso elementar de uma linha monofásica sem cabo de blindagem, isolada da terra pelos isoladores da torre. Uma descarga de corrente impulsiva, de valor de pico I_p , incide na linha, como ilustra a Figura 8 (ALVAREZ, 2011).

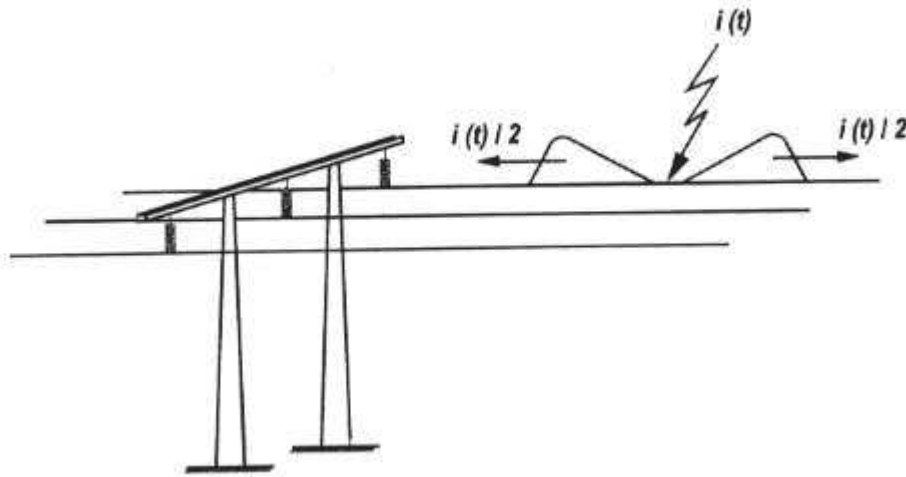


Figura 8- Descarga atmosférica sobre uma rede sem cabos para-raios.

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

Quando a descarga incide na linha, a corrente de retorno se divide em duas parcelas de amplitudes aproximadamente iguais ($I_p/2$). Para cada lado da linha se propaga uma onda de corrente, cuja amplitude vale aproximadamente metade da corrente incidente. A linha de transmissão pode ser representada por sua impedância de onda Z_L (ALVAREZ, 2011):

$$Z_L = [(R + j\omega L)/G + j\omega C]^{1/2} \quad (11)$$

Em que nesta expressão, R , L , C , e G representam respectivamente os parâmetros por unidade de comprimento da linha: resistência, indutância, capacitância e condutância. O termo ω representa a frequência angular $\omega = 2\pi f$. Para a propagação de ondas impulsivas

rápidas ou de alta frequência em linhas aéreas, a impedância de onda se aproxima da impedância de surto da linha Z_S (ALVAREZ, 2011).

$$Z_S = (L/C)^{1/2} \quad (12)$$

Associada a cada onda de corrente que se propaga, tem-se uma onda de tensão (ou sobretensão, dado o usual valor muito elevado de sua amplitude). Assim, a cada ponto ao longo da linha está associada uma onda de corrente e outra de tensão. A onda de tensão corresponde à integral do campo elétrico do solo até a superfície do condutor imediatamente acima, e sua amplitude pode ser aproximada pelo produto da impedância de surto pela amplitude de onda de corrente ($V_p = Z_S \cdot I_p$), onde o índice “p” indica o valor de pico. As ondas de corrente e tensão se propagam ao longo da linha. Ao alcançarem a primeira estrutura aterrada, o isolador que separa o condutor energizado da estrutura (eletricamente conectada ao solo) fica submetido à onda de sobretensão (ALVAREZ, 2011).

Em grande parte dos casos, em função de seu valor elevado, a sobretensão pode ser capaz de promover a ruptura do isolamento, como estabelecimento de um arco elétrico conectando o condutor e a estrutura aterrada. O arco elétrico constitui-se usualmente em um arco superficial que contorna o isolador através do ar ou mais raramente num arco volumétrico, que pode destruir o isolador (ALVAREZ, 2011).

Através do arco, a corrente de descarga flui em direção ao solo e cessa após um breve período de tempo, devido à sua natureza impulsiva e de curta duração. Contudo, em muitas situações, o arco elétrico pode se manter, sustentado pela própria tensão de operação da linha. Para se estabelecer um arco elétrico, com o rompimento da rigidez dielétrica do ar, é necessária a aplicação de um valor muito elevado de tensão sobre o isolador. Porém, uma vez estabelecido o arco, o valor da impedância no seu percurso é reduzido e uma tensão de amplitude relativamente discreta pode ser capaz de manter um nível de corrente suficiente para assegurar a ionização da região correspondente ao percurso do arco e, logo, para sustenta-lo. Mantendo-se o arco, configura-se um curto-circuito. Este pode ter natureza muito destrutiva para o sistema, pois a corrente de baixa frequência do sistema de energia passa a fluir pelo arco em direção solo. Nesses casos, após um determinado período limite de fluxo da corrente de curto-circuito através do arco, o sistema de proteção, cujos relés são sensibilizados por esta corrente, deve atuar, causando o desligamento da linha (ALVAREZ, 2011).

Para fins de ilustração, admite-se a incidência de uma descarga diretamente sobre a fase da linha. Assume-se 30 kA como valor de pico da corrente. Considera-se que a linha tenha uma impedância de onda da ordem de 400 Ω . Estima-se que o valor da sobretensão estabelecida se aproxime de 6 MV $[(30 \text{ kA}/2) \cdot 400 \Omega]$. As ondas de sobretensão e de corrente se propagam ao longo da linha, sujeitas a atenuação relativamente discreta de suas amplitudes, e chegam à estrutura aterrada (poste ou torre) que sustenta os isoladores conectados ao condutor da linha. Tais isoladores é que promovem o isolamento entre o condutor energizado da linha e a terra (ALVAREZ, 2011).

Como mostra a Tabela 7, o nível de isolamento da cadeia de isoladores frente as sobretensões impulsivas varia consideravelmente, dependendo do nível de tensão da linha e das particularidades do projeto. Os valores correspondentes tem ordem inferior a 5kV para linhas de distribuição de baixa tensão, de 95 a 300 kV para linhas de média tensão e de várias centenas de alguns milhares de quilovolts para linhas de alta tensão. Em qualquer dos casos considerados, o nível de sobretensão resultante, gerada pela descarga (6 MV), é muito superior à suportabilidade do isolamento. Por conseguinte deve ocorrer o rompimento do isolamento, com o estabelecimento de um arco elétrico (superficial ou volumétrico) através dos isoladores que suportam a fase (ALVAREZ, 2011).

Tabela 7- Índices de desligamento por nível de tensão (isoladores: vidro e porcelana).

Nível de tensão de operação da linha (kV)	Valor mínimo de tensão suportável ao impulso: NBI (kV)	Valor usual de TSI ou NBI (kV)	Número máximo de desligamentos: d ($d/100 \text{ km/ano}$)
69	380	450	10-15
138	650	850	10
230	975	1.200	5
345	1.240	1.350	2-3
500	1.612	1.750	1-2

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

A principal prática de proteção para se evitar que se suceda o quadro descrito consiste na colocação de cabos de blindagem sobre os condutores energizados (condutores de fase). Tais cabos, também designados cabos de terra ou cabos para-raios, são conectados eletricamente às estruturas e ao solo através de aterramentos elétricos. O emprego de cabos de blindagem é prática usual para linhas de nível de tensão de operação superior a 69 kV. Especificamente no caso das linhas de 69 kV, o emprego (ou não) desses cabos depende da filosofia adotada por cada concessionária de energia. Sendo comuns as duas situações (ALVAREZ, 2011).

3.3.2 Backflashover

A Figura 9 ilustra a representação de uma linha de transmissão trifásica, onde estão incluídos dois cabos de blindagem, e indica a incidência de uma descarga sobre um deles. Tais cabos são posicionados sobre os condutores das fases, segundo uma configuração geométrica que objetiva assegurar a interceptação de eventuais descargas, que, na ausência dos mesmos, podem incidir diretamente sobre os condutores das fases. Os cabos de blindagem são ligados ao solo em cada estrutura, seja por conexão elétrica à estrutura (no caso de torres metálicas) ou através de cabos de descida conectados ao aterramento da linha (no caso de postes de madeira ou concreto). Desta forma, direcionam para o solo as correntes de eventuais descargas incidentes (VISACRO FILHO, 2005).

Ao evitar a incidência direta de descargas no cabo fase, os condutores de blindagem previnem os efeitos de ruptura de isolamento descritos na seção anterior (*flashover*). Eventualmente, mesmo com tais precauções, pode ocorrer a falha do isolamento da linha, mas segundo um mecanismo de natureza diversa daquele já descrito: o “*backflashover*”. Neste contexto sugere-se a adoção do termo *descarga disruptiva de retorno* para designar tal mecanismo. Na explicação que se segue, são adotadas duas estilizações, apresentadas na Figura 10, que simplificam e denotam com maior nitidez os efeitos descritos (VISACRO FILHO, 2005).

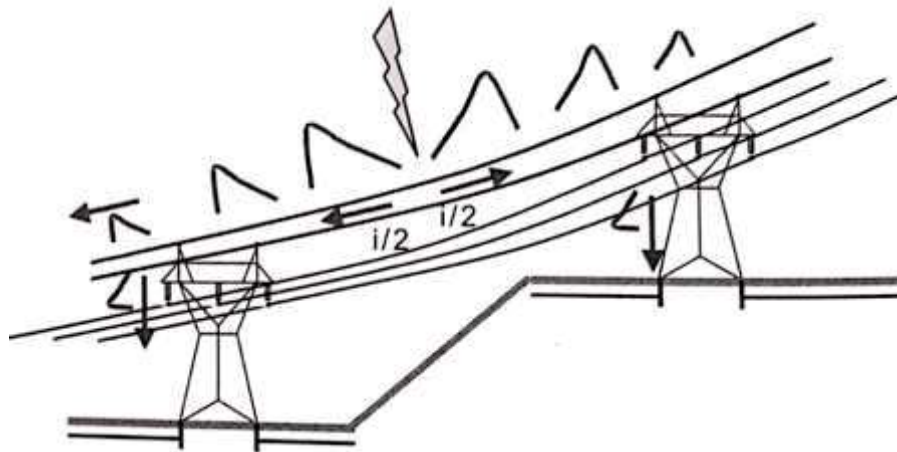


Figura 9- Linha trifásica blindada atingida por descarga.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Primeiramente, a onda de corrente de descarga é aproximada por uma onda triangular. Adicionalmente a estrutura da torre da linha de transmissão é representada por um elemento vertical, tendo em sua base uma barra para representar o seu aterramento elétrico (VISACRO FILHO, 2005).

