

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS
ENGENHARIA ELÉTRICA
LUCAS FELIPE FLAUZINO DA SILVA

UMA ANÁLISE DE SOBRE TENSÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO
FRENTE A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA

Varginha

2018

LUCAS FELIPE FLAUZINO DA SILVA

**UMA ANÁLISE DE SOBRE TENSÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO
FRENTE A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Adilson Amaro da Silva.

Varginha

2018

LUCAS FELIPE FLAUZINO DA SILVA

**UMA ANALISE DE SOBRE TENSÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO
FRENTE A UMA DESCARGA ATMOSFÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: ____ / ____ / _____

Prof. Adilene Tirelli

Prof. Silvio Bottrel

Rafael Kerner

OBS:

Dedico este trabalho principalmente a meus pais, meus avós e tios por todo companheirismo e motivação fornecidos ao longo do período cursado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda proteção, saúde e sabedoria, a minha avó e minha tia que sempre me apoiaram e me deram força, meu pai por toda dedicação que fez tornar meu sonho possível que sempre me incentivou e me deu forças, meus amigos pela compreensão.

“O sonho das pessoas não tem fim!”

Marshall D. Teach

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo demonstrar uma análise de sobre tensão e desempenho de uma LT frente a uma descarga atmosférica. Esse trabalho tem como metodologia aplicada o estudo bibliográfico e também simulações com a utilização do *Matlab/Simulink*. Foi feito nessa segunda etapa deste trabalho uma simulação utilizando o *Matlab/Simulink*, análise essa com foco no desempenho e estabilidade da linha de transmissão. Ao final desse trabalho foi concluído o sinal de uma LT frente a uma descarga atmosférica, provando sua instabilidade e seu desempenho frente a mesma, feito a partir da análise do sinal obtido. Sendo um trabalho de extrema importância para sociedade no geral e também para o engenheiro electricista, já que um desligamento não programado de uma linha de transmissão irá acarretar em diversos problemas de ordem econômica e também social.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas. Linhas de Transmissão. *Flasshover*. *Backflashover*.

ABSTRACT

The objective of this paper is to demonstrate an overvoltage and performance analysis of a LT against an atmospheric discharge. This work has as applied methodology the bibliographic study and also simulations with the use of Matlab / Simulink. A second simulation was performed using Matlab / Simulink, which focused on the performance and stability of the transmission line. At the end of this work the signal of an LT was concluded before an atmospheric discharge, proving its instability and its performance in front of it, made from the analysis of the obtained signal. Being a work of extreme importance for society in general and also for the electrical engineer, since an unplanned shutdown of a transmission line will entail several economic and social problems.

Keywords: *Atmospheric Discharges. Transmission Lines. Flasshover. Backflashover.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de estrutura de LT	18
Figura 2 – Circuito LT curta.....	19
Figura 3 – Circuito LT média.....	20
Figura 4 – Circuito LT longa.....	20
Figura 5 – Ruptura de isolamento ou flashover.....	23
Figura 6 – Ruptura de isolamento por backflashover.....	25
Figura 7 – Tensão resultante no topo de uma torre de transmissão.....	27
Figura 8 – Ruptura a meio de vão	28
Figura 9 – Configurações típicas do aterramento de uma LT	34
Figura 10 – Mapa de descargas de densidade no Brasil	39
Figura 11 - Sinal de uma LT referente a uma descarga atmosférica	45
Figura 12 - Primeira simulação	46
Figura 13 - Segunda simulação	46
Figura 14 - Terceira simulação	47
Figura 15 - Quarta simulação	47
Figura 16 - Simulação final 1	48
Figura 17 - Simulacao final 2	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Expressões para o cálculo do raio de atração.	24
Quadro 2– Expressões para o cálculo do comportamento de onda de sobre tensão refletida no solo.	26
Quadro 3– Valores típicos de NBI das linhas de transmissão e número de isoladores por nível de tensão.	30
Quadro 4 – Equações de surto de uma torre de LT de Darveniza e de Wileman.....	32

LISTA EQUAÇÕES

Equação 1	23
Equação 2	24
Equação 3	24
Equação 4	26
Equação 5	26
Equação 6	29
Equação 7	31
Equação 8	32
Equação 9	32
Equação 10	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
ATM	Atmosférica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CFO	<i>Critical Flashover Voltage</i>
DF	Indicação de Direção
EAT	Extra Alta Tensão
HEM	<i>Hybrid Electro Magnetic Model</i>
IEC	<i>International Eleetchnical Commission</i>
IMPACT	<i>Improved Accuracy from Combined</i>
KV	Quilovolt
LLP	<i>Lightning Location and Protection System</i>
LLS	<i>Lighting Location System</i>
LPATS	<i>Lighting Position and Tracking System</i>
LT	Linhas de Transmissão
NBI	Nível Básico de Isolamento
SAFIR	<i>Système d"Alerte Foudre por Interérométrie Radioélectrique</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
UAT	Ultra Alta Tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 LINHAS DE TRANSMISSÃO	16
2.1 Classificação das LT	16
3 INCIDÊNCIA DIRETA E INDIRETA DE DESCARGAS ELÉTRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	21
3.1 Incidência Indireta de Descargas Atmosféricas na Linha	21
3.2 Incidência Direta de Descargas ATM na LT	22
3.3 Ruptura de Isolamento por Incidência Direta nos Condutores: <i>Flashover</i>	22
3.4 Ruptura de Isolamento por Incidência Direta nos Cabos de Blindagem: <i>Backflashover</i>	25
3.5 Ruptura a Meio de Vão	27
4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NOS DESLIGAMENTOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	29
4.1 Blindagem.....	29
4.2 Características de Isolamento.....	30
4.3 Principais Características da Torre e Dos Cabos de Uma Linha de Transmissão...	31
4.4 Altura da Torre.....	31
4.5 Impedância de Surto da Torre	32
4.6 Condutores e Sua Impedância de Surto	33
4.7 Aterramento de Uma Linha de Transmissão.....	33
5 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SEUS PARÂMETROS	35
5.1 Processo de Formação	35
5.2 Fenômenos Envolvidos no Estabelecimento da Descarga Elétrica	36
5.3 Transferência de Carga Para o Solo: Descarga Negativa	36
5.4 Descarga Positiva	37
6 ÍNDICE CERÁUNICO	38
7 RELAÇÃO ENTRE TD E NG	40
7.1 Técnicas de Indicação de Direção: DF.....	40
7.2 Técnica de Variação no Tempo de Chegada	41
7.3 Técnica Interferométrica	41
7.4 Técnica de Detecção em Operação.....	42
8 DISCRIMINAÇÃO DOS TIPOS DE DESCARGAS E ESTIMATIVA DE PARÂMETROS.....	43
9 ANÁLISE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO DO PROGRAMA MATLAB.....	44
9.1 As LT frente a descarga atm.....	44
9.2 Iniciando as simulações	45

10 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
11 CONCLUSÕES.....	52
REFERENCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia no cenário elétrico brasileiro, as empresas de energia elétrica têm tido uma grande preocupação com os desligamentos não programados em uma linha de transmissão, desligamento esses que nesse artigo terão como foco as descargas atmosféricas, porém existe outros meios de ocorrência.

Sabe-se também que a maior parte destes desligamentos não programados em uma linha de transmissão se deve pelas descargas atmosféricas. Falhas na linha causadas por descargas atmosféricas são comuns, e em muitos casos são eliminadas pelo próprio equipamento de proteção da linha, que consegue religar a mesma poucos segundos depois. Porém, quando ocorre novamente um desligamento na mesma, isso pode exceder a sua frequência aceitável de desligamento, o que pode prejudicar a qualidade da energia entregue aos clientes. Caso ocorra algum problema com o sistema da linha, a mesma pode vir a não religar, com isso pode acarretar inclusive na indisponibilidade da linha, causando problemas de ordem econômica para empresa e para sociedade em geral.

Neste trabalho foram apresentados os resultados de uma pesquisa realizada sobre esses importantes fenômenos que devem ser levados em conta em avaliações sobre tensão e também desempenho da linha de transmissão.

Tendo como objetivo primário, estudar o sinal de sobre tensão pós incidência da descarga atmosférica e também o desempenho da linha de transmissão frente ao fenômeno, e como elas se comportam, é um tema de extrema importância para o engenheiro electricista, principalmente no Brasil, onde tem-se o transporte de energia elétrica feito principalmente por essas linhas, e as mesmas percorrem grandes distancias do centro de geração até o centro de consumo, algo que faz da linha de transmissão um alvo fácil para descargas atmosféricas o que dependendo de como essa descarga atingir a linha, pode acarretar em seu desligamento, algo que causara prejuízos em diversas áreas.

A metodologia aplicada foi o estudo bibliográfico para entender teoricamente o que ocorre na linha frente uma descarga atmosférica, e por fim simulações utilizando o *Matlab/Simulink*, a fim de demonstrar matematicamente o sinal de sobre tensão e o desempenho de uma linha frente a descargas atmosféricas.

2 LINHAS DE TRANSMISSÃO

A Linhas de Transmissão (LT) são um dos componentes mais importante de um sistema elétrico de potência. Tendo como sua função primária o transporte de energia elétrica com o mínimo de perdas, do centro gerador até o centro consumidor, centros esses que geralmente estão separados por grandes distâncias, principalmente no sistema elétrico de potência brasileiro (PINTO, 2014). Uma LT é formada, basicamente, por torres, condutores, cabos de blindagem e isoladores, e seu circuito pode ser simples, duplo ou múltiplo.

As linhas de transmissão podem variar seu comprimento dependendo do nível de tensão que se pretende transportar. Linhas que percorrem grandes distâncias geralmente são para grandes blocos de energia elétrica.

De acordo com Oliveira (2009), a teoria básica por trás de uma LT, pode ser aplicada a qualquer tipo de linha. Porém, cada tipo de linha irá possuir diferentes propriedades, essas propriedades dependem basicamente da frequência (Hz), nível de tensão (V), quantidade de potência a ser transmitida (W), modo em que essa potência será transmitida, se vai ser de maneira subterrânea ou aérea (por sinal, uma linha subterrânea tende a ter um custo muito elevado na hora de realizar o projeto e também de sua manutenção, por isso é usada em sua grande maioria em grandes centros urbanos), a distância que vai ter entre os condutores de energia e os receptores, entre algumas outras variáveis.

Dito isto, serão tratados assuntos com direcionamento para as linhas de transmissão de potência.

2.1 Classificação das LT

De acordo com Pinto (2014), a evolução histórica dos sistemas de energia elétrica (tanto de forma regional quanto de forma nacional) não permitiu uma padronização das tensões. Atualmente, o IEC (*International Electrotechnical Commission*) recomenda (para tensão nominal/tensão máxima) os valores de: 330 a 345/362 kV; 380 a 400/420 kV; 500/525 kV; 700 a 750/765 kV.

No Brasil os níveis de tensões padronizadas são:

- a) Transmissão: 750, 500, 230, 138 e 69 kV;
- b) Subtransmissão: 138, 69 e 34,5 kV.

Dentro desses parâmetros de acordo com Oliveira (2009) existe também a caracterização das tensões de transmissão que são divididas em:

- a) Alta tensão (AT): LTs com tensões entre 69 kV e 230 kV;
- b) Extra Alta Tensão (EAT): LTs com tensão entre 230 kV e 765 kV;
- c) Ultra Alta Tensão (UAT): LTs com tensão acima de 765 kV.

As linhas de UAT ainda estão em estudos, podendo chegar até em transmissões de 1000 kV. No Brasil LT de 750 a 765 kV são uma minoria.

No Brasil, a Resolução da Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) número 456/2000 estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, definindo em seis subgrupos:

- a) A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;
- f) AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, atendida a partir de um sistema subterrâneo de distribuição e faturada neste grupo em caráter opcional.

Os subgrupos A1 e A2 são a rede básica (ou SIN – Sistema Interligado Nacional), já que esta é definida pela Aneel como instalações de transmissão de energia elétrica que integram o SIN, de propriedade das concessionárias de serviço público de transmissão (PINTO, 2014).

