



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

**DESEMPENHO DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DO
GUIA IEEE Std 1410**

por

JOSÉ LÚCIO PIRES VIEIRA BRAGA

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de
Engenharia da Universidade Federal de Minas
Gerais, como requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Compatibilidade
Eletromagnética e Qualidade de Energia.**

Orientador: Professor Ivan José da Silva Lopes

FEVEREIRO DE 2009

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESEMPENHO DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO
DO GUIA IEEE Std 1410**

JOSÉ LÚCIO PIRES VIEIRA BRAGA

RESUMO

Uma das mais importantes fontes de distúrbios em sistemas de distribuição são as descargas atmosféricas que podem causar interrupções momentâneas ou permanentes. A crescente preocupação com relação à qualidade da energia elétrica criou grande interesse na interação das descargas atmosféricas com os sistemas de energia e na melhoria da proteção contra seus efeitos em linhas de distribuição. Estudos indicam que, no Brasil, as descargas atmosféricas são responsáveis por mais de 30 % de todas as interrupções acidentais que ocorrem nos sistemas de distribuição. O guia IEEE Std 1410 propõe um método de avaliação de desempenho das linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas de modo a reduzir as interrupções no fornecimento de energia e os danos associados. O objetivo desse trabalho é estudar e implementar a metodologia de cálculo a partir da modelagem proposta através de um programa computacional. O programa permite investigar as relações existentes entre a incidência de descargas, as características da linha (sua blindagem, nível de isolamento, tipo de estrutura, etc.) e as interrupções causadas por descargas diretas e indiretas, separadamente. O programa computacional implementado apresenta grande versatilidade e facilidade no cálculo de desempenho de linhas de distribuição e possibilita a verificação de como novas modelagens afetam a estimativa de desempenho dos sistemas.

ABSTRACT

Lightning is one of the most important sources of disturbances in distribution systems that can cause permanent or momentary interruptions. The growing concern regarding power quality has created great interest in the interaction of lightning with power systems and an improved protection against its effects on distribution lines. Studies indicate that, in Brazil, lightning is responsible for more than 30 % of all accidental interruptions in distributions systems. The IEEE Std 1410 proposes a method for assessing the performance of overhead distribution lines and means of reducing the outages. The objective of this work is to study and implement the proposed methodology in a computer program. The program allows to investigate the relationship between lightning activity, the line characteristics (shielding, insulation level, type of structures, etc.) and the interruptions caused by direct and indirect lightning, separately. The implemented computer program has great versatility and allows the verifications of how new models may affect the performance estimate of distribution systems.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai (in memorian) e a minha mãe, que viveram com simplicidade, dignidade e coragem e souberam investir e orientar na educação dos seus filhos.

Ao Professor Ivan José da Silva Lopes, pela orientação, apoio, competência, paciência, exemplo e dedicação, o que tornou possível a realização desse trabalho.

Aos professores do CPDEE, que muito contribuíram com os seus ensinamentos para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos meus amigos Jordão, Lana, Zezinha, Beth, Elder, Paulo Fernando, Elaine, Lincoln, Anilde, Cláudio, Vidal, Leila, Sulamita, Rozane, Leandro, Eliana, Kleber, Vanda, Tônico, Jania, Arthur, Lys Maria e Vanda (acompanhante da minha mãe) que acreditaram, apoiaram e incentivaram no desenvolvimento desse trabalho.

Em especial ao meu amigo Vicente da Conceição que sempre me incentivou e apoiou no desenvolvimento e realização desse trabalho de Mestrado.

Aos meus irmãos José Poluceno, Maria Clélia (in memorian), Maria Ângela, Maria Cristina, Maria Lúcia, meu irmão gêmeo José Mário, Maria Marta, José Aurélio (in memorian) e minha irmã caçula Maria Regina (in memorian), pelo companherismo na luta conjunta pela educação dada pelos nossos pais.

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos Luciana e Rodrigo.

Sumário

	Pág
1) Introdução	
1.1) Considerações preliminares.....	1
1.2) Objetivo do trabalho.....	3
1.3) Revisão bibliográfica.....	3
1.3.1 – Modelagem da descarga.....	4
1.3.2 – Modelagem da tensão induzida.....	5
1.3.3 – Desempenho de linha de distribuição	7
1.4) Organização do texto.....	16
2) O fenômeno e sua modelagem	
2.1) Introdução.....	17
2.2) O fenômeno da descarga atmosférica.....	17
2.3) Os efeitos das descargas no sistema elétrico.....	19
2.4) A interação das descargas atmosféricas com o sistema elétrico.....	20
2.4.1) Descargas diretas.....	21
2.4.2) Descargas laterais.....	25
2.5) Os aspectos da modelagem.....	27
2.6) Comentários.....	29
3) Metodologia de cálculo	
3.1) Introdução.....	30
3.2) A metodologia utilizada.....	30
3.2.1) Incidência das descargas atmosféricas.....	31
3.2.2) Características elétricas das descargas e distribuições da corrente de pico	32
3.2.3) Desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas.	34

	Pág
3.2.3.1) Descargas diretas em linhas aéreas.....	35
3.2.3.2) Blindagem devido a estruturas e árvores próximas.....	35
3.2.3.3) Desligamentos por descargas laterais.....	38
3.2.4) Nível de isolamento da linha de distribuição.....	40
3.3) Considerações sobre nível de isolamento e disrupção das linhas de distribuição.....	42
3.4) O método simplificado.....	45
3.5) Comentários.....	49
4) Implementação da metodologia de cálculo do desempenho	
4.1) Introdução.....	50
4.2) O programa computacional desenvolvido.....	50
4.2.1) Entrada de Dados.....	50
4.2.2) Processamento.....	52
4.2.3) Saída.....	59
4.3) Comentários.....	63
5) Estudo de Casos	
5.1) Introdução.....	65
5.2) Características dos sistemas de distribuição em estudo.....	66
5.3) Casos simulados.....	67
5.4) Resultados e análises.....	68
5.5) Comentários.....	78
6) Conclusão e proposta de continuidade.....	80
Bibliografia.....	82

1) Introdução

1.1) Considerações preliminares

O mundo moderno é um grande consumidor de energia elétrica. A praticidade de geração, transmissão, distribuição e utilização desse tipo de energia tornou-se essencial em praticamente todos os tipos de atividade humana. Por isso, tem se justificado há muito tempo constantes investimentos científicos e tecnológicos no setor para assegurar a qualidade da energia disponibilizada pelos sistemas elétricos de potência. Mais recentemente, o processo de modernização da indústria com a crescente utilização de equipamentos eletrônicos acabou por realçar a importância de se ter energia elétrica de alta qualidade. Dentre os parâmetros utilizados para aferir essa energia, está a continuidade de seu fornecimento e o tempo médio de restabelecimento do sistema após uma interrupção [13].

O fato da qualidade de energia ter tornado um assunto recente, não significa que ela não foi importante no passado. Concessionárias em todo o mundo têm, por décadas, trabalhado na melhoria do que é agora conhecido como qualidade de energia elétrica [3]. Uma boa energia recebida é a disponibilidade de energia elétrica na forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude e interrupções, emanando de uma fonte de potência infinita. Qualquer desvio nas características destes parâmetros é considerado um problema envolvendo qualidade da energia [6]. Dentro deste contexto, uma das mais importantes fontes de distúrbios em sistemas de distribuição são as descargas atmosféricas que podem causar interrupções momentâneas ou permanentes e que constituem o foco deste trabalho.

A crescente preocupação com relação à qualidade da energia elétrica criou mais interesse na interação das descargas atmosféricas com os sistemas de energia e na melhoria na proteção contra seus efeitos em linhas de distribuição. As descargas atmosféricas podem também causar faltas

permanentes e, em 5 a 10% dos casos, podem causar danos permanentes aos equipamentos [1]. A principal fonte de insatisfação de consumidores, independente de classe de consumo, é a interrupção no fornecimento de energia. Estudos indicam que, no Brasil, as descargas atmosféricas são responsáveis por mais de 30 % de todas as interrupções acidentais que ocorrem nos sistemas de distribuição [12].

Esse quadro tem determinado, ao longo dos anos, a realização de uma série de investigações com relação aos processos físicos relacionados à ocorrência das descargas atmosféricas, ao mecanismo de incidência destas nas linhas, e à resposta dos sistemas a esse tipo de solicitação. Tais investigações têm como objetivo diminuir os danos causados pelas descargas atmosféricas que atingem as linhas aéreas de distribuição, danos que podem se dar nas próprias linhas como também em indústrias, subestações e residências. A avaliação de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas é amplamente discutida na literatura. O tema é complexo e contém um alto grau de incertezas em relação a diversos tópicos, a despeito da vasta literatura existente no assunto.

A incidência de uma descarga atmosférica diretamente em uma linha de distribuição de energia submete os componentes do sistema próximos ao ponto de incidência a sobretensões de grandes magnitudes. Tais sobretensões podem ocasionar a formação de arco elétrico sobre o isolamento da linha e, conseqüentemente, causar falha de operação, com o desligamento do sistema [13].

As descargas que incidem em uma região próxima à linha exercem influência no comportamento da mesma. Tais descargas são as descargas indiretas ou descargas para o solo. Quando elas atingem o solo, induzem tensão e corrente no sistema, determinando, assim, sobretensões em seu isolamento. Tal efeito decorre do acoplamento eletromagnético entre a descarga e o sistema. Apesar dessas descargas serem mais freqüentes, as sobretensões causadas neste caso são menos severas que aquelas devido a descargas diretas. As linhas aéreas de distribuição são susceptíveis a tais sobretensões, devido ao seu nível de isolamento. São freqüentes as falhas nas linhas devido a descargas indiretas [15].

O guia IEEE Std 1410 – 2004, objeto de estudo dessa dissertação, publicado em julho de 2004, elaborado pela Comissão de Transmissão e Distribuição do IEEE (Power Engineering Society) foi desenvolvido pelos membros do Grupo de Trabalho de Desempenho de Linhas de Distribuição frente a Descargas Atmosféricas [1]. Ele propõe um método para avaliação de desempenho das linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas de modo a reduzir, para níveis aceitáveis, as interrupções no fornecimento de energia e os danos associados.

1.2) Objetivo do trabalho

O objetivo desse trabalho é estudar e implementar uma metodologia de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas a partir da modelagem proposta no Guia IEEE Std 1410 [1] através de um programa computacional. O programa permite investigar as relações existentes entre a incidência das descargas, as características da linha (sua blindagem, nível de isolamento, tipo de estrutura, etc.) e as interrupções causadas por descargas diretas e indiretas, separadamente.

1.3) Revisão bibliográfica

A relevância de se abordar o desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas pode ser percebida pelo grande volume de trabalhos teóricos e experimentais que abordam a modelagem das descargas e das linhas, e a interação entre elas com o objetivo de se chegar a cálculos do desempenho.

A modelagem dos fenômenos envolvidos consiste em um tema complexo e é abordado, neste item, através da exposição das idéias fundamentais contidas em publicações apresentadas na literatura. Este item apresenta contribuições de diversos autores sobre o desempenho de linhas aéreas de

distribuição frente a descargas atmosféricas. São abordados: a modelagem da descarga, a interação das descargas com as linhas, a suportabilidade das estruturas e o desempenho dos sistemas.

1.3.1) Modelagem da descarga

Alberto Borghetti apresenta em 2004 [21] um estudo sobre os parâmetros da corrente de descarga no qual descreve um procedimento para obter a distribuição estatística dos parâmetros da corrente de descarga para a terra partindo dos dados registrados por meio de torres instrumentadas. O procedimento foi baseado no método de Monte Carlo que permite deduzir a distribuição estatística dos parâmetros da corrente de descarga, tais como valor de pico, tempo de frente, etc. O procedimento abordado foi aplicado em duas distribuições de parâmetros de descargas log-normal disponíveis na literatura, deduzido de dados registrados de torres instrumentadas de diferentes alturas (40 m e 70 m). No estudo apresentado, as distribuições calculadas da corrente de pico para a terra exibem valores médios menores que aquelas de distribuição adotadas por CIGRÉ e IEEE, variando de mais de 20% para em torno de 40%, dependendo do raio de atração adotado na expressão de cálculo. A influência da altura da torre com instrumentos usados para medição dos parâmetros da descarga atmosférica na distribuição da corrente de pico para a terra foi investigada como uma função a ser considerada na expressão do raio de atração. O trabalho de pesquisa adicional, sugerido pelo autor, é necessário, no sentido de melhorar a precisão dos resultados obtidos pela implementação de modelo de torre no topo de montanha. De acordo com o autor, as conclusões acima deviam ser levadas em conta na coordenação de isolamento dos sistemas de potência, especialmente com respeito a desempenho das linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Os resultados obtidos podem ser usados para estimar o desempenho dos sistemas localização de descargas com respeito à distribuição estatística da corrente.

1.3.2) Modelagem da tensão induzida

A contribuição de Voislav Jankov em 1997 [19] sobre tensão induzida em linhas de distribuição devido a descargas próximas apresenta um estudo sobre os parâmetros que afetam a máxima tensão induzida em linhas aéreas devido às descargas laterais e propõe uma equação para calcular essa tensão. A razão disso é que essa equação pode ser útil para cálculo de desligamentos e de interrupções de linhas. Para determinação do cálculo das tensões induzidas, o autor utilizou um modelo de descarga de retorno, o campo eletromagnético irradiado pela descarga LEMP (Pulso Eletromagnético de Descarga) e um modelo de acoplamento de interação da LEMP e a linha. O autor leva em consideração a forma de onda da corrente de descarga, a velocidade da descarga de retorno de $100 \text{ m}/\mu\text{s}$ e a linha é apresentada como um condutor singelo. O autor apresenta um estudo comparativo das máximas tensões induzidas em função das distâncias de incidência de descargas nas proximidades da linha para variações no tempo de frente e de queda da onda de corrente, velocidade de descarga de retorno e altura da linha. Os estudos comparativos apresentados entre as tensões máximas estimadas e calculados indicam que a equação proposta pelo autor dá uma boa aproximação para o cálculo da máxima tensão induzida em linhas de distribuição devido a descargas próximas. Na determinação da máxima tensão induzida, o autor reconhece a influência da altura da linha, tempo de frente e tempo de queda da corrente de descarga, velocidade da descarga de retorno e a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha. As conclusões do autor foram que a equação proposta no estudo é aplicada em problemas onde o ponto de incidência de descargas está entre várias dezenas até centenas de metros de distância da linha. Para os outros parâmetros tais como corrente de pico de descarga de retorno, seu tempo de frente, seu tempo de cauda e altura da linha, podem ser variados naqueles que são de interesse prático.

Nucci e Rachidi apresentam em 1999 [18] um estudo sobre as tensões induzidas por descargas atmosféricas e descrevem que a 1ª corrente de retorno é considerada a maior responsável pelas tensões induzidas por causa da radiação eletromagnética que é intensa durante essa fase. O cálculo

das tensões induzidas apresenta os seguintes estágios: primeiro, é adotado um modelo de descarga de retorno que especifica a distribuição da corrente no espaço e no tempo ao longo do canal durante a fase da descarga de retorno; segundo, as alterações do campo eletromagnético produzido pela distribuição da corrente são calculadas ao longo da linha, considerando o efeito de propagação ideal do campo; e terceiro, a tensão resultante da interação entre o campo eletromagnético e os condutores da linha é obtida usando um modelo de acoplamento. Os modelos comumente adotados de acoplamento são o modelo de Rusck, o modelo de Chowdhuri e Gross e o modelo de Agrawal et al, sendo o último considerado como o mais rigoroso dentro dos limites das hipóteses adotadas. O estudo mostra que a forma de onda de tensão induzida apresenta tempo de subida muito rápido e duração curta com relação a corrente de descarga de retorno e a magnitude da tensão induzida depende significativamente dos parâmetros da corrente de retorno, da distância, posição relativa e da configuração da linha. A distância dentro da qual podem haver desligamentos por tensão induzidas está dentro de 200 m do ponto de incidência de descarga e a linha, de acordo com os autores. Essa distância depende da severidade da descarga, configuração da linha (altura e comprimento), condutividade do solo e nível de isolamento. O estudo apresenta que a tensão induzida é inversamente proporcional à distância de incidência da descarga a linha. Várias medidas podem ser adotadas para proteger contra as tensões induzidas, tais como: aumento do nível de isolamento da linha, altura da linha e resistividade do solo, utilização de dispositivos pára-raios, aplicação de cabo pára-raios e outras. Os autores descrevem que um cabo pára-raios pode reduzir a magnitude da tensão induzida de 20 a 40 %, reduzindo o número de falhas da linha. O resultado de uma pesquisa apresentada pelos autores mostra que as tensões induzidas podem exceder o nível de isolamento da linha para diversas condutividades de solo e concluem que linhas com nível de isolamento menor que 300 kV estão mais propensas a desligamentos por tensões induzidas.

1.3.3) Desempenho de linhas de distribuição

No artigo publicado em 2000 [16] Juan A. Martinez, et al apresenta um estudo comparativo de vários métodos utilizados para cálculos de taxas de desligamentos frente a descargas atmosféricas no qual distinguem-se as descargas que atingem diretamente a linha daquelas que atingem a terra. Todos os métodos foram aplicados para linhas sem cabo pára-raios, com cabo pára-raios e resistividade do solo ideal. As conclusões mais importantes do estudo foram: as sobretensões induzidas são um problema somente para linhas com níveis de isolamento menores que 75 kV; as sobretensões induzidas podem ser reduzidas utilizando cabo pára-raios; a resistência de aterramento tem a maior influência na taxa de desligamento por backflashover; as diferenças entre a altura das linhas podem ser significativas para os cálculos do número de falhas das linhas; as diferenças entre os métodos de cálculos de desligamentos causados por descargas laterais são importantes sendo dependentes da velocidade da corrente de retorno. Os autores reconhecem que a condutividade do solo tem influência significativa nos cálculos de desligamentos das linhas.

No artigo de Thanasaksiri em 2004 [17] sobre melhoria de desempenho de linhas aéreas de distribuição de 22 kV frente a descargas atmosféricas foi utilizado um modelo computacional desenvolvido pelo EPRI (Electric Power Research Institute). O propósito do estudo apresentado foi investigar o desempenho da linha de distribuição com a variação da impedância de aterramento e do diâmetro do cabo pára-raios. Para linhas de distribuição, o programa calcula os desligamentos com opções de uso de dispositivos pára-raios, cabos pára-raios, variações na resistência de aterramento e utilização de blindagem por construções e árvores próximas. O programa permite o analisar o desempenho para várias modelagens de configurações de linhas em campo aberto e em área blindada. Mostra a tensão disruptiva de impulso baseada na modelagem adotada; calcula o número de desligamentos esperados; quantos desligamentos envolveriam as fases da linha; a quantidade esperada de pára-raios que pode vir a falhar e o valor médio da corrente de descarga. O autor apresenta um estudo comparativo de desempenho de linhas em campo aberto e em área blindada por

árvores e construções próximas, sem proteção (sem cabo pára-raios e dispositivos pára-raios), com somente cabo pára-raios, com somente dispositivos pára-raios e com cabo pára-raios e dispositivos pára-raios. No estudo apresentado, o desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas na área blindada é muito diferente daquele em campo aberto porque as árvores e construções próximas estão mais expostas que os condutores. O circuito é susceptível a desligamentos por causa da tensão induzida nos condutores pela incidência das descargas em árvores e construções próximas. Uma outra conclusão apresentada no estudo é que a linha com cabo pára-raios pode reduzir o número de desligamentos em campo aberto e em área blindada. O autor conclui que, a impedância de aterramento pode afetar somente linhas com cabo pára-raios. No estudo, o autor também conclui que uma elevada impedância de aterramento pode causar um maior número de desligamentos por descargas diretas devido à tensão de backflashover, mas pode causar um menor número de desligamentos por descargas próximas, tanto para linhas em campo aberto quanto em área blindada. O estudo apresentado mostra que para descargas diretas e uma maior resistência de aterramento o diâmetro do cabo pára-raios não tem influência no desempenho da linha, mas para descargas laterais há uma melhora no desempenho da linha tanto para campo aberto quanto para área blindada. Em todos os casos apresentados, as configurações protegidas com dispositivos pára-raios são as que têm o melhor desempenho. Para proteção contra descargas diretas, a instalação de cabo pára-raios e dispositivos pára-raios em todos os postes é a melhor opção.

A contribuição de H. Bueno, et al em 2005 [20] apresenta um método simplificado de engenharia para análise e melhoria de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas. O método desenvolvido consiste de duas partes: uma de estatística de simulação de descargas atmosféricas para se obter o histograma das piores solicitações de sobretensões e a outra de simulação de sobretensões induzidas em um modelo monofásico para computar sua amplitude e forma de onda ao longo da linha. O modelo estatístico de simulação de descargas foi simulado no programa LIOV (Sobretensão Induzida por Descarga Atmosférica) e o modelo de simulação de

sobretensões induzidas foi simulado no programa ATP (Alternative Transients Program). O método foi aplicado em 16 alimentadores da AES-Eletropaulo, sendo que o modelo do alimentador foi considerado linear com o comprimento total de todos os ramais. O modelo simulado no LIOV leva em conta as posições de todas as estruturas altas próximas à linha, pára-raios, chaves e terminações da linha. O modelo avalia as máximas tensões induzidas, para cada descarga, pela equação apresentada no estudo. Considerando somente as tensões induzidas que podem causar desligamentos, um histograma de falhas de isolamento e desligamentos ao longo da linha é obtido. Os dados obtidos das simulações no LIOV consideram que todas as falhas de isolamento que ocorrerem numa distância menor que 35 m de qualquer pára-raios serão evitados por eles.

Os resultados apresentados mostram onde devem ser instalados os pára-raios de surto na linha. E as instalações de pára-raios ao longo da linha não devem ultrapassar a uma distância máxima de 200 m. Concluem os autores que pára-raios instalados acima dessa distância não apresentam proteção efetiva esperada.

No artigo de 2005, Nagaraj et al [22] avaliam um estudo de confiabilidade do sistema de distribuição sob tempestades. O estudo consiste de um sistema com 100 alimentadores com 3600 km de linhas e abrangendo uma área de 6480 km². Os dados de descargas tais como tempo, localização, amplitude e polaridade foram obtidos da rede nacional de detecção de descargas atmosféricas. Desses dados, as descargas foram identificadas e os modelos estatísticos de intensidade, duração e frequência de eventos de tempestades foram desenvolvidos. Foi apresentado um estudo de faltas permanentes e interrupções sustentadas em função do número de descargas atmosféricas durante as tempestades e conclui-se que a maioria dos desligamentos por descargas atmosféricas resulta em faltas temporárias enquanto uma pequena parcela de desligamentos resulta em faltas permanentes. Da análise dos dados, em torno de 20% das faltas devido a descargas atmosféricas resultaria em interrupções sustentadas, portanto a taxa de faltas permanentes é suposta ser de 20% da taxa de desligamentos por descargas atmosféricas e a taxa de faltas temporárias é, portanto de 80% da taxa de desligamentos

por descargas. Os resultados da simulação mostram que os índices de confiabilidade utilizando os métodos de Monte Carlo e Analítico (Modo de Falhas e Análises de Efeito) estão próximos. Os histogramas de probabilidades de confiabilidade de sistemas devido a interrupções causadas por descargas atmosféricas foram apresentados e pode ser vistos que as horas de interrupções sustentadas por cliente por ano tem um desvio padrão de 40% do valor médio enquanto o número de interrupções momentâneas por cliente por ano indica um desvio padrão de 30% do valor médio. Foi avaliado o impacto do tamanho do sistema na variação dos índices de confiabilidade do sistema testado agrupando em subsistemas de 10 a 100 alimentadores e o resultado é que os índices de confiabilidade para interrupções sustentadas dependem do tamanho do sistema, mas os índices de confiabilidade para interrupções momentâneas não dependem do tamanho do sistema.