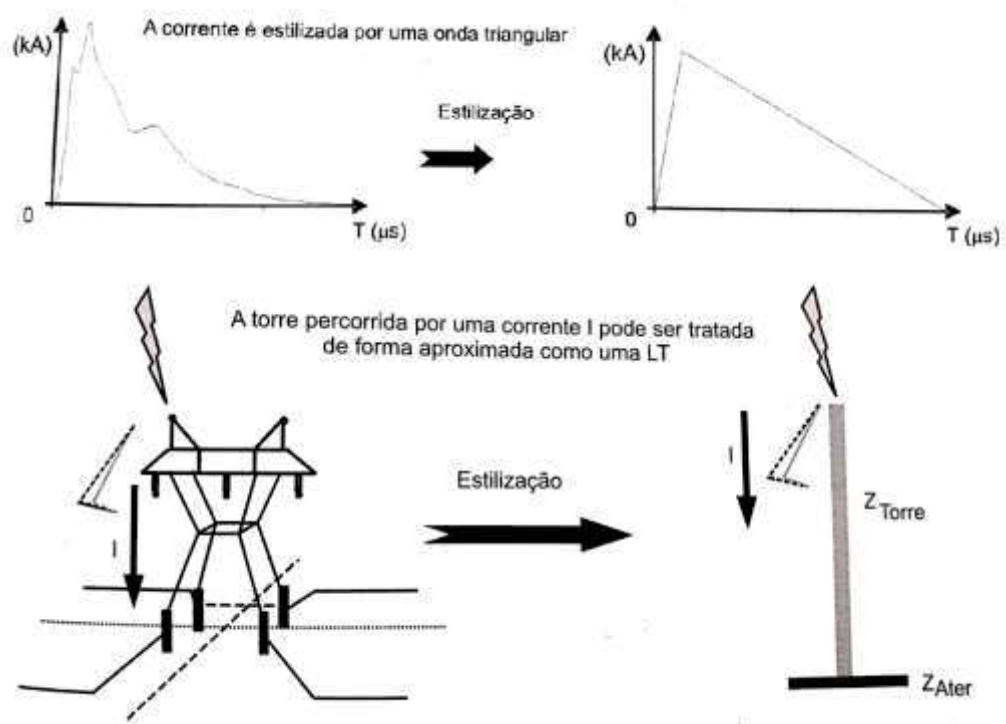


Figura 10- Estilização da onda de corrente e da torre da linha de transmissão.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

As análises decorrer a partir de agora são dedicadas à avaliação da amplitude da sobretensão resultante no topo da torre, quando da incidência de descarga. O parâmetro de interesse, determinante para ruptura do isolamento, constitui-se na amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Esta cadeia sustenta os condutores das fases, separando-os eletricamente da estrutura metálica da torre. Por outro lado, pode ser verificado que existe uma relação proporcional entre as sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores e no topo da torre (VISACRO FILHO, 2005).

Como mostra a Figura 11, ao incidir numa linha, longe das estruturas, a onda de corrente se divide em duas parcelas aproximadamente iguais, que se propagam para lados opostos. Associada a cada onda de corrente, também se propaga uma onda de tensão. A amplitude desta onda de tensão é dada aproximadamente pelo produto da onda de corrente pela impedância de surto da linha (Z_s), sendo tal impedância correspondente à impedância de onda da linha para condições de alta frequência (VISACRO FILHO, 2005).

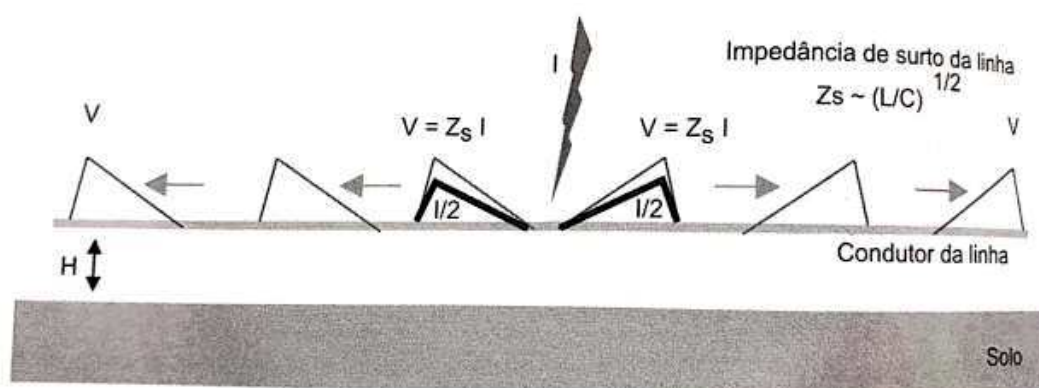


Figura 11- Propagação das ondas de corrente e tensão ao longo da linha.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Em algumas situações pode haver descontinuidade da impedância de surto da linha a partir de determinado ponto. Isso ocorre, por exemplo, se as características do condutor forem modificadas, ou mesmo quando uma impedância concentrada, cujo valor seja diferente da impedância de surto, está conectada à linha. Nesta situação, apenas uma parcela da onda de sobretensão é transmitida além daquele ponto, sendo a parcela restante refletida. Isso implica que tal parcela passa a se propagar em sentido contrário aquela da onda incidente no ponto. Esta condição está representada na Figura 12 (VISACRO FILHO, 2005).

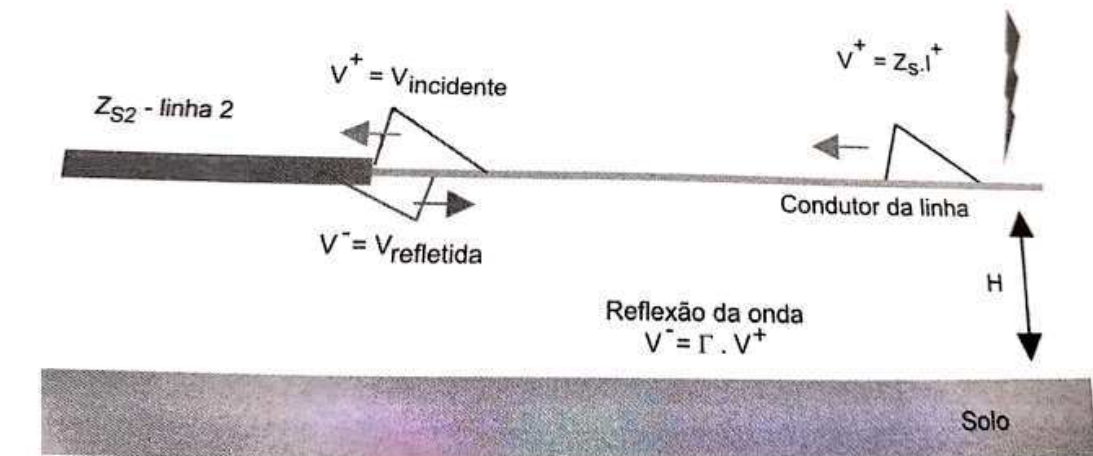


Figura 12- Reflexão da onda e tensão numa descontinuidade ao longo da linha.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Coefficiente de reflexão:

$$\Gamma = \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})}{(Z_{S2} + Z_{S1})}$$

$$Z_{S2} = 0 \therefore \Gamma = -1$$

$$Z_{S2} < Z_{S1} \therefore \Gamma < 0$$

$$Z_{S2} = Z_{S1} \therefore \Gamma = 0$$

$$Z_{S2} > Z_{S1} \therefore \Gamma > 0$$

No ponto de descontinuidade, a onda de tensão refletida (V^-) é definida através de um *coeficiente de reflexão* Γ , cujo valor é obtido em função da relação entre as impedâncias de surto das duas linhas [$\Gamma = (Z_{S2} - Z_{S1}) / (Z_{S2} + Z_{S1})$]. O índice “1” se refere à linha na qual a onda incidente se propaga (VISACRO FILHO, 2005).

Quando o valor do coeficiente é nulo (correspondendo à condição de igualdade das impedâncias de surto nos dois lados da interface), não há reflexão e a onda de tensão incidente (V^+) continua se propagando além da descontinuidade, sendo integralmente transmitida. Na figura, é indicado o comportamento do coeficiente e reflexão, em função da relação entre as duas impedâncias de surto. Se a impedância de surto a partir da descontinuidade é inferior àquela da primeira linha, o coeficiente de reflexão é negativo, indicando que, além da onda de tensão possuir uma parcela refletida propagando em sentido contrário ao da onda incidente, a amplitude dessa onda tem sinal contrário aquela da onda incidente (VISACRO FILHO, 2005).

Caso a impedância de surto da segunda linha tenha valor superior àquela da primeira linha, há também reflexão e a onda refletida tem sinal igual ao da onda incidente. A onda de

tensão resultante em qualquer ponto P da linha é constituída pela superposição das ondas incidentes (V^+) e refletida (V^-), tendo em conta eventuais defasamentos no tempo entre tais ondas [$V = V^+ + V^-$] (VISACRO FILHO, 2005).

3.3.3 Parâmetros de influência na amplitude da sobretensão resultante

Voltando ao caso da análise, ao incidir sobre o cabo de blindagem da linha, a descarga dá origem a uma de corrente para cada lado, se propagando até alcançar uma estrutura aterrada. Como mostra a Figura 11, uma parcela menor da corrente continua seguindo pelos cabos para-raios e a maior parte desce pela estrutura em direção ao solo. Para fim de ilustrar, considera-se uma corrente de valor de pico de 40 kA, incidente no meio do vão da linha. De uma das parcelas que se propagam resulta o fluxo de uma corrente pela torre mais próxima, cujo valor de pico vale 15 kA (VISACRO FILHO, 2005).