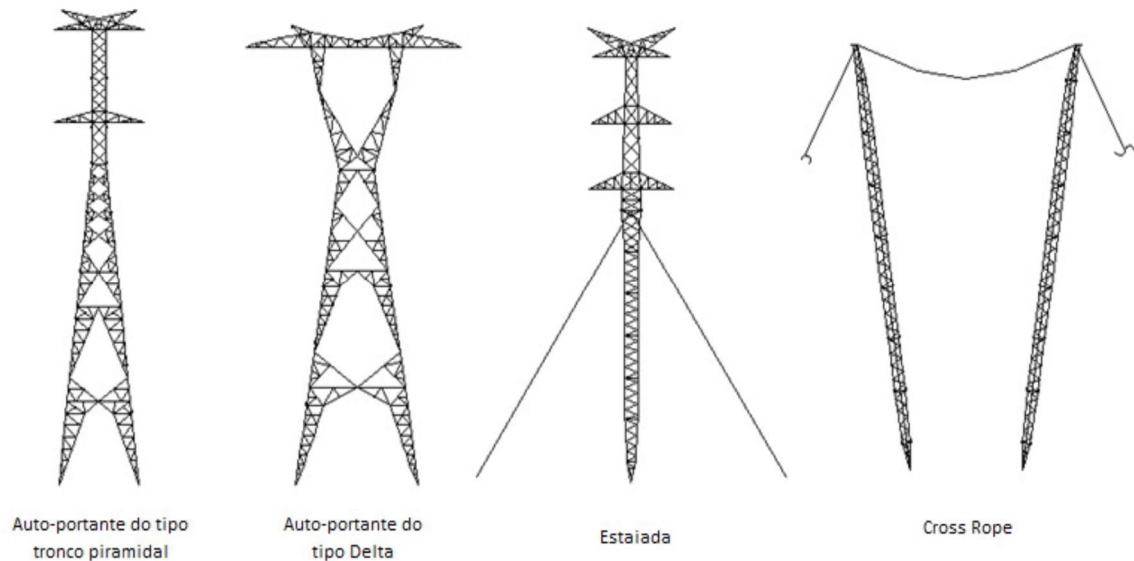
Tem-se também a torre ou estrutura de sustentação dos cabos condutores e para-raios da linha de transmissão. Essas torres são dimensionadas para manter os cabos distanciados das partes que estão aterradas de forma assim compatível com o nível de tensão da linha e também de forma que sustentem o esforço mecânico causado pelos cabos, para cada nível de tensão tem-se um desenho específico.

Os tipos mais usuais de estruturas são:

- a) Entrelaçada: auto-portante ou estaiada;
- b) Tubular: auto-portante;
- c) Concreto: auto-portante;
- d) Madeira: auto-portante (apenas para tensões inferiores a 88 KV).

A seguir na Figura 1, pode-se ver alguns desses tipos de estruturas citadas, com exceção da torre de concreto e da de maneira.

Figura 1 – Tipos de estrutura de LT



Fonte: Vitoração (2018).

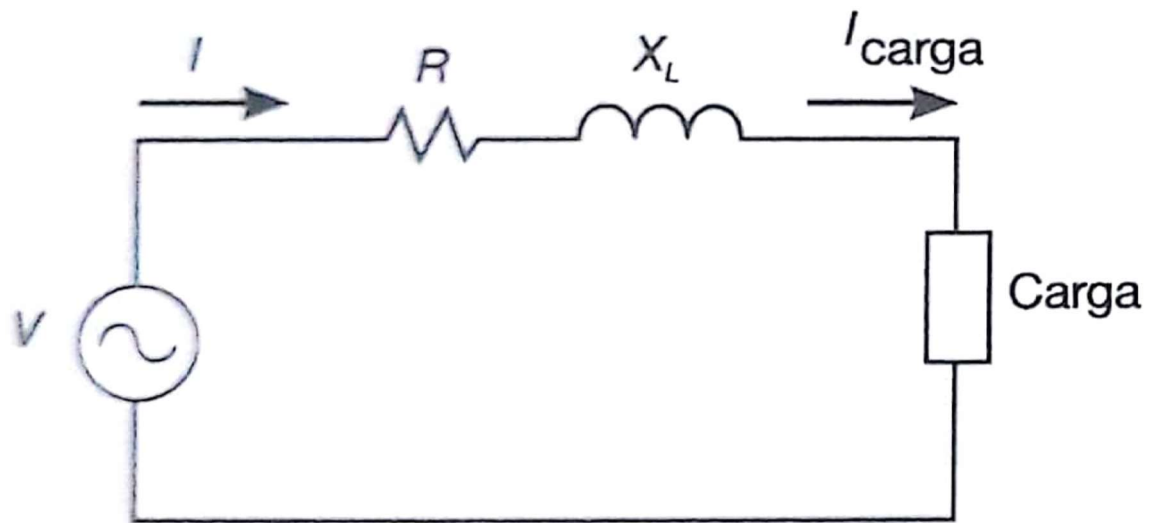
As LT são classificadas em:

- Linhas de transmissão longa: comprimento $> 249\text{km}$;
- Linhas de transmissão média: $80 < \text{comprimento} < 249\text{km}$;
- Linhas de transmissão curta: comprimento $< 80\text{km}$.

Como acaba de ser mostrado, a disposição dos parâmetros de uma LT depende do comprimento desta, sendo mostrado na forma de um circuito elétrico. A análise de circuito é feita para três situações: para uma linha de transmissão curta, para uma média e para uma longa.

- Linha de transmissão curta, nada mais é que uma linha inferior a 80km . Neste caso o efeito do capacitor *shunt* pode ser desprezado, sendo consideradas apenas a resistência e a reatância indutiva (parâmetros série). Assumindo as condições de equilíbrio, a linha pode ser representada por um circuito equivalente monofásico, com uma resistência R e uma reatância indutiva X_L em série, como mostrado na Figura 2.

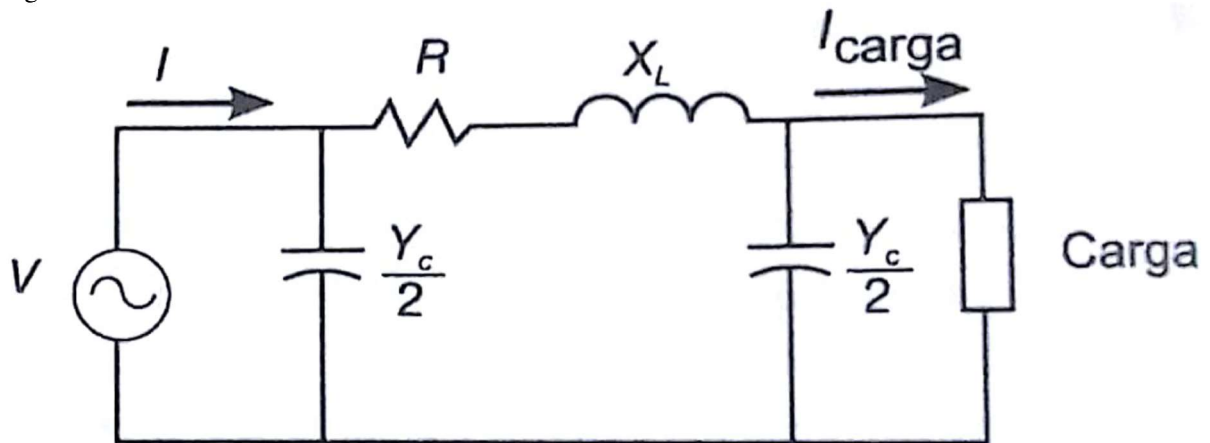
Figura 2 – Circuito LT curta



Fonte: Pinto (2014).

- b) Linha de transmissão média, nada mais do que uma LT que tem sua distância entre 80km e 240km. Nesse caso, o efeito do capacitor *shunt* (Y_c) é dividido em duas partes iguais, dispostas no início e no fim da linha. Esta é representada também por um circuito equivalente monofásico, sendo chamado de configuração π , devido ao formato semelhante com a letra, como mostrado na Figura 3.

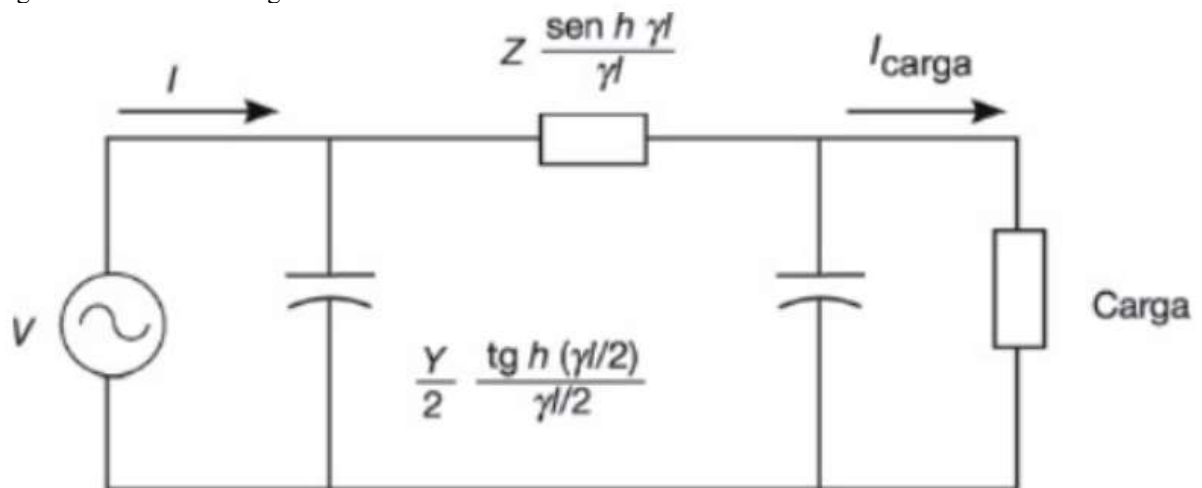
Figura 3 – Circuito LT média



Fonte: Pinto (2014).

- c) Linhas de transmissão longa são as linhas que ultrapassam 249 km, então, os parâmetros dessa linha, por ser bastante extensa, tem que ser distribuídos de maneira uniforme ao longo do caminho. A impedância e a capacitância *shunt* são determinadas por meio da solução de equações diferenciais, em que a tensão e a corrente são descritas em função da distância e do tempo. A Figura 4 demonstra o circuito equivalente de uma LT longa.

Figura 4 -Circuito LT longa



Fonte: Pinto (2014)

3 INCIDÊNCIA DIRETA E INDIRETA DE DESCARGAS ELÉTRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Neste item o foco principal será também o mais importante, já que a descarga atmosférica é fonte de 70% dos desligamentos não-programados que podem ocorrer em uma linha de transmissão, em que o mesmo possui como característica uma baixa impedância de falta e, normalmente, pode ser também correlacionado com a ocorrência de descargas localizadas através de um sistema de localização por descargas atmosféricas-LLS (*Lighting location system*) (VISACRO, 2005). Neste mesmo item o tipo de desligamento provocado por descarga atm (Atmosférica) em linha de transmissão tem assim o estabelecimento das sobretensões nas cadeias de isoladores ou entre os condutores da linha, algo que acaba levando a ruptura do seu isolamento sendo pela incidência direta ou da indireta.

Sendo assim, uma ocorrência específica e com muito interesse prático, refere-se à incidência direta de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Com base na altura usual em relação ao solo e também sua extensão, uma base de incidência muito ampla, torna significativa a probabilidade de uma ocorrência de descarga direta na linha (VISACRO, 2005).

Sua importância torna-se especialmente maior nos sistemas elétricos de potência existentes no Brasil. Em função da grande distância entre as fontes de energia (usinas elétricas e demais) e os maiores centros de consumo, as linhas de transmissão locais são bastante extensas. Esse aspecto acarreta uma grande possibilidade de desligamento dessas linhas por solicitação de seus isoladores devido à sobretensões de origem atmosférica (VISACRO, 2005).

O desligamento de uma linha gera sérios problemas da ordem social e econômica com a falta de alimentação de energia, o que pode motivar a interrupção de processos produtivos industriais em toda macrorregião. O desligamento de uma linha pode também comprometer os equipamentos de saúde e segurança de grandes cidades, quando debilita a operação dos sistemas de segurança como: o corpo de bombeiros, polícia e também os sistemas básicos hospitalares. Isso acaba tornando muito estrito sua expectativa de desempenho (VISACRO, 2005).

3.1 Incidência Indireta de Descargas Atmosféricas na Linha

Com a ocorrência de uma descarga atmosféricas nas proximidades de uma linha de transmissão, mesmo que esta não atinja a linha, cada elemento que compõe o canal da descarga atmosférica, atua como uma fonte de campo eletromagnético, que ao “iluminar” a linha, induz assim uma tensão na mesma que dependendo do valor de pico da corrente e tempo de frente da

onda de descarga pode vir a gerar uma sobre tensão nessa linha, algo que, caso o seu nível de suportabilidade seja baixo, vai gerar uma instabilidade ou até um desligamento da LT. Nesta situação as amplitudes das sobretensões induzida nos condutores podem ter valores máximos da ordem de algumas centenas de quilovolts, o que representa uma grande preocupação para o desempenho de sistemas elétricos de baixa e média tensão, já que essas linhas normalmente têm uma suportabilidade inferior a linhas de extra alta tensão (VISACRO, 2005).

Já as linhas de extra alta tensão possuem uma tensão máxima de suportabilidade ao impulso da ordem de 800 a 2000kV ou até maior, logo, as tensões induzidas por descargas indiretas não irão apresentar riscos para esse tipo de linha (CUNHA, 2010).