Os resultados práticos deste estudo mostram a importância da modelagem detalhada das características das descargas e a simulação da resposta do sistema avaliando a confiabilidade do sistema de distribuição durante as descargas atmosféricas. O autor considera que a taxa de desligamentos, conseqüentemente o número de interrupções momentâneas, depende não somente da intensidade da descarga, mas também da quantidade de trechos de linha que permanecem energizados todo o tempo no sistema. Esta dependência resulta numa relação não linear entre a densidade de descargas para a terra e a confiabilidade do sistema. O autor utiliza o método de simulação de Monte Carlo para estudar os índices de confiabilidade devido às faltas causadas por descargas atmosféricas. No estudo apresentado, a modelagem da intensidade de descargas durante as tempestades, o número de faltas permanentes e temporárias é diretamente proporcional à intensidade da descarga e depende das condições do sistema elétrico. A severidade das tempestades, de acordo com o estudo, pode ser modelada pelo número de tempestades que ocorrem durante o ano, a intensidade medida pela densidade de descargas para a terra durante a tempestade e a duração de tempestade. Os autores concluem que as descargas atmosféricas causam um número de desligamentos momentâneos e relativamente alguns desligamentos sustentados. Concluem que os

resultados apresentados indicam que o método de simulação de Monte Carlo dá uma avaliação realística dos índices de confiabilidade do sistema de distribuição sob descargas atmosféricas.

Vilson Luiz Coelho em 2005 [12] apresenta um estudo sobre linhas aéreas de distribuição no qual apresenta um trabalho sobre a influência das descargas atmosféricas no desempenho de sistemas aéreos de distribuição de energia. O trabalho contempla um projeto de pesquisa com o objetivo de propor soluções técnicas e econômicas para reduções de interrupções de energia elétrica devido a descargas atmosféricas. Foram realizados os trabalhos de levantamento de características do sistema; ensaios de laboratório para avaliar os níveis de isolamento das estruturas; medições de resistividade do solo; levantamento de custos das interrupções e desenvolvimento de uma planilha de cálculo de interrupções em redes aéreas de distribuição e seus respectivos custos. Os resultados apresentados pelo autor sugerem que o sistema de distribuição de energia da CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina) pode ser dividido em 5 regiões diferentes de redes e características geográficas. A simulação apresentou interrupções muito superiores a esses valores observados. Isso representando em média, 41% das interrupções prováveis. Tais causas, de acordo com o autor, devem ser as faltas temporárias, diferentes fatores de blindagem e as faltas desconhecidas. Entretanto, para diversas regiões de Santa Catarina, o estudo apresentou excelente conformidade entre o cálculo de interrupções e os valores observados, validando assim a metodologia de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição adotado pelo Guia IEEE Std 1410 [1]. No estudo apresentado, o cálculo realizado para grande parte das interrupções do sistema ocorreu por ação de descargas diretas e a solução de aumento de níveis de isolamento das estruturas não resolveria o problema. O autor sugere que os fatores de religamentos, desligamentos por causa ignorada, fator de blindagem e extinção espontânea de arco, devem ser estudados. Esse trabalho foi realizado a partir de relatórios e informações num período de quatro anos, sendo considerado um prazo relativamente curto diminuindo a precisão dos resultados.

Afonso Ávila em 2005 [11] apresentou um estudo de desempenho de redes de distribuição rural utilizando dados do sistema de localização de tempestades e da operação do sistema. Os dados de descargas atmosféricas foram extraídos do Sistema de Localização e Detecção de Descargas (SLT) e os dados de operação do sistema foram obtidos do Sistema de Controle de Interrupções da CEMIG (CONINT). Foram analisadas ocorrências de desligamentos do sistema e descargas atmosféricas no período de 2001 a 2004. A metodologia de cálculo de desempenho utilizando o Guia IEEE – Std 1410 – 2004 é aplicada a três alimentadores com níveis de isolamento de 95 kV, 170 kV e misto (95 kV e 170 kV). Os cálculos de desempenho dos alimentadores foram comparados com o desempenho real e concluiu-se que, para os alimentadores de NBI de 95 kV e 170 kV, os valores reais estão dentro da faixa dos valores calculados. Para o alimentador misto (95 kV e 170 kV) o desempenho é influenciado pelo trecho de NBI de 170 kV. Comparando os dados do desempenho real e estimado, conclui-se na validação da metodologia de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas.

Em 2007 Alberto Borghetti [14] apresentou um estudo sobre procedimento de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas comparado com o procedimento adotado pelo guia IEEE [1]. Os dois métodos diferem-se em dois pontos: nos modelos adotados para avaliar as tensões induzidas e na aproximação estatística da corrente de pico de descarga utilizando a distribuição probabilística log-normal adotada pelo Cigré. O procedimento adotado pelo guia IEEE é concebido para a linha aérea infinita com condutor singelo, resistividade do solo ideal, aplica o método estatístico e usa a fórmula simplificada de Rusck para o cálculo da máxima tensão induzida por descargas atmosféricas. O procedimento proposto é baseado na aplicação do método de Monte Carlo, chamado de LIOV-MC (Sobretensão induzida por descargas atmosféricas), leva em conta a distribuição estatística do tempo de subida da corrente de descarga além do valor de pico, assim como fatores de correlação entre eles e permite o cálculo de sobretensões induzidas no modo mais preciso que a fórmula simplificada de Rusck. Para tensões induzidas, o método proposto trata o cabo

pára-raios como um dos condutores da linha enquanto o método do IEEE leva em conta um fator que depende do aterramento e da proximidade do condutor aterrado dos condutores fase. O estudo apresentado faz uma comparação entre a taxa de desligamentos utilizando o guia IEEE e o procedimento proposto com condutividades do solo variando do valor ideal a valores finitos ($\sigma_g = 1$ mS/m e 10 mS/m). O estudo mostra que para condutividade do solo ideal o procedimento proposto apresenta a taxa de desligamentos menores que os calculados pelo guia IEEE. Para condutividade do solo $\sigma_g = 1$ mS/m os desligamentos para o procedimento proposto são praticamente iguais aos calculados pelo IEEE e para condutividade do solo $\sigma_g = 10$ mS/m os desligamentos para o procedimento proposto são maiores que os calculados pelo padrão do IEEE. Outro estudo apresentado conclui que as diferenças entre o procedimento proposto e o guia IEEE está no fato da fórmula de Rusck ser aplicada somente no caso de forma de onda da corrente de descarga em degrau. Para tensões induzidas foi apresentado um estudo usando o procedimento proposto (programa LIOV-MC), incidência de descargas nos modelos eletrogeométrico (EGM), modelo de progressão do líder (LPM), Ericsson e Rizk para o caso de condutividade do solo ideal e condutividade do solo $\sigma_g = 1$ mS/m. O resultado é que para os modelos eletrogeométrico, Ericsson e Rizk os desligamentos são menores que os calculados com o modelo LPM para condutividade ideal do solo enquanto que, para a condutividade do solo $\sigma_g = 1$ mS/m, os desligamentos estão muito próximos para todos os modelos de descargas adotados.

Foi verificado que o procedimento baseado no método de Monte Carlo dá os mesmos resultados que o método do IEEE quando tensões induzidas são avaliadas usando a fórmula de Rusck e o programa LIOV-MC, para as mesmas configurações de corrente de retorno, altura da linha e o modelo eletrogeométrico do guia IEEE. Os resultados apresentados da investigação mostraram que o método proposto pode haver uma melhora comparada com o método do IEEE levando em consideração a configuração de linha, a forma de onda da corrente de descarga e condutividade do solo.

O artigo de Marco Saran, et al em 2007 [23] apresenta um estudo de desempenho para diversos projetos de linhas de distribuição aérea de média tensão submetidas a tensões induzidas. O estudo apresentado faz comentários ao desempenho e comparações de diferentes configurações de construções de linhas aéreas. Para as simulações, foram considerados uma linha com comprimento de 2 km, vãos de 200 m entre os postes e a geometria dos condutores é um dos padrões onde o condutor aterrado é o condutor neutro. Os valores de condutividade de terra foram assumidos como 0,01 S/m e 0,0033 S/m e as resistências de aterramento de 10 ohms e 40 ohms. Uma área de 24 km² e densidade de descargas para terra de 1 descarga/km²/ano foram considerados. A topologia da rede de distribuição é o maior fator de influência para análises e resulta numa maior ou menor probabilidade de incidência de descargas atmosféricas diretas. Os autores consideram que entre 2 a 16% das descargas atmosféricas atingem diretamente a rede de distribuição urbana. O principal fator de estudo para melhoria de desempenho de sistemas urbanos de distribuição é o surto de tensão induzida. O estudo apresentado aplica o método de Monte Carlo para gerar um número significativo de eventos, os quais são caracterizados por variáveis aleatórias (amplitude da corrente de descarga atmosférica, tempo de frente e coordenadas de localização da descarga). Para cálculos de tensões induzidas foi aplicado o programa LIOV (Sobretensão induzida por descargas atmosféricas). Os parâmetros do pico da corrente e tempo de frente são aquelas propostas por Anderson e Eriksson [2]. Num dos estudos apresentados da linha de distribuição sem condutor aterrado, sem pára-raios de surto e condutividade de terra de 0,0033 S/m, o risco de desligamentos para incidência de descargas de 1000 m e 2000 m em cada direção da linha é praticamente o mesmo. Noutro estudo com incidência de descargas de 2000 m da linha com condutividade do solo igual a 0,01 S/m e instalação de pára-raios de surtos a cada 400 m tem um desempenho próximo para linha com configuração com condutor aterrado a cada 100 m. Foi apresentado também um estudo comparativo de custo de construção para linhas com nível de risco de falhas igual a 4 desligamentos/100 km/ano e o resultado é que o custo de construção por quilômetro de linhas é maior para níveis de isolamentos dos

isoladores de 95 kV. As linhas com nível de isolamento dos isoladores maiores que 200 kV apresentam redução do risco de desligamentos mesmo com configurações mais complexas que envolvam pára-raios a cada 200 m e cabo aterrado. Tais configurações não fazem diferença em relação à configuração padrão sem pára-raios e nem cabos aterrados. Foi demonstrado no estudo que a instalação de pára-raios de surto a cada 400 metros não é uma solução eficiente, principalmente quando comparados com soluções onde a tensão disruptiva de impulso dos isoladores é maior que 170 kV. Sistemas onde o nível de isolamentos dos isoladores é menor que 125 kV e protegido por pára-raios de surtos a cada 400 metros apresenta risco de desligamentos maiores que sistemas sem pára-raios de surtos e com isoladores com tensão disruptiva maior que 170 kV. Outra conclusão do autor é que a solução para linha de 3 condutores, sem pára-raios nem cabo de terra e nível de isolamento maior que 200 kV é uma alternativa válida e merecem estudos adicionais.

As pesquisas, investigações e estudos apresentados reforçam a relevância do tema e serviram de base para se estudar em detalhes uma metodologia de avaliação de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente às descargas atmosféricas como proposto pelo Guia IEEE Std 1410 [1].

1.4) Organização do texto

O presente texto está dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os principais aspectos relacionados à tarefa de avaliação do desempenho de linhas de distribuição. São descritas as considerações com relação às descargas atmosféricas, como o processo físico de formação e seus principais parâmetros. O capítulo contempla, ainda, as modelagens da incidência de descargas, destacando o modelo eletrogeométrico. Adicionalmente, os efeitos da interação das descargas com o sistema elétrico são abordados.

O Capítulo 3 é dedicado à metodologia implementada, com descrição da incidência das descargas, suas características elétricas, desempenho de linhas de distribuição frente a descargas diretas e indiretas, aspectos de blindagem da linha, etc. Considerações sobre o nível de isolamento, proteções de linhas com cabos pára-raios são também abordados, assim como a influência da resistência de aterramento no desempenho das linhas de distribuição.

No Capítulo 4, é apresentado o programa computacional desenvolvido para cálculo de desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas, a linguagem utilizada e suas características.

No Capítulo 5, um estudo de casos de linhas de distribuição é apresentado. O capítulo contempla ainda cálculos de desempenho das linhas, análises dos resultados obtidos e conclusões.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais contribuições do trabalho, esclarecendo seu alcance, suas implicações e propostas de continuidade.

2) O fenômeno e sua modelagem

2.1) Introdução

As descargas atmosféricas constituem-se no principal elemento responsável pelos desligamentos não programados dos sistemas elétricos de potência. Apesar da maioria dos desligamentos ser de natureza transitória, essas perturbações no sistema têm se mostrado bastante críticas [5]. O desempenho de uma linha de distribuição frente a descargas atmosféricas pode ser expresso por meio da frequência de interrupções no funcionamento da linha. O desempenho é usualmente medido pelo número de desligamentos por unidade de comprimento e por unidade de tempo que expressa um dos parâmetros da qualidade da energia suprida às cargas.

Quando uma descarga atmosférica atinge uma linha de distribuição ou sua vizinhança, uma sobretensão é desenvolvida através de seu isolamento. Se essa tensão exceder a sua suportabilidade, ocorrerá uma falha de isolamento. Isso acontecendo ter-se-á como consequência a formação de um arco elétrico, o qual será mantido pela tensão do sistema, tornando-se então necessária a operação dos dispositivos de proteção para a eliminação deste curto-circuito [4].

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos na análise do comportamento transitório de uma linha atingida por descarga atmosférica, vários aspectos de modelagem do sistema deverão ser analisados com o objetivo de avaliar o desempenho das linhas de distribuição com vistas a melhorá-lo. Este capítulo discute o fenômeno das descargas atmosféricas, seus efeitos e sua interação com o sistema elétrico, assim como os aspectos da modelagem.

2.2) O fenômeno da descarga atmosférica

Uma descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica transitória de curta duração, com uma alta corrente associada, que usualmente atinge quilômetros de extensão [9]. Tal descarga ocorre quando nuvens em uma determinada região da atmosfera atingem uma quantidade de cargas elétricas de forma a gerar campos elétricos tão intensos que superam a rigidez dielétrica do ar, causando assim, sua ruptura. Esta suportabilidade é da ordem de 30 kV/cm para o ar seco nas condições atmosféricas padronizadas, mas pode ser bem menor, devido tanto à redução da pressão atmosférica como também devido à elevada umidade na atmosfera [4]. Para que tal processo possa acontecer, é necessário que as condições ambientais estejam favoráveis. Isso pode ser encontrado em tempestades de neve e de areia, nas nuvens sobre vulcões e, na maior parte das vezes, nas nuvens de tempestade. Nas nuvens de tempestade, podem ser identificados quatro tipos de descargas atmosféricas: descargas dentro da nuvem, entre nuvens, entre nuvem e solo e entre nuvem e a estratosfera. Devido aos seus efeitos em estruturas e edificações terrestres, as descargas da nuvem para o solo despertam maior interesse [13].

As descargas de nuvem para o solo podem ser classificadas em descargas ascendentes e descendentes segundo a direção da evolução do canal de descarga que faz o fechamento do percurso ionizado. Elas também podem ser classificadas segundo a polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo por esse percurso, negativas e positivas. Deste modo, pode-se ter descargas atmosféricas descendentes positivas e negativas e descargas ascendentes positivas e negativas [13].

A grande maioria das descargas é de polaridade negativa, sendo considerado um percentual igual ou maior do que 90 %, o que é de grande importância para o desempenho das linhas e dos equipamentos em virtude da diferente resposta de suas isolações de acordo com a polaridade. O valor médio da crista da corrente de descarga varia entre 30 kA e 50 kA, dependendo do local da ocorrência. O tempo médio de duração de uma corrente de descarga aproxima-se de 300 ms. Para descargas entre nuvem e solo, seu percurso pode estender entre 1 e 3 km abaixo da nuvem, embora seu percurso total possa superar 10 km [10].

Além da complexidade que envolve a formação e a evolução do fenômeno, o mesmo apresenta natureza aleatória, o que dificulta a sua análise. Para a sua caracterização, são definidos alguns parâmetros de interesse, cuja distribuição estatística é determinada por meio de medições realizadas em estações especiais para registro da corrente de descarga e por medições de campos gerados por correntes [10].

Os efeitos mais desastrosos do fenômeno decorrem da incidência das descargas diretas em prédios, estruturas, árvores, etc, e podem gerar destruição, incêndio e principalmente, em sistemas de distribuição, danos em equipamentos e desligamentos. Os efeitos mais freqüentes são aqueles associados às descargas indiretas, ou seja, são os efeitos induzidos por descargas próximas. A característica de variação muito rápida da corrente de descarga produz uma importante fonte de distúrbios eletromagnéticos que são capazes de gerar danos e interferências em sistemas elétricos e eletrônicos.

Dentre os parâmetros para estudos de desempenho de sistemas de distribuição, a densidade de descargas para a terra é um dos parâmetros dos mais importantes porque determina a quantidade de descargas incidentes a partir do número de dias com ocorrência de trovoadas por ano, que é o nível cerâmico da região.

Pesquisa realizada pela Cemig, no período de 1971 a 1991, apresentou um nível cerâmico médio para o Estado de Minas Gerais de 67 dias de trovoadas por ano que corresponde a 7,67 descargas/km²/ano [25].

2.3) Efeitos das descargas no sistema elétrico

Um trabalho publicado pelo IEEE e EEI (Edson Electric Institute) em 1967, no período de janeiro de 1950 a dezembro de 1964, constatou que as descargas atmosféricas são a causa mais comum de desligamentos de linhas de transmissão e distribuição respondendo por 26 % de desligamentos em

circuitos de 230 kV e 65 % de desligamentos em circuitos de 345 kV. Esses dados foram coletados de 42 companhias nos estados Unidos e Canadá em linhas de transmissão de 230 kV e 345 kV [7, 8, 26]. Um estudo similar no Reino Unido, também num período de 14 anos, cobrindo 50000 faltas nas linhas de distribuição, mostra os desligamentos que aconteceram em circuitos a partir de 33 kV. Foi observado que 47% de todos os desligamentos, incluindo aqueles de origem desconhecida, foram causados por descargas atmosféricas [7].

As sobretensões de origem atmosférica podem atingir as redes de distribuição de média e baixa tensão e instalações consumidoras. Os efeitos da incidência direta de descargas na rede são de elevada severidade e podem provocar diversos danos no sistema. A incidência direta de descargas é mais comum em linhas de distribuição rural de média tensão ou em regiões periféricas de cidades, onde há maior exposição da linha. É mais raro em redes aéreas urbanas, devido à presença de edificações elevadas. É pouco freqüente em redes de baixa tensão instaladas sob redes primárias. Os efeitos devido à incidência de descargas nas proximidades das redes elétricas são muito menores do que aqueles originados por incidência direta. No entanto, sua frequência de ocorrência é muito superior. Isto torna as sobretensões induzidas o fator crítico de avaliação de desempenho de linhas e redes de distribuição frente a descargas atmosféricas [10]

2.4) A interação das descargas atmosféricas com o sistema elétrico

A ação das descargas atmosféricas em redes aéreas de distribuição de energia vem sendo estudada durante décadas. Tem-se registro de estudos realizados na década de 30 e, a partir daí, muitos outros foram efetivados objetivando a interpretação do fenômeno em redes de média e baixa tensão. As sobretensões de origem atmosférica que ocorrem em uma rede de distribuição podem ser provenientes de descargas diretas sobre a linha ou induzidas por descargas que atingem o solo em locais próximos à mesma [12].

2.4.1) Descargas diretas

Primeiramente, considere-se uma descarga atingindo o condutor fase de uma linha de distribuição. A descarga inicia a propagação de ondas de tensão e de corrente, as quais trafegam aproximadamente à velocidade da luz em ambas as direções a partir do ponto de impacto, com a tensão de surto de $1/2Z_s I$, onde Z_s é a impedância de surto da linha e I é a corrente de descarga. A impedância de surto é definida com $Z_s = (L/C)^{1/2}$, onde L e C são as indutância e capacitância da linha por unidade de comprimento, respectivamente. Estas ondas continuam a se propagar pela linha até que seja encontrada uma descontinuidade. Neste ponto, as ondas de tensão e corrente são refletidas enquanto outras são transmitidas através do ponto de descontinuidade.

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 fica submetido a sobretensão. Essa sobretensão pode ser capaz de romper o isolamento, com estabelecimento de um arco elétrico conectado entre o condutor e a estrutura aterrada. O arco elétrico constitui usualmente num arco superficial de contorno do isolador através do ar ou raramente num arco volumétrico, que pode destruir o isolador [10].

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 pode se manter, sustentado pela própria tensão de operação da linha. Uma vez estabelecido o arco, o valor da impedância de percurso da corrente é reduzido e uma tensão de amplitude relativamente baixa pode ser capaz de manter o nível da corrente o suficiente para assegurar a ionização da região correspondente ao percurso do arco e sustentá-lo. Mantendo-se o arco, configura-se um curto-circuito que pode ser muito destrutivo para o sistema, pois a corrente de baixa frequência passa a fluir pelo arco elétrico em direção ao solo. Nesses casos, após um período de fluxo da corrente, o sistema de proteção cujos relés são sensibilizados por essa corrente, atua, causando o desligamento da linha.

Os cabos pára-raios são ligados ao solo através de cabos de descida conectados ao aterramento da linha, no caso de postes de madeira ou de concreto. Desta forma, direcionam as correntes incidentes de descargas para o solo. Ao proteger a incidência de descargas diretamente no cabo fase, evita-se o efeito de ruptura de isolamento descritos na incidência de descarga direta [4].

O modelo simplificado para a incidência de uma descarga direta é mostrado na Figura 2.1 [1]

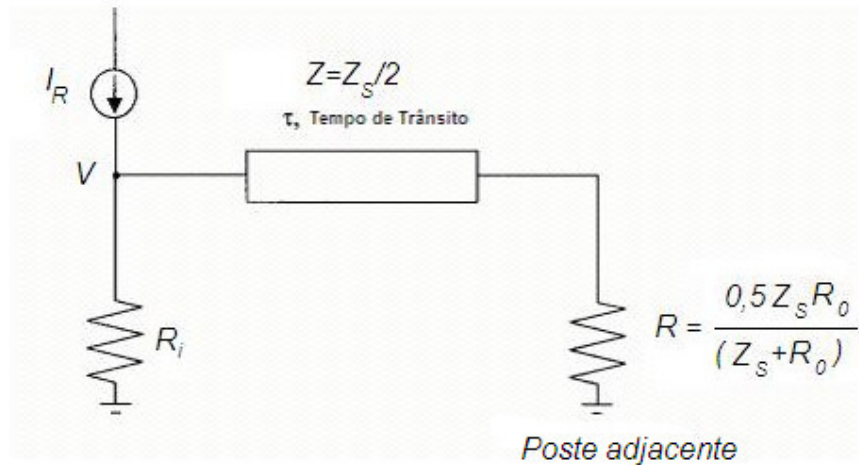


Figura 2.1 – Modelo Simplificado de descarga direta sobre cabo pára-raios em linha de distribuição [1]

O modelo apresentado na Figura 2.1 mostra a incidência de descarga no cabo pára-raios, considerando as resistências de aterramento do pé do poste e do poste adjacente e o tempo de trânsito da onda de corrente de descarga. A partir das expressões a seguir calculamos os parâmetros de resistências de aterramento dos pés dos postes.