Para analisar as sobretensões desenvolvidas, admite-se que a torre é representada por uma impedância de surto (Z_{Torre}) de valor 120Ω . Assume-se que o aterramento conectado à base da torre seja um elemento concentrado, representado por sua impedância (Z_{Ater}). Admite-se o fluxo da corrente de 15 kA pela torre (onda incidente), conforme o esquema representado na Figura 9 (VISACRO FILHO, 2005).

À parcela da onda de corrente incidente que percorre a torre em direção ao solo está associada uma onda de tensão. Esta é obtida pelo produto da impedância de surto da torre pela onda de corrente, como dito anteriormente, e ilustrado na Figura 13 para uma corrente estilizada (VISACRO FILHO, 2005).

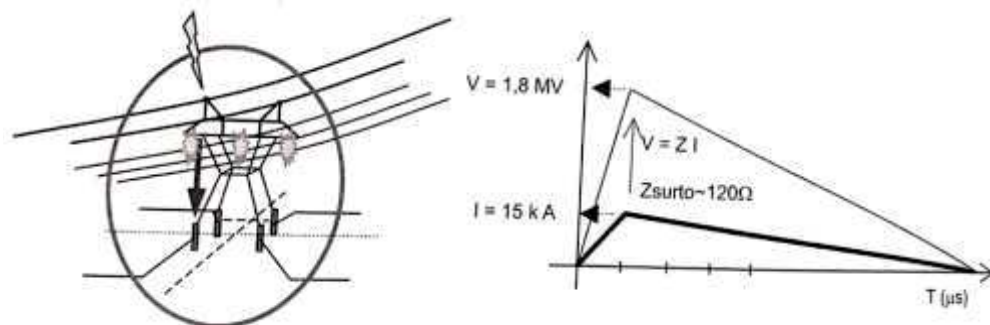


Figura 13- Onda de tensão incidente: propagação do topo da torre em direção ao solo.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Caso o aterramento apresente um valor de impedância igual aquele da impedância de surto da torre, não há reflexão e a onda de tensão resultante no topo da torre constitui-se na própria onda incidente. Como mostra o gráfico da figura anterior, a amplitude da onda de tensão seria de 1,8 MV ($V^+ = Z_{Torre} \cdot I^+$) (VISACRO FILHO, 2005).

Considerando um aterramento com valor de impedância inferior aquele da impedância de surto da torre, quando a onda de tensão alcança o solo, encontra uma descontinuidade de impedância, havendo reflexão negativa naquele ponto. A Figura 12 ilustra tal processo, na hipótese particular de um valor nulo para a impedância de aterramento (caso ideal). Nessa hipótese, após um tempo de trânsito pela torre (τ), a onda sofre uma reflexão total ($\Gamma = -1$), em função do valor nulo da impedância de aterramento. A onda refletida tem a mesma amplitude da onda incidente, mas o sinal contrário ($V = \Gamma \cdot V^+$), e trafega subindo pela torre até alcançar o topo, após um tempo de trânsito igual ao de descida (VISACRO FILHO, 2005).

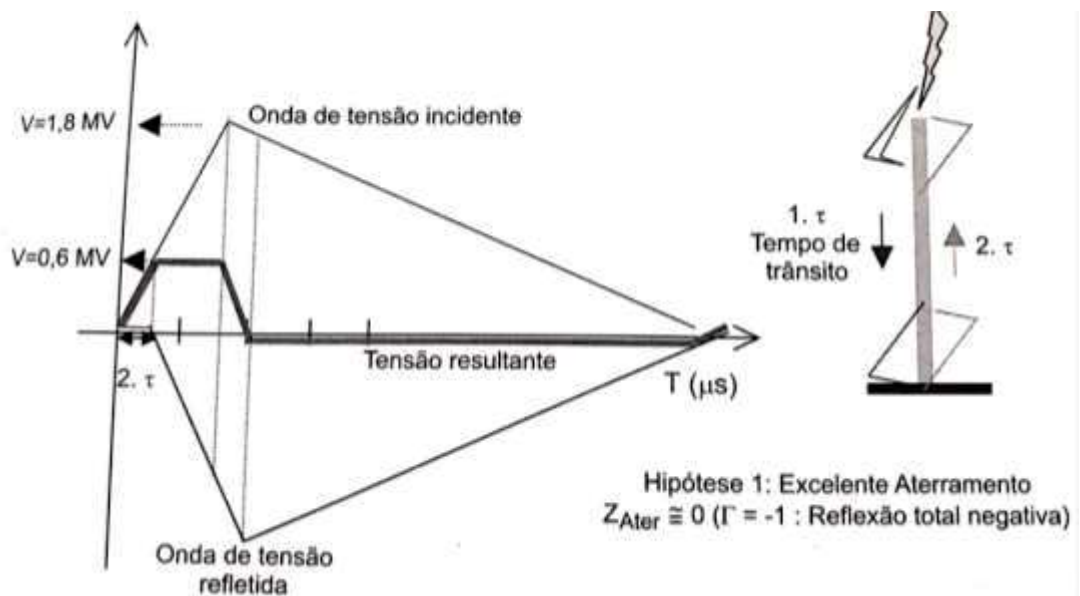


Figura 14- Representação da reflexão da onda de tensão no aterramento e determinação da onda resultante no topo da torre (Hipótese: $Z_{Ater} = 0\Omega$).

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

A onda total de tensão resultando no topo da torre é aquela obtida pela superposição das ondas incidentes e refletidas. Tal onda está indicada em traço mais forte na Figura 14. Percebe-se que, até que a onda refletida alcance o topo, após um intervalo de tempo igual ao dobro do tempo de trânsito (2τ), a onda resultante é idêntica à onda incidente. A partir desse instante, como as duas ondas apresentam a mesma taxa de crescimento, mas sinais contrários,

o crescimento da onda é anulado. O valor alcançado em 2τ permanece como a diferença entre as ondas incidente e refletida até que a onda incidente atinja seu valor de pico. Daí, o valor da tensão começa a decrescer, pois passa a prevalecer o crescimento negativo da onda refletida, havendo a redução da amplitude da onda resultante até que a onda refletida também alcance seu valor de pico. A partir desse ponto, a amplitude da onda resultante se aproxima de zero. Assim, o efeito da reflexão negativa da onda de tensão no aterramento foi promover uma sensível redução na amplitude da sobretensão no topo da torre (VISACRO FILHO, 2005).

3.4 Modelos de incidência e de transitório.

3.4.1 Modelo eletrogeométrico (MEG)

O modelo eletrogeométrico utiliza o conceito de raio de atração, um procedimento para determinar os requisitos de proteção de uma linha transmissão, em função do posicionamento dos cabos para-raios. Ele se aplica essencialmente as descargas descendentes negativas, pressupõem que o canal de descarga avance em direção ao solo, sem influência das estruturas terrestres. O cenário pode ser modificado quando é alcançado o raio de atração, entre a estrutura terrestre e a extremidade do canal descendente (VISACRO FILHO, 2005).

Logo, se a distância entre a descarga e a estrutura for menor ou igual ao raio crítico, a estrutura será atingida pela descarga atmosférica. Através de experimentos laboratoriais com modelos em escalas reduzidas, de registros fotográficos da incidência de descargas reais em torres “instrumentadas”, foram desenvolvidas relações empíricas que relacionam o maior raio de atração com o valor de pico da corrente de descarga (I_p). A maior parte destas expressões tem a forma $R_s = A \cdot I_p^B$, sendo A e B constantes empíricas, e fornece resultados muito similares. A Tabela 8 indica algumas destas relações (VISACRO FILHO, 2005).

Na Tabela 9 são indicados os valores estimados do raio de atração para diferentes valores de pico da corrente de descarga, através da aplicação das expressões $R_a = 10(I_p)^{0,66}$ e $R_a = 2 \cdot I_p + 30 \cdot (1 - e^{-I_p})$, esta última recomendada na norma NBR 5419 para o cálculo desse parâmetro (VISACRO FILHO, 2005).

Tabela 8- Expressões sugeridas na literatura para o cálculo do raio de atração.

Referências	Expressão $R_a(m), I_p(kA)$
Brown, Whitehead ^[12]	$R_a = 7,1 \cdot (I_p)^{0,75}$
Love ^[13] , Anderson ^[14]	$R_a = 10 \cdot (I_p)^{0,65}$
Armstrong ^[15]	$R_a = 6,7 \cdot (I_p)^{0,8}$
Norma 5419 ABNT ^[16]	$R_a = 2 \cdot I_p + 30 \cdot (1 - e^{-I_p})$

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Tabela 9- Valores estimados do raio de atração em função da corrente de descarga.

Valor de pico da corrente (kA)	$R_a = 2 \cdot (I_p) + 30 \cdot (1 - e^{-I_p})$ (m)	$R_a = 10 \cdot (I_p)^{0,65}$ (m)
5	40	29
10	50	46
15	60	60
20	70	72
30	90	94
50	130	132
100	230	209

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

A adoção do conceito do raio de atração torna possível a nítida definição de regiões de incidência. É fácil ilustrar tal aspecto para o caso específico de linhas de transmissão, como mostra a Figura 15. Ali, considera-se a linha constituída por três condutores energizados (cabos e fases) e um condutor de blindagem (ou cabo para-raios: G) (VISACRO FILHO, 2005).

A Figura 15 representa a análise da proteção da linha especificamente para a incidência de uma corrente de descarga de valor de pico 10 kA, ao qual está associado um raio de atração de 46 m, conforme a Tabela 9. Na figura 15 estão traçadas circunferências de raio igual ao

raio de atração (R_a), centradas sobre o eixo de cada uma dos condutores da linha. Está também traçada uma linha horizontal, cuja distância ao solo é igual ao raio de atração. Tais circunferências e linha correspondem ao corte respectivamente de superfícies cilíndricas (em cujo eixo localizam-se os condutores) e do plano paralelo à superfície do solo, definidos ao longo da linha de transmissão (VISACRO FILHO, 2005).