3.2 Incidência Direta de Descargas ATM na LT

Em linhas de transmissão superiores a 230kV, a incidência direta de uma descarga atmosférica na linha de transmissão (LT), é sem dúvida onde tem-se a maior probabilidade de ocorrer um desligamento, já que é onde as LTs são extensas, linhas que percorrem grandes distancias, se tornando assim um alvo de grande potencial. Há assim, três mecanismos básicos de ruptura caso ocorra diretamente uma incidência de descarga atmosférica na linha (VISACRO, 2007):

- a) Ruptura de isolamento por incidência direta nos cabos condutores ou *Flashover*;
- b) Ruptura de isolamento por incidência direta nos cabos de blindagem ou *Backflashover*;
- c) Ruptura a meio de vão por incidência de descargas em cabos de blindagem;

3.3 Ruptura de Isolamento por Incidência Direta nos Condutores: *Flashover*

Quanto a ocorrência do *flashover*, que nada mais é, que a ruptura no isolamento de uma linha de transmissão, devido a ocorrência de uma descarga atmosférica direta nos condutores da mesma, seja pela ausência de cabos de blindagem ou pela falha deles.

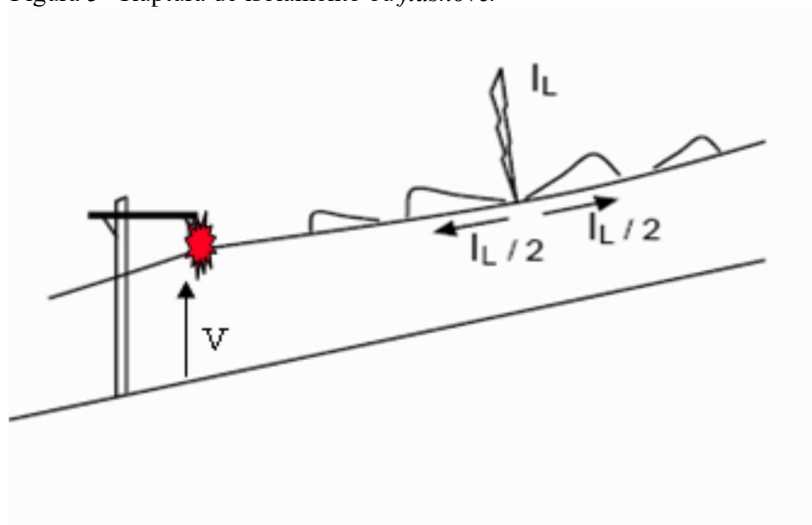
Ao colidir diretamente nos condutores, a corrente proveniente da descarga atmosférica irá dividir-se então em duas ondas de corrente de amplitude que tem aproximadamente valores iguais, que assim viajam uma para cada direção a partir do ponto onde a descarga incidiu. As correntes (I) geram ondas de sobretensão com amplitudes iguais ao seu produto pela impedância de surto (Z_s) da linha de acordo com a equação 1.

$$\bar{V} = \bar{Z}_s \cdot \bar{I}. \quad (1)$$

Para ondas rápidas, como são caracterizadas basicamente as ondas de descarga, a impedância de surto da linha $Z_s = \sqrt{L/C}$ (VISACRO, 2005), sendo L e C respectivamente a indutância e capacitância por km da linha.

Assim, no caso de ruptura de isolamento, o cabo de blindagem será submetido a uma sobretensão que irá estabelecer um arco elétrico entre os condutores energizados e a estrutura da torre. A corrente oriunda da descarga atmosférica irá fluir rapidamente pelo arco em direção a terra. Em grande maioria, o arco elétrico será sustentado pela própria tensão de operação da linha de transmissão, pois uma vez originado esse arco, ele não precisa de um valor elevado de tensão para se manter. De acordo com Cunha (2010), nesse tipo de situação, o arco se sustentaria, causando um curto-circuito entre os cabos fase e o aterramento, isto irá acabar originando correntes destrutivas para o sistema, que futuramente virá a causar o desligamento da linha de transmissão (SILVA, 2007). A Figura 5 servirá como forma de ilustrar um *flashover*:

Figura 5– Ruptura de isolamento ou *flashover*



Fonte: Extraída de Cunha (2010).

De acordo com Cunha (2010) os cabos de blindagem, que são instalados de maneira a ficar sobre posto aos cabos condutores ou cabos fase de maneira a tentar receber as descargas atmosféricas diretamente no lugar dos cabos fase, são comumente conhecidos como cabos para-raios, e são eles, o meio mais usual de proteção e prevenção de *flashover*. Contudo, mesmo com sua aplicação, ainda podem ocorrer desligamentos na linha por falha da blindagem, devido a ocorrência de descargas de baixa amplitude de corrente, que mesmo assim são capazes de gerar uma sobretensão suficiente para exceder o isolamento dos equipamentos.

Tem-se aqui um dos modelos utilizados em projetos feitos para proteção de uma linha de transmissão, projetos eletromagnéticos, utilizados para posicionar os cabos de blindagem. Segundo Visacro (2005), baseia-se no conceito simplificado de raio de atração, que seria basicamente a distância estimada a partir da qual ocorrerá eventualmente o fechamento do percurso entre o canal descendente da descarga atmosférica e o ascendente que é originado pela estrutura. A quantidade deste raio de atração (Ra) foi desenvolvida de maneira empírica, a partir de modelos de incidência. Este Ra será fortemente influenciado pelo valor de pico da corrente (I_p). No Quadro 1 tem-se as equações 2 e 3 respectivamente, equações essas para se calcular o Ra , uma retirada da ABNT NBR-5419 e outra do Eriksson (1987).

Quadro 1 – Expressões para o cálculo do raio de atração.

2 – NBR-5419	$Ra = 2 \cdot I_p + 30(1 - e^{-I_p})$
3 – Eriksson (1987)	$Ra = 0,84H^{0,6} \cdot I_p^\alpha$ Onde $\alpha = 0,7H^{0,02}$

Fonte: Adaptado de (CUNHA, 2010)

Onde temos que:

- Ra = é o raio de atração;
- H = é a altura da torre;
- I_p = é a corrente de pico.

O raio de condução, ou o raio de atuação da proteção do cabo de blindagem para as descargas com uma corrente de baixa intensidade, será bem reduzido em relação àqueles de descargas com uma maior amplitude, o que aumenta então a probabilidade de exposição dos cabos face a incidência direta de descargas menos intensas (CUNHA, 2010).

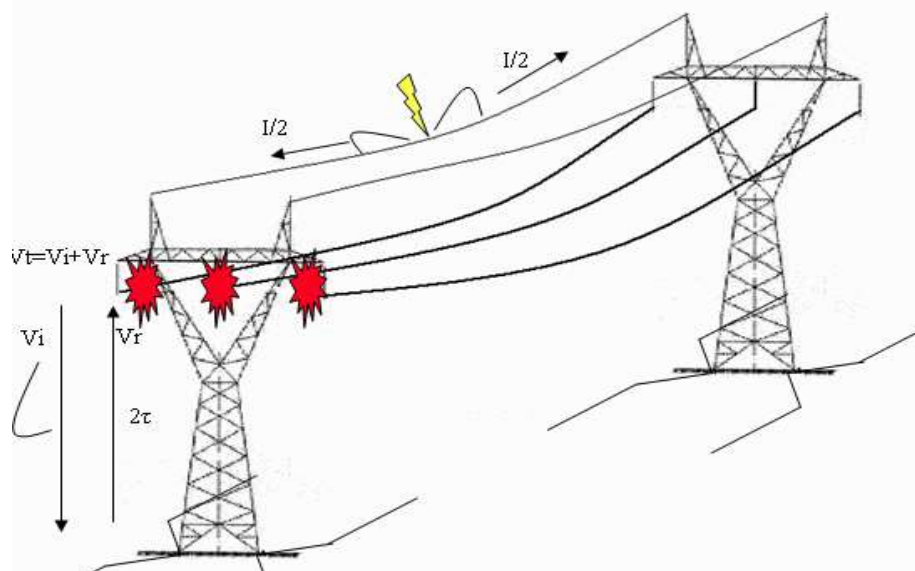
Sugerida pela NBR-5419, a relação é baseada nos modelos desenvolvidos a partir da década de 60 por *Brown, Hileman, Armstrong, Whitehead* e outros. Essa relação não leva (em conta) o efeito causado pela altura das estruturas no raio de atração, que é o mesmo considerado por Eriksson (1978). Para uma torre característica de 30m, conforme Eriksson (1987), o raio de atração se aproxima bastante das relações tradicionais. Todavia, o acréscimo da influência da altura apresenta então uma abordagem que, em uma linha com uma estrutura que se tem uma

altura variada, o impacto do cálculo do ângulo de proteção dos cabos para-raios e assim então reduzindo a probabilidade de falha na blindagem dos condutores.

3.4 Ruptura de Isolamento por Incidência Direta nos Cabos de Blindagem: *Backflashover*

De acordo com Cunha (2010) *backflashover* é a disrupção do isolamento de uma linha provocada pela sobretensão resultante na cadeia de isoladores decorrente da incidência direta de descargas no cabo de blindagem ou na torre. A seguir tem-se a Figura 6, demonstrando um *backflashover*:

Figura 6 – Ruptura de isolamento por *backflashover*



Fonte: Retirada de (CUNHA, 2010)

Os cabos de blindagem ou comumente chamados, cabos para-raios tem como finalidade evitar que as descargas atmosféricas atinjam os cabos condutores ou cabos fase de uma determinada linha de transmissão e também tem a finalidade de conduzir as correntes provenientes das descargas atmosféricas para a terra. Quando uma descarga atmosférica colide com os cabos para-raios ou nas torres de uma linha de transmissão, a corrente gerada pela descarga irá se propagar através das estruturas em busca de descarregar no solo através do aterramento.

De acordo com Silva (2007) em associação com esta corrente, irá se propagar também uma onda de tensão cuja sua amplitude é dada aproximadamente pelo produto da amplitude da onda de corrente e a impedância de surto da linha, algo que será visto logo mais neste artigo.

Porém, quando a corrente de descarga e a sobretensão associada percorrem pelo cabo de blindagem e encontram a primeira torre aterrada, as ondas se dividem então em componentes. Uma parcela será então refletida, a outra continuará seu percurso nos cabos de blindagem, e outra desce a estrutura em direção ao solo. Quando a onda de sobretensão associada atingir o solo, ela será submetida a uma reflexão, devido a descontinuidade da impedância de surto da torre (Z_t) com a impedância de aterramento (Z_g). No Quadro 2 a seguir tem-se as equações 4 e 5 que modelam aproximadamente o comportamento da onda de sobre tensão refletida no solo:

Quadro 2– Expressões para o cálculo do comportamento de onda de sobre tensão refletida no solo.

Equação-4	$T = \frac{Z_g - Z_t}{Z_g + Z_t}$
Equação-5	$V_r = \Gamma \cdot V_i$

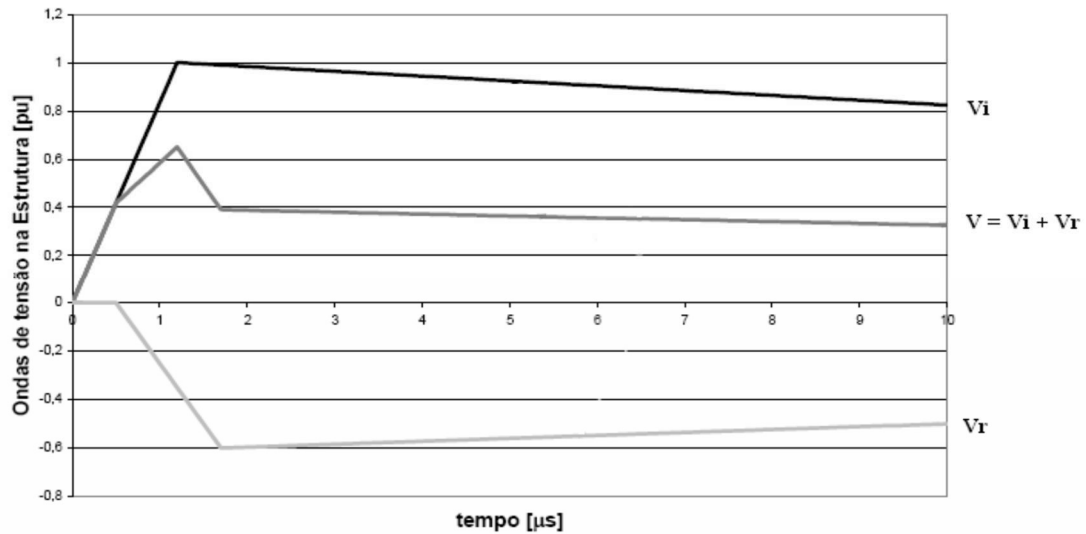
Fonte: Adaptado de (CUNHA, 2010).

Onde temos que:

- V_r e V_i são respectivamente as ondas de tensão refletida e incidente;
- Z_g e Z_t são respectivamente a impedância de aterramento e a impedância de surto da torre;
- T é o coeficiente de reflexão da onda de tensão.