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{i_R}{I_g}}} \tag{2.1}$$

Onde,

$$I_g = \frac{E_g \rho}{2\pi R_0^2} \tag{2.2}$$

$$i_R = I_R \frac{R_0 Z}{R_0 + Z} \tag{2.3}$$

I_R = corrente de pico de descarga [kA];

Z_s = impedância de surto do cabo de blindagem [Ω];

τ = tempo de trânsito[seg];

R_i = resistência de aterramento do pé do poste [Ω];

R_0 = resistência de aterramento na medida convencional [Ω];

E_g = gradiente de ionização do solo, assumido como 300 kV/m;

ρ = resistividade do solo [$\Omega.m$]

O modelo simplificado é apresentado com postes adjacentes aterrados, onde Z_s é a impedância de surto do cabo de blindagem.

A utilização dos cabos pára-raios como controle na limitação das sobretensões de origem atmosféricas é feita baseado no modelo eletrogeométrico [1]. A base do modelo eletrogeométrico é o estabelecimento de uma relação entre a intensidade da corrente de descarga e a região ao alcance da ponta da descarga piloto, a qual permite então que o raio em sua trajetória para a terra tenha preferência em alcançar objetos mais próximos. Esta relação entre a intensidade da corrente e a distância de atração pode ser mais bem compreendida se considerarmos que os campos elétricos de grande intensidade são estabelecidos ao redor de uma linha de distribuição, devido às cargas deslocadas pela descarga piloto em sua progressão em direção ao solo, provocando um movimento ascendente de cargas que vão em direção à ponta de descarga piloto. Este movimento ascendente de cargas pode deslocar o raio da trajetória inicial, atraindo-o para a terra, condutor ou cabo pára-raios. Deste modo, pode-se afirmar que o ponto de impacto na linha não é definido até que a descarga piloto alcance uma determinada distância acima do solo, ocorrendo então a orientação definitiva, em função das cargas ascendentes, para o ponto de impacto: solo, condutor ou cabo pára-raios.

Deve-se ressaltar que nem sempre é possível fazer uma blindagem completa de toda a linha por cabos pára-raios [4]. A ocorrência de desligamentos como consequência de descarga direta é dificilmente eliminada.

O modelo eletrogeométrico é utilizado para estimar o número de descargas que incidem próximas à linha, assim como o número de descargas diretas na linha. O princípio básico é que a linha de distribuição ou outro objeto possui um raio de atração, que aumenta com a altura da linha e depende da intensidade da corrente de descarga. As distâncias de atração para o condutor e para solo são representadas pelas equações (2.4) e (2.5) e o diagrama do modelo pela Figura 2.2.

$$r_s = 10 \cdot I_0^{0,65} \tag{2.4}$$

$$r_g = 0,9r_s = 9 \cdot I_0^{0,65} \tag{2.5}$$

onde:

r_s = distância crítica para o condutor [m]

r_g = distância crítica para o solo [m]

I_0 = amplitude da corrente de descarga [A]

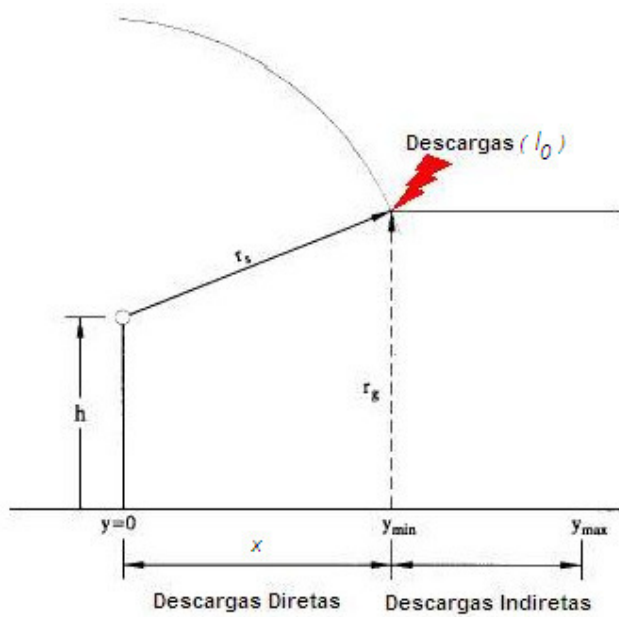


Figura 2.2 – Diagrama Básico do Modelo Eletrogeométrico [1,11]

A partir do modelo da Figura 2.2 e das equações (2.4) e (2.5), determina-se o valor da distância horizontal da descarga para a linha, representada pela equação (2.6)

$$r_s^2 = (r_g - h)^2 + x^2 \tag{2.6}$$

onde:

x = distância horizontal da descarga para a linha [m]

h = altura da linha [m]

2.4.2) Descargas laterais

Não é necessário que uma descarga atinja o poste, cabo pára-raio ou condutor fase para criar um surto de tensão; surtos podem ser produzidos pela indução causada por descargas laterais. Deve-se esperar que tensões induzidas por descargas laterais sejam mais um problema dos circuitos de distribuição do que circuitos de transmissão e isto é realmente o caso. Nem os cabos de blindagem são de muita ajuda para resolver o problema [7].

Linhas blindadas com cabos pára-raios e de tensão nominal maior do que 69 kV, geralmente têm isolamento suficiente para impedir a ocorrência de descargas para tensões impulsivas da ordem de 500 kV. Linhas de tensão abaixo de 69 kV podem falhar por surtos de tensão induzidos. Na maioria dos casos, estas linhas não têm cabos pára-raios e, logo, estão sujeitas a falharem cada vez que ocorrer uma descarga lateral.

O nível básico de isolamento (NBI) das linhas de distribuição de média tensão é relativamente baixo (95 kV a 170 kV) se comparado com o das linhas de transmissão, por essa razão as descargas laterais podem causar sobretensões acima do suportável. De acordo com Eriksson [24], as sobretensões induzidas possuem um valor máximo em torno de 300 kV. O condutor neutro multi-aterrado pode reduzir a sobretensão no isolador por um fator que depende do valor do aterramento e da proximidade do condutor aterrado com o condutor fase. Esse valor varia de 0,6 a 0,9 [1]. A proximidade dos condutores fase do condutor aterrado melhora o acoplamento eletromagnético com consequência da diminuição da tensão induzida. Tal redução é significativa apenas quando os cabos aterrados estão muito próximos do condutor energizado e conectados a aterramentos próximos aos pontos de

observação. Em linhas com 4 m de distância entre os cabos energizados e de blindagem, estima-se uma redução de 10% na tensão induzida entre as fases e o solo. No caso de condutores energizados estarem próximos aos cabos pára-raios, essas reduções da tensão induzida podem ultrapassar a 40%. Na existência de terminações à terra próximas, o surto induzido no cabo sofre reflexão no solo nas posições destas terminações. Isto resulta em substancial modificação das ondas de tensão e corrente no cabo aterrado e, pelo efeito de acoplamento entre cabos, promove a redução da tensão induzida nas fases. O valor da resistência de aterramento das terminações à terra dos cabos pára-raios ou condutor neutro praticamente não influencia na amplitude da tensão induzida, para valores típicos de resistência entre 5 a 200 Ohms [10].

O cálculo de tensão induzida desenvolvido por Rusck permite obter a máxima tensão induzida em um condutor infinito sem descontinuidades, provocada por uma descarga próxima à linha [1]. Essa tensão é representada pela equação (2.4).

$$V_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2}} \right) \quad (2.4)$$

onde,

V_{\max} = máxima tensão induzida no condutor [kV]

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 30 \text{ohms}$$

I_0 = corrente de pico de descarga [kA];

h = altura média da linha em relação ao solo [m];

y = distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha [m];

v = velocidade de propagação da onda de descarga [m/seg];

v_0 = velocidade da luz [m/seg];

Z_0 = impedância característica [Ω]

2.5) Os aspectos da modelagem

O modelo utilizado para interpretar os efeitos de uma descarga direta, que é um fenômeno natural e apresenta comportamento aleatório, requer uso de técnicas estatísticas e é relativamente simples, enquanto que os processos envolvendo cálculo de campo e tensão induzida devido a descargas atmosféricas indiretas, são complexos e apresentam também o mesmo comportamento aleatório e técnicas estatísticas das descargas diretas. Desta forma, todos os modelos desenvolvidos, de acordo com suas particularidades, recorrem a algumas simplificações nos seus desenvolvimentos [12].

Três aspectos principais estão envolvidos no cálculo do desempenho de linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas: os aspectos relativos às características das correntes de descarga, os aspectos relativos à conexão entre o canal de descarga e os componentes da linha de distribuição, e os aspectos relacionados à resposta da linha atingida pela descarga atmosférica.

As linhas de distribuição podem apresentar várias configurações para as estruturas de postes adjacentes, condutores aéreos e para aterramento das estruturas. Diferentes configurações para esses elementos estabelecem diferentes respostas transitórias sob solicitações de descargas atmosféricas, as quais refletem sobre os valores calculados para as sobretensões resultantes.

Vários modelos têm sido apresentados para estudar e avaliar a resposta dos componentes das linhas de distribuição quando submetidos à incidência de uma descarga atmosférica. Alguns desses modelos individuais apresentam um elevado grau de elaboração e complexidade e demandam simplificações do fenômeno [27, 28 e 29].

Para uma dada linha de distribuição com uma tensão nominal especificada, os seguintes fatores devem ser considerados: altura do poste, largura da linha, tipo de cruzeta, tipo de poste, cabo estai, aterramento do neutro da linha, nível de isolamento dos isoladores por fase, tipo e distância da mão francesa, utilização de cabos pára-raios e resistividade do solo com conseqüência na resistência de aterramento e outros. Tais fatores são utilizados na configuração da linha e influenciam no seu cálculo

de desempenho. Vale ressaltar que a utilização de cabos pára-raios e a resistividade do solo não são consideradas neste trabalho para o cálculo de desempenho das linhas de distribuição apresentado no capítulo 4.

Existem diferentes métodos para a melhoria de desempenho das linhas de distribuição: aumento do nível de isolamento dos isoladores, instalação de cabos pára-raios em linhas não providas dessa proteção, melhoria da eficiência da blindagem dos cabos pára-raios, aterramento do neutro da linha, posicionamento dos condutores fase, melhoria da resistência de aterramento, instalação de pára-raios de linha, dentre outros.

A influência dos postes adjacentes nas tensões resultantes ao longo da linha é maior para menores distâncias entre vãos e a existência de terminações à terra. Este fato pode ser explicado pelo tempo de propagação das ondas ao longo da linha, sendo fortemente influenciado pelo tempo de frente da onda de corrente.

Na explicação que se segue, são adotadas simplificações que denotam com maior nitidez os efeitos descritos. Primeiramente, a onda de corrente de descarga é aproximada por uma onda triangular [10]. A estrutura do poste, a impedância de surto do poste e o tempo de propagação da onda de corrente são desprezadas uma vez que as estruturas dos postes são de alturas menores comparados com as estruturas das linhas de transmissão. Os espaçamentos de postes mais próximos às linhas de distribuição impedem modelagem precisa com o algoritmo existente no programa Flash [2, 6, 15], que é um programa que foi desenvolvido pelo IEEE para cálculo de desempenho de linhas de transmissão [2], assim modificações são necessárias para as linhas de distribuição [1].

Por causa dos vãos serem menores em linhas de distribuição, as reflexões dos postes adjacentes reduzirão grandemente a tensão no isolador. Para linhas de distribuição, as tensões são calculadas somente em $2\mu\text{s}$. É assumido que as reflexões nos postes adjacentes reduzem a cauda da onda de forma que o ponto de $2\mu\text{s}$ determina a falha de isolamento [1].

2.6) Comentários

Este capítulo abordou o fenômeno, os efeitos, a interação e a modelagem das descargas atmosféricas com o sistema elétrico. Foi visto que a incidência das descargas atmosféricas e seus efeitos nos sistemas elétricos podem causar sobretensões elevadas capazes de ultrapassar a suportabilidade da cadeia de isoladores, causando desligamento da linha. Foi abordado o estudo do problema de tensões induzidas devido às descargas indiretas ou descargas laterais. Foram abordados os aspectos da modelagem com o objetivo de avaliar o desempenho de linhas de distribuição.

No capítulo seguinte será apresentada a metodologia utilizada pelo guia IEEE Std 1410–2004.

3) Metodologia de cálculo

3.1) Introdução

Esse capítulo apresenta a metodologia de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas. São apresentados os princípios e a modelagem utilizada.

3.2) A Metodologia utilizada

O Guia IEEE – Std 1410 contém informações para o cálculo do desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas e é aplicável em sistemas de até 69 kV. A metodologia identifica fatores que contribuem para as faltas causadas por descargas atmosféricas em linhas aéreas de distribuição e sugere melhorias. Consiste num método estatístico utilizando um modelo simplificado [1]. O método é concebido para o caso de uma linha aérea de um condutor singelo infinito com ou sem a presença do condutor de blindagem (ou neutro) aterrado [14].

O guia contém informações para melhoria de desempenho de linhas aéreas de distribuição e reconhece que uma linha perfeita não existe e que uma série de compromissos são assumidos em qualquer projeto de linha de distribuição [1]. Enquanto alguns parâmetros são conhecidos, outros são feitos com discricção do projetista. O guia pode ajudar o projetista de linha de distribuição a otimizar o projeto levando em conta o custo benefício. Ele utiliza a metodologia de cálculo de desempenho de linhas de distribuição com base nos parâmetros das descargas atmosféricas, sua incidência, suas características elétricas, sua distribuição da corrente máxima, a incidência de descargas diretas, as tensões induzidas devido a descargas próximas (descargas laterais), altura das estruturas da linha e sua blindagem devido a construções e árvores próximas. A metodologia de cálculo considera o nível de isolamento da linha

combinado com o nível de isolamento dos isoladores, cruzetas e postes. Descreve-se a seguir cada um dos itens citados acima.

3.2.1) Incidência das descargas atmosféricas

Uma indicação da atividade de descargas é obtida do nível cerâmico (Número de dias de trovoadas por ano). O nível cerâmico é a indicação da atividade regional de descargas e é baseada nas quantidades médias de descargas para a terra. O número de dias com trovoadas durante um ano define o índice cerâmico da região. Estes índices geralmente são valores médios obtidos de observações em vários anos consecutivos. A Figura 3.1 mostra o índice cerâmico em diversas regiões de Minas Gerais [11]. A frequência de descargas nuvem-solo é um parâmetro de grande significado para o desempenho do sistema elétrico. O parâmetro que traduz esse valor é a densidade de descargas ao solo. Este índice estabelece uma medida de densidade por unidade de área, sendo expresso em número de descargas/km²/ano [11].

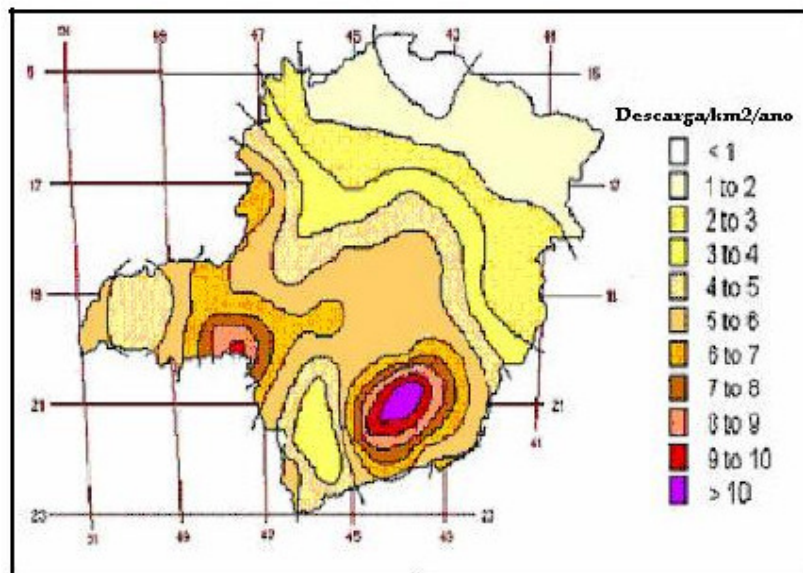


Figura 3.1 – Mapa da densidade de descargas ao solo em Minas Gerais [11]

Os mapas de densidade de descargas para a terra são usados para projetos de linhas de distribuição, estimando a quantidade de descargas atmosféricas para solo.

A confiabilidade de uma linha de distribuição é dependente da sua exposição a descargas atmosféricas. Para determinar a exposição, o projetista necessita conhecer o número anual de descargas por unidade de área.

A densidade de descargas para a terra, N_g , pode ser estimada do nível cerâmico usando a equação de Anderson [1] :

$$N_g = 0,04T_d^{1,25} \text{ [descargas/km}^2\text{/ano]} \quad (3.1)$$

Onde, T_d é o número de dias de trovoadas por ano (nível cerâmico)

A densidade de descargas para a terra também pode ser obtida a partir de dados de rede de detecção de descargas ou do contador de descargas. Se os dados estão presentes durante anos de coletas, isso tem uma vantagem na identificação das variações regionais. As taxas de interrupções causadas por descargas atmosféricas têm variações consideráveis de ano a ano. O desvio padrão histórico por medição anual de atividade de descargas varia de 20-50 % na média. Estimativas de densidade de descargas para a terra nas regiões pequenas tais como 10 x 10 km tem um desvio padrão maior de 30-50% da média. Regiões maiores tais como 500 x 500 km tem um desvio padrão menor de 20-25% da média. Em áreas com níveis menores de atividade de descarga, o desvio padrão é maior [1].

3.2.2) Características das descargas e distribuições das correntes de pico

A forma de onda típica para uma descarga descendente negativa é mostrada na Figura 3.2. Nesta figura, $T_{10/90}$ é o intervalo de tempo na onda entre 10% e 90% da onda de corrente, e $T_{30/90}$ é o intervalo de tempo entre 30% e 90% da onda de corrente. Os valores de correntes encontram normalizados [11].

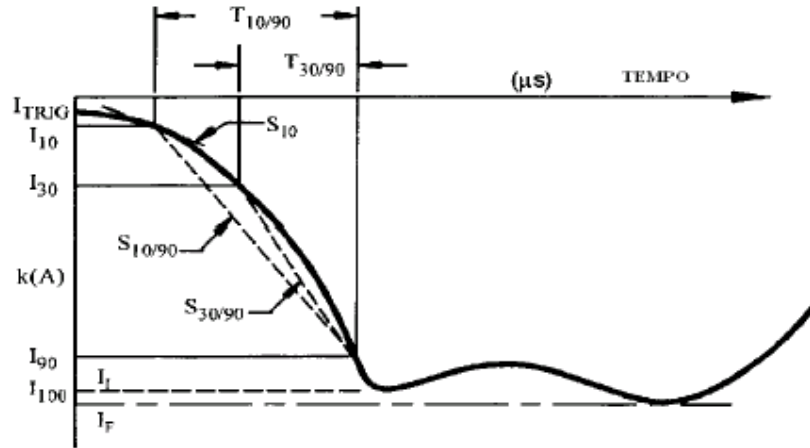


Figura 3.2 – Parâmetros da forma de onda de descarga [1]

A análise estatística de dados de descargas levantados em todo o mundo demonstra que as variações da corrente de pico (I_p) ou de crista da onda de corrente, correspondente ao valor máximo alcançado pela corrente, apresentam uma distribuição log-normal [11]:

$$p(I) = \frac{1}{\sigma_{ini} I \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln I - \ln \bar{I}}{\sigma_{ini}}\right)^2\right\} \quad (3.2)$$

onde $p(I)$ é a função densidade de probabilidade da corrente de pico (corrente de crista da onda de corrente de descarga), \bar{I} , σ_{ini} são os valores médio e o desvio padrão. Esses valores são referidos à primeira componente da descarga que normalmente apresenta valores de pico mais elevados [11].

A função distribuição acumulada permite calcular a probabilidade da corrente de pico de uma descarga (I) ser igual ou maior que um determinado valor i_0 . Essa função P pode ser calculada a partir da equação simplificada (3.3) [1,11]:

$$P(I_0 \geq i_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (3.3)$$

onde:

$P(I_0 > i_0)$ = probabilidade da corrente de pico I_0 ser maior que i_0 ;

I_0 = corrente de pico da descarga;

i_0 = corrente de descarga de um determinado valor;

Esta equação mostra a probabilidade de uma corrente de pico I_0 (valor máximo alcançado pela corrente) ser igual ou maior que um dado valor i_0 em kA. Sua aplicabilidade é condicionada a valores de I_0 inferiores a 200 kA.

Sua forma gráfica é apresentada na Figura 3.3.

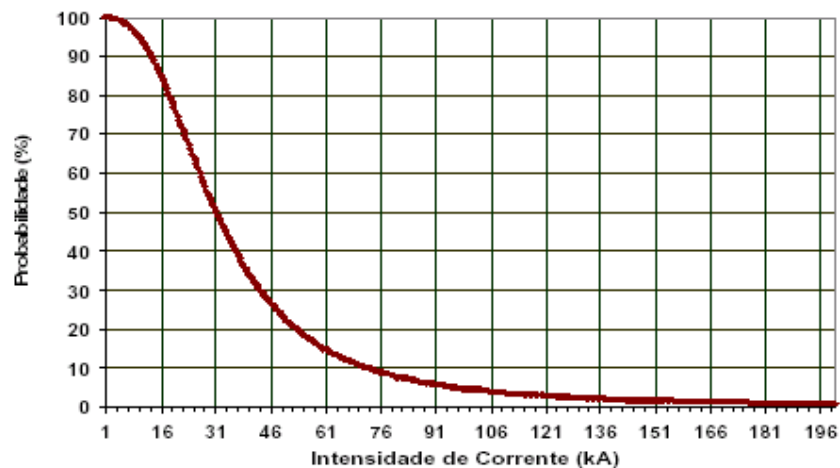


Figura 3.3 – Curva da Probabilidade acumulada X Intensidade da corrente [11]

3.2.3) Desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas

As descargas diretas em linhas de distribuição causam falhas na isolação na grande maioria dos casos. Entretanto, experiências e observações mostram que muitos desligamentos devido a descargas atmosféricas em linhas com TDI (Tensão Disruptiva de Impulso) menores são devidos a descargas atmosféricas que atingem a terra nas proximidades da linha. A maior parte das tensões induzidas em uma linha de distribuição por descargas que atingem o solo nas proximidades da linha são menores que 300 kV. As descargas podem ser interceptadas por estruturas mais altas influenciando na blindagem da linha de distribuição que influencia no desempenho da linha.