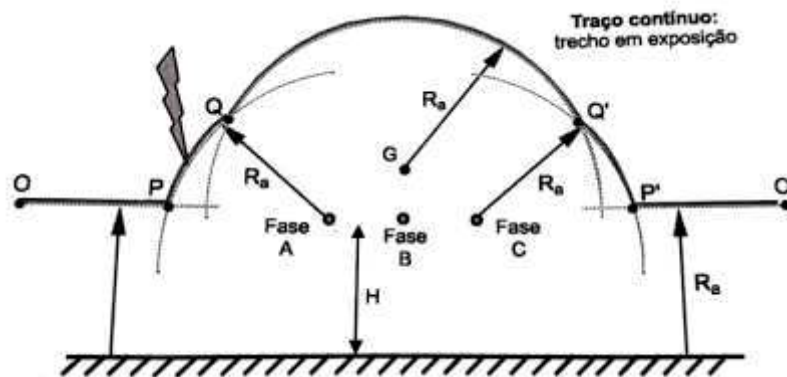


Figura 15- Representação esquemática da aplicação do Modelo Eletrogeométrico para proteção de uma linha de transmissão: Definição de regiões de proteção através do raio de atração.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

A curva contínua $OPQQ'P'O'$ foi traçada sobre os pontos mais externos das circunferências e da linha horizontal. Estes constituem os primeiros pontos de contato de qualquer eventual canal descendente de descarga que se aproxime da linha. Cada trecho desta curva está associado ao condutor da linha (ou ao solo) para o a extremidade do canal apresenta a menor distância (igual ao raio de atração). Nesse trecho, à distância aos demais condutores ou ao solo é superior ao raio de atração. Por conseguinte, caso um canal de descarga se aproxime da linha, chegando primeiro àquele trecho, tem-se a expectativa de sua conexão ao condutor associado, pois tal condutor apresenta a menor distância ao canal. É dele que deve partir o canal ascendente ao qual conecta o canal descendente (VISACRO FILHO, 2005).

Como indica a figura, se um canal alcançar o trecho PQ, a descarga deve incidir no condutor da fase A. Desta forma, a chegada de um canal descende a um dos trechos OP, PQ, QQ', Q'P', P'O' (nesta ordem) define a incidência de descarga respectivamente no solo, na fase A, no condutor de blindagem, na fase C e no solo. Nota-se que a fase B está totalmente

blindada para o raio de atração considerado (ou respectiva amplitude de corrente: 10 kA). Entretanto, as fases A e C estão expostas à incidência direta de descargas, a despeito da presença do cabo para-raios (VISACRO FILHO, 2005).

A Figura 16, a seguir, denota como a amplitude de corrente afeta a blindagem dos condutores energizados da linha. À esquerda considera-se um corrente de descarga inferior (5 kA), que corresponde ao raio de atração de 29 m. À direita considera-se a blindagem para uma corrente de descarga de 20 kA ($R_a = 72$ m) (VISACRO FILHO, 2005).

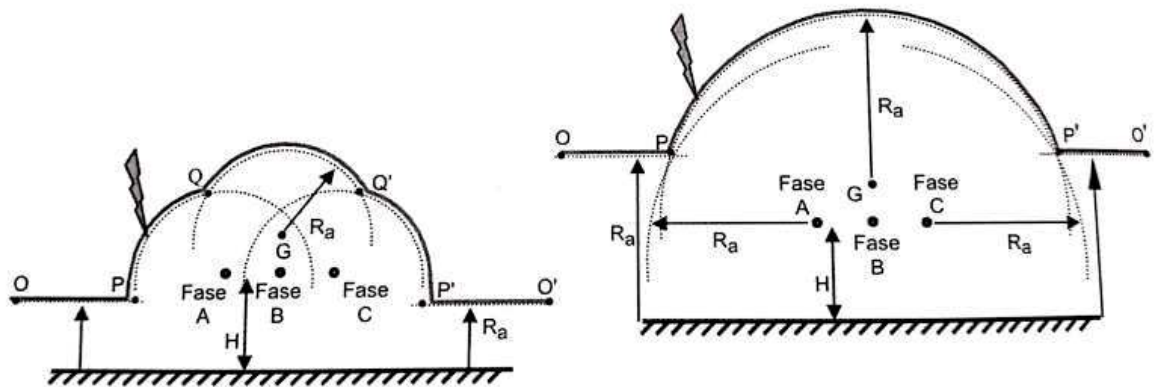


Figura 16- Efeito da amplitude de corrente na blindagem da linha.

Fonte: (VISACRO FILHO, 2005).

Na condição de menor corrente (e, portanto, de menor raio de atração) há substancial aumento dos trechos PQ e P'Q', com o significativo crescimento da probabilidade de incidência nas fases A e C, em relação à condição considerada na Figura 15. A fase B permanece integralmente blindada, pois a distância do seu condutor à superfície externa na figura é bem superior ao raio de atração. Caso fossem consideradas descargas de menor amplitude de corrente e a distância entre os condutores energizados fosse superior, tal fase poderia ficar exposta à incidência direta de descargas. Nesse caso, poderiam ser necessários dois cabos para-raios para assegurar a blindagem do condutor central (VISACRO FILHO, 2005).

Por outro lado, a figura à direita mostra que para uma corrente superior a 20 kA, ocorre a blindagem integral de todas as fase. Os trechos PQ e P'Q' foram integralmente suprimidos

com o crescimento do raio de atração e, no caso de aproximação de um canal descendente, a descarga deve se conectar diretamente ao cabo para-raios ou ao solo (VISACRO FILHO, 2005).

O objetivo da Figura 16 é ressaltar que o traçado que determina o condutor de incidência é definido para cada valor de corrente de descarga. No caso da maior amplitude, os condutores energizados ficam totalmente blindados, não havendo expectativa de incidência de descarga nos mesmos. Por outro lado, à medida que a amplitude da corrente é reduzida, tal blindagem vai sendo diminuída. Este aspecto justifica a afirmativa de que a *probabilidade de falha de blindagem de um sistema de proteção é tanto maior quanto menor for a amplitude da corrente da descarga* (VISACRO FILHO, 2005).

Como evidenciado, o fundamento do Modelo Eletrogeométrico se assenta no conceito de Raio de Atração. Neste contexto parece prudente tecer algumas considerações objetivas com relação a esse parâmetro (VISACRO FILHO, 2005).

Na realidade, não parece natural a existência de uma relação direta entre raio de atração e o valor de pico de uma corrente de descarga. Em princípio, a definição de uma distância a partir da qual ocorreria uma descarga entre o canal descendente e uma estrutura aterrada estaria associada, sobretudo, à diferença de potencial entre a extremidade do canal descendente e o solo. É esta diferença de potencial que estabelece um valor médio de campo elétrico no percurso, capaz de sustentar a evolução do estágio final dos canais ascendente e descendente até a conexão destes. Neste sentido, a carga acumulada no canal descendente (sobretudo em sua extremidade) é um parâmetro muito mais significativo para expressar a relação com o raio de atração. Por outro lado, verifica-se a existência de uma forte correlação entre carga acumulada no canal e o valor de pico da corrente consequente da eventual conexão dos canais. E, por sua vez, na perspectiva de aplicação em engenharia de proteção, não se pode negar o interesse prático em se expressar uma relação desta natureza diretamente a partir da amplitude da corrente de descarga. Tais aspectos justificam a formulação do raio de atração como função dessa corrente (VISACRO FILHO, 2005).

3.5 Método para cálculo de desempenho de linhas frente a descargas diretas.

O propósito de se avaliar o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é determinar qual a probabilidade de existir disrupção elétrica, no isolamento da linha, entre partes metálicas e condutores energizados, dada à incidência da descarga.

3.5.1 Abordagem determinística

Caracterizada pela simplicidade de modelos e cálculos adotados, trata os parâmetros de forma determinística, através de seus valores médios ou medianos. Outras três aproximações requerem verificação mais cuidadosa (ALVAREZ, 2011):

- i. A consideração de somente dois instantes de tempo para avaliação das sobretensões (2 e 6 μs).
- ii. A adoção do fator de 60 % no cálculo de N_T .
- iii. Em linhas sem cabos para-raios, considera-se somente a falha de blindagem para o cálculo de desempenho, desta forma, o efeito da torre em uma possível blindagem não é levado em consideração.

W. A. Chisholm, um dos idealizadores do Flash, publicou um artigo em que apresenta algumas justificativas relativas às aproximações realizadas neste programa. De um modo geral, todas as justificativas envolvem aspectos relacionados às incertezas envolvidas, devido às complexidades de cálculos mais elaborados, e principalmente no fato das previsões dos cálculos do Flash traduzir, em alguns casos, aproximadamente, os índices de desempenho observados em linhas reais (W. A. CHISHOLM, 2001).

Pesquisas recentes objetivam contribuir para a melhoria das previsões nos índices de desempenho de linhas de transmissão, envolvendo, basicamente, as seguintes abordagens:

- Avaliação de desempenho de linhas de transmissão e de distribuição que podem auxiliar, por exemplo, na calibração das modelagens (T. NARITA, 2000).
- Desenvolvimento de modelagens físicas mais consistentes (principalmente baseadas em medições laboratoriais e no modelo de propagação do canal de

descarga) para avaliação da interação direta de descargas atmosféricas e estruturas terrestres (M. S. SAVIC, 2003).

- Modelagem eletromagnética para cálculo do transitório eletromagnético, considerando o acoplamento eletromagnético entre elementos aéreos e enterrados, visando determinação mais confiável das sobretensões nos pontos de interesse (SOARES, 2001).

3.5.2 Abordagem probabilística

Toma os parâmetros com caráter aleatório por meio de funções de densidade de probabilidade estatística. Esta abordagem trabalha com diversos parâmetros, tanto do sistema de transmissão quanto das descargas atmosféricas, estão envolvidos nos cálculos de desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas (ALVAREZ, 2011).