Se a impedância de aterramento não for reduzida (no caso bem inferior a impedância de surto da torre), a amplitude da onda de sobretensão resultante no topo da torre (resultante da superposição da onda incidente positiva e a onda refletida negativa, já computado o deslocamento associado ao tempo de tráfego na torre), pode ser muito elevada. A sobretensão no grupo de isoladores dada pela diferença entre sobretensão e no topo e a tensão da fase, pode exceder a suportabilidade do isolamento da linha provocando assim uma falha no isolamento da estrutura para fase, o que então irá caracterizar o fenômeno conhecido como *backflashover* (VISACRO, 2007). Na Figura 7 será mostrado a composição de onda de sobre tensão no topo de uma torre de transmissão:

Figura 7– Tensão resultante no topo de uma torre de transmissão.



Fonte: Extraída de Cunha (2010)

Como o *backflashover* é o mecanismo de maior frequência de desligamentos não programados em linhas de transmissões (que possuem um ou mais cabos de blindagem no caso), por descargas atmosféricas, a maior parte dos esforços para melhorar o desempenho da linha são então direcionados para esse tipo de mecanismo (VISACRO, 2004). O restante dos parâmetros de influência responsável por este tipo de falha será aprofundado nos próximos tópicos.

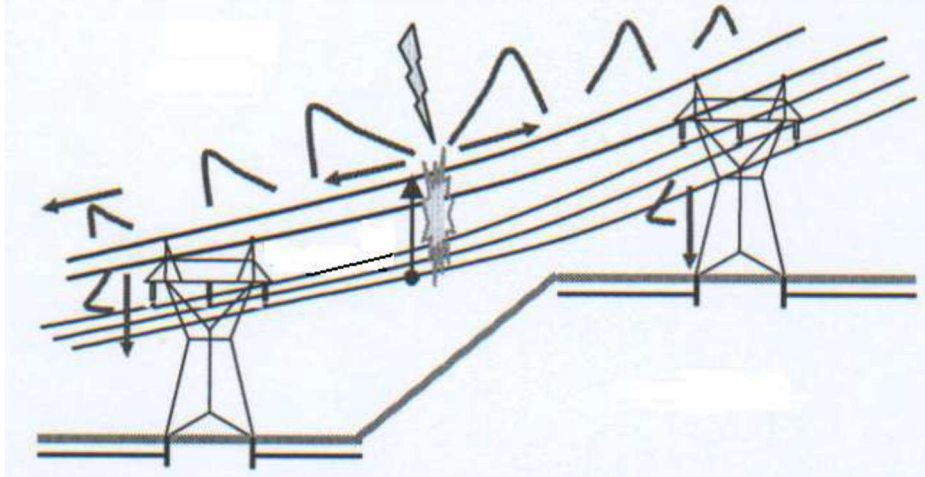
3.5 Ruptura a Meio de Vão

É um fenômeno que ocorre por causa das grandes distâncias entre a incidência da descarga atmosférica de seu aterramento, isso acaba gerando um grande tempo de trânsito das ondas geradas no meio de vão, o que infelizmente reduz a eficiência dos pontos de aterramento adjacentes. De acordo com Rocha (2009) a sobretensão no ponto de incidência pode atingir valores muito elevados se forem comparados a valores de tensão em caso de uma incidência direta na torre. Isto pode ocasionar na ruptura do isolamento do ar entre o cabo para-raios atingido e também em uma fase próxima, que seguido disso irá ocasionar em curto-circuito e posteriormente em um desligamento da LT (VISACRO, 2007).

É sabido que os cabos para-raios ficam disposto a cima dos cabos condutores ou cabos fase, para que assim tenha uma blindagem dos cabos contra uma descarga atmosférica direta, dependendo do ângulo de incidência.

Evitando uma incidência nos cabos condutores, evita-se também um *flashover*, porém pode vir a ocorrer outro fenômeno, que será no caso o *backflashover*, algo que já foi visto anteriormente neste artigo. Na Figura 8 tem-se a ruptura a meio de vão.

Figura 8– Ruptura a meio de vão.



Fonte: Extraída de (ROCHA, 2009).

Dadas as similaridades deste evento com o evento do *backflashover*, alguns autores o classificam como o mesmo, porém preferiu-se considerar neste artigo como um fenômeno separado.

Segundo Rocha (2009), a sobretensão resultante será dada pela diferença das amplitudes das ondas de sobretensão no ponto de incidência e na fase mais próxima. De acordo com Cunha (2010) para se ter uma ruptura a meio de vão é necessário que o valor de pico da onda de sobretensão no isolamento de ar entre o cabo de blindagem e o cabo fase seja capaz de causar um campo elétrico médio maior do que 623kV/m (EPRI, 1982).

A chance de uma ocorrência de uma ruptura a meio de vão em comparação aos outros tipos de desligamentos não programados de uma linha de transmissão é da ordem de 1 a 5%, isso para linhas de extra-alta tensão (UDO, 1997).

4 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NOS DESLIGAMENTOS CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Serão apresentados a partir de agora alguns parâmetros que impactam diretamente no desempenho de uma linha de transmissão frente as descargas atmosféricas, serão de extrema utilidade também, para entender melhor as falhas já citadas como *flashover*, *backflashover* e a ruptura a meio de vão, esses parâmetros são: característica do solo, fatores climatológicos e os parâmetros da própria Linha de transmissão, sendo os parâmetros da linha no geral que serão mais especificados a seguir.

4.1 Blindagem

Os cabos de blindagem, ou para-raios são projetados para guiar a corrente elétrica de uma descarga atmosférica até o solo, fazendo isso através da torre e dos eletrodos de aterramento, tendo como objetivo reduzir a chance de que ocorra um *flashover*. Esses cabos têm seu posicionamento variado de acordo com o ângulo de blindagem. De acordo com Brown (1978), apesar de tudo, ainda pode ocorrer um *flashover* por causa de falha da blindagem. Um modelo utilizado para o cálculo do ângulo de blindagem é o eletrogeométrico.

Para se estimar a ocorrência de um *flashover* tem que calcular o valor da corrente crítica (I_c), esse valor nada mais é do que o valor mínimo para que se ocorra um *flashover* e pode ser obtido a partir da equação 2 a seguir:

$$I_c = \frac{2CFO}{Z_s} \quad (6)$$

Onde o Z_s é a impedância de surto da linha, e o CFO é a tensão de *flashover* crítica (*critical flashover overvoltage*).

Se reduzir a corrente crítica, uma parcela considerável das falhas de blindagem poderá gerar um *flashover*, sendo em decorrência de uma primeira incidência de descarga atmosférica de baixa amplitude de corrente, ou de uma incidência seguinte de amplitude também reduzida (IEEE,1997).

A blindagem de uma linha é o que tem maior impacto sobre um *flashover* visto que, a primeira instancia, um bom projeto é capaz de anular esse fenômeno.

4.2 Características de Isolamento

Segundo Cunha (2010) a suportabilidade dos isolamentos definida para uma determinada linha é projetada pensando-se na operação em regimes permanente ou regime transitório. A ruptura do isolamento é um dos principais eventos que ocorrem quando acontece um *backflashover* ou *flashover*, e depende de três fatores basicamente (IEEE, 1997):

- a) Características da sobretensão resultante da corrente da descarga como amplitude, forma de onda e polaridade;
- b) Tensão instantânea na linha no momento da incidência de descarga;
- c) Suportabilidade das cadeias de isoladores.

O desempenho dielétrico de uma cadeia de isoladores é normalmente avaliado experimentalmente submetendo as cadeias de isoladores à ensaios de impulsos, esses impulsos simulando as descargas atmosféricas, tendo como modelos de onda de descarga como por exemplo a dupla exponencial. O tempo da frente da onda é de $1,2\mu\text{s}$ já o tempo de meia onda será de $50\mu\text{s}$. A amplitude do impulso irá aumentar gradativamente até que está alcance uma tensão onde a cadeia de isoladores rompe com 50% dos testes. Essa tensão tem como nome tensão disruptiva crítica (*CFO – Critical flashover voltage*).

A tensão resultante na cadeia de isoladores de uma linha de transmissão será obtida subtraindo a tensão obtida no topo da torre pelo valor instantâneo dos condutores da linha de transmissão, isso pode causar um aumento ou diminuição de tensão. Segundo Cunha (2010) no caso de circuito trifásico de corrente alternada, a sobretensão associada a descarga atmosférica será sobreposta a tensão instantânea de cada fase, já no circuito de corrente contínua, a tensão contínua de cada polo. O polo positivo costuma experimentar mais de um *backflashover* que o polo negativo neste último caso, devido a maior ocorrência de descargas atmosféricas nuvem-solo de polaridade negativa.

O número que se tem de isoladores influencia diretamente no nível básico de isolamento (NBI) de uma linha de transmissão. A seguir no Quadro 3 tem-se os valores típicos de NBI e a quantidade de isoladores típica para cada nível de tensão (CEMIG, 2010).

Quadro 3– Valores típicos de NBI das linhas de transmissão e número de isoladores por nível de tensão.

Nível de tensão (kV)	NBI (kV)	Número de isoladores
230	975	11-14
345	1240	15-19
500	1612	22-28

Fonte: Extraído de (CUNHA, 2010).

As condições climáticas podem afetar a suportabilidade das cadeias de isoladores. Em altas altitudes, por exemplo, a densidade do ar irá diminuir e, conseqüentemente, a rigidez dielétrica do ar pode variar, algo que afeta a tensão suportável da cadeia de isoladores.

O nível de isolamento de uma linha de transmissão impacta de forma direta a taxa de *flashover* e *backflashover*, visto que a ocorrência desses mecanismos depende da tensão disruptiva crítica da cadeia (CUNHA, 2010).

4.3 Principais Características da Torre e dos Cabos de Uma Linha de Transmissão

Como já falado, a torre de uma linha de transmissão varia de tamanho e estrutura dependendo do nível de tensão, sendo assim, as torres de uma LT de extra-alta tensão 230kV até 765kV, tem sua altura as distancias elétricas e o número de isoladores nas cadeias superior as demais torres. Porém, com as distancias mais abrangentes entre as fases e os cabos de blindagem, tem-se um aumento na probabilidade de ocorrer uma falha de blindagem, e também um aumento da chance de uma incidência de uma descarga atmosférica na mesma, já que sua altura é elevada. A seguir algumas características das torres de LT.

4.4 Altura da Torre

A altura de uma torre irá influenciar diretamente em sua probabilidade de receber uma descarga atmosférica. De acordo com Cunha (2010) a partir de observações da indecência de descargas atmosféricas reais em estruturas, Eriksson (1987b), desenvolveu a seguinte relação para o cálculo do número de descargas coletadas pela linha em função da altura da estrutura e outros parâmetros. A seguir a equação 3:

$$N_s = N_g \cdot \left(\frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad (7)$$

Onde temos que:

- h é a altura da torre da LT;
- N_g é a densidade de descargas (*flashes/km²/ano*);
- N_s é a taxa de descargas coletadas (*flashes/100km/ano*);

- b é o espaçamento dos cabos de blindagem da LT.

Como pode ser visto pela equação 2, aumentando a altura da torre, tem-se um aumento direto nas incidências de descargas atmosféricas na mesma, o que conseqüentemente irá aumentar a probabilidade de ocorrer um desligamento por incidência direta.

4.5 Impedância de Surto da Torre

Essa impedância de surto da torre de uma LT, irá influenciar no valor do coeficiente de reflexão da onda de sobretensão no solo, juntamente com a impedância de aterramento, e ambas definem a amplitude de onda refletida, e por conseqüência, a amplitude da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores (CUNHA, 2010).

A impedância de surto de uma torre de LT (Z_t) depende da sua geometria e pode variar ao longo da mesma. A modelagem desse elemento não é trivial. Em alguns casos ela é considerada como uma linha de transmissão vertical sem perdas, representadas por geometrias similares a de uma torre em formato de cone (Darveniza et al, 1969) ou cilindro (Wagner e Hileman, 1962) (CUNHA, 2010). No Quadro 4 temos respectivamente as equações 8 e 9 de Darveniza e de Wagner e Hileman respectivamente. Onde temos que:

- $-h$ altura da torre;
- $2r$ é o diâmetro da torre.

Quadro 4 – Equações de surto de uma torre de LT de Darveniza e de Wileman.

Darveniza (1969)	$Z_t = 30 \ln \cdot \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right]$
Wagner e Hileman (1962)	$Z_t = 60 \ln \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\frac{h}{r} \right) - 60$

Fonte: Adaptado de (CUNHA, 2010).

Essa modelagem, em outros casos, pode ser feita com o uso de equações de campo eletromagnético de maneira numérica. De acordo com Cunha (2010) Visacro et al. propuseram a modelagem da impedância de surto equivalente de vários tipos de torre, com o uso de uma modelagem híbrida nomeada de HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*), essa que tem uma

aplicação direta das equações de campo e teoria de circuitos através de simulações em computadores (CUNHA, 2010).