3.2.3.1) Descargas diretas em linhas aéreas

As descargas atmosféricas têm um efeito significativo na confiabilidade da linha, especialmente se os postes estão mais altos que as estruturas circunvizinhas. A maioria das descargas é coletada por estruturas altas. O número de descargas diretas num terreno aberto, sem árvores e construções próximas é estimado pela equação Eriksson [1] como mostrado na equação (3.4):

$$N = N_g \left(\frac{28h^{0,6} + b}{10} \right) \quad (3.4)$$

onde,

h = altura do poste em(m);

b = distância entre as fases externas(m);

N_g = densidade de descargas para a terra (descargas/km²/ano);

N = número de descargas diretas (descargas/100 km/ano)

Para a maioria das linhas de distribuição, a distância entre as fases externas é desprezível porque ele é pequeno para influenciar no cálculo do número de descargas diretas.

A exposição da linha de distribuição depende de quanto as estruturas estão mais altas que as estruturas circunvizinhas. As estruturas localizadas ao longo do topo das montanhas, cumes ou colinas estão mais sujeitas a descargas diretas do que aquelas blindadas por árvores próximas.

3.2.3.2) Blindagem devido a construções e árvores próximas

As árvores e construções desempenham papel importante no desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Linhas localizadas em áreas urbanas ou em regiões de floresta possuem proteções naturais, tais como árvores e edifícios, formando uma espécie de blindagem que reduz o número de descargas diretas sobre as mesmas. O fator de blindagem, S_f , é definido como um

percentual da linha que recebe proteção contra descargas diretas por construções e árvores próximas. O número de descargas na linha é mostrado pela equação (3.5):

$$N_s = N(1 - S_f) \tag{3.5}$$

Onde,

S_f = fator de blindagem;

N = número de descargas diretas (descargas/100 km/ano);

N_s = número de descargas diretas na linha (descargas/100 km/ano)

Um fator de blindagem zero significa que a linha está em terreno aberto e um fator de blindagem 1 significa que a linha está totalmente blindada de descargas diretas.

A Figura 3.4 dá por aproximação os fatores de blindagem para construções e árvores de várias alturas para uma linha de distribuição de 10 m de altura. As construções e árvores são supostas estar em uma linha paralela à linha de distribuição e localizadas ao lado dela. Isto pode representar uma linha contínua de árvores e construções paralelas à linha de distribuição.

A Figura 3.4 também pode ser usada para construções e árvores em ambos os lados da linha se os fatores de blindagem do lado direito e do lado esquerdo são somados (se a soma dos fatores de blindagem for maior que 1, então o fator de blindagem total é igual a 1).

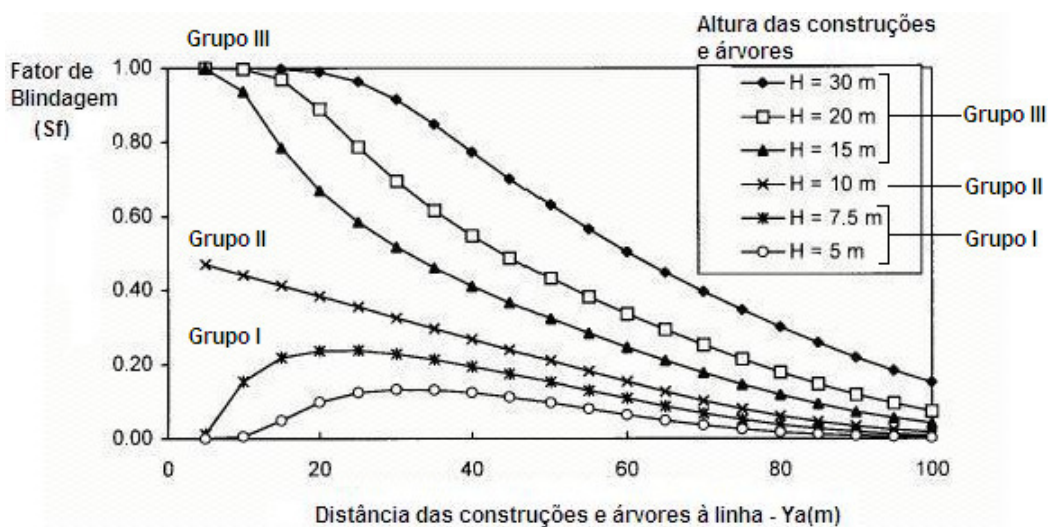


Figura 3.4 – Fator de Blindagem X Distâncias das construções e árvores próximas à linha para diversas alturas [1]

A Figura 3.4 mostra a variação do fator de blindagem em função das distâncias e altura das construções e árvores próximas. Em geral, quanto mais próximas as construções e árvores da linha, maior é o fator de blindagem. Da mesma forma, quanto mais altas as construções e árvores, maior o fator de blindagem para uma dada distância à linha. Na Figura 3.4 podemos analisar também que existem três grupos de construções e árvores:

O Grupo I com duas alturas, uma com altura de 5 m cujo fator de blindagem atinge um valor máximo aproximadamente a 30 m da linha e cai a zero para distâncias de aproximadamente 10 m e maiores que 100 m da linha e a outra com altura de 7,5 m cujo fator de blindagem atinge um valor máximo aproximadamente a 20 m da linha e cai a zero para distâncias de aproximadamente 5 m e maiores que 100 m da linha. Para esse grupo, quanto mais próximos as construções e árvores estiverem da linha, menores os fatores de blindagem. A razão disso é devido à altura das construções e árvores serem menores que a altura da linha aumentando a probabilidade das descargas atingirem a linha.

O Grupo II com altura de 10 m cujo fator de blindagem atinge um valor máximo à aproximadamente 5 m da linha e tende a zero para distâncias maiores que 100 m. Para esse grupo, quanto mais próximos as construções e árvores estiverem da linha, maior o fator de blindagem. Devido à altura das construções e árvores serem da mesma altura que a linha, diminui a probabilidade das descargas atingirem a linha.

O Grupo III com alturas de 15, 20 e 30 m cujo fator de blindagem atinge o valor 1, ou seja, a linha está totalmente blindada, para distâncias à linha menores que 20 m. Para esse grupo, o fator de blindagem tende a zero para distâncias à linha acima de 100 m. Devido à altura das construções e árvores serem maiores que a altura da linha, aumenta a probabilidade das descargas não atingirem a linha.

Para todos os grupos analisados, quanto mais distante estiverem as construções e árvores da linha, menores os fatores de blindagem.

Todas as descargas atmosféricas que atingem diretamente a linha causarão desligamentos indiferentemente do nível de isolamento, espaçamento dos condutores e aterramento.

3.2.3.3) Desligamentos por descargas laterais

No cálculo das tensões induzidas, o guia sugere a simplificação da equação (2.4), considerando a velocidade da descarga de retorno de $1,2 \times 10^8$ m/s, e um degrau para a forma de onda da corrente de descarga, a máxima tensão que é induzida na linha de distribuição para um ponto mais próximo que atinge a linha pode ser estimada por:

$$V_{\max} = 38,8 \frac{I_0 h_a}{y} \quad (3.6)$$

onde,

I_0 = é a corrente de pico da descarga [kA],

h_a = é a altura média da linha sobre o solo [m],

y = é a distância mais próxima entre a linha o ponto de descarga [m];

V_{\max} = é máxima tensão induzida no condutor da linha [kV]

A equação (3.6) é usada para linha longa infinita, com condutor singelo e condutividade de terra perfeita. Tal equação foi deduzida por Rusck para o modelo simplificado.

O cabo neutro ou o cabo de blindagem aterrado reduzirá a tensão através da isolação pelo fator de acoplamento entre ele e as fases. Seu valor típico está entre 0,6 e 0,9.

A frequência de desligamentos por tensões induzidas pode dramaticamente aumentar pelos níveis mais baixos da TDI da linha. A Figura 3.5 apresenta a frequência de desligamentos como uma função da tensão TDI (Tensão Disruptiva de Impulso) que é a máxima tensão disruptiva de impulso atmosférico da linha. A Figura 3.5 mostra também os resultados para duas configurações de

aterramento. O circuito não aterrado não tem o fio neutro ou cabo de blindagem tais como circuitos trifásicos ou circuitos a quatro fios não aterrados.

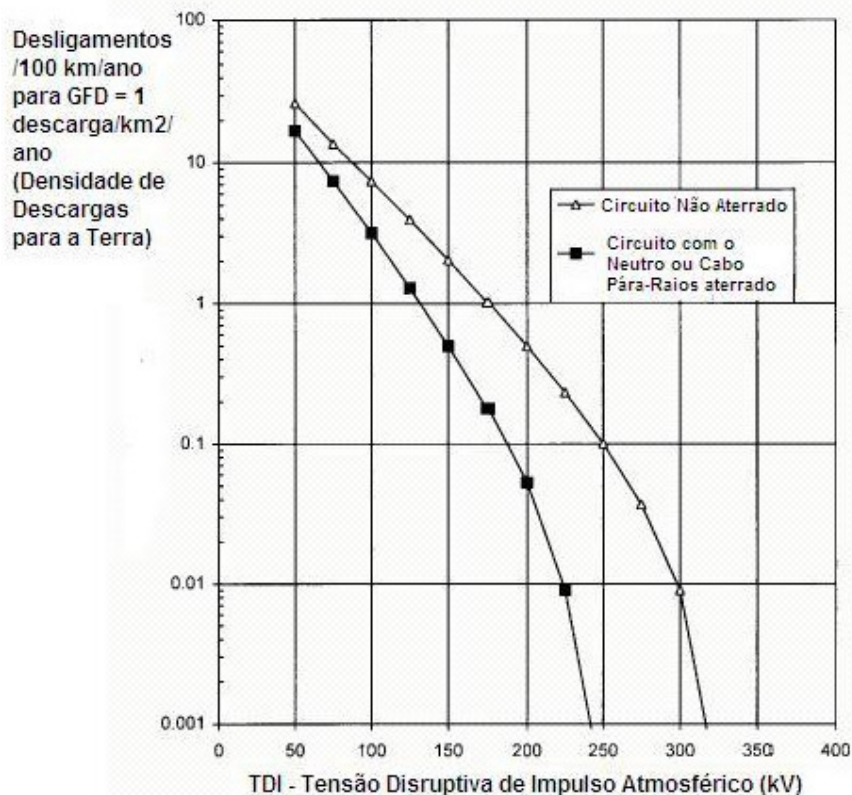


Figura 3.5 – Desligamentos por descargas laterais X TDI (Tensão Disruptiva de Impulso) em campo aberto s/ blindagem [1]

Podemos observar que quanto maior a tensão disruptiva da linha, menores são os desligamentos, seja para linha com neutro aterrado ou neutro isolado. Para uma dada tensão disruptiva, os desligamentos são maiores para a linha com neutro isolado que linha com neutro aterrado. Os desligamentos praticamente não existem para linhas com tensão disruptiva acima de 250 kV para linha com neutro aterrado e 300 kV para linha com neutro isolado. Também podemos observar na Figura 3.5 que os desligamentos são máximos para tensão disruptiva da linha igual a 50 kV.

O circuito aterrado significa um circuito com o neutro ou o cabo de blindagem aterrado. O circuito aterrado tem desligamentos menores para uma dada TDI porque o condutor aterrado reduz a tensão

através da isolação. No circuito não aterrado pode ter uma TDI fase-terra maior do que no circuito multi-aterrado devido à ausência do fio neutro aterrado. Os valores de desligamentos do gráfico da Figura 3.5 são normalizados para densidade de descargas para a terra de 1 descarga/km²/ano e uma altura da linha de distribuição de 10 m. Os resultados podem ser dimensionados linearmente com respeito ao comprimento e a densidade de descargas para a terra.

O número de desligamentos por tensão induzida depende da presença de construções e árvores próximas que podem blindar a linha das descargas diretas. Isto pode aumentar os desligamentos por tensões induzidas porque há mais descargas próximas a linha. Num terreno aberto a tensão induzida somente será um problema para linhas com níveis de isolamento muito abaixo. Tipicamente, uma suposição usada para linhas de distribuição é que se a TDI é 300 kV ou maior, os desligamentos por tensões induzidas serão eliminados.

3.2.4) Nível de Isolamento da linha de distribuição

O nível de isolamento da estrutura é de fundamental importância para determinar o desempenho de uma linha de distribuição. O guia pode ajudar a “otimizar as capacidades de isolamento” das linhas aéreas frente a descargas atmosféricas utilizando isoladores, postes, cruzetas e outros componentes da linha com maiores níveis de isolamento. As linhas utilizam vários tipos de materiais isolantes. Os mais utilizados são postes e cruzetas de madeira e fibra de vidro, isoladores de porcelana e vidro, suporte de fibra de vidro. Cada um desses elementos tem seu próprio nível de isolamento. Quando usados em conjunto, fazem com que o isolamento das linhas seja um isolamento composto. Alguns fatores tais como condições atmosféricas, umidade do ar, chuva, contaminação atmosférica, polaridade da tensão, taxa de elevação de tensão, forma e configuração do arranjo afetam os níveis de desligamentos por descargas atmosféricas das linhas de distribuição e dificultam estimativa do nível de isolamento.

A melhor forma de determinar a TDI de uma linha com isolamento composto é em laboratório. As curvas e tabelas permitem o cálculo aproximado da TDI.

O guia apresenta essas tabelas para o cálculo da TDI de linhas constituídas de isoladores, postes e cruzetas de madeira e cruzetas de fibra de vidro. Os resultados são dados em termos de TDI dessas combinações.

Em linhas com postes de concreto armado, sem cruzetas ou com cruzetas metálicas a TDI da linha é a TDI dos isoladores. Uma maior TDI da linha é conseguida com a combinação dos isoladores com cruzetas de madeira ou fibra de vidro e poste de madeira.

A TDI é definida como o nível de tensão na qual estatisticamente há 50 % de chance de interrupção. Este valor é um ponto definido em laboratório. O método de cálculo da TDI, anteriormente utilizado em projeto de linha de transmissão, teve sua aplicação estendida para componentes de isolamento múltiplos usados em linhas de distribuição. Ele utiliza a TDI do isolamento do elemento básico e primário (isoladores) e adiciona àquele valor o aumento na TDI oferecido pela componente adicionada (cruzetas), mantendo-se a idéia de que o isolamento do componente adicionado é sempre menor do que um simples elemento. As tabelas apresentadas no guia, Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 abaixo, referem-se às condições dos componentes em estado de molhado, que é recomendado para estimar o valor da TDI. Para valores de TDI em condições de seco obtidos do fabricante ou de testes de impulso de laboratório, o seu valor é multiplicado por 0,8 para obter o valor estimado da TDI na condição de molhado. A TDI na condição de molhado é tipicamente entre 0,7 e 0,9 da condição de TDI seco.

Tabela 3.1 - Isolação Primária (TDI_{isol})		
Isoladores		kV
Pino	ANSI 55-4	105
	ANSI 55-5	120
	ANSI 55-6	140
	ANSI 55-7	180
Suspensão de Porcelana	10,2 cm(4 pol)	75
	10,2 cm(4 pol)	165
	10,2 cm(4 pol)	250
Isolação		kV/m
Ar		600
Poste de Madeira		330
Cruzeta de Madeira		360
Suporte de Fibra de Vidro		500

Tabela 3.1 – Isolação Primária (TDI_{isol}) [1]

Tabela 3.2 - TDI - Segundo Componente (TDI_{SegComp})		
Segundo Componente	Com Primeiro Componente de	kV/m
Cruzeta de Madeira	Isolador de Pino Vertical	250
Cruzeta de Madeira	Isolador de Suspensão Vertical	160
Cruzeta de Madeira	Isolador de Suspensão Horizontal	295
Poste de Madeira	Isolador de Pino Vertical	235
Poste de Madeira	Isolador de Suspensão	90
Cruzeta de Fibra de Vidro	Isolador	250
Suporte de Fibra de Vidro	Isolador	315

Tabela 3.2 – TDI – Segundo Componente (TDI_{SegComp}) [1]

Tabela 3.3 - TDI - Terceiro Componente (TDI_{TerComp})	
Terceiro Componente	kV/m
Poste de Madeira	65
Suporte de Fibra de Vidro	200

Tabela 3.3 – TDI – Terceiro Componente (TDI_{TerComp}) [1]

3.3) Considerações sobre nível de isolamento e disrupção das linhas de distribuição

As estruturas podem aumentar o nível de isolamento das linhas de distribuição diminuindo os desligamentos devido a tensões induzidas. Algumas considerações devem ser levadas em conta sobre o nível de isolamento das linhas.

O valor elevado da tensão resultante de uma descarga pode provocar disrupção no isolamento da linha ocasionando um curto circuito que irá provocar um desligamento da linha. O guia considera que ocorrerá disrupção e provavelmente desligamento do sistema sempre que:

$$V_{\max} \geq 1,5xTDI \quad (3.7)$$

onde:

V_{\max} é a tensão máxima induzida na linha, em kV, calculada pela equação (3.7) [30];

TDI corresponde, em kV, a Tensão Disruptiva de Impulso que é o valor de pico de uma tensão com forma de onda $1,2 \times 50 \mu s$, que em 50% das aplicações provoca disrupção no isolamento da estrutura.

Toda sobretensão acima da TDI provoca formação de um arco elétrico. Este arco pode ser mantido ou não pela tensão nominal de 60 Hz. Caso o arco seja mantido, provoca um curto circuito que causará desligamento da linha.

A madeira tem capacidade de extinguir o arco elétrico. A melhoria na extinção do arco elétrico causado pelas descargas atmosféricas utilizando cruzeta de madeira é conseguido pelo aumento dos níveis de isolamento da linha e utilizando cruzetas mais longas.

A Figura 3.6 apresenta as curvas de probabilidade de disrupção na superfície da madeira para várias fases envolvidas na disrupção, do número de caminhos da descarga e do gradiente de tensão na superfície da madeira.

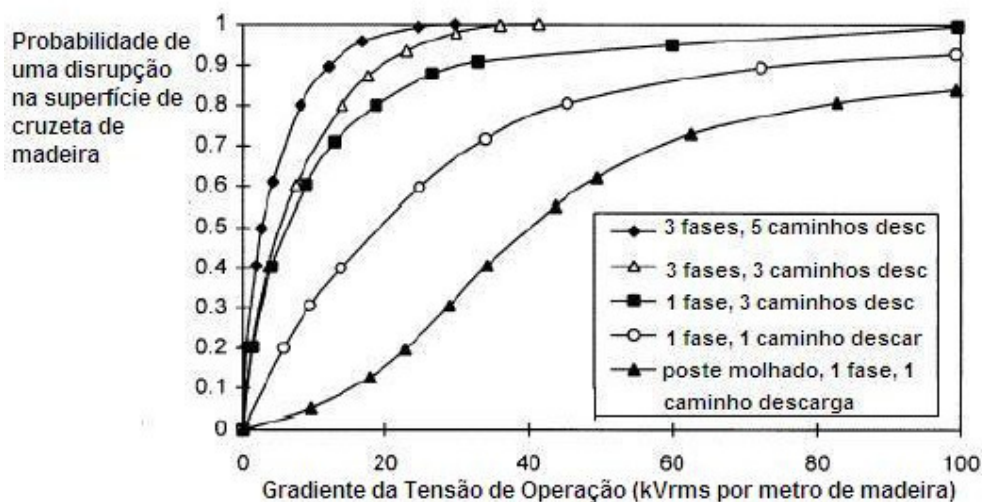


Figura 3.6 – Probabilidade de uma disrupção na superfície de cruzeta de madeira úmida [1]

A Figura 3.6 mostra a probabilidade de disrupção na cruzeta de madeira em função do gradiente da tensão de operação. Observa-se que a probabilidade de disrupção aumenta com o aumento do gradiente da tensão de operação e quanto maior o número de caminhos das descargas e número de fases, maior a probabilidade de disrupção. Observa-se também que o poste molhado apresenta a menor probabilidade de disrupção para um mesmo gradiente de tensão de operação.

O guia considera que toda descarga direta provoca desligamento da linha.

Os cabos pára-raios são condutores aterrados que tem a finalidade de interceptar as descargas atmosféricas que, ao contrário, atingiriam diretamente as fases da linha. Eles devem conduzir a corrente de descarga para a terra e não devem permitir que apareçam sobretensões superiores às suportáveis pela linha. A utilização de cabos pára-raios é importante para melhoria de desempenho da linha de distribuição, porém não será discutida sua utilização e eficiência uma vez que não faz parte deste estudo. A resistividade do solo é outro fator importante para estudo de cálculo de desempenho de linhas de distribuição que pode resultar na redução significativa da resistência da malha de aterramento, porém não será discutida nesse estudo.

A Figura 3.7 fornece as curvas do número de interrupções/100 km/ano devido a descargas diretas para uma região com uma densidade de descargas de 1 descarga/km²/ano para linhas com TDI de 175 e 350 kV e altura de 10 m em função da resistência de aterramento do cabo pára-raios.

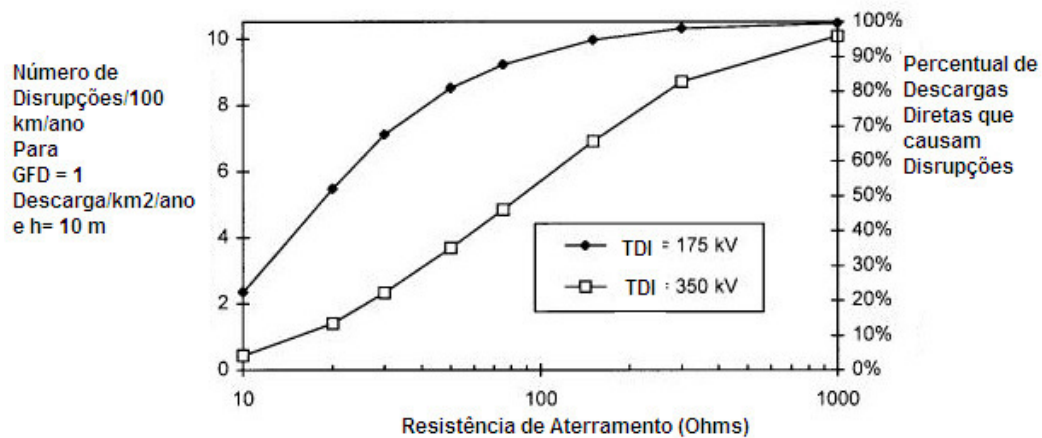


Figura 3.7 – Número de disrupções de uma rede aérea de 10 m de altura com cabo pára-raios [1]

Na Figura 3.7 observa-se que o número de desligamentos e o percentual de descargas diretas que causam interrupções aumentam com o aumento da resistência de aterramento do cabo pára-raios. Quanto maior a resistência de aterramento, maior o número de desligamentos e o percentual de descargas diretas que causam desligamentos. Observa-se que para uma resistência de aterramento, o número de desligamentos e o percentual de descargas diretas que causam desligamentos são maiores para linhas com TDI de 175 kV que linhas com TDI de 350 kV.