- Sistema de transmissão \Rightarrow Resistividade do solo onde a linha está instalada (ρ) e valores instantâneos de tensão (à frequência industrial) nos condutores de energia, no momento de ocorrência da descarga (V_{INST}) (ALVAREZ, 2011).
- Descarga Atmosférica \Rightarrow Amplitude da onda de corrente (I), tempo de frente (t_f), ângulo de incidência (θ) e ponto de incidência ao longo do vão (X). Tais parâmetros são de natureza estocástica. Desta forma, devem ser tratados dentro de uma abordagem probabilística. Para cada conjunto de valores desses parâmetros pode-se avaliar o desempenho (φ) de uma determinada configuração de linha. Desta forma, considerando a variação de cada parâmetro entre seus limites inferior e superior e a respectiva densidade de probabilidade conjunta $f(\rho, V_{INST}, I, T_F, \theta, X)$, pode-se obter integração, o desempenho total (D) da linha sob estudo, representado na Equação 13 (ALVAREZ, 2011):

$$D = Nv \int_{\rho_{min}}^{\rho_{max}} \int_0^{V_{pico}} \int_{I_{min}}^{I_{max}} \int_{t_{fmin}}^{t_{fmax}} \int_{-90}^{90} \int_{0}^{vão} \theta(\rho, V_{INST}, I, t_f, \theta, X) f(\rho, V_{INST}, I, t_f, \theta, X) d_x d_\theta d_{t_f} d_I dV_{INST} d\rho \quad (13)$$

Sendo:

$N_V \Rightarrow$ Número de vãos.

$\theta \Rightarrow$ Número de desligamentos de um vão da linha para um conjunto de parâmetros.

A avaliação de φ engloba o cálculo do transitório eletromagnético na linha de transmissão e a posterior determinação de ocorrência de disrupção no isolamento da linha. O cálculo de D requer simplificações, pois (ALVAREZ, 2011):

- Existem muitas incertezas em φ e nos limites reais dos parâmetros.
- Exigência de um grande esforço computacional.

Assim, os algoritmos de cálculo de desempenho de linhas de transmissão não realizam a solução completa da Equação 13 (ALVAREZ, 2011).

3.6 Investigação dos modelos para cálculo de desempenho, no software *Flash* desenvolvido pela IEEE.

Considerando os parâmetros da corrente de descarga, a análise das diferentes funções de probabilidade cumulativa do valor de pico de corrente permite estimar desvios percentuais apreciáveis nos índices de confiabilidade. Empregando a formulação ajustada, para região de Minas Gerais como referência, as simulações do caso base, mostram que a distribuição cumulativa implementada no programa *Flash* resulta em uma subestimativa das taxas de desligamentos. Os tempos de frente e de meia onda também afetam, evidentemente, com importâncias relativas diferentes, o desempenho do sistema (MARIANO, 2012).

O aumento do tempo de frente que, de acordo com a forma de onda selecionada, determina a taxa de crescimento da corrente injetada, é acompanhado da redução da taxa de desligamentos. De maneira similar, solicitações com decaimentos mais lentos após o instante de ocorrência do pico, resultam em uma diminuição pouco expressiva da taxa de *backflashover*. A avaliação dos diferentes parâmetros da equação do raio de atração, empiricamente ajustados, quando realizado de acordo com a variação da probabilidade de ocorrência do valor de pico de corrente, selecionado de acordo com a

distribuição cumulativa de corrente implementada no *Flash*. O emprego das diferentes aproximações, conforme esperado, resulta em diferenças significativas das taxas calculadas, reforçando a necessidade de uma avaliação mais criteriosa dos modelos de incidência (MARIANO, 2012).

4. Metodologia

Este trabalho irá abordar os principais métodos e modelos para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão, frente a descargas atmosféricas, com base em um compilado de informações empíricas e teóricas, mais consolidadas encontradas na literatura.

Para o escopo deste trabalho os temas a seguir receberão especial atenção, dentre os vários parâmetros encontrados na literatura.

- a) Modelos de caracterização do fenômeno de descarga atmosférica.
- b) Avaliação das funções que relacionam o nível cerâmico às densidades de descargas.
- c) Comportamento da cadeia de isoladores mediante a *flashover* e *backflashover*.

Para compreensão de tais parâmetros, fazem-se necessários conhecer de antemão alguns itens específicos, listados a seguir:

- a) Modelagens utilizadas para melhor caracterização do fenômeno em estudo.
- b) Modelos de incidência e de transitório.
- c) Linhas e torres de transmissão.
- d) Modelagem do canal de descarga.
- e) Estudo do estado da arte com relação aos modelos considerados no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.
- f) Investigação dos modelos para cálculo de desempenho, no software *Flash* desenvolvido pelo IEEE.

5. Resultados e Discussões

Como resultado desse projeto foi possível obter um conjunto de informações e análises, que caracterizem as principais metodologias aplicadas nas pesquisas da área. Nisso deve-se obter informações de modelos de descarga, tipos de abordagens, entre outros fatores. Então com a finalização bem-sucedida desse projeto, os resultados poderão ajudar pesquisadores e profissionais iniciantes na área, a encontrar soluções que visem melhorar de forma satisfatória o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

5.1 Parâmetros de incidência geográfica

Os parâmetros de incidência geográfica definem a atividade atmosférica no interior da zona de estudo. Tradicionalmente, o nível ceráunico, T_d , tem sido o parâmetro mais adotado no mapeamento das ocorrências de descargas atmosféricas em diversas regiões. Neste sentido, diversos estudos são realizados objetivando estabelecer ajustes empíricos que relacionem o nível ceráunico à densidade de descargas, embora a correlação entre estes parâmetros não seja precisa (MARIANO, 2012).

A Figura 17 mostra os resultados das simulações utilizando a abordagem clássica, adotada no *Flash*, e a formulação ajustada para a região de Minas Gerais. Conforme esperado, as duas metodologias, embora apresentem a mesma tendência comportamental não linear, divergem de maneira expressiva em suas estimativas. Considerando o caso base, por exemplo, que corresponde ao valor aproximado $T_d = 62,3$ dias de trovoadas por ano, a aplicação da formulação de N_g proposta para o estado de Minas Gerais resulta em uma redução de cerca de 60% na taxa de desligamentos da linha. Verifica-se, também, que a divergência entre os índices estimados, com as duas curvas mencionadas, aumenta de acordo com a variação incremental no nível ceráunico (MARIANO, 2012).

Com relação aos parâmetros de incidência geográfica, constata-se a necessidade da adequação de ajustes experimentais, que traduzam a identidade meteorológica da região na qual o sistema é instalado. Dada a imprecisa correlação entre o nível ceráunico e a densidade de descargas atmosféricas, ressalta-se a necessidade do desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados, baseados, por exemplo, em sistemas de localização de tempestades.

Realizando uma avaliação sistemática da atribuição da consideração estocástica das variáveis envolvidas, é possível quantificar a influência de tal atribuição na estimativa do desempenho do sistema (MARIANO, 2012).

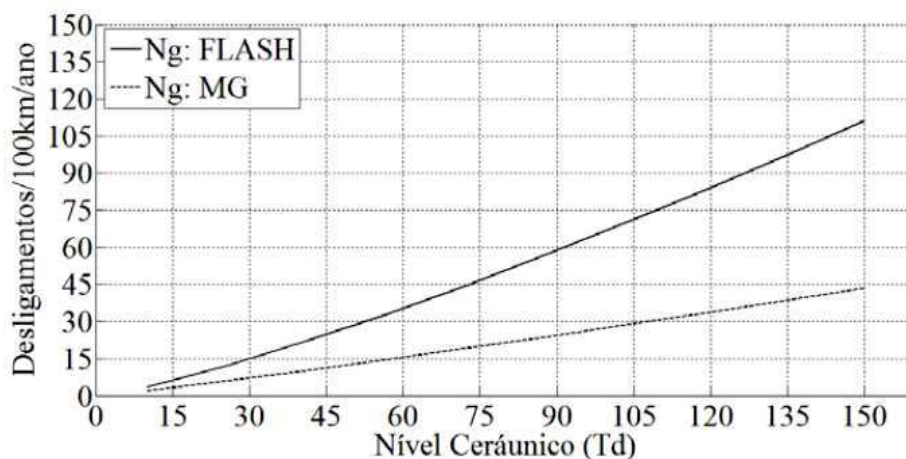


Figura 17 - Influência do nível cerâmico na taxa de backflashover.

Fonte: (MARIANO, 2012)

É verificado que, em geral, a inclusão de incertezas nos parâmetros da corrente de surto, assim como na impedância impulsiva de aterramento, implica em um aumento da confiabilidade. Por outro lado, o efeito da característica estocástica do ângulo de referência, proporciona um aumento no número de desligamentos estimado, ou seja, resulta na diminuição da confiabilidade (MARIANO, 2012).

5.2 Sensibilidade do T_d

O índice T_d , nível cerâmico (dias de trovoadas por ano), em casos de cálculo de desempenho de linhas, ainda é, em termos práticos, o parâmetro mais utilizado para a indicação da frequência de incidência de descargas atmosféricas em uma determinada região. Este é obtido por meio da estatística acumulada por longos períodos de observação para cada região (ALVAREZ, 2011).

Conforme já apresentado anteriormente, para o cálculo do desempenho de linhas, diversos estudos foram realizados para estabelecer relações entre o nível cerâmico (T_d) e a densidade de descargas na região (N_g). Muitas são as formulações propostas. Então, considerando o valor médio da região de Minas Gerais ($T_d = 70$) e adotando valores

acrescidos de 100, 75, 50 e 25% do caso base e valores diminuídos de 25, 50 e 75% do caso base, são analisadas duas situações dos resultados do desempenho da linha; são elas (ALVAREZ, 2011):

- i. Utilizando a formulação clássica de $N_g - Flash$ 1.9;
- ii. Utilizando a formulação de N_g para a região de Minas Gérias.

Os resultados são apresentados na Tabela 10 e na - Influência dos níveis de T_d na taxa total de desligamento da linha. De acordo com os resultados, pode-se observar que:

- Conforme esperado, para ambas as formulações de N_g adotadas, o aumento do nível cerâmico provoca maior número de desligamento da linha, acarretando um pior desempenho da mesma.
- O aumento do número das taxas de desligamento (*backflashover*, *flashover* e total) não segue a mesma proporção de crescimento de T_d , para ambas as formulações.

Tabela 10 - Influência de T_d no nível das taxas de desligamento por backflashover, flashover e taxa de total [desligamentos/100 km/ano].