De acordo com Soares Jr. (1996), o valor típico da impedância de surto de torres metálicas de uma LT está na faixa de 150 e 250Ω. Usando valores dessa faixa, pode-se ter uma boa aproximação do desempenho de uma determinada torre de LT, algo que auxilia bastante na análise de desempenho no geral (CUNHA, 2010).

4.6 Condutores e Sua Impedância de Surto

Para descargas atmosféricas, que nada mais são que um impulso unitário, pode-se aproximar a impedância de surto de um condutor de acordo com a equação 4 a seguir (VISACRO, 2005).

$$Z_s = \sqrt{L/C} \quad (10)$$

Onde temos que:

- L é a indutância em serie da linha de transmissão;
- C é a capacitância para terra por unidade de comprimento da linha de transmissão.

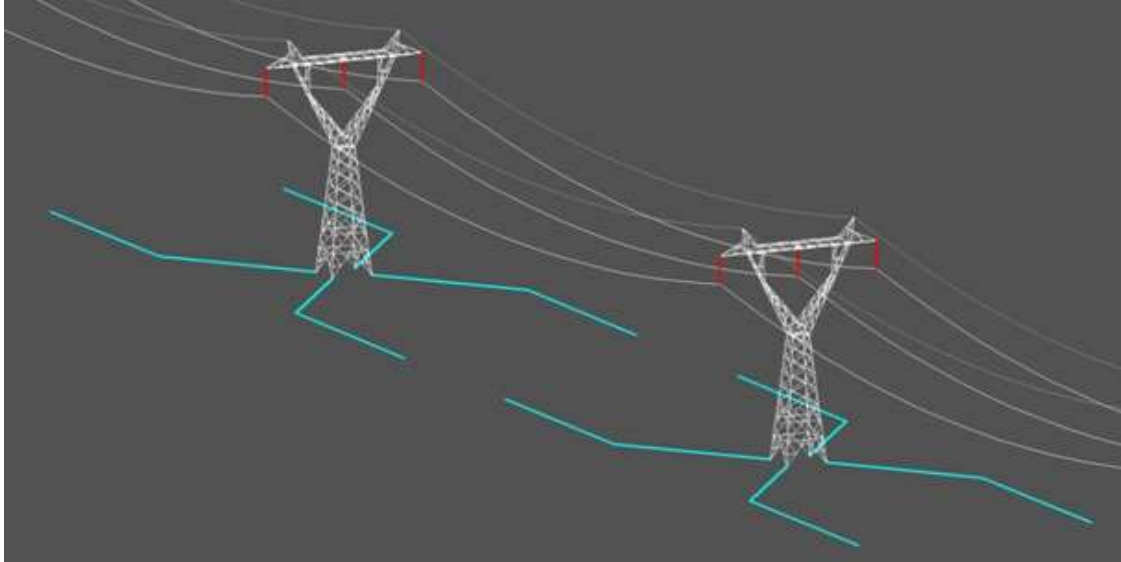
Também chamada de impedância de surto da linha, como visto anteriormente neste artigo, esta equação serve para representar aproximadamente qual será o comportamento da impedância da linha para um fenômeno com uma elevada frequência, como é o caso das descargas atmosféricas. De acordo com Visacro (2005), o produto de Z_s pela amplitude da corrente que trafega ao longo de uma LT em decorrência da impedância de uma descarga atmosférica, resulta na amplitude de sobretensão associada a esta corrente (CUNHA,2010).

4.7 Aterramento de Uma Linha de Transmissão

Os suportes de uma LT devem ser aterrados de modo que venha a tornar a resistência do aterramento compatível com o desempenho que se espera e claro, com a segurança de terceiros. O aterramento não deve interferir com outras instalações existentes, nem com atividades desenvolvidas dentro de sua faixa, ele deve se restringir a faixa de segurança da linha. O cabo que deve ser utilizado precisa ter alta resistência mecânica e um bom tratamento para

corrosão, por isso os cabos mais utilizados para o aterramento (contrapeso) de uma LT é o cabo de aço galvanizado ou aço cobrado. As ferragens da fundação da torre também serão consideradas parte do aterramento da mesma, conforme a Figura 9:

Figura 9 – Configurações típicas do aterramento de uma LT.



Fonte: FAW7(2018).

A corrente de impulso unitário proveniente de uma descarga atmosférica e também as ondas de tensão, se propagam ao longo dos cabos de contrapeso.

O critério mais comum de resistência de aterramento utilizado pelas concessionárias de transmissão de energia é igual ou inferior a 30Ω . Caso conheça a configuração da malha de aterramento, e também o valor da resistência (Rlf), será possível então estimar razoavelmente o valor da impedância impulsiva (Zp), tendo então que $Zp = 0.7Rlf$ (Soares Jr, 1996), (CUNHA, 2010).

Este valor de impedância tem grande impacto sobre o fenômeno de *backflashover* de uma LT, porém de acordo com Cunha (2010) esse impacto seria deveras reduzido em ruptura a meio de vão e também nos *flashover*.

5 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E SEUS PARÂMETROS

A descarga atmosférica, mais conhecida como raio, nada mais é que uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. É um fenômeno complexo que se dá através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso na medida de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra (VISACRO, 2005).

A maioria das descargas é oriunda das nuvens de tempestades, cientificamente chamadas de Cumulus Nimbus, embora seja registrada sua ocorrência em outras circunstâncias, tais como: erupções vulcânicas e em tempestades de areia no deserto. Já no aspecto do percurso das descargas, elas podem ser entre nuvens, entre nuvens e solo, dentro de uma única nuvem ou entre nuvens e estratosfera.

Os principais efeitos de uma descarga atmosférica se consistem em: destruição, incêndio e até mesmo morte, ao atingir prédios, estruturas, sistemas elétricos e/ou seres vivos. O mais comum efeito é o gerado por descargas indiretas, ou seja, induzidos por uma descarga próxima, que se consiste em, basicamente, distúrbios eletromagnéticos, sendo capaz de causar danos e interferência em sistemas elétricos e eletrônicos (VISACRO, 2005).

5.1 Processo de Formação

O principal processo que caracteriza a formação das descargas elétricas é o chamado circuito elétrico global, decorrente de um carregamento negativo do corpo sólido e líquido da Terra e de um carregamento positivo do ar. A carga elétrica espacial positiva, contida na região compreendida entre a superfície do solo e uma altura de, aproximadamente, 10km, praticamente iguala a carga negativa da Terra ($\sim -500.000C$) (VISACRO, 2005).

Levando em consideração a condutividade do ar na região de bom tempo, a existência dessa carga é responsável pelo fluxo contínuo de uma corrente positiva do ar para o solo (consiste entre 750 e 2.000A). A característica contínua desse fluxo proporciona a existência de fontes geradoras de corrente, identificadas como a ação combinada de geradores na ionosfera e na baixa atmosfera, nesse caso as nuvens de tempestades. De acordo com Visacro (2005) caso não existissem essas mesmas fontes, a carga elétrica presente na parte sólida e líquida da Terra seria neutralizada em um curto período de tempo (de 5 a 40 minutos), devido à condutividade do ar. Desse modo, o campo elétrico seria totalmente dissipado.

5.2 Fenômenos Envolvidos no Estabelecimento da Descarga Elétrica

Cargas elétricas: A capacidade das cargas elétricas de induzirem cargas de sinal oposto em condutores é uma propriedade física comumente conhecida. Desse modo, a base da nuvem intensamente carregada com cargas negativas é capaz de induzir no solo uma distribuição de cargas positivas de mesma intensidade, fazendo assim a geração de um forte campo elétrico na região compreendida entre a nuvem e o solo, conseqüentemente causando uma diferença de potencial.

Quando campos elétricos intensos se desenvolvem em um meio isolante (dielétrico) gasoso, há a possibilidade de acontecer o processo físico associado à liberação dos elétrons das camadas mais externas dos átomos responsáveis pela composição do meio, dando origem a uma descarga elétrica (faísca). Esse processo é chamado de Mecanismo de Townsend.

Cada meio dielétrico possui a sua capacidade máxima de suportabilidade do meio ao receber um campo elétrico sem que ocorra o processo disruptivo, tal propriedade é chamada de rigidez dielétrica (ar = 3mV/m).

Outra característica física importante relacionada às descargas elétricas é chamada de Poder das Pontas, que consiste na tendência das cargas elétricas nos corpos condutores eletricamente carregados se concentrarem nas extremidades dos mesmos. Essa característica é responsável pela ruptura do isolamento ter início nas extremidades do meio, dando origem a canais disruptivos que partem dessas mesmas extremidades (VISACRO, 2005).

5.3 Transferência de Carga Para o Solo: Descarga Negativa

De acordo com Visacro (2005) uma nuvem, carregada negativamente em sua base, induz no solo um acúmulo de cargas de sinal contrário, causando uma enorme diferença de potencial e um intenso campo elétrico. Esse mesmo campo elétrico atinge valores superiores à rigidez dielétrica do ar, causando a ocorrência de uma descarga elétrica intensa, criando assim um canal ionizado. Nesse canal condutor, acumula-se grandes quantidades de carga negativa proveniente da nuvem. Esse acúmulo de cargas promove o aumento do campo elétrico nas extremidades do canal, o que é capaz de gerar descargas consecutivas semelhantes à inicial.

Esse canal com origem na nuvem que parte em direção ao solo é chamado de canal descendente. A medida que esse canal carregado com cargas negativas se aproxima do solo, aumenta-se a densidade de cargas positivas na superfície e aumenta-se também o campo elétrico associado. Quando o canal descendente chega próximo ao solo, o campo elétrico na superfície

torna-se tão intenso que dá origem a descargas elétricas ascendentes (de baixo para cima). Quando os dois canais se encontram e acontece a conexão entre nuvem e solo é estabelecido uma onda de corrente de alta intensidade, conhecida como corrente de retorno.

O fluxo da corrente pelo canal ionizado gera aquecimento intenso e um efeito luminoso, o relâmpago. Esse aquecimento resulta também na expansão do ar próximo ao canal e consequentemente no deslocamento de uma onda sonora no ar, o trovão (VISACRO, 2005).

5.4 Descarga Positiva

Como as nuvens de tempestades possuem uma distribuição de carga organizada de uma forma que as cargas positivas fiquem na parte superior e as negativas na base, ela se torna vulnerável a mudanças de posicionamento e interferência na atração/repulsão de cargas acumuladas no solo. Uma rajada de vento é capaz de movimentar a base da nuvem e deixar o topo exposto, fazendo com que o solo fique negativamente induzido em locais de alta altitude. Dessa forma, podem ocorrer descargas que interligam tais partes da nuvem ao solo, transferindo carga positiva para a Terra. Assim, um canal descendente positivo pode evoluir a partir do centro de cargas positivas da nuvem e um canal ascendente negativo pode evoluir a partir do solo. Quando há a conexão entre os dois, ocorre a descarga positiva para o solo (VISACRO, 2005).

6 ÍNDICE CERÁUNICO

Índice Ceráunico indica o número de dias de trovoadas numa dada região por ano. Esses números são obtidos por pessoas encarregadas que assumiram a responsabilidade de monitoramento ao longo das várias regiões do país.