3.4) O método simplificado

O método de estimar o desempenho das linhas aéreas de distribuição lida com uma variedade de efeitos estatísticos e não lineares. A incerteza do problema faz permitir simplificação do método de desempenho proposto, já que alguns parâmetros são conhecidos e não se justifica fazer cálculos tão precisos.

O método simplificado para estimativa de desempenho de linhas de distribuição foi desenvolvido por um grupo de trabalho do IEEE e ajuda o projetista a otimizar o desempenho da linha frente a descargas atmosféricas e faz considerações sobre custo e benefício [1]. Com base neste fato, foi proposto um método simplificado que define e analisa os seguintes parâmetros:

- a. Determina os parâmetros das descargas que caracterizam a intensidade das descargas atmosféricas em uma determinada região;
- b. Determina a distribuição estatística dos valores de pico das correntes de descarga;
- c. Determina a influência das descargas diretas;
- d. Determina o efeito da blindagem proporcionada por estruturas próximas;
- e. Determina as tensões induzidas baseada na teoria de Rusck [1];
- f. Analisa o efeito do desligamento com base do nível de isolamento das estruturas;
- g. Sugere a utilização de cabos pára-raios na proteção da linha e as resistências de aterramento das suas terminações;
- h. Sugere a utilização dos dispositivos pára-raios ao longo das linhas.

O modelo simplificado da interação das descargas atmosféricas com a linha aérea de distribuição foi descrito no item 2.4.

Conhecendo o nível cerâmico, é possível estimar o número de descargas que atingem qualquer linha a partir da equação (3.1). O impacto da descarga na linha dependerá da magnitude e da taxa de elevação da corrente e também da impedância encontrada no caminho.

A forma de onda da corrente é idealizada para análises, na maneira mostrada na Figura 3.8 [6, 7].

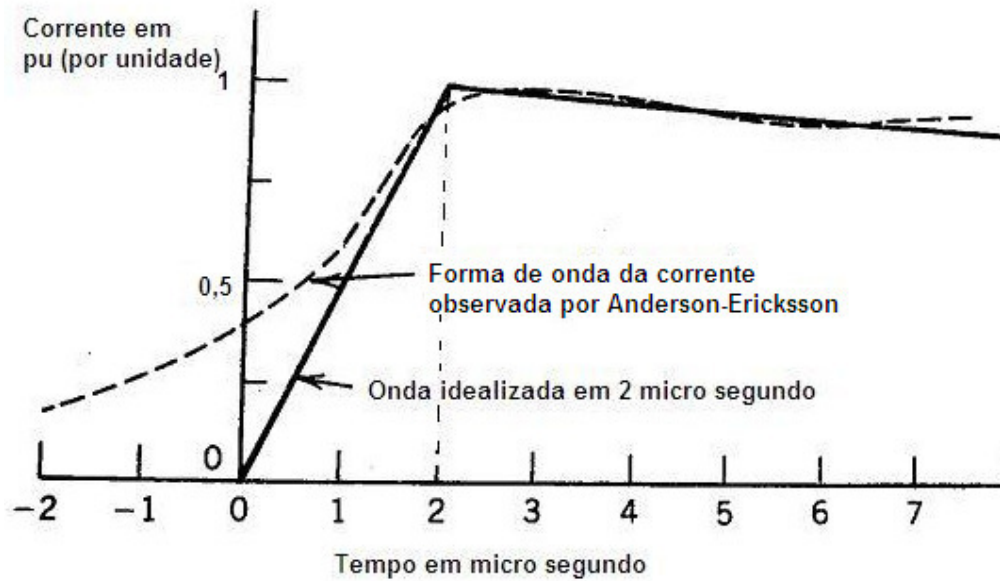


Figura 3.8 – Forma de onda idealizada no Método Simplificado [6, 7]

Outro parâmetro importante é a distribuição estatística dos valores de pico das correntes de descarga, que fornece a probabilidade de um determinado valor da corrente ser excedido. A expressão é válida para as descargas descendentes e para a primeira componente e foi descrita no item 3.2.2.

Os dados de amplitudes das correntes de descargas foram coletados por Anderson e Ericksson e também por Popolansky e estão apresentados na Figura 3.9.

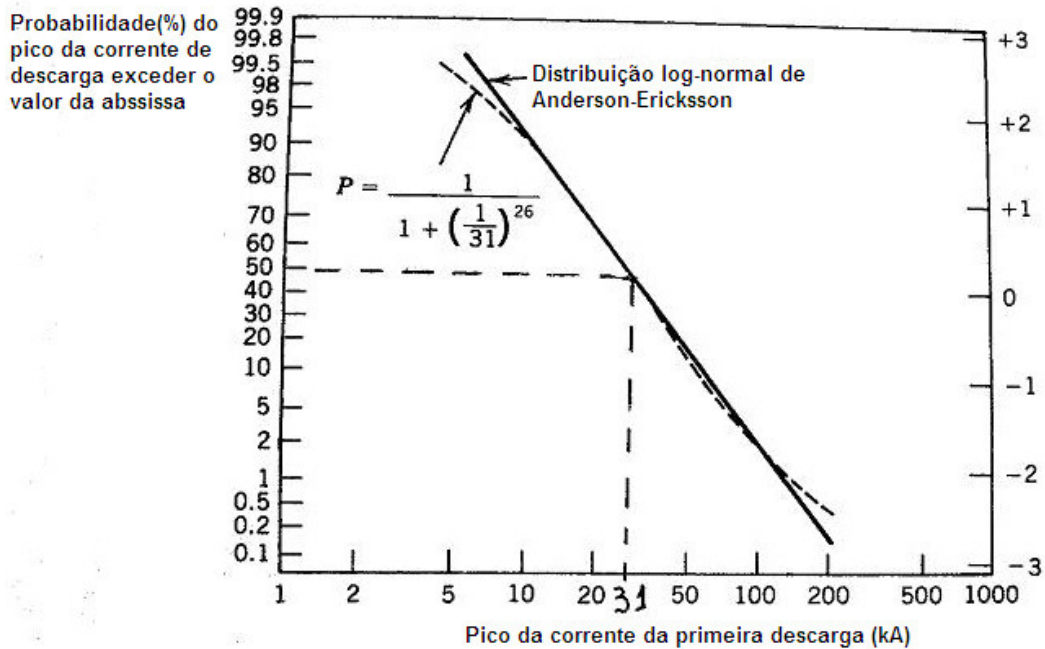


Figura 3.9 – Distribuição da probabilidade cumulativa da magnitude da corrente do raio [7]

Observe que 50% das descargas excedem a 31 kA.

Outro fator importante no modelo simplificado é a incidência de descargas diretas.

A expressão representada pela equação (3.4) determina o cálculo do número de descargas diretas que atingem 100 km de linha por ano.

O fator de blindagem da linha é outro item importante que é definido como uma parte por unidade da linha que é protegida por estruturas e árvores próximas. As árvores e edificações nas proximidades de uma linha irão proporcionar a blindagem contra descargas diretas. Com os valores de distância da incidência de descarga nas proximidades e a altura das construções e árvores próximas à linha, calcula-se o fator de blindagem através do gráfico da Figura 3.4. A fórmula para calcular a blindagem da linha é representada pela equação (3.5).

Alguns aspectos sobre a blindagem proporcionada por estruturas próximas à linha são discutidos na literatura. Quanto maior o fator de blindagem, menor o número de desligamentos por descargas

diretas, porém, os desligamentos por descargas laterais podem se tornar mais evidentes devido a elevadas tensões induzidas.

De acordo com a teoria de Rusck [1] o valor de pico das tensões induzidas no ponto mais próximo da incidência da descarga atmosférica na linha é dada pela equação (3.6).

Com o valor da TDI da linha, informado no gráfico da Figura 3.5, encontra-se o valor de desligamentos/100 km/ano para tensões induzidas em campo aberto para densidade de 1 descarga/km²/ano. O cálculo dos desligamentos totais é a soma dos desligamentos por descargas diretas e os desligamentos por tensões induzidas.

O modelo simplificado faz algumas análises do efeito de utilização de cabos pára-raios na proteção das linhas de distribuição e suas resistências de aterramento, bem como de utilização de pára-raios em linhas com cabos pára-raios, porém não faz parte deste estudo a aplicação desses dispositivos para o cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição.

3.5) Comentários

Este capítulo abordou a metodologia de cálculo do Guia IEEE – Std 1410 sobre o desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Foi visto que os parâmetros das descargas, a incidência das descargas, suas características e o nível de isolamento das linhas afetam o desempenho das linhas. Foram apresentadas algumas considerações sobre o nível de isolamento e disrupção das linhas de distribuição para melhorias de desempenho. Foram abordadas também as considerações sobre o método simplificado adotado no guia. No próximo capítulo será apresentada a implementação da metodologia de cálculo de desempenho em um programa computacional.

4) Implementação de metodologia de cálculo de desempenho

4.1) Introdução

As estimativas de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas contém muitas incertezas. Algumas tais como a intensidade das descargas medidas pelo GFD (Densidade de Descargas para Terra) ou a estimativa de descargas diretas e indiretas que atingem a linha de distribuição podem ter erros significativos. O programa desenvolvido, descrito neste capítulo, aplica a metodologia descrita no Capítulo 3 e tem o objetivo de prover estimativas de faltas causadas por descargas atmosféricas e avaliar opções de melhorias de desempenho da linha. O programa tem como finalidade a execução dos cálculos de desempenho de linhas aéreas de distribuição contra descargas atmosféricas e todo o seu desenvolvimento foi feito a partir dos modelos constantes dos Capítulos 2 e 3 aplicando a metodologia do Guia IEEE – Std 1410.

O programa calcula a densidade de descargas para a terra, a quantidade de descargas diretas que atinge a linha, a tensão disruptiva (TDI) com e sem neutro aterrado para diversas configurações de estruturas, o fator de blindagem com diversas alturas e distâncias dos objetos à linha, o número de desligamentos para descargas diretas, o número de desligamentos para descargas laterais e o número de desligamentos total da linha.

4.2) O programa computacional desenvolvido

O programa computacional desenvolve o cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição a partir de uma planilha Excel e linguagem Visual Basic. A metodologia descrita no Capítulo 3 é implementada no programa e está dividida em Entrada de Dados, Processamento e Saída, conforme mostrado na Figura 4.1.

4.2.1) Entrada de dados

Nesses campos, devem ser inseridos os dados relativos ao número de dias de trovoadas por ano, as características da linha, altura das estruturas, informações sobre construções e árvores próximas à linha, distâncias das estruturas à linha, tipos de estruturas e suas características e nível de isolamento dos isoladores. Na Figura 4.1 é possível visualizar as incidências de descargas, as características da linha, os tipos de estruturas, o fator de blindagem da linha, as características das estruturas e o desempenho da linha.

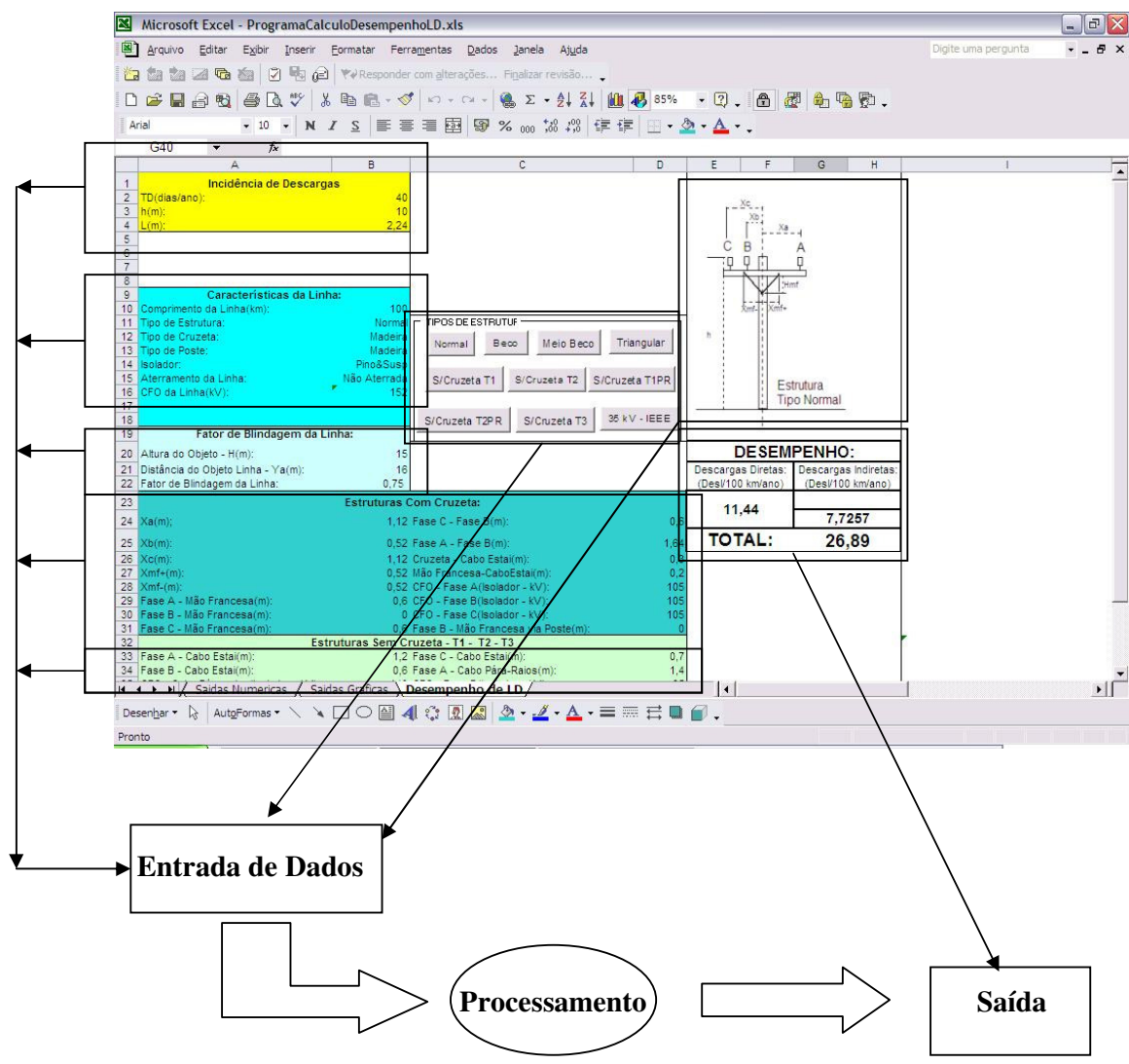


Figura 4.1- Programa de Cálculo de Desempenho de LD: Interface com o usuário

4.2.2) Processamento

A) Cálculo dos desligamentos por descargas diretas, descargas laterais e descargas totais:

Com a informação da incidência de descargas que incluem o número de dias de trovoadas por ano (T_d), altura da linha (h) e a largura da linha (L) na planilha mostrada na Figura 4.1, obtém-se a densidade de descargas para a terra, a quantidade de descargas diretas que atinge a linha, o número de desligamentos para descargas diretas, o número de desligamentos para descargas laterais e o número de desligamentos totais da linha. Para os cálculos acima apresentamos a programação a seguir:

```
Public Function Ng(Td, variavel1, variavel2)
```

```
  'Ng=Numero de Descargas Diretas/km2/ano'
```

```
  Ng = (Td ^ variavel1) * variavel2
```

```
End Function
```

```
Public Function Y(h, numero1, numero2)
```

```
  Y = numero1 * (h ^ numero2)
```

```
End Function
```

```
Public Function HB(Y, b, numero3)
```

```
  HB = (Y + b) / numero3
```

```
End Function
```

```
Public Function N(HB, Ng)
```

```
  'N = Numero de Descargas Diretas/100 km/ano'
```

```
  N = Ng * HB
```

```
End Function
```

```
Public Function DDD(Ng, HB, numero1, Sf)
```

```
  'DDD = Desligamentos por Descargas Diretas/100 km/ano com Fator de Blindagem'
```

```
  DDD = Ng * (HB) * (numero1 - Sf)
```

```
End Function
```

```
Public Function DDL(Ng, numero1)
```

```
  'DDL = Desligamentos por Descargas Laterais/100 km/ano'
```

```
  DDL = Ng * numero1
```

```
End Function
```

```
Public Function DTotal(Ns, DDL)
```

```
  'DTotal = Desligamento Total/100 km/ano'
```

```
  DTotal = DDL * 2 + Ns
```

```
End Function
```

```
Public Function Desligamentos(DTotal, Llinha)
```

```
  'Desligamentos = Numero de Desligamentos da Linha'
```

```

Desligamentos = (DTotal * Llinha) / 100
End Function

```

```

Public Function DescInd_LDAtt(Ng, Desl_LDAterrada)
'Descargas Indiretas com LD Aterrada'
DescInd_LDAtt = Ng * Desl_LDAterrada
End Function

```

```

Public Function DescInd_LDNAtt(Ng, Desl_LDNAterrada)
'Descargas Indiretas com LD Não Aterrada'
DescInd_LDNAtt = Ng * Desl_LDNAterrada

End Function

```

B) Cálculo da tensão disruptiva de isolamento da linha:

Com a informação das características da linha tais como: tipo de estrutura, tipo de cruzeta, tipo de poste, dimensões das estruturas, nível de isolamento dos isoladores, calcula-se a tensão disruptiva do conjunto da linha (TDI). A Figura 4.2 A, mostra os níveis de isolamento dos componentes primários da linha para isoladores por fase, para cruzeta de madeira, poste de madeira, ar e suporte de fibra de vidro.

1) CFO - ISOLAÇÃO PRIMÁRIA:	
CFO - Fase A(Isolador - kV) =	105
CFO - Fase B(Isolador - kV) =	105
CFO - Fase C(Isolador - kV) =	105
CFO-Fase A(Isolador porcelana suspensão - kV) =	
CFO-Fase B(Isolador porcelana suspensão - kV) =	
CFO-Fase C(Isolador porcelana suspensão - kV) =	
CFO(cruzeta madeira - kV/m) =	360
CFO(poste de madeira - kV/m) =	330
CFO(Ar - kV/m) =	600
CFO(Suporte de Fibra - kV/m) =	500

Figura 4.2 A – Tensão Disruptiva de Isolação primária dos componentes da linha

A Figura 4.2 B mostra os níveis de isolamento dos componentes secundários da linha tendo como primeiro componente os isoladores de pino e isoladores de suspensão para os componentes secundários de cruzeta e poste de madeira, cruzeta e suporte de fibra de vidro.

2) CFO - ISOLAÇÃO SECUNDÁRIA/COM 1o COMPONENTE DE:	
CFO(cruzeta madeira - kV/m)/Isolador pino =	250
CFO(cruzeta madeira - kV/m)/Isolador suspensão =	160
CFO(cruzeta madeira - kV/m)/Isolador susp horz =	295
CFO(poste madeira - kV/m)/Isolador de pino =	235
CFO(poste madeira - kV/m)/Isolador suspensão =	90
CFO(cruzeta fibra - kV/m)/Isolador =	250
CFO(suporte fibra - kV/m)/Isolador =	315

Figura 4.2 B – Tensão Disruptiva de Isolação secundária dos componentes da linha

A Figura 4.2 C mostra os níveis de isolamento do terceiro componente da linha, sendo poste de madeira e suporte de fibra de vidro.

3) CFO - TERCEIRO COMPONENTE:	
CFO(poste madeira - kV/m) =	65
CFO(Suporte de Fibra - kV/m) =	200

Figura 4.2 C – Tensão Disruptiva de Isolação do terceiro componente da linha

A Figura 4.2 D e Figura 4.2 E, mostra as características e dimensões da linha.

4) CFO - ESTRUTURA TIPO NORMAL	
Xa(m) =	1,12
Xb(m) =	0,52
Xc(m) =	1,12
Xmf+(m) =	0,52
Xmf-(m) =	0,52
Fase A - Mão Francesa(m) =	0,6
Fase B - Mão Francesa(m) =	0
Fase C - Mão Francesa(m) =	0,6
Fase C - Fase B(m) =	0,6
Altura da Linha = h(m)	10
Cruzeta de Madeira - Cabo Estai(m) =	
Mão Francesa - Cabo Estai(m) =	0,2

Figura 4.2 D – Dimensões da estrutura Tipo Normal

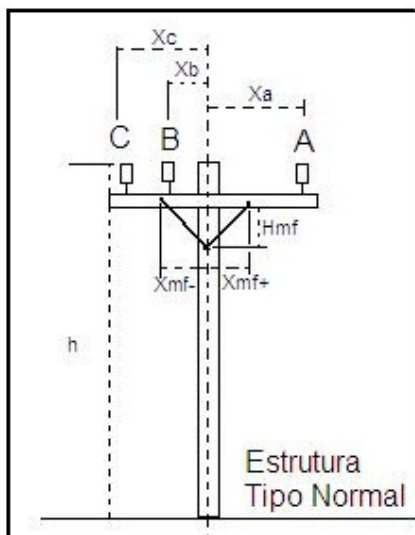


Figura 4.2 E – Características da estrutura Tipo Normal

A Figura 4.2 F mostra o resultado dos cálculos das tensões disruptivas de isolamento da linha para as piores condições de posicionamento dos componentes primários, dos componentes secundários e do terceiro componente para a estrutura Tipo Normal mostrado na Figura 4.2 E.

4A) CFO - CRUZETA DE MADEIRA-ISOLADOR DE PINO	
CFO - Fase C - Fase B(kV) =	276
CFO - Fase A - Cabo Estai(kV) =	268
CFO - Fase B - Cabo Estai(kV) =	152
CFO - Fase C - Fase B pelo Ar(kV) =	360
CFO - Menor Valor(kV) =	152

Figura 4.2 F – TDI da Cruzeta de Madeira e Isolador de Pino e do conjunto da linha para estrutura Tipo Normal

O menor valor calculado, mostrado na Figura 4.2 F, é usado como a TDI do conjunto da linha.