T_d	$N_g = 0,04 T_d^{1,25}$			$N_g = 0,03 T_d^{1,12}$		
	Blackflashover	Flashover	Total	Blackflashover	Flashover	Total
140	3,6969	0,0146	3,7115	1,4585	0,0058	1,4643
122,5	3,1286	0,0124	3,1410	1,2559	0,0050	1,2609
105	2,5803	0,0102	2,5905	1,0568	0,0042	1,0609
87,5	2,0544	0,0081	2,0625	0,8616	0,0034	0,8650
70	1,5544	0,0061	1,5605	0,6710	0,0026	0,6737
52,5	1,0849	0,0043	1,0892	0,4862	0,0019	0,4881
35	0,6535	0,0026	0,6561	0,3087	0,0012	0,3100
17,5	0,2748	0,0011	0,2759	0,1421	0,0006	0,1426

Fonte: (ALVAREZ, 2011)

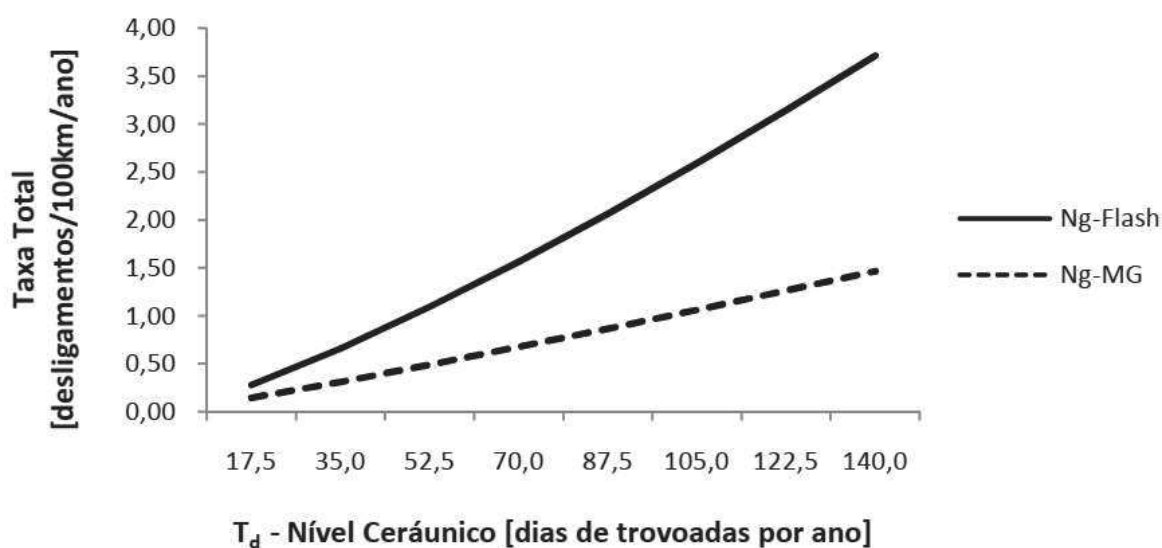


Figura 18 - Influência dos níveis de T_d na taxa total de desligamento da linha.

Fonte: (ALVAREZ, 2011)

- Com as formulações utilizadas para o cálculo de N_g , à medida que o valor de T_d aumenta, verifica-se que as três taxas de desligamento são maiores para a formulação clássica ($N_g = 0,04T_d^{1,25}$ adotada pelo *Flash*) (ALVAREZ, 2011).
- Utilizando-se a formulação clássica de N_g e adotando-se como valor de $T_d = 70$, obtém-se valor de N_g aproximadamente a 8 descargas/km²/ano. No entanto, se for considerada a formulação de N_g sugerida para a região de Minas Gerais ($N_g = 0,03T_d^{1,12}$) e o mesmo valor de T_d (70), tem-se como resultado de N_g , 3,5. Valor este muito próximo do valor contabilizado por meio de sistemas de detecção e localização de descargas (4 descargas/km²/ano) (ALVAREZ, 2011).
- Verifica-se, então, que os resultados gerados utilizando a formulação clássica de N_g são mais conservadores, maiores que os resultados esperados para a referida região. Seu crescimento se dá em uma taxa um pouco maior que o crescimento quando se utiliza a formulação para Minas Gerais, conforme ilustrado na Figura 18 (ALVAREZ, 2011).

Recentemente, foram desenvolvidos modernos sistemas que detectam, localizam e rastreiam tempestades que envolvem descargas atmosféricas, denominados Sistemas de Localização e Detecção de Descargas Atmosféricas. Na CEMIG, por exemplo, é utilizado o Sistema de Localização de Tempestades (SLT), cuja precisão na determinação de N_g foi substancialmente aumentada, além de possibilitar distinção entre as diversas correntes de

retorno, polaridade, amplitude etc. A descrição dos SLT's está fora do escopo desta dissertação de mestrado, sendo que, detalhes podem ser encontrados nas referências. Estas referências apresentam, também, descrição detalhada sobre medições por meio de satélites e de radar (ALVAREZ, 2011).

5.3 Impedância do canal

O efeito da variação da impedância interna do canal de descarga, representada no modelo simulado por um resistor linear a parâmetros concentrados, alocado em paralelo à fonte impulsiva de corrente, é mostrado na Tabela 11. O resultante perfil de variação não linear da resposta é ilustrado graficamente na Figura 19. Verifica-se, pela avaliação dos dados apresentados, que a taxa de desligamentos da linha, a partir de determinado valor de impedância, torna-se menos sensível à variação incremental deste parâmetro. Além disto, para valores reduzidos desta quantidade, o arranjo equivalente constitui um divisor de corrente, implicando em uma dispersão considerável da taxa de desligamentos obtida, com relação ao caso base (MARIANO, 2012).

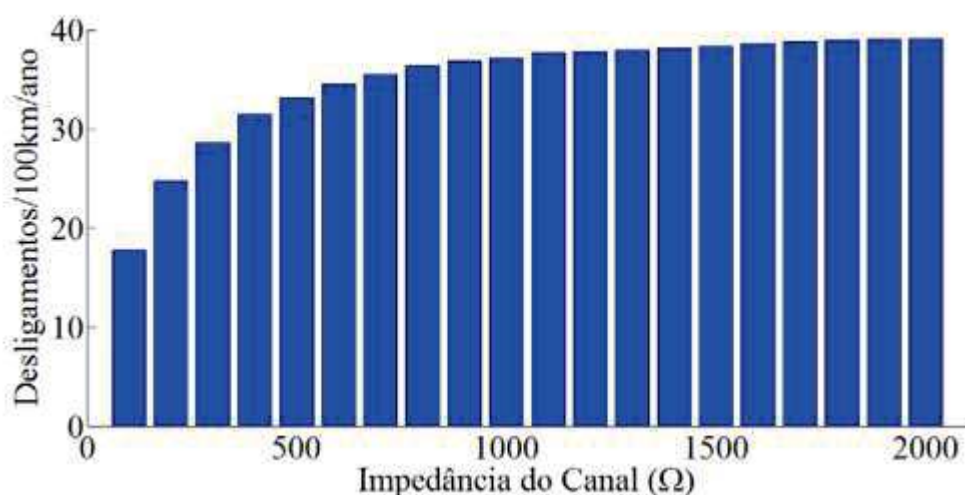


Figura 19 - Sensibilidade da taxa de backflashover à variação da impedância do canal de descarga

Fonte: (MARIANO, 2012)

Tabela 11 - Sensibilidade da taxa de *Backflashover* à variação da impedância do canal

Impedância do canal (Ω)	<i>Backflashover</i>	Desvio (%)
100	17,78	53,65
200	24,71	35,58
300	28,63	25,36
400	31,43	18,06
500	33,04	13,87
600	34,50	10,05
700	35,49	7,48
800	36,33	5,29
900	36,89	3,83
1000	37,10	3,28
⋮	⋮	⋮
1500	38,36	0,0
⋮	⋮	⋮
2000	39,13	2,01

Fonte: (MARIANO, 2012)

5.4 Ângulo de referência

Conforme evidenciado na Figura 20, a máxima sobretensão que se desenvolve através das cadeias de isoladores, durante uma interação descarga-linha, é função da sobreposição da tensão resultante da corrente injetada pelo canal de descarga com a tensão de operação na frequência de 60 Hz. Para gerar o resultado mostrado na Figura 20, o ângulo de referência das fontes de tensão foi sistematicamente variado entre 0° e 360° , armazenando o valor de pico da distribuição temporal das múltiplas sobretensões observadas, em resposta à injeção de uma onda de corrente do tipo rampa triangular, com valor de pico $I_p = 45 \text{ kA}$ polaridade positiva (MARIANO, 2012).

Sendo U_i um número aleatório com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$ e θ uma observação do ângulo de referência obtido a partir Equação 14, as funções que definem o sistema de transmissão de energia trifásico, com excitação senoidal em regime permanente de operação, são mostradas nas Equações 14 a 17 (MARIANO, 2012).

$$\theta = 2 \cdot \pi \cdot U_i \quad (14)$$

$$v_{0(t)} = V_0 \cdot \cos(\omega t + \theta + 0^\circ) \quad (15)$$

$$v_{1(t)} = V_0 \cdot \cos(\omega t + \theta + 120^\circ) \quad (16)$$

$$v_{2(t)} = V_0 \cdot \cos(\omega t + \theta + 240^\circ) \quad (17)$$

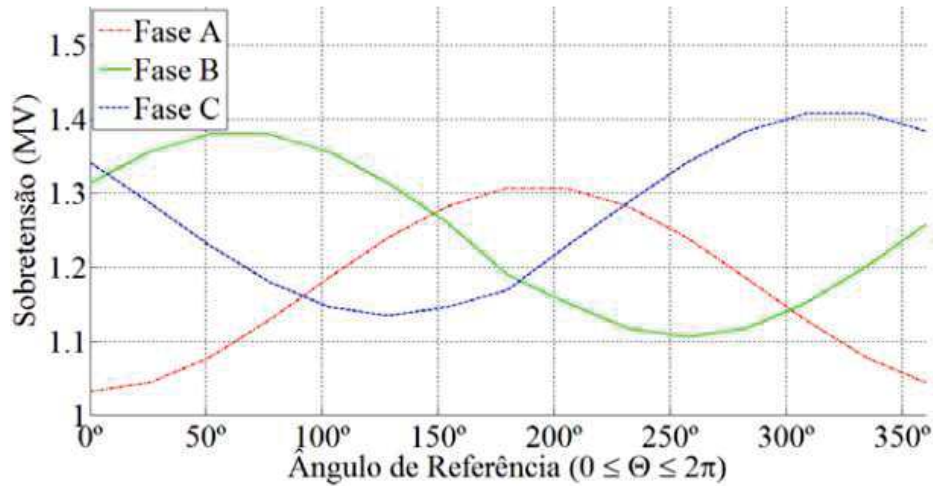


Figura 20 - Sensibilidade da máxima sobretensão nas cadeias de isoladores à variação do ângulo de referência.