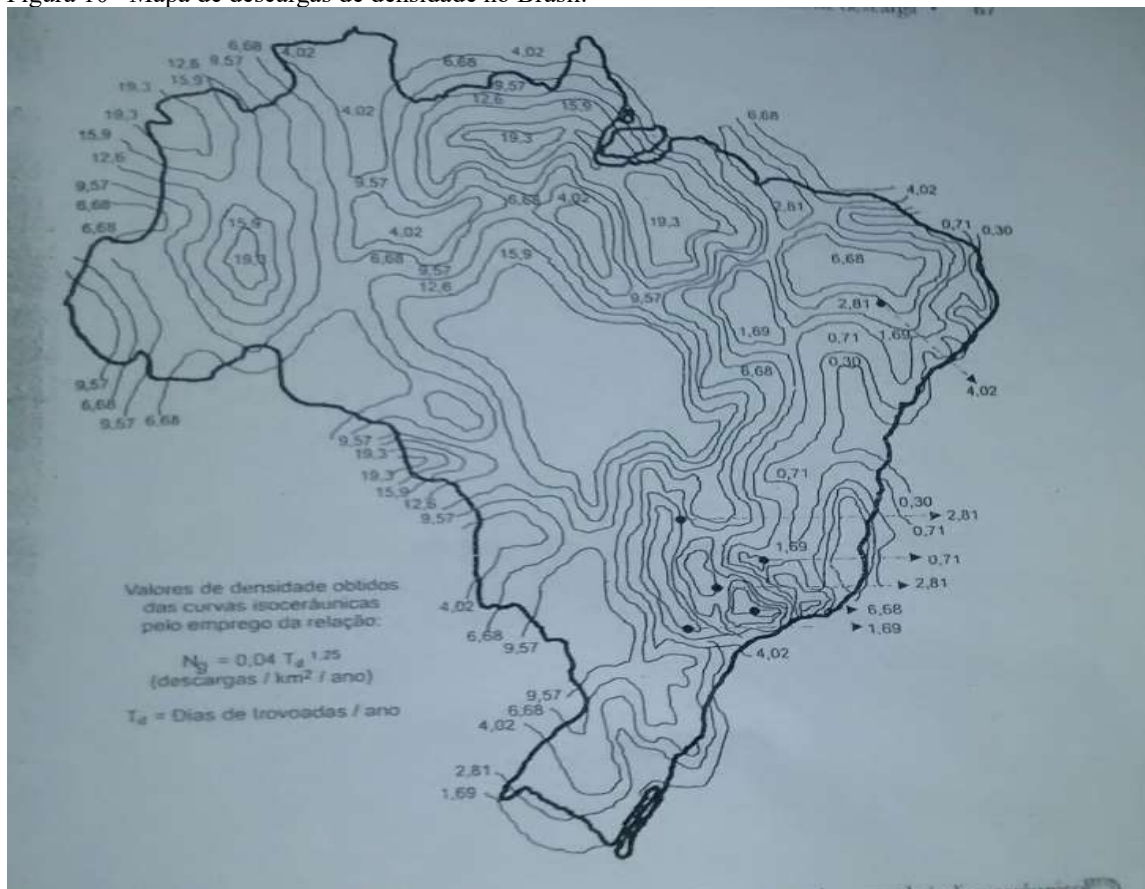
As medições são feitas através de parâmetros como o Índice Ceráunico Local (Td) que indica os dias de trovoada por ano, que é apanhado através da estática acumuladas por longos períodos de observação por região. Este índice é obtido através da percepção do efeito indireto sonoro gerado pela descarga. Em regiões planas o ouvido humano é capaz de perceber essas descargas em distâncias de até 10 km.

Os observadores ficam, comumente, em postos de observações espalhados pelo local onde se deseja conhecer o Índice, normalmente em estações meteorológicas. A testemunha registra uma indicação para cada dia do ano em que se é ouvido um trovão, então, é registrado apenas um trovão independentemente da quantidade ouvida naquele dia, pois o objetivo principal é apenas compilar a ocorrência de tempestade no dia analisado.

No mundo, é comum a existência de mapas onde estão dispostas as curvas isoceráunicas das regiões, pois muitos setores como a agricultura e serviços de utilidade pública têm interesse no conhecimento da frequência de tempestades.

A Figura 10 mostra as faixas de valores de Nível Ceráunicos em diversas regiões: É importante salientar a natureza de valor médio do índice Ng. Assim, ao se atribuir determinado valor deste índice a uma região, dever ser preservada a perspectiva de que, para as áreas interiores à região, a densidade de descargas pode variar numa ampla faixa de valores. Por exemplo, no caso brasileiro tem-se a expectativa de valor típico de densidade superior a 3 descargas/km²/ano. Tal índice tem a ordem 4 em Minas Gerais, de 1 na Bahia e superior a 5 no Pará.

Figura 10– Mapa de descargas de densidade no Brasil.



Fonte: Extraído de (VISACRO, 2005).

7 RELAÇÃO ENTRE TD E NG

De acordo com Visacro (2005) a relação entre os índices de densidades de tempestades, Td e densidades de descargas locais Ng, é usualmente estabelecida para microrregiões. Ainda hoje, esta metodologia é muito usada em diversas partes do globo terrestre para determinação da densidade local de descargas, inclusive em diversas regiões do Brasil (VISACRO, 2005).

Apesar disso, não parece razoável a existência de uma relação generalizada entre tais índices, em função da influência de vários outros fatores climáticos e de ortografia local, dentre outros, que, conforme a região em consideração, podem afetar de forma diferente a relação entre as frequências de ocorrência de tempestades e de descargas.

Para realizar suas funções, os LLS compreendem:

- a) Técnicas de detecção de descarga e localização do destino da incidência;
- b) Critérios de discriminação para tipificação do evento;
- c) Modelos para estimativa da intensidade de corrente e de outros parâmetros.

A característica de funcionamento dos sistemas LLS consiste na medição indireta do campo eletromagnético que se gera pelo fluxo da corrente de retorno no local de descarga, por meio de uma rede de estações detectoras. Estes mesmos são posicionados de forma estratégica com uma distância de ordem de algumas centenas de quilômetros (geralmente de 100km a 400km) e também de forma a demarcar uma região de cobertura para monitoramento das descargas atmosféricas incidentes (VISACRO, 2005).

7.1 Técnicas de Indicação de Direção: DF

O princípio da primeira técnica utilizada na localização dos locais de incidência e de descargas são constituídos por um dispositivo de bobinas cruzadas, que é "iluminado" pelo campo eletromagnético gerado pela descarga no local que é abrangido pela distância do detector. De acordo com Visacro S. (2005) em função dessa da distância e juntamente considerando o comprimento de onda necessariamente superior a 300m, o campo magnético nas redondezas do disposto pode ser considerado uniforme. Analisando de outra maneira, a orientação vertical predominante para tais elementos de corrente no local da descarga, determina um sentido para o campo eletromagnético que tangencia a circunferência centrada no ponto de incidência de descarga.

Cada estação possui um dispositivo similar ao informado acima. Na ocorrência de uma incidência de descarga, cada uma dessas estações indica o ângulo da direção de chegada do sinal propagado pelo campo. Com apenas duas estações com detectores é possível localizar o ponto de emissão de campo, simplesmente através da interseção das retas correspondentes às direções de incidência em cada respectiva estação. Para se evitar qualquer indeterminação do ponto de incidência, essas detecções requerem no mínimo três estações com detectores (VISACRO, 2005).

Obviamente, qualquer medição apresenta erros. Quando se trabalha com várias estações, tem-se uma expectativa de que os locais demarcados pelas várias interseções sejam diferentes. Os LLS compõem-se de algoritmos inclusos capazes de realizar cálculos mais detalhados e diminuir o índice de erro desses medidores (VISACRO, 2005).

7.2 Técnica de Variação no Tempo de Chegada

O campo eletromagnético gerado em uma descarga gasta mínimas variações de tempo para atingir as estações detectoras posicionadas a diferentes distâncias em relação ao local da incidência.

A técnica de determinar a variação do tempo de chegada, consiste em utilizar as diferenças nas indicações dos instantes de tempo de chegada da onda eletromagnética gerado pela incidência em ao menos três sensores de campo espaçados entre si e perfeitamente sincronizados, para se determinar a localização exata de onde ocorreu a incidência.

7.3 Técnica Interferométrica

Esse método é fundamentado nas medições de diferenciações de fase da onda eletromagnética detectada por diferentes antenas que estão em conjunto. Tais diferenças estão totalmente relacionadas com a direção de chegada de onda.

Estas antenas funcionam dentro de uma determinada faixa de frequência de interesse. A distância dessas antenas define as dimensões da ordem do comprimento de onda característicos a essas frequências. As diferenças de fase dependem do contexto do conjunto das antenas e também da direção de onde se chega a onda eletromagnética.

Usando a forma de posicionamento das antenas em triangulo, conhecido como método da triangulação, e utilizando-se dois conjuntos de antenas, é possível localizar o ponto de incidência da descarga atmosférica.

7.4 Técnica de Detecção em Operação

Os mais primitivos sistemas de localização foram desenvolvidos por duas diferentes empresas, utilizando métodos distintos de detecção, cada um carregando a filosofia do seu criador com particularidades de discriminação dos eventos e de estimativa de parâmetros. Assim foi criado o sistema LLP (*Lightning Location and Protection System*), modelado na técnica de indicação de direção (DF), e dentro do comércio a partir de 1976. O sistema de LPATS (*Lightning Position and Tracking System*), baseado na técnica da diferença no tempo de chegada (ToA), teve sua entrada no mercado em 1981. Desde então esses sistemas foram implantados em diversas nações.

Algum tempo depois, as fabricantes resolveram integrar todos esses sistemas em apenas uma única plataforma, criando as estações IMPACT (*Improved Accuracy From Combined*). Tais plataformas utilizam-se as duas técnicas para detecção conjugadas, tal que conseguiram uma sensível melhoria tanto na performance de detecção quanto na exatidão dos resultados dos locais de incidências.

Paralelamente, um outro tipo de método baseado na técnica interferométrica fora projetado e vinha sendo utilizado em vários países: o SAFIR (*Système d'Alerte Foudre por Interérométrie Radioélectrique*). Este sistema detectava aplicações que se estendiam a atividades complementares à localização de descargas, sobretudo na área da meteorologia.

A qualidade dos resultados finais obtidos pelas redes de detecção é concebida por dois parâmetros: sua eficiência na detecção e a exatidão de localização. A eficiência de todo o sistema está totalmente ligada à sua capacidade de precisão em localizar descargas. Atualmente os especialistas e fabricantes buscam eficiências acima de 90% na detecção de descargas nuvem-solo. Já na distância o erro máximo aceitável é de apenas 500m de onde ocorreu a incidência (VISACRO, 2005).

8 DISCRIMINAÇÃO DOS TIPOS DE DESCARGAS E ESTIMATIVA DE PARÂMETROS

As técnicas mostradas acima, são capazes de determinar a localização mais provável no ponto de incidência da descarga. Esses sistemas de detecção proveem alguns dados adicionais a partir da identificação de padrões, através dos critérios pré-estabelecidos de discriminação (VISACRO, 2005).

A primeira avaliação que a onda da incidência é submetida consiste em detectar se o sinal que é recebido realmente provém de uma descarga nuvem-solo. Nesses critérios é estabelecido uma quantia aceitável para os tempos de frente e de duração do pulso de onda do campo eletromagnético detectado. No caso do sensor IMPACT, o tempo de onda do campo magnético deve ser inferior a 24 μs e a duração do tempo de pulso deve ser compreendido entre 11 μs e 31 μs . Os incidentes que não estiverem dentro destes parâmetros serão consequentemente desconsiderados.

Já a polaridade dos incidentes que são aceitos pelo detector é analisada a partir do sinal do campo de onda eletromagnética detectado.

Consta também a análise de umas incidências independentes ou incidências múltiplas (várias descargas contidas em um flash) que é analisada pela central de processamento, considerando o intervalo de tempo entre as incidências e a distância dos pontos destas mesmas incidências, seguindo critérios muito definidos.

Estes sistemas também analisam a estimativa da amplitude da corrente geradora do evento. Para obter essas informações são utilizadas expressões empíricas que relacionam a intensidade da onda do campo eletromagnético detectado, a distância do local de incidência e o valor do pico da corrente de retorno. Os resultados obtidos do tempo de frente de onda da corrente são processados diretamente do tempo de frente da onda de campo detectada (VISACRO, 2005).

9 ANÁLISE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO DO PROGRAMA MATLAB

O MATLAB nada mais é do que um software criado pela empresa Norte-Americana *Mathworks*, inc. O nome MATLAB vem da abreviatura da palavra “*MATrix LABORatory*”. Apesar de sua denominação ser *MatLab*, o que pode sugerir muitas vezes que ele só serve para cálculos de ciências matemáticas, ele vai muito além desse ramo, ele trata-se de um programa que serve para auxiliar em qualquer área onde tem-se que trabalhar com problemas.

Se tem como grande vantagem sua extrema facilidade de manuseio e também suas quase ilimitadas funções e aplicações e a possibilidade de operar com os mais variados tipos de linguagem.

Com esse sistema, permite-se a resolução de diversos problemas numéricos em apenas uma pequena fração de tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante utilizando as linguagens Fortran, Basic ou C. Além disso as funções que são expressas no MATLAB têm uma grande exatidão com as expressões escritas matematicamente.