C) Cálculo do fator de blindagem da linha:

Com as informações da altura das construções e árvores próximas à linha (H) e distâncias das estruturas próximas à linha (Y), obtêm-se o fator de blindagem. É apresentada a programação do processamento do cálculo para estrutura tipo Normal, com poste de Madeira, cruzeta de Madeira, linha Aterrada e linha Não Aterrada. É apresentada também a programação para apresentação da imagem gráfica da estrutura Tipo Normal que é visto na planilha. Ao optar pela estrutura Normal, o programa

calcula o fator de blindagem e transfere a imagem gráfica da estrutura Normal para a planilha de acordo com programação desenvolvida abaixo.

```
Private Sub CommandButton1_Click()  
If Range("B20").Value = "5" Then  
Cells.Range("B22").Value = Sheets("Desempenho de LD").Range("=J2")  
Application.Run ("Macro1_Normal")  
If Range("B11").Value = "Normal" Then  
    If Range("B12").Value = "Madeira" Then  
        If Range("B13").Value = "Madeira" Then  
            Cells(16, "B").Value = ("=M2")  
            If Range("B15").Value = "Aterrada" Then  
                Cells(17, "B").Value = ("=N2")  
            ElseIf Range("B15").Value = "Não Aterrada" Then  
                Cells(18, "B").Value = ("=O2")  
        End If  
    End If  
End If  
End If  
End If  
End If
```

```
If Range("B20").Value = "7,5" Then  
Cells.Range("B22").Value = Sheets("Desempenho de LD").Range("=J3")  
Application.Run ("Macro1_Normal")  
If Range("B11").Value = "Normal" Then  
    If Range("B12").Value = "Madeira" Then  
        If Range("B13").Value = "Madeira" Then  
            Cells(16, "B").Value = ("=M2")  
            If Range("B15").Value = "Aterrada" Then  
                Cells(17, "B").Value = ("=N2")  
            ElseIf Range("B15").Value = "Não Aterrada" Then  
                Cells(18, "B").Value = ("=O2")  
        End If  
    End If  
End If  
End If  
End If
```

```
If Range("B20").Value = "10" Then  
Cells.Range("B22").Value = Sheets("Desempenho de LD").Range("=J4")  
Application.Run ("Macro1_Normal")  
If Range("B11").Value = "Normal" Then  
    If Range("B12").Value = "Madeira" Then  
        If Range("B13").Value = "Madeira" Then  
            Cells(16, "B").Value = ("=M2")  
            If Range("B15").Value = "Aterrada" Then  
                Cells(17, "B").Value = ("=N2")  
            ElseIf Range("B15").Value = "Não Aterrada" Then  
                Cells(18, "B").Value = ("=O2")  
        End If  
    End If  
End If
```



```
End If
  End If
    End If
      End If
        End If
```

```
If Range("B20").Value = "15" Then
Cells.Range("B22").Value = Sheets("Desempenho de LD").Range("=J5")
Application.Run ("Macro1_Normal")
If Range("B11").Value = "Normal" Then
  If Range("B12").Value = "Madeira" Then
    If Range("B13").Value = "Madeira" Then
      Cells(16, "B").Value = ("=M2")
    If Range("B15").Value = "Aterrada" Then
      Cells(17, "B").Value = ("=N2")
    ElseIf Range("B15").Value = "Não aterrada" Then
      Cells(18, "B").Value = ("=O2")
    End If
  End If
End If
  End If
    End If
      End If
        End If
```

```
If Range("B20").Value = "20" Then
Cells.Range("B22").Value = Sheets("Desempenho de LD").Range("=J6")
Application.Run ("Macro1_Normal")
If Range("B11").Value = "Normal" Then
  If Range("B12").Value = "Madeira" Then
    If Range("B13").Value = "Madeira" Then
      Cells(16, "B").Value = ("=M2")
    If Range("B15").Value = "Aterrada" Then
      Cells(17, "B").Value = ("=N2")
    ElseIf Range("B15").Value = "Não aterrada" Then
      Cells(18, "B").Value = ("=O2")
    End If
  End If
End If
  End If
    End If
      End If
        End If
```

```
If Range("B20").Value = "30" Then
Cells.Range("B22").Value = Sheets("Desempenho de LD").Range("=J7")
Application.Run ("Macro1_Normal")
If Range("B11").Value = "Normal" Then
  If Range("B12").Value = "Madeira" Then
    If Range("B13").Value = "Madeira" Then
      Cells(16, "B").Value = ("=M2")
    If Range("B15").Value = "Aterrada" Then
      Cells(17, "B").Value = ("=N2")
    End If
  End If
End If
```

```

ElseIf Range("B15").Value = "Não aterrada" Then
    Cells(18, "B").Value = ("=O2")
End If
End If
End If
End If
End If

Sub Macro1_Normal()
' Macro1_Normal Macro
' Macro gravada em 30/10/2007 por jose.lucio'
' Atalho do teclado: Ctrl+a'
ActiveSheet.Shapes("EstruturaNormal").Select
Selection.Copy
Range("E2").Select
ActiveSheet.Paste
End Sub

```

Para os cálculos das demais estruturas de linhas mostradas na Figura 4.3, informe as características da linha com o tipo e dimensões das estruturas, tipo de cruzeta, tipo de poste, aterramento ou não da linha. Ao acionar o tipo de estruturas na planilha mostrada na Figura 4.1, obtêm-se a TDI da linha, o fator de blindagem, os desligamentos por descargas diretas, os desligamentos por descargas laterais, os desligamentos por descargas totais, utilizando os mesmos procedimentos para os cálculos citados anteriormente.

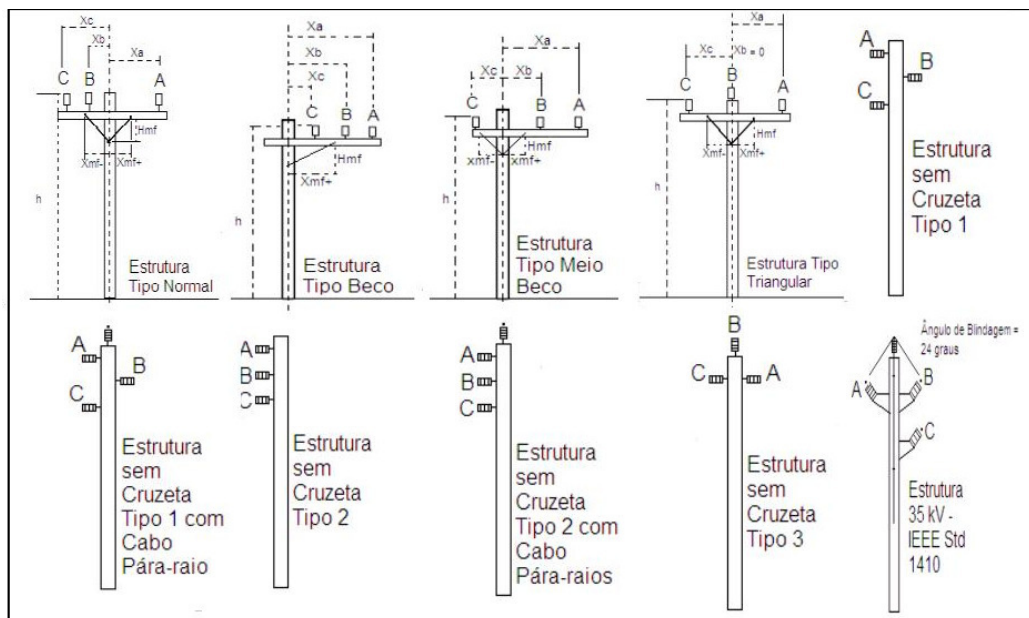


Figura 4.3 – Tipos de Estruturas

4.2.3) Saída

A Saída é o resultado do cálculo de Desempenho da Linha que são os Desligamentos por Descargas Diretas (DDD), os Desligamentos por Descarga Laterais (DDL) e os Desligamentos por Descargas Totais (DDT).

A Figura 4.1 mostra os aspectos gerais da interface gráfica do programa desenvolvido. O programa tem que prover resultados, mas dentro da precisão da modelagem utilizada. Ao mesmo tempo, ele tem que manter simples, rápido e de fácil uso.

A Figura 4.4 mostra o fluxograma de cálculo de desligamentos por descargas diretas. Primeiro, é necessário informar o número de dias de trovoadas por ano (T_d). Com esse dado, calcula-se a densidade de descargas no solo por ano (N_g). Com o valor de N_g , altura da linha (h) e distância entre as fases externas da linha (L), calcula-se o número de descargas diretas para cada 100 km por ano (N). Com a altura das estruturas próximas à linha (H) e suas distâncias à linha (Y_a), obtêm-se o fator de blindagem S_f .

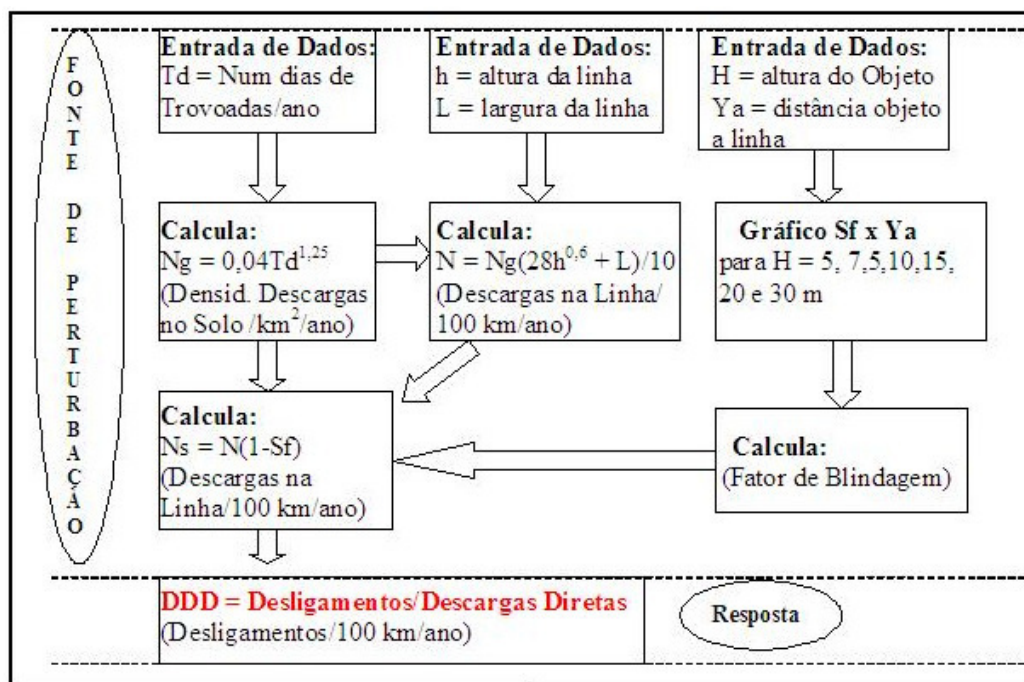


Figura 4.4 - Fluxograma do Cálculo de Desligamentos/Descargas Diretas

Com o fator de blindagem (S_f) e o número de descargas na linha por 100 km por ano (N), calcula-se o número de desligamentos por descargas diretas na linha (DDD).

O gráfico da Figura 4.5 mostra o fator de blindagem em função das distâncias das estruturas à linha para diversas alturas das estruturas. Observa-se no gráfico que à medida que a distância das estruturas à linha aumenta, menores são os fatores de blindagem para quaisquer altura de estruturas, ou seja, o fator de blindagem tende a zero para distância das estruturas à linha maiores que 100 m. Outra observação importante do gráfico é que os fatores de blindagem tornam-se maiores para altura de estruturas mais altas para uma mesma distância das estruturas à linha.

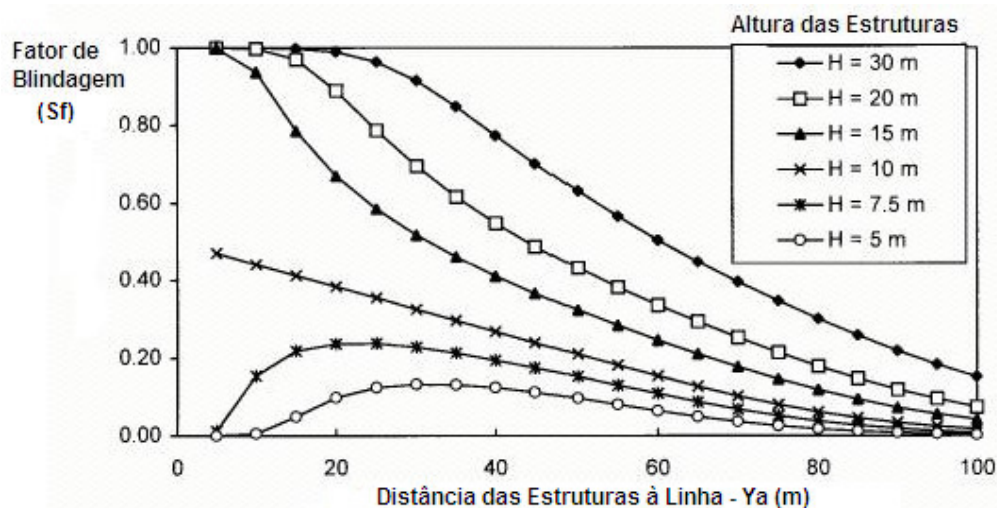


Figura 4.5 – Fator de Blindagem (S_f) X Distâncias das estruturas próximas à linha (Y_a) para diversas alturas das estruturas (H) [1]

A Figura 4.6 mostra o fluxograma de cálculo de desligamentos por descargas indiretas e o desempenho total da linha. Primeiro, é necessário informar as características da linha, suas dimensões, tipos de estruturas (com cruzeta e sem cruzeta) e os níveis de isolamento dos isoladores. Com esses dados, o programa calcula o menor valor da TDI (Tensão Disruptiva de Impulso) da linha que é assumido como o valor da TDI do conjunto. Uma vez definido se o neutro da linha é aterrado ou não aterrado juntamente com a TDI do conjunto da linha, esses valores são informados no gráfico da Figura 4.7 e

calcula-se o número de desligamentos por 100 km por ano para uma densidade de 1 descarga por km^2/ano .

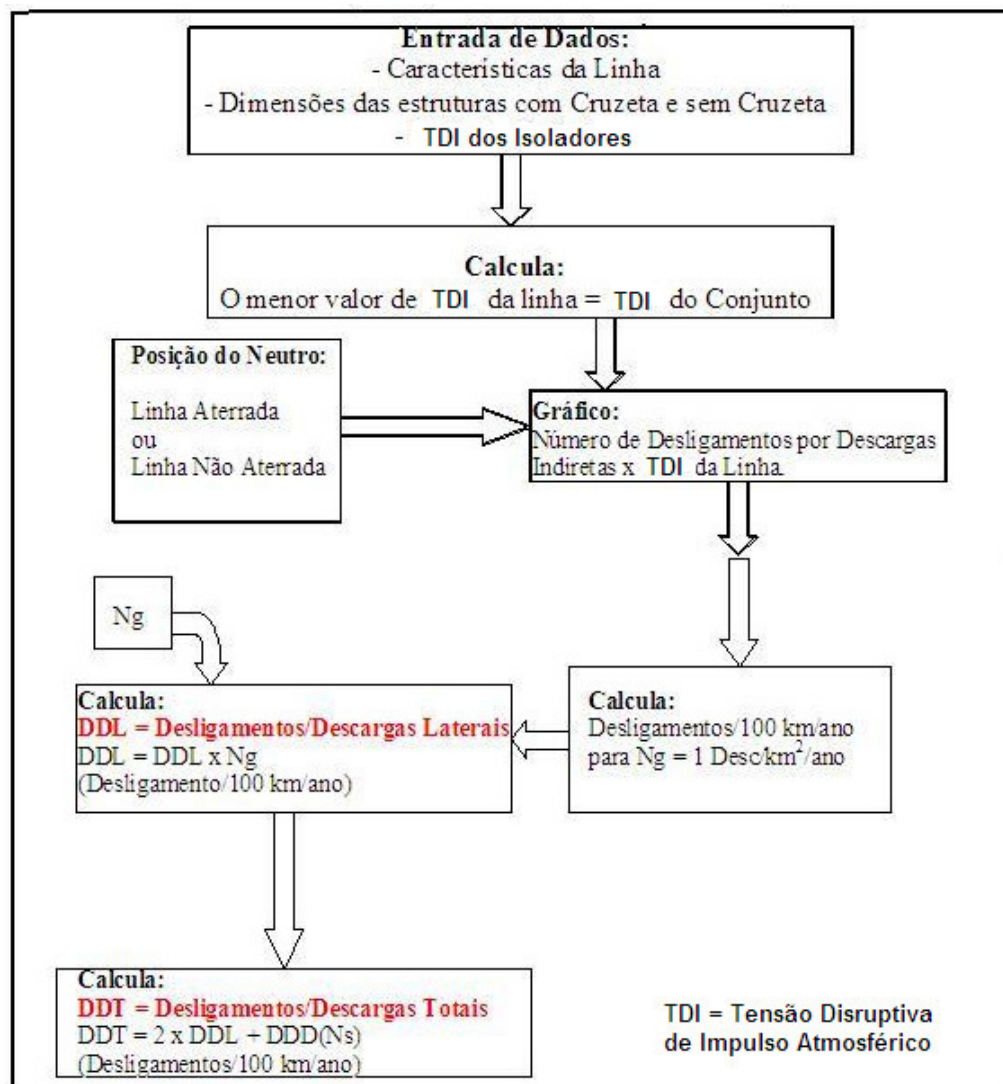


Figura 4.6 - Fluxograma de Cálculo de Desligamentos/Descargas Lateral e Desempenho

Uma vez que a densidade de descargas no solo foi calculada anteriormente por descargas diretas (N_g), calcula-se o número de desligamentos por descargas laterais (DDL), multiplicando esse valor pelo número de descargas que atingem o solo (N_g). Como resultado final, tem-se o desempenho total da linha que é a soma do número de desligamentos por descargas diretas (DDD) com o número de desligamentos por descargas laterais ($2xDDL$). Esse resultado final é o Desempenho Total da linha

(DDT). O fator 2 do número de desligamentos por descargas laterais, ou seja, $2xDDL$, é assumido pelo guia IEEE [1] considerando que os desligamentos por descargas laterais está entre os desligamentos por descargas laterais em campo aberto e os desligamentos por descargas diretas também em campo aberto. O guia assume que os desligamentos por descargas laterais são duas vezes os desligamentos por descargas laterais para campo aberto. Estudo apresentado no Capítulo 5 mostra que os desligamentos por descargas laterais diminuem com o aumento do nível de isolamento da linha, independente do fator $2xDDL$.

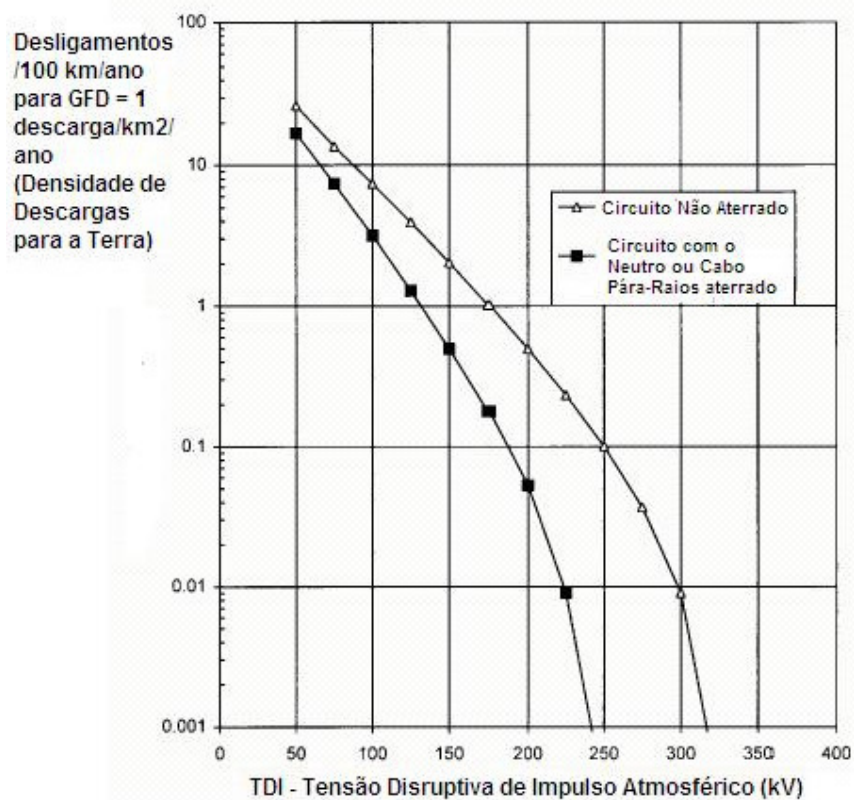


Figura 4.7 - Número de desligamentos/100 km/ano para $N_g = 1$ descarga/km²/ano (campo aberto) [1]

O gráfico da Figura 4.7 mostra os desligamentos em função da tensão disruptiva da linha para campo aberto, considerando a densidade de descargas de 1 descarga/km²/ano e a linha com neutro aterrado e neutro isolado.

O programa permite fazer uma análise de desempenho de linhas para diversos parâmetros variáveis tais como número de dias de trovoadas por ano, altura da linha, tipo de estruturas, tipo de cruzeta, tipo de poste, linha com neutro isolado e linha com neutro aterrado, altura de estruturas e árvores próximas e suas distâncias à linha interferindo no fator de blindagem, dimensões e características das estruturas com e sem cruzeta e nível de isolamento dos isoladores nas fases que interfere diretamente no cálculo do nível de isolamento da linha. Os parâmetros variáveis citados estão relacionados entre si através de planilhas de cálculos internas ao programa e podem alterar o resultado de desempenho da linha com alteração de quaisquer dos parâmetros.

O programa tem a versatilidade e a facilidade de calcular o desempenho de uma linha para qualquer tipo de estrutura com e sem cruzeta, como mostrado na Figura 4.3. Ele relaciona as incidências de descargas, as características da linha, o tipo da estrutura, o modelo da estrutura e as suas dimensões (com cruzeta e sem cruzeta). Uma vez definido o tipo da estrutura, o programa captura o modelo e transfere a sua imagem gráfica da estrutura escolhida no momento que atuar o botão “Tipos de Estrutura”. Neste instante, calculam-se os Desligamentos por Descargas Diretas, Descargas Laterais e Descargas Totais. Qualquer alteração dos parâmetros variáveis da linha poderá alterar o seu desempenho. O estudo de sensibilidade de linha está intimamente relacionado com os seus parâmetros variáveis. O usuário tem a facilidade de trabalhar com o programa com somente uma planilha como mostrado na Figura 4.1.

4.3) Comentários

Este capítulo apresentou os principais aspectos do programa de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas aplicando a metodologia de cálculo do Guia IEEE – Std 1410. Foi visto que é capaz de calcular o número de desligamentos por descargas diretas,

laterais e totais com a influência das fontes de perturbação como a incidência das descargas, das características da linha, do fator de blindagem, dos tipos de estruturas e suas dimensões.

No próximo capítulo, será apresentado um estudo de casos com análise de sensibilidade e discussão do desempenho de linhas de distribuição frente as descargas atmosféricas proposto pelo guia e avaliar as opções de melhorias de desempenho das linhas.

5) Estudo de Casos

5.1) Introdução

Esse capítulo apresenta os resultados de um estudo de caso desenvolvido a partir da metodologia descrita nos capítulos anteriores. O objetivo é apresentar alguns resultados de interesse oriundos da aplicação da modelagem desenvolvida no programa computacional para diferentes configurações de linhas de distribuição. Várias análises decorrentes dos resultados foram realizadas, as quais são apresentadas neste capítulo. As simulações se concentram em configurações de linhas de distribuição em estudo. A aplicação da modelagem das linhas de distribuição e a qualidade dos resultados obtidos realçam as características da modelagem adotadas e apresentam uma flexibilidade na análise dos resultados.

O capítulo inicia-se com a apresentação das características dos sistemas de distribuição estudados. Em seguida, são apresentados os casos simulados, sua flexibilidade na análise de resultados, na análise de sensibilidade dos sistemas de distribuição e na versatilidade do programa computacional desenvolvido. Os resultados dos alimentadores estudados comprovam a validação da metodologia aplicada no guia IEEE [1]. Os resultados de desempenho das linhas de distribuição são apresentados e suas análises com relação aos diferentes fatores de blindagem, densidade de descargas para a terra, tensão disruptiva de impulso (TDI), linhas com neutro aterrado, linhas com neutro isolado, sensibilidade das linhas com relação à descarga laterais, descargas diretas e fator de blindagem.