Fonte: (MARIANO, 2012)

Com relação aos parâmetros do caso base, quando as tensões de fase são negligenciadas, o valor estimado do desempenho sofre uma redução de 13,5 %, ressaltando a relevância que as fontes de excitação do sistema exercem no cálculo da taxa de backflashover. Observando a Figura 20, verifica-se a dominância de cada uma das fases em intervalos bem definidos do ciclo operacional. Analogamente, tal característica é refletida nos índices de desempenho estimados, apresentados na Figura 21, que exibe o perfil da taxa de desligamentos da linha em função da variação do ângulo de referência.

Neste caso, é interessante salientar que as diferenças nas probabilidades calculadas, considerando o modelo de J. Martí e o modelo de parâmetros constantes com a frequência são mais expressivos na avaliação da variação incremental dos parâmetros da componente de baixa frequência (MARIANO, 2012).

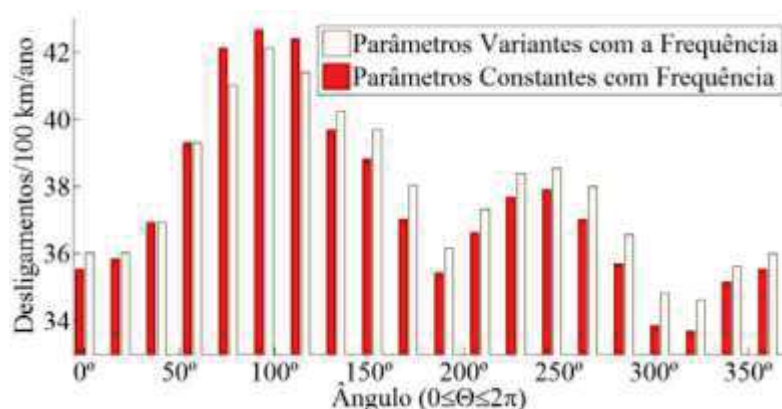


Figura 21 - Avaliação da influência do ângulo de referência da tensão na frequência de operação, no desempenho do sistema.

Fonte: (MARIANO, 2012)

5.5 Modelo Eletrogeométrico

Visando avaliar a influência das diferentes calibrações dos parâmetros da formulação empírica do raio de atração, na taxa de desligamentos do sistema de transmissão em causa, foi desempenhada uma análise comparativa da taxa de *backflashover*. Os resultados, apresentados na Tabela 11, mostram as diferenças nas taxas de desligamento estimadas considerando os parâmetros do caso base. Para este valor específico, verifica-se que as aproximações de Wagner e Anderson-1973 divergem de forma apreciável, em suas estimativas, das demais calibrações (MARIANO, 2012).

Os resultados mostrados na Tabela 12, apenas reiteram as diferenças observadas no cálculo do raio de atração por meio de cada uma das aproximações consideradas. O MEG é um artifício bastante engenhoso e conduz a resultados de valor prático destacados. Entretanto, em sua concepção, tal procedimento admite inúmeras simplificações e ajustes experimentais, evidenciando a necessidade do desenvolvimento de metodologias mais elaboradas e que descrevam as interações descarga-linha de forma mais realista, a despeito do esforço computacional associado (MARIANO, 2012).

Tabela 12 - Comparação entre as diferentes calibrações do MEG.

Eletrôgeométrico	<i>Backflashover</i>
Wagner	21,78
Darveniza	40,08
Armstrong	45,36
Anderson - 1975	25,08
Anderson - 1993	37,59

Fonte: (MARIANO, 2012)

5.6 Análise comparativa em CIGRÉ e CEMIG

Em diversos estudos, o parâmetro T_d relativo às descargas atmosféricas e diversos outros parâmetros como, resistências de aterramento relativos às linhas de transmissão, são aumentados em 100, 75, 50 e 25% e diminuídos em 25, 50 e 75% dos valores do caso base. Estas variações são propostas para fins de comparação e análise do desempenho da linha sob diversas situações. Tais análises são executadas seguindo dois diferentes métodos para o cálculo de N_g (ALVAREZ, 2011):

1. CIGRÉ – Formulação clássica.
2. CEMIG – Formulação proposta para Minas Gerais.

Ao se traçar um gráfico com diversos valores de T_d para as formulações de densidades de descargas, N_g , proposta pelo CIGRÉ – Equação 3, utilizada no *Flash* (formulação clássica), e a proposta pela CEMIG para o estado de Minas Gerais – Equação 4, encontra-se as seguintes curvas representadas na Figura 22 (ALVAREZ, 2011).

Pela Figura 22 pode-se concluir que a formulação utilizada no *Flash* apresenta resultados bem mais conservadores do que quando se utiliza a formulação proposta pela CEMIG, principalmente valores altos de T_d . Observa-se então que, para um valor médio de T_d do estado de Minas Gerais (70), o resultado calculado para a formulação clássica é duas vezes maior que aquele da formulação proposta pela CEMIG. Tendo em vista que o N_g medido na região mineira é de 4, constata-se evidentemente uma melhor adequação da formulação da CEMIG para estudos de desempenho de linhas de transmissão situadas no estado de Minas Gerais (ALVAREZ, 2011).

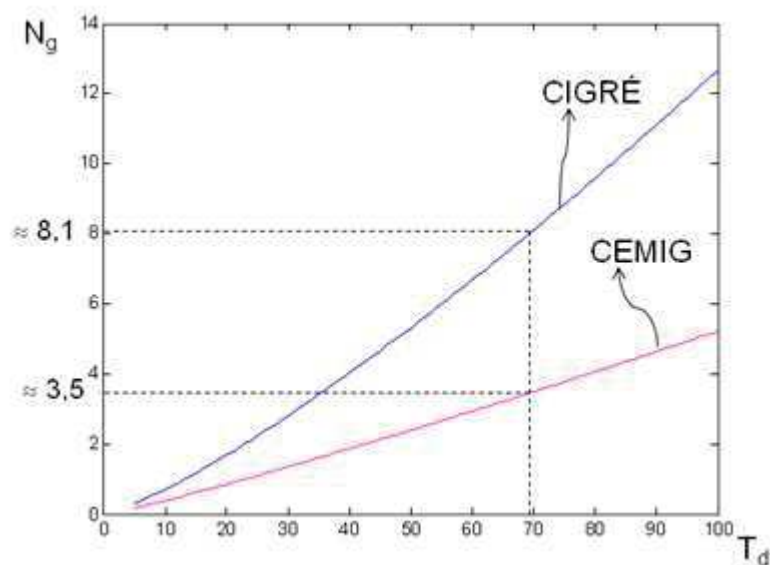


Figura 22 - Curvas $N_g \times T_d$ para a formulação CIGRÉ e CEMIG.

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

Outro parâmetro que deve ser considerado é a função de distribuição de probabilidade cumulativa do pico de corrente ($P[I \geq I_p]$): normalmente, o *Flash* utiliza resultados de medição realizados em San Salvatore, na Suíça, por K. Berger, que indicam um valor mediano de pico de corrente de descarga atmosférica de aproximadamente 30 kA. Por outro lado, medições realizadas no Brasil, mais especificamente em Minas Gerais, na Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo, resultaram em um valor mediano de 45 kA.

Com os estudos realizados, pode-se constatar que existe uma profunda relação entre a resistência de aterramento e o valor da corrente crítica da descarga atmosférica capaz de causar disrupção nas cadeias de isoladores. Após inúmeras simulações computacionais, verificou-se que para aterramentos elétricos com baixos valores de resistências, somente correntes críticas acima de aproximadamente 70 kA provocam disrupção nas cadeias de isoladores; por outro lado, em regiões que apresentam aterramentos com valores maiores de impedância, corrente menores que 70 kA são suficientes para ocasionar disrupção (ALVAREZ, 2011). A Figura 23 ilustra os comportamentos de ($P[I \geq I_p]$) para as formulações do CIGRÉ e da CEMIG.

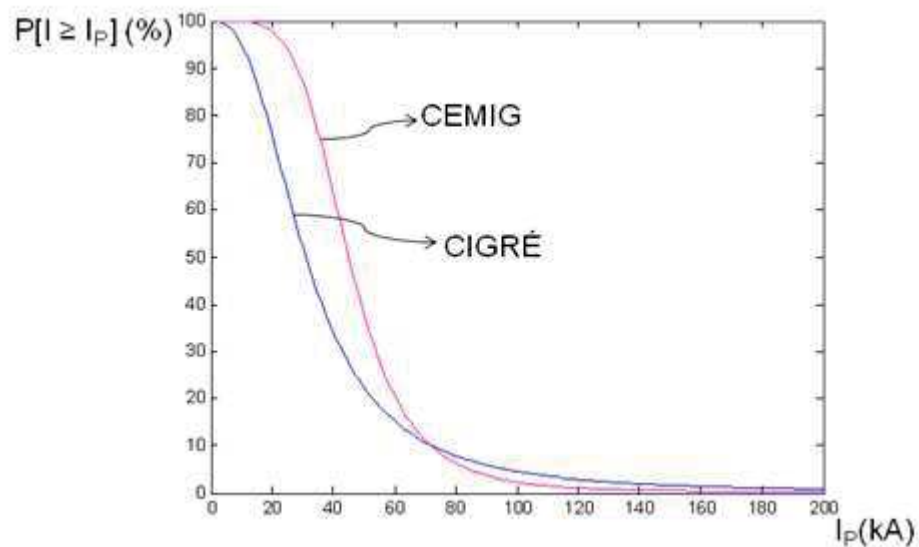


Figura 23 - Comportamento das funções de distribuição de probabilidade cumulativa do pico de corrente Flash (CIGRÉ - clássica) x CEMIG (MG).

Fonte: (ALVAREZ, 2011).