O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em um ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional

9.1 As LT frente a descarga atm

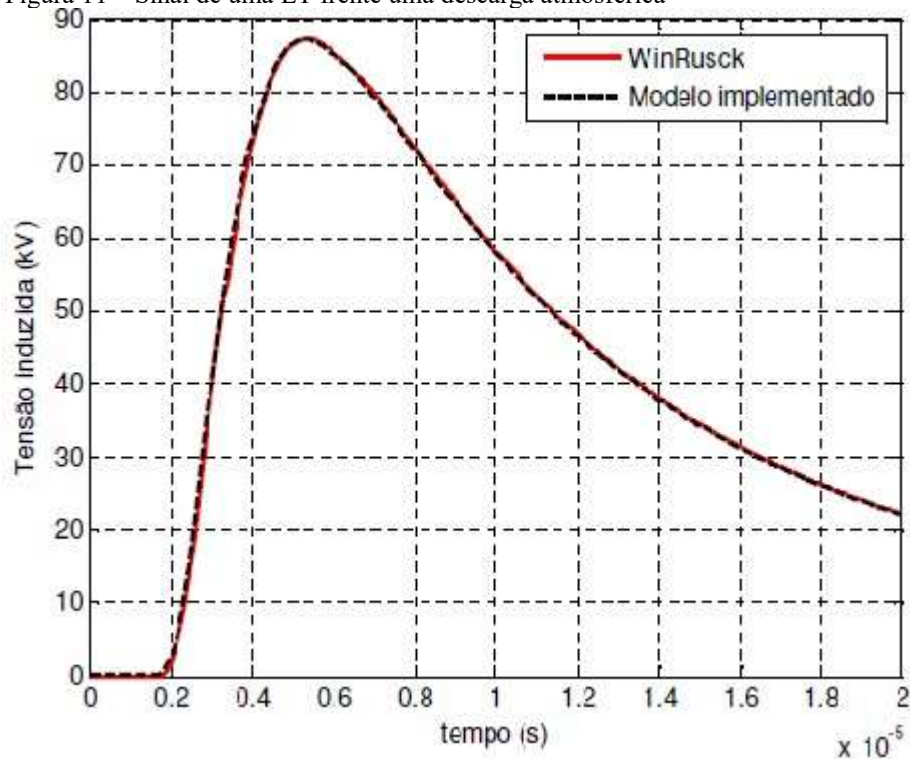
As LT que serão analisadas nesse trabalho, terão seus dados fictícios, afim apenas de representar o sinal dessas linhas frente a uma descarga atm, o intuito será demonstrar de forma matemática utilizando o *Matlab* e seus recursos como o sinal da linha irá se comportar perante tal fenômeno.

Preferencialmente as tensões para uma LT que serão abordadas aqui, vão ser das EAT (Extra Alta Tensão), tensões essas na faixa de 230 a 765 kV, porem como no Brasil o uso de uma linha de 765 kV ainda está em baixa, as linhas serão de 230 kV e 500 kV.

Para fazer simulação de um sinal de uma linha de transmissão frente a descarga atm a fim de analisar seu desempenho, nesse trabalho o cálculo será realizado a partir de um impulso unitário, pois, já que uma descarga atmosférica é um fenômeno muito rápido, com tempo de iteração frente a LT muito curto, um impulso unitário consegue realizar esse papel muito bem. Dito isso, se tem duas formas de realizar essa simulação, a primeira é retirando a equação do circuito equivalente de uma LT, sendo esse circuito referente a linhas curtas, medias ou longas,

após a retirada dessa equação, precisa de muda-la para o domínio da frequência, e após isso, multiplica-la pelo impulso, feito isto basta usar o MATLAB e gerar o sinal. Pode-se também fazer a simulação com a utilização do *Simulink*, esse que nada mais é que uma extensão do MATLAB que trabalha utilizando de blocos, com intuito de analisar sistemas de controle e processamento digital de multi-domínios. Para a realização da simulação utilizando do *Simulink*, é preciso apenas montar os blocos de acordo com o circuito equivalente da LT, e depois utilizar uma fonte externa com valor unitário para simular o impulso. A resposta do sinal em ambos os casos é muito próxima da Figura 11.

Figura 11 – Sinal de uma LT frente uma descarga atmosférica

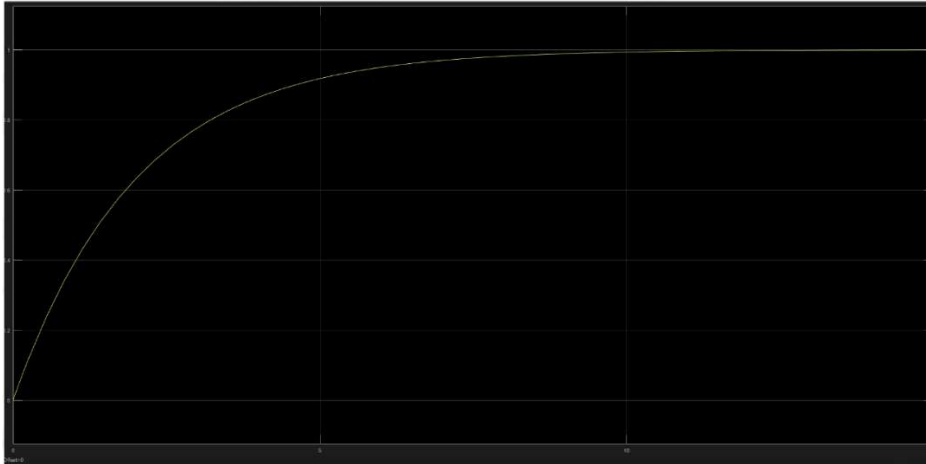


Fonte: Assis (2006).

9.2 Iniciando as simulações

Optou-se nesse trabalho como fonte da simulação, a utilização do *Simulink*, onde que a primeira simulação realizada, infelizmente não saiu como planejado, provavelmente em virtude da inexperiência com a ferramenta, e também de possíveis configurações indevidas. A Figura 12 mostra a primeira simulação.

Figura 12 – Primeira simulação

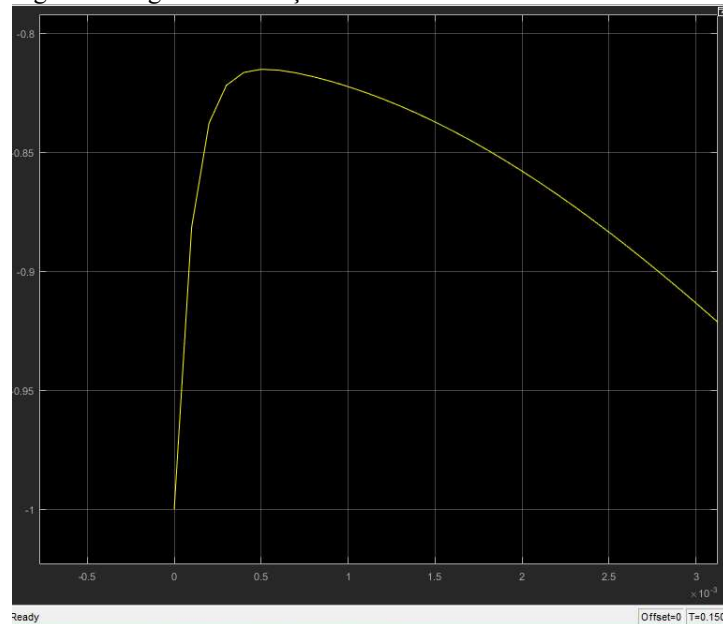


Fonte: Autor.

Como visto na Figura 12, se deu o distúrbio, contudo, um erro ocorrido na montagem do circuito equivalente, fez com que a simulação não durasse tempo o suficiente. Esse circuito que tem como base o circuito equivalente da Figura 4 deste trabalho, onde o circuito de uma LT média, já que um dos dados adotados para distancia, está inserido nas linhas medias, linhas essa que variam de 80 a 240km.

Para as próximas simulações, o modo de montagem dos blocos, e o circuito equivalente se manteve, porém foram feitas algumas correções e mudanças nos valores de cada componente, e a princípio, os resultados foram um pouco mais satisfatórios como se pode ver na Figura 13.

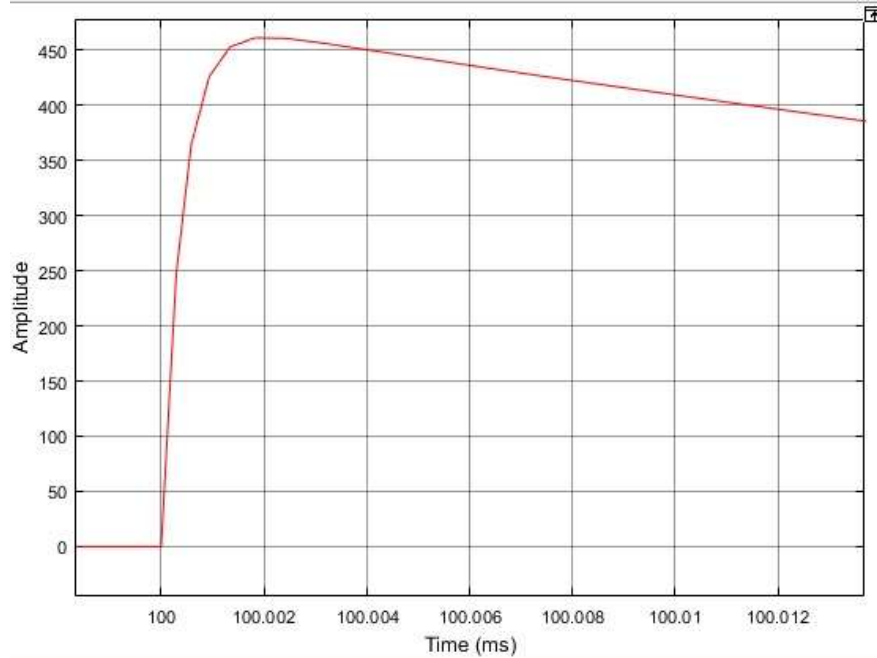
Figura 13 Segunda simulação



Fonte: Autor.

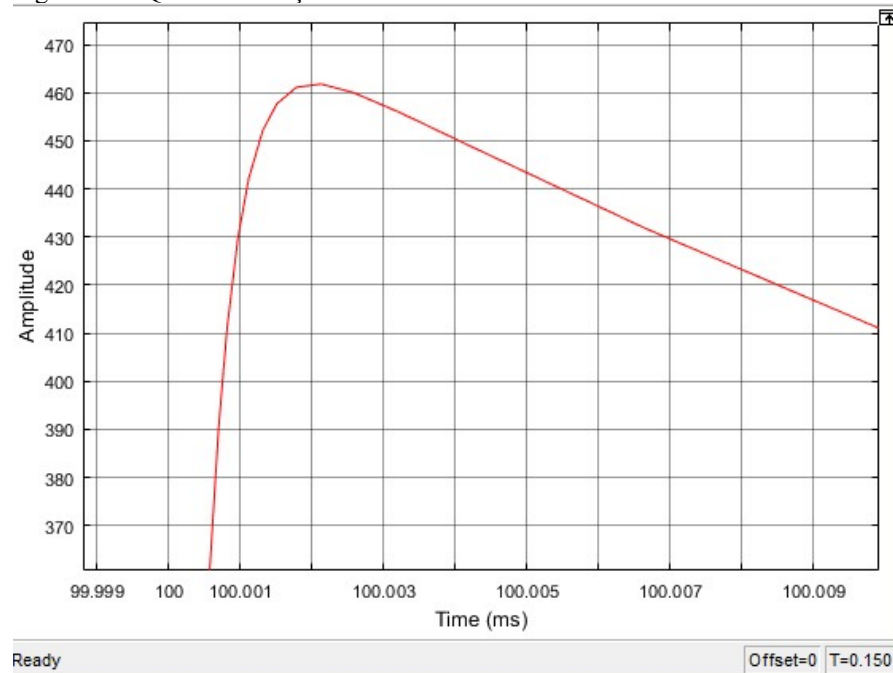
Para as próximas simulações, após não se aproximar mais da resposta desejada, optou-se então por modificar o modo de montagem dos blocos, algo que inicialmente, fez com que a primeira resposta obtida não tenha sido satisfatória, como pode ser visto nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Terceira simulação



Fonte: Autor.