São apresentadas as análises de resultados de simulações da tensão disruptiva de impulso em função do fator de blindagem para desligamentos por descargas laterais maior que desligamentos por descargas diretas. As análises do porcentual acumulativo e dos valores absolutos de desligamentos são apresentadas em função das tensões disruptivas para uma linha com fator de blindagem igual a 0,75.

São apresentados os resultados de simulações de desempenho da linha em função da tensão disruptiva de impulso para uma linha com fator de blindagem igual a 0,75. É discutido o fator 2 para

desligamentos por descargas laterais proposto pelo guia no qual $DDT = 2 \times DDL + DDD$, onde DDT (desligamentos por descargas totais) e DDD (desligamentos por descargas diretas). E apresentada uma análise comparativa da sensibilidade das linhas utilizando diferentes fatores para DDL (desligamentos por descargas laterais).

5.2) Características dos sistemas de distribuição em estudo

Para o estudo, foram utilizados três alimentadores reais do sistema de distribuição da Cemig localizados em uma região com elevado índice de incidência de descargas para a terra com a média de 6,54 descargas/km²/ano, equivalente a 59 dias de trovoadas por ano [11]. As alturas médias dos alimentadores e ramais foram consideradas de 10 m, e a largura das linhas de 2,4 m. Um alimentador possui o NBI (Nível Básico de Isolamento) de 95 kV, o segundo alimentador possui o NBI de 170 kV e o terceiro alimentador possui o NBI misto de 95 kV e 170 kV. Para os alimentadores em estudo foram consideradas uma linha de distribuição base com estruturas tipo normal com cruzeta de madeira e poste de concreto, com neutro não aterrado e dimensões das estruturas com cruzeta conforme apresentado na planilha da Figura 5.1,

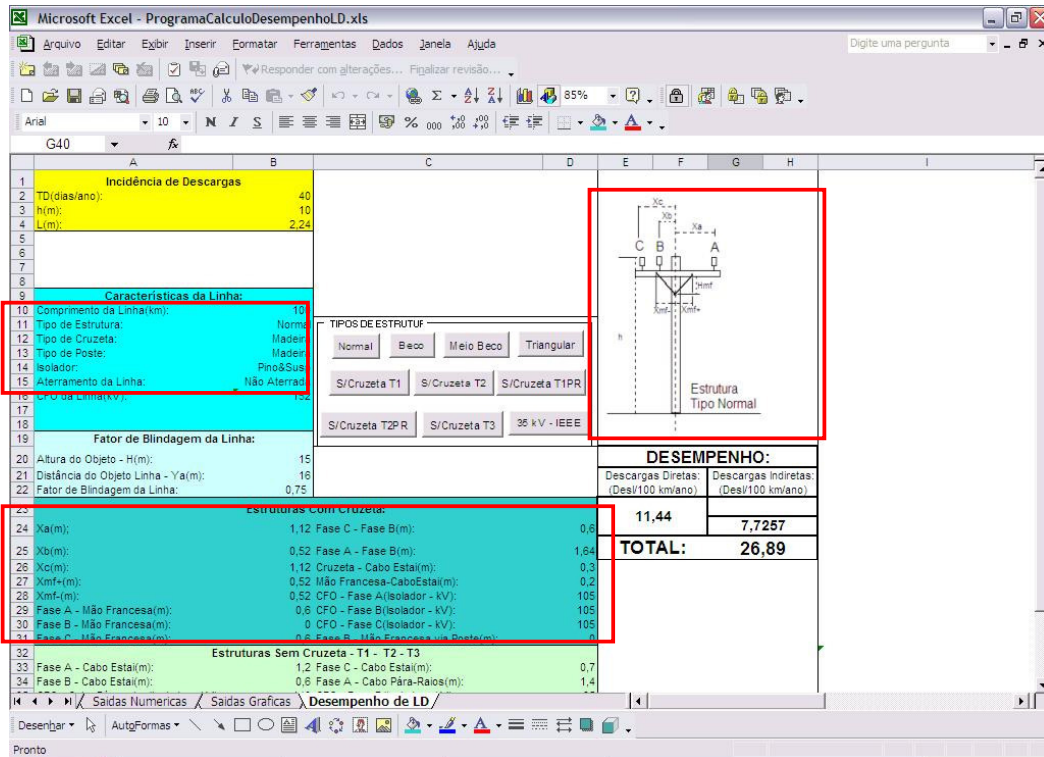


Figura 5.1 – Planilha de cálculo de desempenho dos alimentadores

que representa as características da linha, as dimensões das estruturas com cruzeta e tipo de estrutura. Os demais parâmetros tais com número de dias de trovoadas por ano, densidade de descargas para o solo e fatores de blindagem da linha, são apresentados nos casos simulados no item 5.3.

5.3) Casos simulados

Para os alimentadores, foram simulados os casos de maior importância para o estudo. Nas simulações foi adotado o fator de blindagem de 0,01 que indica a linha sem blindagem e 0,99 que indica que a linha está totalmente protegida por estruturas e árvores próximas. Os números de dias de trovoadas por ano foram adotados entre 0 e 90 dias os quais são utilizados para calcular as densidades de descargas para a terra entre 0,0 a 11,09 descargas/km²/ano.

Os casos apresentados são:

- Desempenho do alimentador com nível de isolamento de 95 kV em função da densidade de descargas para a terra e fatores de blindagem de 0,01 e 0,99.

- Desempenho do alimentador com nível de isolamento de 170 kV em função da densidade de descargas para a terra e fatores de blindagem de 0,01 e 0,99.
- Desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso com o neutro aterrado, com fator de blindagem de 0,01 e densidade de descargas para a terra de 1 descarga/km²/ano.
- Desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso com o neutro isolado, com fator de blindagem de 0,01 e densidade de descargas para a terra de 1 descarga/km²/ano.
- Desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso com o neutro aterrado, com fator de blindagem de 0,99 e densidade de descargas para a terra de 1 descarga/km²/ano.
- Desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso com o neutro isolado, com fator de blindagem de 0,99 e densidade de descargas para a terra de 1 descarga/km²/ano.
- Variação da TDI (Tensão Disruptiva de Impulso) em função dos fatores de blindagem para Desligamentos por Descargas Laterais (DDL) maiores que Desligamentos por Descargas Diretas (DDD).
- Desempenho de alimentadores (em valores absolutos) em função da TDI com fator de blindagem de 0,75.
- Desempenho de alimentadores (em valores percentuais) em função da TDI com fator de blindagem de 0,75.
- Desempenho de alimentadores em função da TDI com fator de blindagem de 0,75 para o fator multiplicador dos Desligamentos por Descargas Laterais (DDL) proposto pelo guia IEEE.

5.4) Resultados e análises

Os resultados apresentados a seguir representam os desempenhos dos alimentadores obtidos das simulações no programa computacional em relação a diversos parâmetros.

A) Número de Interrupções X densidade de descargas para a terra (N_g):

A Figura 5.2 mostra o desempenho do alimentador com nível de isolamento de 95 kV em função da

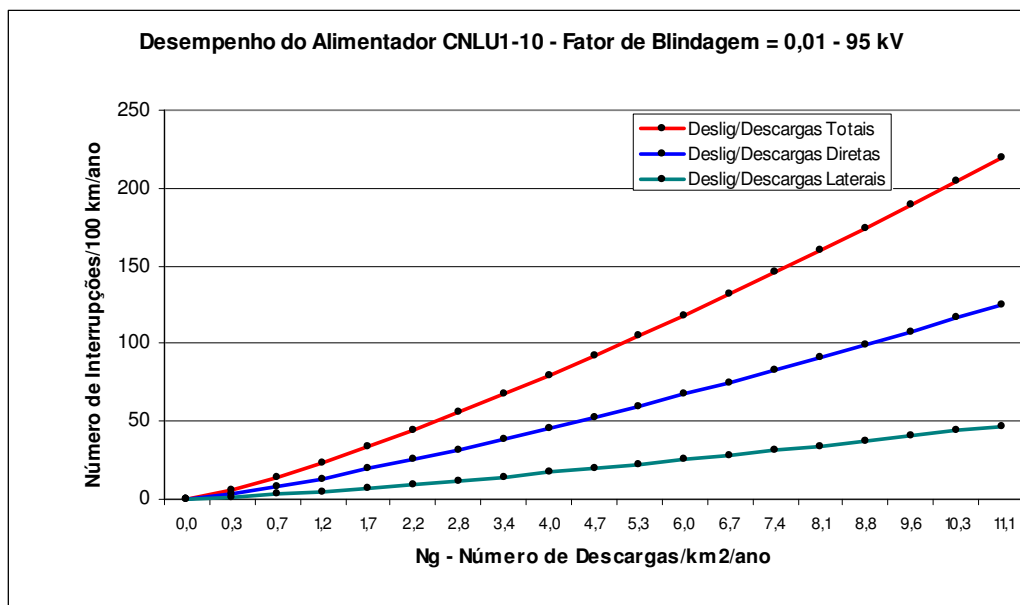


Figura 5.2 – Desempenho do Alimentador CNLU1-10 x N_g – $S_f = 0,01$ e $NBI = 95$ kV

densidade de descargas e fator de blindagem de 0,01. Observa-se no gráfico que as interrupções crescem com o aumento da densidade de descargas e que as interrupções por descargas diretas são maiores que as interrupções por descargas laterais. Isso é devido ao baixo fator de blindagem da linha influenciada pelas estruturas e árvores próximas causando um maior incidência de descargas diretas na linha.

A Figura 5.3 mostra o alimentador com nível de isolamento de 95 kV em função da densidade de descargas com fator de blindagem de 0,99. Observa-se na Figura 5.3 que as interrupções crescem com o aumento da densidade de descargas e que as interrupções por descargas diretas tornam-se desprezíveis.

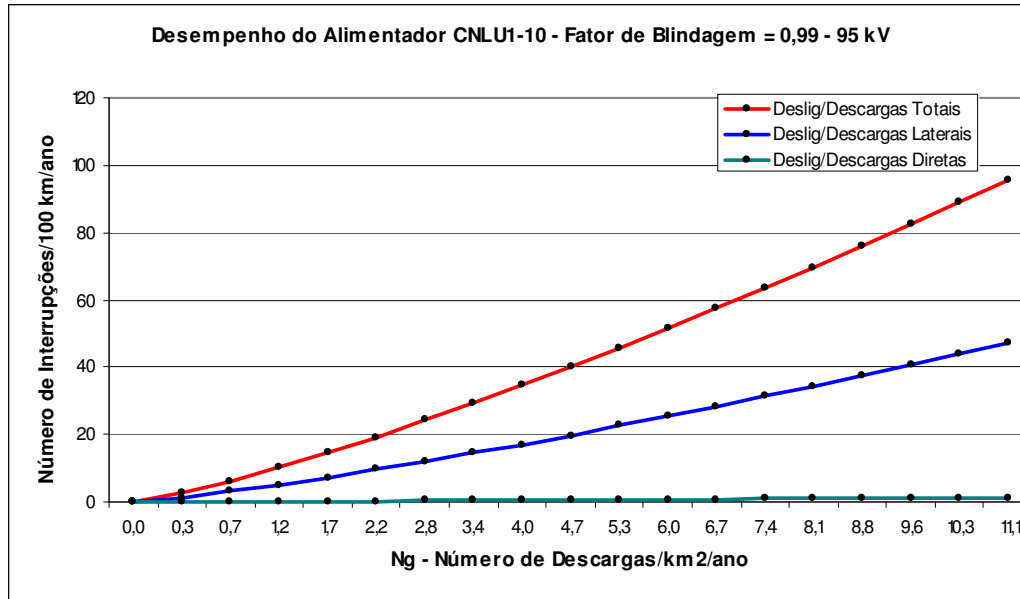


Figura 5.3 – Desempenho do Alimentador CNLU1-10 x N_g – $S_f = 0,99$ e $NBI = 95$ kV

As interrupções por descargas laterais tornam-se elevadas pelo elevado fator de blindagem da linha pelas estruturas e árvores próximas. O elevado fator de blindagem protege a linha da incidência de descargas diretas e aumentam a incidência das descargas laterais causando desligamentos.

A Figura 5.4 mostra o alimentador com nível de isolamento de 170 kV em função da densidade de descargas. Observa-se que as interrupções por descargas laterais são desprezíveis comparadas com as interrupções por descargas diretas, mesmo a linha com baixo fator de blindagem. Esse baixo valor de interrupções por descargas laterais é devido ao nível mais elevado do isolamento da linha que suporta as tensões induzidas.

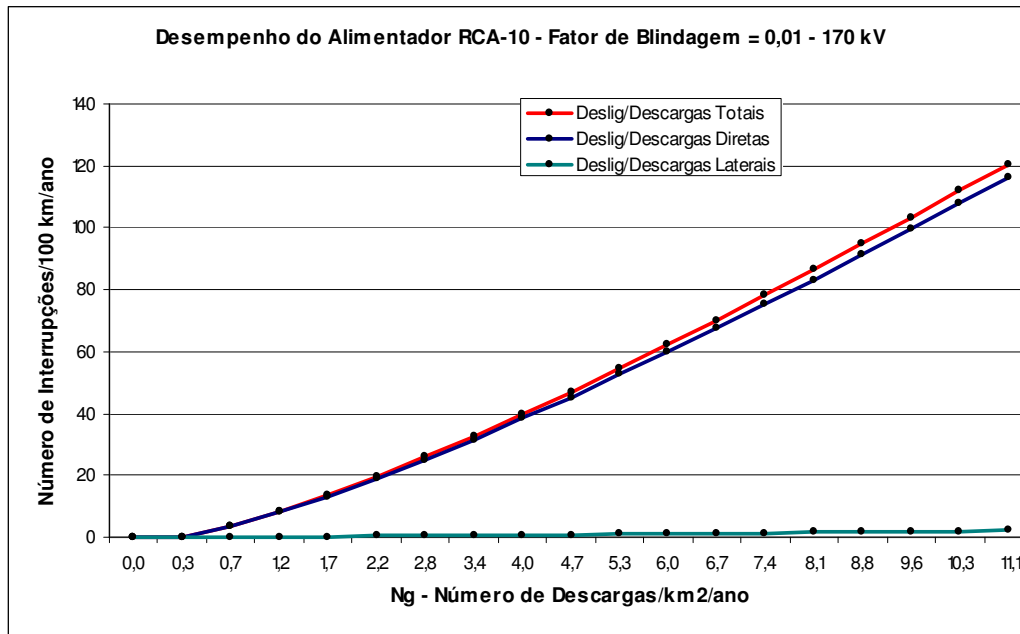


Figura 5.4– Desempenho do Alimentador RCA-10 x N_g – $S_f = 0,01$ e NBI = 170 kV

A Figura 5.5 mostra o alimentador com nível de isolamento de 170 kV em função da densidade de

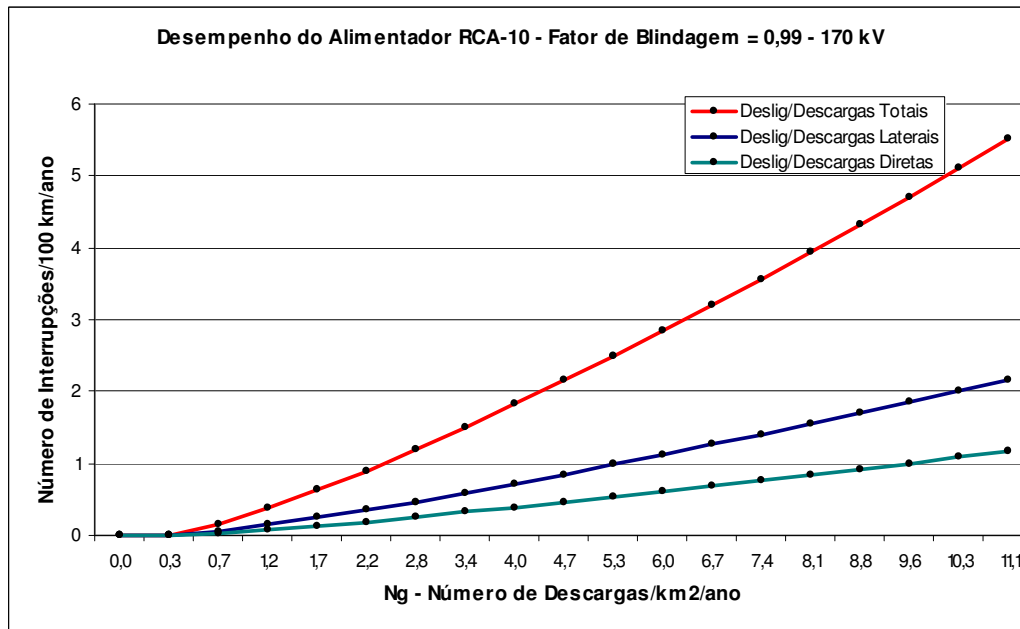


Figura 5.5 – Desempenho do Alimentador RCA-10 x N_g – $S_f = 0,99$ e NBI = 170 kV

descargas e fator de blindagem de 0,99. Observa-se na Figura 5.5 que as interrupções por descargas diretas são maiores que as interrupções por descargas laterais. O elevado fator de blindagem protege a linha das descargas diretas, mas aumenta os desligamentos por descargas laterais. Observando-se as

Figuras 5.4 e 5.5 conclui-se que há uma grande melhora no desempenho do alimentador pelo aumento do fator de blindagem e pelo elevado nível de isolamento da linha. Outra conclusão observada da análise das Figuras 5.4 e 5.5 é que com o aumento do fator de blindagem do alimentador, há um aumento significativo dos desligamentos por descargas laterais.

B) Número de interrupções X TDI (kV):

A Figura 5.6 mostra o desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso da linha com fator de blindagem de 0,01, neutro aterrado e densidade de descargas de 1 descarga/km²/ano.

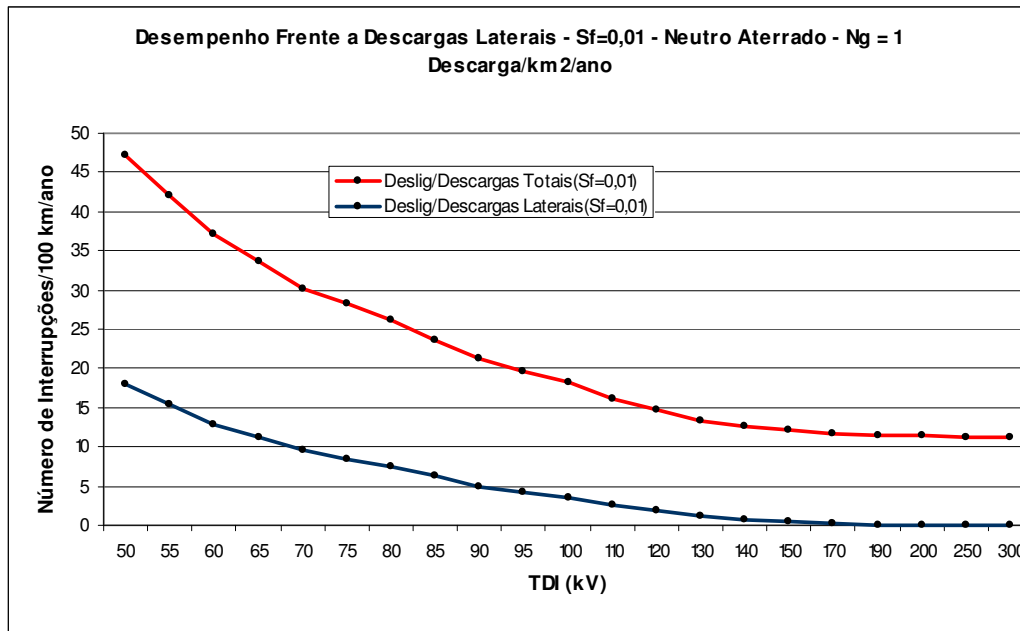


Figura 5.6 – Desempenho X TDI (kV) N_g = 1 – S_f = 0,01 – Neutro Aterrado

A Figura 5.7 mostra o desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso da linha com fator de blindagem de 0,01, neutro isolado e densidade de descargas de 1 descarga/km²/ano.

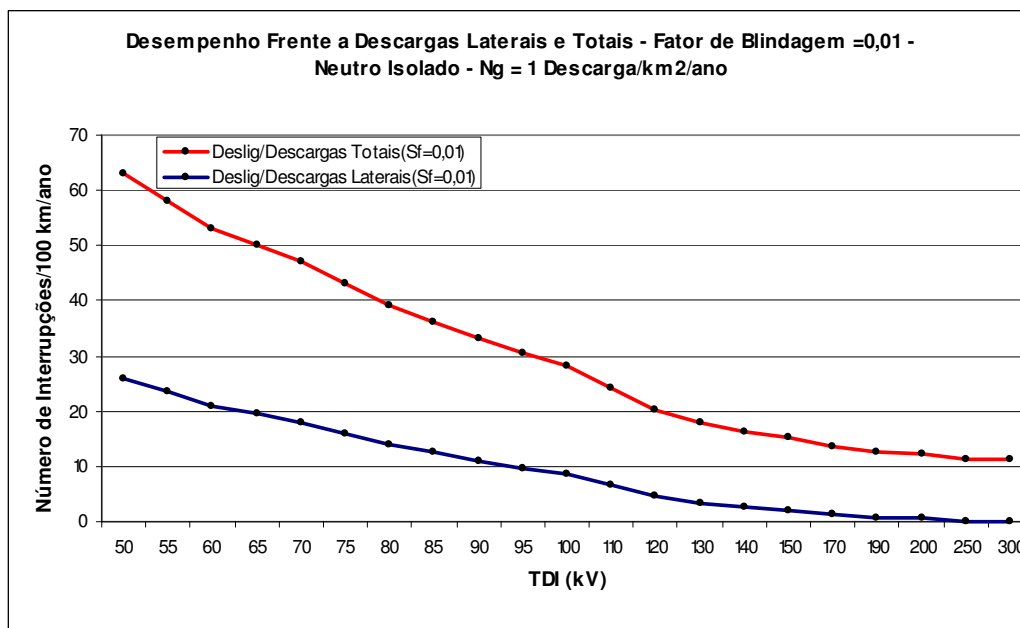


Figura 5.7 – Desempenho X TDI (kV) – $N_g = 1$ – $S_f = 0,01$ – Neutro Isolado

Observa-se nas Figuras 5.6 e 5.7 que as interrupções por descargas laterais e descargas totais são praticamente inversamente proporcionais a TDI da linha e que para os níveis de isolamento da linha superior a 170 kV, tornam-se praticamente desprezíveis as interrupções por descargas laterais, porém as interrupções por descargas totais tornam-se constantes para TDI acima de 170 kV. Esses valores constantes são devido às interrupções causadas por descargas diretas na linha sem proteção pelo fator de blindagem por estruturas e árvores próximas sendo assim inevitável o seu desligamento. Outra observação nas Figuras 5.6 e 5.7 é que os sistemas elétricos com o neutro aterrado apresentam um melhor desempenho que sistemas com neutro isolado.