O comportamento das funções de distribuição de probabilidade cumulativa do pico de corrente utilizadas pelo *Flash* (CIGRÉ) e pela CEMIG apresentam uma transição de comportamento justamente em torno de 70 kA (Figura 23): abaixo de 70 kA esta função é maior para o caso das medições realizadas no Brasil e acima de 70 kA o domínio passa a ser das medições realizadas por K. Berger na Suíça. Este comportamento tem impacto direto no cálculo do desempenho final da linha, pois para correntes abaixo de 70 kA a utilização da probabilidade cumulativa levantada de medições no Brasil gera maiores taxas de desligamento, enquanto para correntes acima de 70 kA aquela oriunda das medições da Suíça apresenta taxas maiores (ALVAREZ, 2011).

6. Conclusão

Neste trabalho é apresentado um estudo do estado da arte para os principais pontos a serem abordados quando se estuda desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Sendo descritos inicialmente, os aspectos gerais da teoria de desempenho de linhas de transmissão e, em seguida, as principais aproximações, modelos e métodos utilizados, mais consolidados na área. A menção ao software *Flash 1.9* desenvolvido pela IEEE e sua utilização como critério balizador para análises comparativas, se deve a sua grande utilização tanto por parte dos usuários e concessionárias de energia, como por parte dos estudiosos e pesquisadores de desempenho de linhas frente às descargas, confirmando assim, a sua intensa aplicação.

Com relação aos parâmetros de incidência geográfica, constata-se a necessidade da adequação de ajustes experimentais, que traduzam a identidade meteorológica da região na qual o sistema é instalado, pois este fator possui elevada expressão na influência do desempenho das linhas, que impacta diretamente na probabilidade cumulativa do pico de corrente, I_p , uma vez que o valor de pico da corrente da descarga atmosférica varia de região para região. Percebe-se que os valores da corrente crítica determinam qual função de probabilidade de pico de corrente (CIGRÉ X CEMIG) será mais conservativa nas respostas das taxas de desligamento das linhas, em função da resistência de aterramento. Estas análises mostram que é de fundamental importância conhecer as principais grandezas físicas que promovem maior impacto no desempenho das linhas, para se obter resultados reais mais condizentes nos cálculos desse desempenho, é imprescindível a utilização de expressões e parâmetros das descargas atmosféricas típicas da região onde a linha analisada está instalada.

É oportuno salientar que, com estudos dos diversos parâmetros que influenciam no cálculo do desempenho de uma linha de transmissão se consegue atingir um número de desligamentos da linha que seja econômica e seguramente aceitável. Deste modo, é importante conciliar os melhores índices de desempenho com um projeto economicamente viável e que obedeça aos padrões estipulados pelas normas locais em vigência.

Com tal estudo pode-se perceber que os parâmetros adotados neste trabalho caracterizam de forma satisfatória o comportamento das linhas de transmissão submetidas a surtos atmosféricos, logo, percebe-se que um estudo para o projeto de linhas de transmissão

abrange muitos parâmetros, não apenas os ligados ao projeto das linhas, tornando, na maioria das vezes, as metodologias que calculam o desempenho das linhas de transmissão bastante complexas e trabalhosas. Isto explica diversas aproximações que são utilizadas no trato de desempenho e linhas de transmissão.

7. Propostas de continuidade

No decorrer deste trabalho foram consideradas inúmeras simplificações, na metodologia, nos modelos selecionados, não sendo abordado em toda sua profundidade e complexidade o referencial teórico, necessário para o completo entendimento de todos os parâmetros envolvidos no cálculo de desempenho de linhas de transmissão. Diante do exposto, os desenvolvimentos alcançados suscitam diversas discussões e servem de objeto para inúmeras investigações futuras, a saber:

- Investigação da influência das diferentes modelagens das torres no desempenho do sistema.
- Consideração de funções matemáticas mais representativas das formas de ondas observadas experimentalmente.
- Consideração de incidência de descargas não apenas verticalmente. Realização de um estudo para considerar no cálculo de desempenho, linhas de transmissão que possam ter mais de 2 (dois) cabos para-raios.
- Investigação da validade de instalação de equipamentos para raios em paralelo com a cadeia de isoladores.
- Verificação do efeito do solo nos valores das impedâncias de surto própria e mútua dos cabos fase e para-raios;

8. Bibliografia

ABNT – NBR 5419, **PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ALVAREZ, Clarissa Gomes Cosentino. **UM AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João Del-Rei, Belo Horizonte, 2011. (ALVAREZ, 2011).

ANDERSON, J.G., **TRANSMISSION LINE REFERENCE BOOK**, 345 kV and Above, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA, 1982.

ARMSTRONG, H.R., Whitehead, E.R., **FIELD AND ANALYTICAL STUDIES OF TRANSMISSION LINE SHIELDING**, IEEE Transaction on PAS, vol. 87, pp. 270-281, Jan. 1968.

BROWN, G.W., Whitehead, E.R., **FIELD AND ANALYTICAL STUDIES OF TRANSMISSION LINE SHIELDING – II**, IEEE Transaction on PAS, Vol. 88, pp. 617-626, 1969.

C. G. A. COSENTINO, M. A. O. Schroeder, M. M. S. Andrade, U. C. Resende, A. G. Pedrosa, **“COMPUTATIONAL TOOL FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF TRANSMISSION LINES FRONT TO ATMOSPHERIC DISCHARGES: BASED ON FLASH SOFTWARE”**, *The International Workshop on Applied Modeling and Simulation (WAMS)*, Armação de Búzios, May 2010.

CIGRÉ Working Group 33.01, **“GUIDE TO PROCEDURES FOR ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES”**, Outubro de 1991.

F. J. DE SOUZA, **“COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E CÁLCULO DE DESEMPENHO UTILIZANDO O FLASH/IEEE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBMETIDAS A SURTOS ATMOSFÉRICOS”**, Trabalho de Graduação (TG), Departamento de Engenharia Industrial Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica

de Minas Gerais, (DEE/CEFET-MG), 2008.

GOLDE. R.H. (editor), **“LIGHTNING – VOLUME 1 – PHYSICS OF LIGHTNING”**, Livro, Academic Press Inc, Londres, Inglaterra, 1977.

LOVE, E.R., **IMPROVEMENTS IN LIGHTNING STROKE MODELING AND APPLICATIONS TO THE DESIGN OF EHV AND UHV TRANSMISSION LINES**, MSC. Thesis, Colorado University, USA, 1973.

MARIANO, José Antônio de Souza. **UM AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA CÁLCULOS DE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS E DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SEGUNDO UMA ABORDAGEM ESTOCÁSTICA**. 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João Del-Rei, São João del Rei, 2012.

M. M. S. ANDRADE, **“DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**, Relatório Final de Iniciação Científica – CNPq: Ciclo 2008-2009, Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, (DEE/CEFET-MG), 2009.

M. S. SAVIC, **“MEDIUM VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEMS LIGHTNING PERFORMANCE ESTIMATION”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, pp. 910-914, July 2003. (M. S. SAVIC, 2003).

SARAN, M. A. M., 2009. **SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO**. *Dissertação de mestrado*.

SOARES, A., Schroeder, M. A. O. & Visacro, S., 2005. **TRANSIENT VOLTAGES IN TRANSMISSION LINES CAUSED BY DIRECT LIGHTNING STRIKES**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, April. Volume VOL 20.

SOARES JÚNIOR, Amilton. **MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. 2001. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, 2001.

SULICIU, M. M. & Suliciu, I., 1981. **TYPE CONSTITUTE EQUATION FOR THE DESCRIPTION OF THE CORONA EFFECT**. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, pp. 3681-368.

TEIXEIRA, F. J. T., Cordeiro, M. R., Resende, F. O. & Moura, A. C. S. M., 2002. **APLICAÇÃO DO EMTP - ATP AO ESTUDO COMPORTAMENTAL DOS ELÉCTRODOS DE TERRA EM SISTEMAS ELÉCTRICOS DE ENERGIA – UTILIZAÇÃO DE DIVERSOS MODLEOS BIBLIOGRÁFICOS**. Revista Iberoamericana del ATP.

T. NARITA, T. Yamada, A. Mochizuki, **“OBSERVATION OF CURRENT WAVESHAPES OF LIGHTNING STROKES ON TRANSMISSION TOWERS”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, n. 1, pp. 429-435, Jan. 2000.

UMAN, M.A., **“LIGHTNING”**, Livro, Editora McGraw-Hill Book Company, 1984.

UNIAN, M.A., Krider, E P., **"A REVIEW OF NATURAL LIGHTNING: EXPERIMENTAL DATA AND MODELING"**, IEEE Transactions on electromagnetic Compatibility (EMC), vol. EMC-24, no.2, Maio de 1982.

VISACRO FILHO, Silvério. **DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artiber, 2005. 268 p.

W. A. CHISHOLM, **“THE IEEE FLASH PROGRAM: A STRUCTURE FOR EVALUATION OF TRANSMISSION LIGHTNING PERFORMANCE”**, T. IEE Japan, vol. 121-B, no. 8, pp. 914-917, 2001.

WAGNER, C. F. & Hileman, A. R., 1961. **THE LIGHTNING STROKE; PART II**. AIEE Transactions, pp. 622-642.

ZANETTA Júnior, L. C., 2003. **TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**. São Paulo: Edusp-Editora da Universidade de São Paulo.

ZANETTA Júnior, L. C., 2003. **TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**. São Paulo: Edusp-Editora da Universidade de São Paulo.

WAGNER, C. F., McCann, G. D. & MacLane, G. L., 1941. **SHIELDING OF TRANSMISSION LINES.** *AIEE Transactions*, Volume 60, pp. 313-328.

VISACRO, S. F. & Soares, J., 2005. **HEM: A MODEL FOR SIMULATION OF LIGHTNING RELATED PROBLEMS.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1206-1208.



RELATÓRIO FINAL DE CURSO N° 3/2025 - DENP (11.62.04)

(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 06/03/2025 15:42)
ITALO ARTHUR JOAO WILSON SILVA MEIRELES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DENP (11.62.04)
Matricula: ###624#3

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 3, ano: 2025, tipo:
RELATÓRIO FINAL DE CURSO, data de emissão: 06/03/2025 e o código de verificação: a6cbe8ac4f