Figura 15 – Quarta simulação

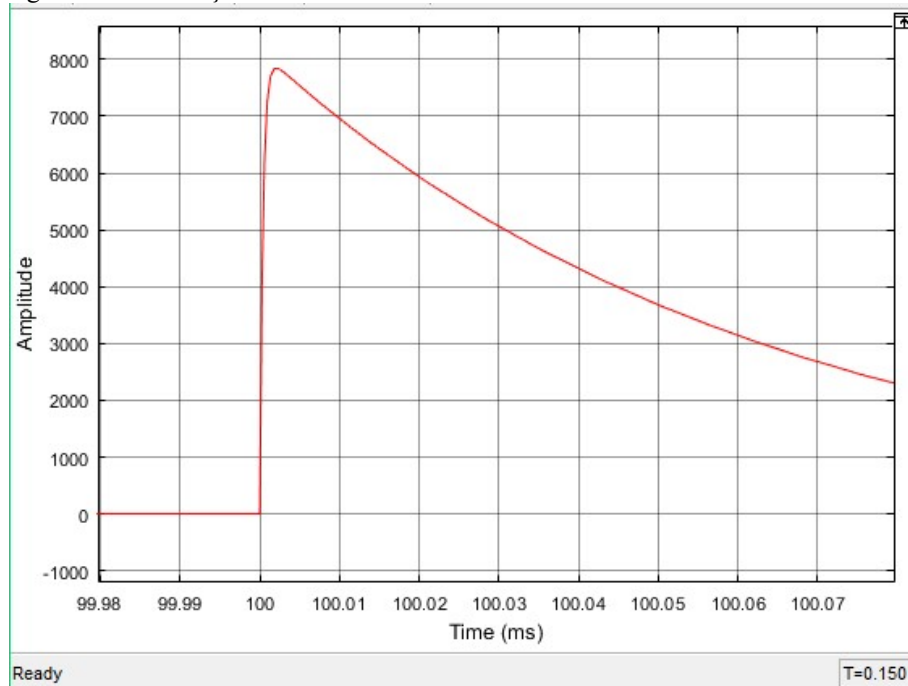


Fonte: Autor

Observa-se então que com as devidas configurações, a simulação poderia obter o

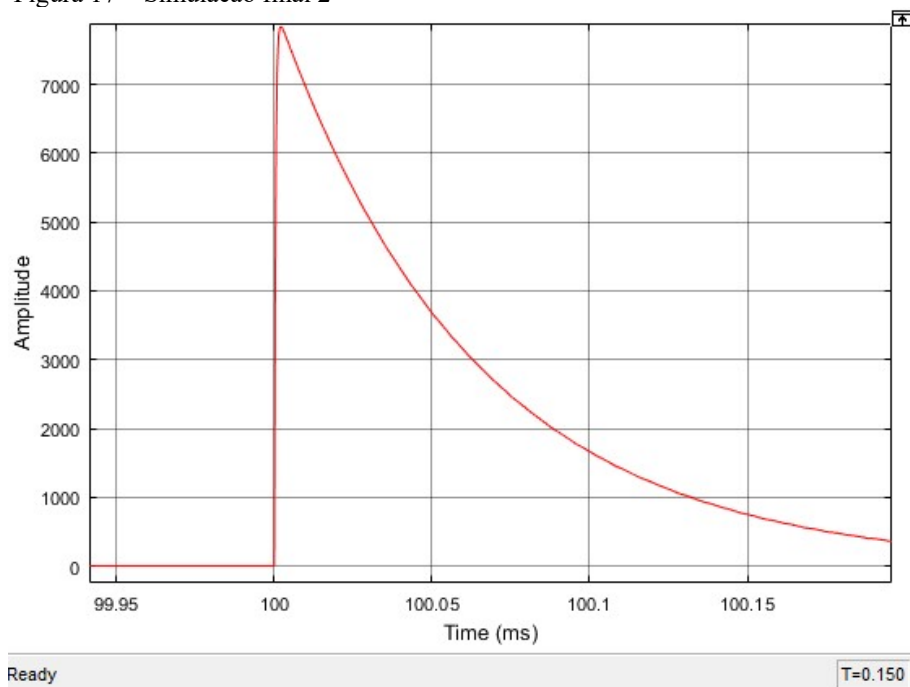
resultado esperado. E após algumas melhorias no circuito equivalente (na montagem do circuito no *Simulink*), alcançou-se os melhores resultados até o momento, os valores alterados em relação as simulações anteriores foram sempre as resistências, optou-se por manter constante as capacitâncias a fim de um melhor estudo. Em resposta as tentativas citadas acima, as outras se distanciaram da modelo base da Figura 11, e decidiu-se então usar como resultados finais as Figura 16 e também a Figura 17.

Figura 16 – Simulação final 1



Fonte: Autor.

Figura 17 – Simulacao final 2



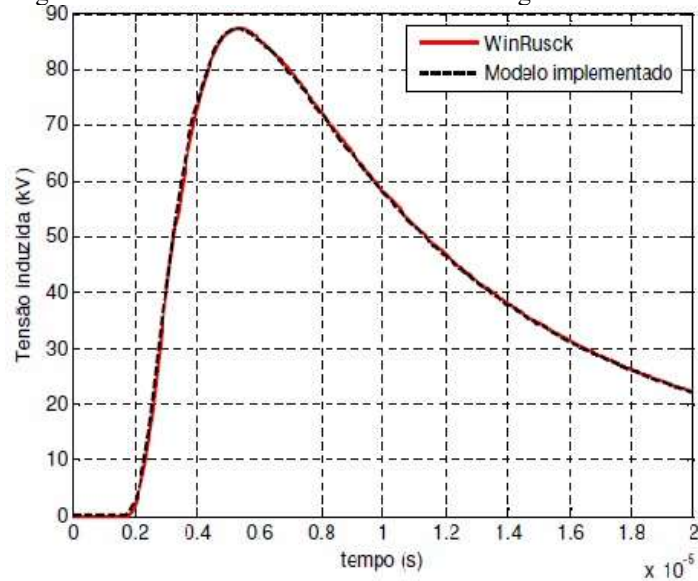
Fonte: Autor

Assim, chegou-se ao fim das simulações de sinal de sobre tensão de uma LT frente a descargas atm. Por mais que esses resultados não tenham alcançado completamente o resultado da Figura 11, eles servem muito bem como um comparativo com a mesma, pois a variação da onda de sobre tensão se deve por conta dos valores adotados nesse trabalho, que como dito anteriormente foram valores fictícios, e a diferença se deve também por conta que na simulação da Figura 11, é utilizado mais variáveis, como por exemplo a resistência de aterramento.

10 RESULTADOS E DISCUSSÃO

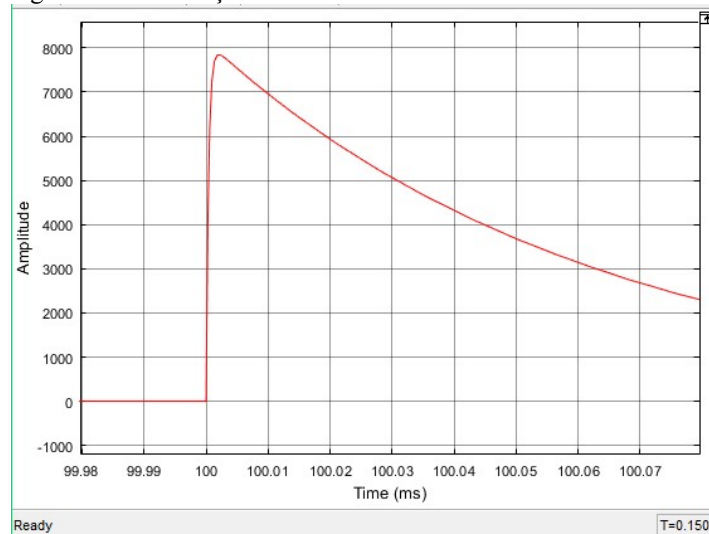
Ainda que as respostas não tenham sido completamente fiel ao sinal proposto por outros autores, verificou-se que as simulações foram muito próximas do esperado, e que após feitos estudos, essa pequena diferença se deve por conta dos valores adotados nesse trabalho em questão e por conta disso acabou sendo este um resultado muito positivo, se forem comparados com as respostas representadas nas Figuras 11, 16 e 17 respectivamente.

Figura 11 – Sinal de uma LT frente uma descarga atmosférica



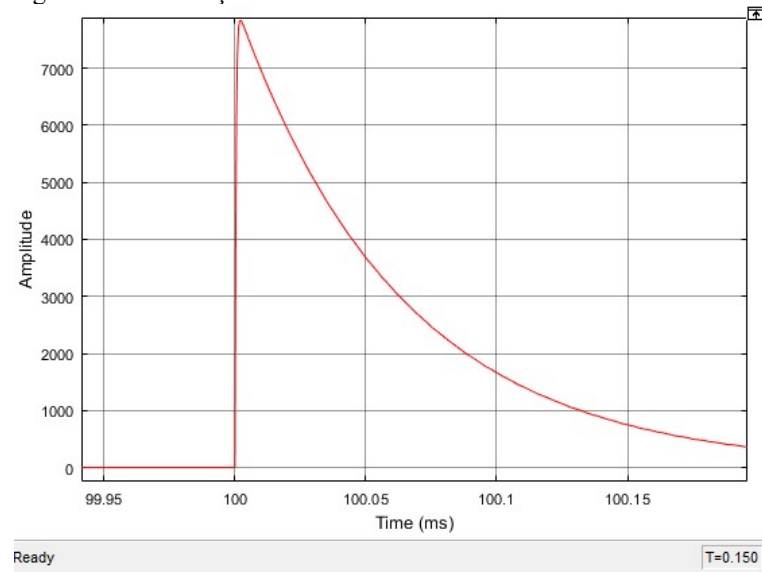
Fonte: Assis (2006).

Figura 16 – Simulação final



Fonte: Autor.

Figura 17 – Simulação final 2



Fonte: Autor.

Assim, por mais que os resultados obtidos não tenham sido os esperados inicialmente, ficou provado a instabilidade de uma LT frente ao fenômeno, o que prova o ponto inicial do trabalho, que nada mais é que verificar e analisar a onda de sobre tensão de uma LT frente a uma descarga atm na mesma, foi demonstrado também com esses sinais a instabilidade em uma linha de transmissão frente a uma descarga atm direta.

11 CONCLUSÕES

Levando em conta os capítulos anteriores desse trabalho, onde a proposta inicial era analisar a onda de sobre tensão de uma LT frente a descargas atmosféricas, pode-se concluir que o objetivo básico do trabalho foi atingido. A simulação atingiu seu objetivo de provar a instabilidade de uma linha de transmissão frente a descarga atm, pois essa instabilidade muitas vezes se deve por causa da sobre tensão e também da sobre corrente, em virtude disto, as LTs podem vir a desligar sem um planejamento prévio, o que irá causar diversos problemas na região afetada, e isso acabou mostrando a grande importância do trabalho, pois provou que para a elaboração de um projeto desse porte, é preciso cálculos pesados para amenizar os problemas futuros recorrentes dá sobre tensão causada por descargas atmosféricas, principalmente no Brasil onde além das linhas serem longas, o clima proporciona um grande risco as mesmas, pois as chances de que elas sejam atingidas por uma descarga atm são bem elevadas.

REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL; **Resolução número 456**, de 29 de novembro de 2000.

ALMEIDA; **Um Novo Modelo de Representação da Corrente de Retorno do Canal e da Torre de Medição para Estudos de Contaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas** - DM, Visacro, S., LRC, 2002.

ASSIS, S. C.; **Cálculo de tensão induzida por descarga atmosférica em linhas aéreas polifásicas e multiterradas: implementação no PSCAD®/EMTDCtm**. Dissertação de Mestrado, Orientador: Wallace de Couto Boaventura, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

BROWN, G. W.; *Lightning Performance I – Shielding Failures Simplified*, IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems, vol. PAS – 97, pp. 33 – 38, 1978.

CEMIG; **Características Básicas de Linhas de Transmissão, Gerência de Engenharia de Manutenção da Transmissão – PN/MT**, Consulta realizada 2018.

CUNHA, L. V.; **Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas atmosféricas: Influência do efeito corona na ruptura a meio de vão**, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, julho 2010.

DARVENIZA, M., SARGENT, M. A, *The calculation of double circuit outage rate of transmission lines*, IEEE Trans. Power Applicat. Syst., vol. PAS-88, no. 5, pp. 680–687, May 1969.

EPRI; *Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above / Second Edition*. General Electric Co. Pittsfield, Mass. USA, 1982.

EPRI; *Handbook for Improving Overhead Transmission Line Lightning Performance*. Final Report, December 2004.

ERIKSSON, A. J.; *Lightning and tall structures* em Trans. South African IEEE, 69, 1978.

FAW7 – ENGENHARIA. **Aterramento em linha de transmissão**. Disponível em <<http://faw7.com.br/aterramento/aterramento-em-linha-de-transmissao>>, acesso em 01/06/2018 às 12:51.

IEEE; *Guide for Improving Lightning Performance of Transmission Lines*, IEEE Standard 1243, 1997.

OLIVEIRA, R. F.; **Linhas de transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, junho, 2009.

- PINTO, M. O.; **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. 1 ed. LTC. Rio de Janeiro. 2014.
- ROCHA, L. C.; **Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UAT Frente a Descargas Atmosféricas: Influência da Ruptura a Meio de Vão**. Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- SILVA, A. P.; **Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Sistema de Informações e Análise de Casos**. Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2007.
- SOARES Jr, A.; **Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas**, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 1996.
- UDO, T.; *Estimation of Lightning Shielding Failures and Mid-span Back-flashovers Based on the Performance of EHV Double Circuit Transmission Lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, pp. 832-836, April 1997.
- VISACRO, S., DIAS, R.N.; MESQUITA, C.R.; **Aplicação não Convencional de SLT como Elemento Auxiliar de Decisão na Definição de Ações de Proteção de Linhas de Transmissão**. Revista Eletroevolução, Nº. 34, pp. 24 a 28, Editora: CIGRÉ-Brasil, Rio de Janeiro, março, 2004b.
- VISACRO, S.; **Descargas Atmosféricas - Uma Abordagem de Engenharia**. Artliber Ltda, São Paulo, 2005.
- VISACRO, S.; *Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines*. *Journal of Lightning Research*, 2007.
- VOTORAÇO – Blog Votoração. **Como as Torres de Transmissão são feitas**. Disponível em <<http://www.votoraco.com.br/como-as-torres-de-transmissao-sao-feitas/>>, acesso em 13/08/2018 às 13:45.
- WAGNER, C. F., HILEMAN, A. R.; *Surge impedance and its application to the Lightning Stroke*. *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* Volume: 80, Issue: 3, February, 1962.