A Figura 5.8 mostra o desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso da linha com fator de blindagem de 0,99, neutro aterrado e densidade de descargas de 1 descarga/km²/ano.

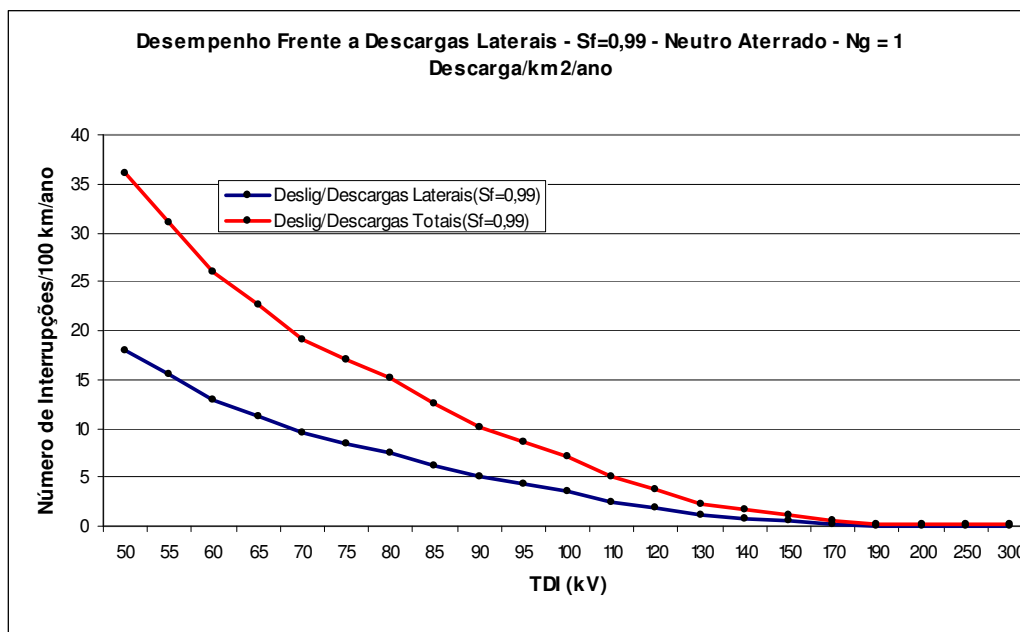


Figura 5.8 – Desempenho X TDI (kV) – $N_g = 1$ – $S_f = 0,99$ – Neutro Aterrado

A Figura 5.9 mostra o desempenho de alimentadores em função da tensão disruptiva de impulso da linha com fator de blindagem de 0,99, neutro isolado e densidade de descargas de 1 descarga/km²/ano.

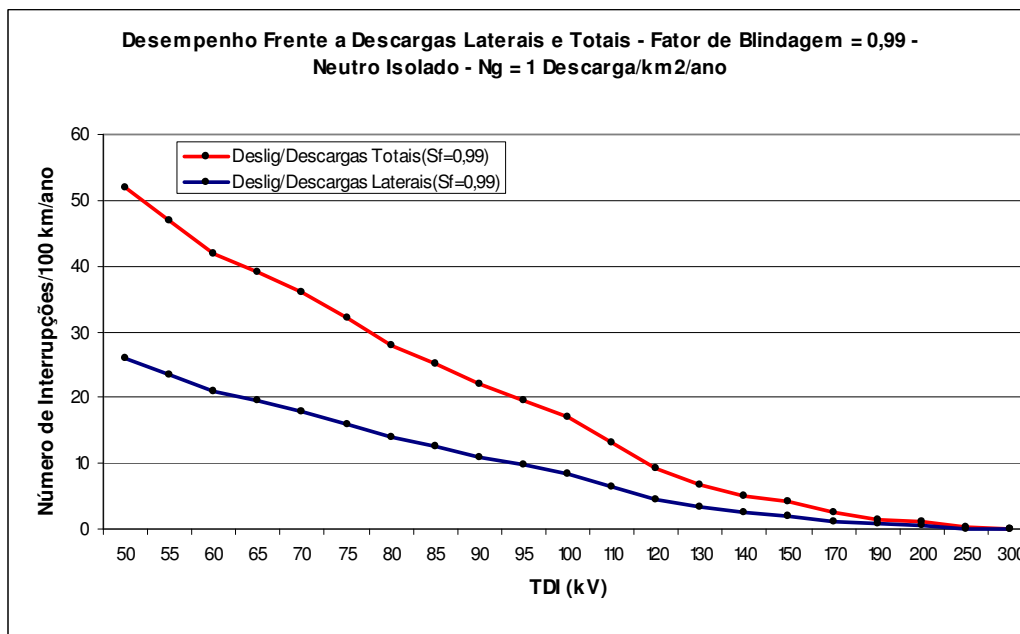


Figura 5.9 – Desempenho X TDI (kV) – $N_g = 1$ – $S_f = 0,99$ – Neutro Isolado

Observa-se nas Figuras 5.8 e 5.9 que os desligamentos por descargas laterais e descargas totais são praticamente inversamente proporcionais a TDI da linha e que para os níveis de isolamento da linha

superior a 170 kV, tornam-se desprezíveis as interrupções por descargas laterais e totais. Essa conclusão é devido à inexistência de desligamentos causados por descargas diretas na linha com elevada proteção pelo fator de blindagem por estruturas e árvores próximas. Outra observação é que os sistemas elétricos com o neutro aterrado apresentam um melhor desempenho que sistemas com neutro isolado.

C) TDI (kV) X Fator de Blindagem para DDL > DDD:

A Figura 5.10 mostra a variação da TDI em função do fator de blindagem por estruturas e árvores próximas da linha. Observa-se que a curva na Figura 5.10 é o lugar geométrico dos pontos cujas interrupções por descargas laterais são maiores que as interrupções por descargas diretas.

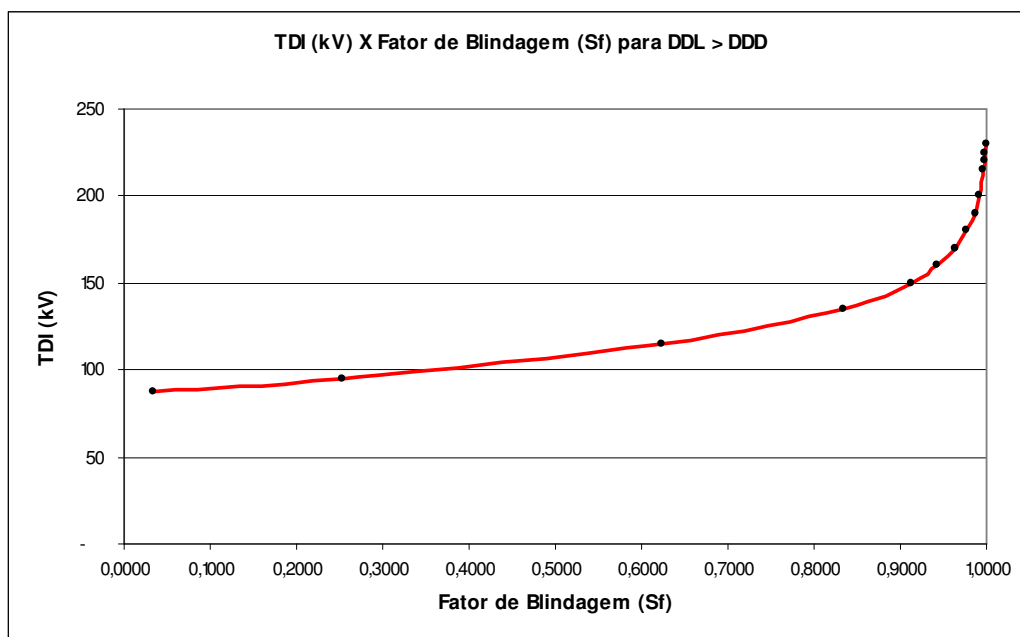


Figura 5.10 – TDI (kV) X Fator de Blindagem (S_f)

À medida que aumenta o fator de blindagem, aumenta a TDI da linha para manter os desligamentos por descargas laterais maiores que os desligamentos por descargas diretas. Outra observação é que à medida que a linha torna-se mais protegida pelo aumento do fator de blindagem maior é a probabilidade de interrupções por descargas laterais e por isso necessita de aumentar a TDI da linha.

Na análise da Figura 5.10 também podemos observar que o valor da TDI (kV) tende ao infinito para o fator de blindagem igual a 1. A explicação para isso é que numa linha totalmente protegida por estruturas e árvores próximas não existirá incidência de descargas diretas na linha, todas as descargas incidirão nas estruturas e árvores próximas à linha causando, portanto desligamentos.

D) Desligamento X TDI (kV) para $S_f = 0,75$:

A Figura 5.11 mostra o desempenho de uma linha, em valores absolutos, em função dos níveis de isolamento com fator de blindagem igual a 0,75.

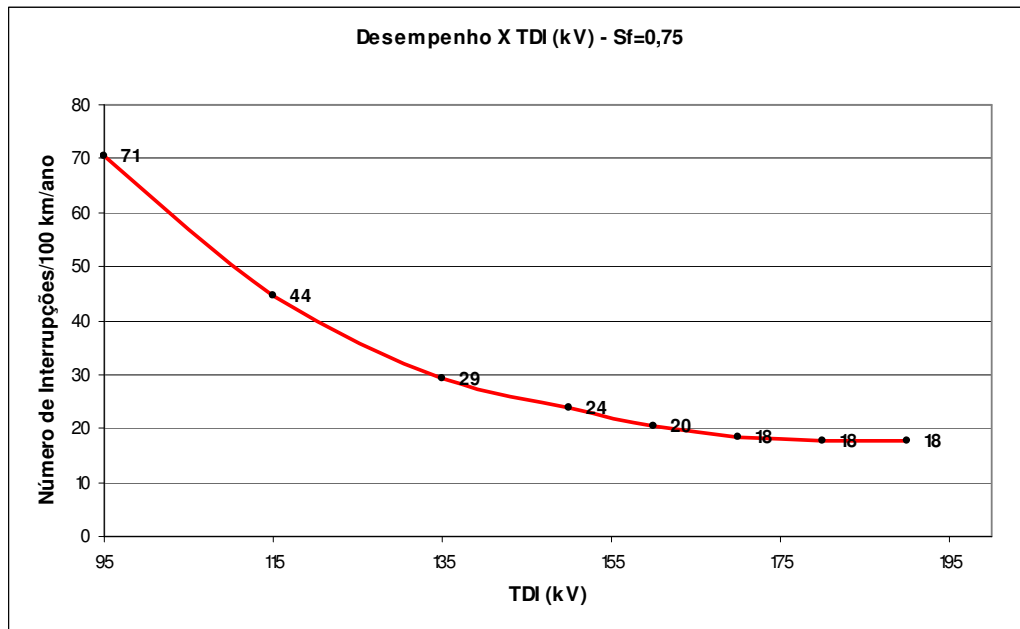


Figura 5.11 – Desempenho X TDI (kV) – $S_f = 0,75$

Observa-se na Figura 5.11 que as interrupções caem drasticamente do nível de isolamento igual a 95 kV para 135 kV. A partir desse nível, as interrupções caem mais suavemente em relação ao nível de isolamento, chegando aproximadamente a 18 desligamentos para níveis de isolamento a partir de 170 kV e mantendo constante a partir desse valor. Esse valor constante é causado principalmente aos desligamentos por descargas diretas. Acima de 170 kV praticamente não existem desligamentos por descargas laterais.

A Figura 5.12 mostra o desempenho de uma linha, em valores percentuais, em função dos níveis de isolamento com fator de blindagem igual a 0,75. O gráfico da Figura 5.12 representa a mesma linha de distribuição representada no gráfico da Figura 5.11.

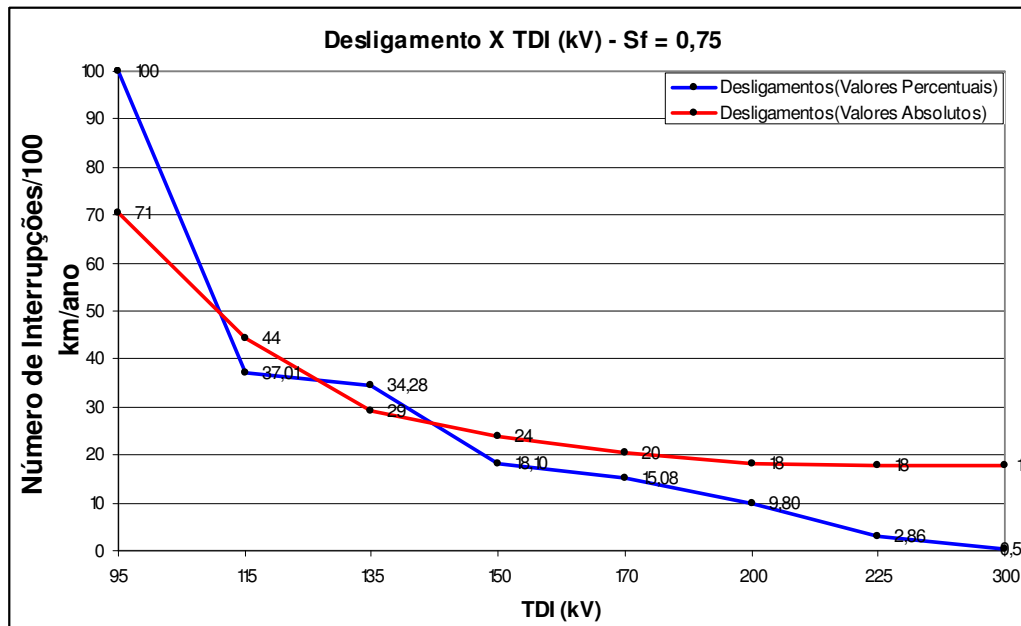


Figura 5.12 – Desligamentos (%) X TDI (kV) – $S_f = 0,75$

Observa-se na Figura 5.12 que para o nível de isolamento igual a 95 kV, ocorre 100 % de interrupções. Para os níveis de isolamento entre 115 e 135 kV as interrupções caem para 37% e a partir de 135 kV as interrupções caem mais suavemente em relação ao nível de isolamento, chegando a 18,1 % para 150 kV, 9,8 para 200 kV, 2,86 para 225 kV e 0,55 % para o nível de isolamento da linha em torno de 300 kV.

E) Desligamentos X TDI (kV) para $S_f = 0,75$

A Figura 5.13 mostra o desempenho de uma linha em função dos níveis de isolamento com o fator de blindagem igual a 0,75 e fator multiplicador de desligamentos por descargas laterais igual a 1 e 2.

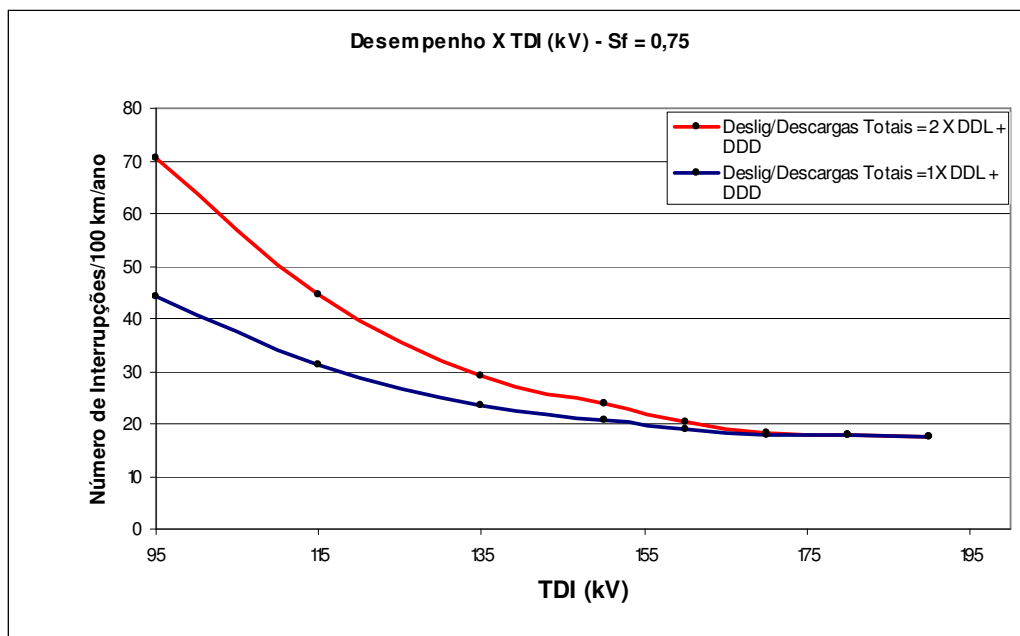


Figura 5.13 – Desempenho X TDI (kV) – Sf = 0,75 – Fator multiplicador de DDL

Observa-se na Figura 5.13 que para o nível de isolamento igual a 95 kV, os desligamentos por descargas laterais são maiores que os desligamentos por descargas diretas. Observa-se também que as duas curvas se encontram no nível de isolamento igual a 170 kV, sendo a partir daí as interrupções se mantêm constante e igual a 18 desligamentos/100 km/ano. A explicação desse fato é que a partir do nível de isolamento de 170 kV não existem desligamentos por descargas laterais. Qualquer que seja o fator multiplicador de desligamentos por descargas laterais, à medida que o nível de isolamento da linha aumenta, diminuem os desligamentos por descargas laterais. O fator multiplicador do DDL é mais relevante para linhas com níveis de isolamento mais baixo.

5.5) Comentários

Este capítulo abordou o estudo de casos de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas aplicando o programa computacional. Foram apresentados os parâmetros utilizados nas simulações aplicando o modelo computacional e casos foram analisados. O programa

representa a metodologia aplicada pelo guia IEEE. Foi apresentada a análise dos resultados obtidos nas simulações dos alimentadores mais expressivos e práticos para o nosso estudo. Foi apresentada também nesse capítulo a análise de sensibilidade das linhas com relação a diversos parâmetros variáveis. Também foi apresentada uma análise da discussão sobre o fator de desligamento por descargas laterais proposto pelo guia.

No próximo capítulo será apresentada a conclusão do trabalho sobre desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas aplicando a modelagem do guia IEEE no programa computacional e apresenta uma proposta de continuidade.

6) Conclusão e proposta de continuidade

O trabalho apresentado é resultado de estudo do tema de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas aplicando a metodologia do Guia IEEE Std 1410.

No Capítulo 2 foram apresentados o fenômeno de descargas atmosféricas, seus efeitos e a sua interação com o sistema elétrico. No Capítulo 3 foi apresentada a metodologia de implementação de melhoria de desempenho de linhas aéreas conforme descrita no guia IEEE e o método simplificado de cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente a descargas atmosféricas. No Capítulo 4 foi apresentada a implementação da metodologia de cálculo de desempenho. No Capítulo 5 foi apresentado um estudo de casos de alimentadores utilizando o programa computacional desenvolvido.

O estudo de casos do Capítulo 5 foi precedido por uma comparação dos resultados obtidos com o programa com dados de desempenho de linhas reais publicadas na literatura.

Dois aspectos da modelagem utilizada pelo Guia merecem atenção: o fator de multiplicação 1,5 da tensão disruptiva e o fator de multiplicação 2,0 do número de desligamentos por descargas laterais. A combinação destes fatores com as incertezas quanto ao real fator de blindagem da linha permite que a estimativa do desempenho sofra variações consideráveis. Este aspecto deve ser levado em conta ao se interpretar os resultados obtidos com a aplicação do Guia.

O modelo de cálculo de desempenho definido pelo guia IEEE – Std 1410 apresenta algumas limitações tais como: o cálculo das tensões induzidas leva em consideração de uma linha infinita com resistividade do solo ideal; não foram considerados os dispositivos pára-raios, os cabos pára-raios, as descontinuidades da linha e o valor da resistividade do solo. Apesar dessas limitações, o programa computacional demonstra que os valores de cálculos de desempenho, as variações dos níveis de isolamento e dos fatores de blindagem dos alimentadores apresentados no estudo de casos são de fundamental importância e validam a modelagem proposta pelo guia IEEE. O programa computacional implementado apresenta uma versatilidade e facilidade no cálculo de desempenho de linhas de distribuição pelas análises das curvas apresentadas com relação a diversos parâmetros variáveis.

Estudos complementares podem ser analisados numa proposta de continuidade dentre os quais podemos citar:

- Avaliar a implementação do cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição considerando a utilização de cabos pára-raios como proteção de blindagem da linha.
- Avaliar a implementação do cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição considerando a resistividade do solo.
- Avaliar a implementação do cálculo de desempenho de linhas aéreas de distribuição considerando a atuação dos dispositivos pára-raios instalados ao longo da linha.

Bibliografia:

- [1] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines – IEEE Std 1410 – 2004.
- [2] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines – IEEE Std 1243 – 1997.
- [3] Math H. J. Bollen, “Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions” – IEEE Press Series on Power Engineering – Edition John Wiley & Sons, Inc. Publications – 2000.
- [4] Ary D’Ajuz, “Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão”- EDUFF – 1987.
- [5] Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, “Electrical Transmission and Distribution Reference Book” – Fourth Edition – 1950.
- [6] J. G. Anderson, “Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above”, Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA, 1982.
- [7] Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems” – Second Edition – Edition John Wiley & Sons, Inc. – 1991.
- [8] J. Duncan Glover and Mulukutla S. Sarma, “Power System Analysis and Design”- Third Edition – Edition Brooks/Cole – 2002.
- [9] UMAN, M.A., “Lightning”, Livro, Editora McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [10] Visacro, Silvério, “Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia”, Editora Líber, 2005.
- [11] Afonso Ferreira Ávila – “Estudo do Desempenho de Redes de Distribuição Rural Utilizando Dados do Sistema de Localização de tempestades e da Operação do Sistema – Uma Abordagem de Engenharia” – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais - 2005.
- [12] Vilson Luiz Coelho – “Influência das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Sistemas Aéreos de Distribuição de Energia Elétrica” – Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – 2005.
- [13] Amilton Soares Júnior – “Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas” – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais – 2001.
- [14] Alberto Borgheti, Carlo Alberto Nucci and Mario Paolone, “An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, NO. 1, January 2007

- [15] IEEE Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines, “Working Group Report: Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no 3, pp. 1408-1417, julho de 1990.
- [16] Juan A. Martinez, Francisco Gonzalez Molina, Pritindra Chowdhuri, “Calculation of Lightning Flashover Rates of Overhead Distribution Line, a Comparativy Study”, Power Engineering Society SummerMeeting, Vol.4page2577-1582.,2000.
- [17] Thanaphong Thanasaksiri, “Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution Line”, TENCON 2004, 2004 IEEE Region 10 Conference, Vol. 3, page 369-372, 2004.
- [18] C.A. Nucci e F. Rachidi, “Lightning-Induced Overvoltages”, IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session “Distribution Lightning Protection”, New Orleans, April, 19, 1999.
- [19] Voislav Jankov, “Estimation of the Maximal Voltage Induced on an Overhead Line Due to the Nearby Lightning”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No.1, January 1997.
- [20] H. Bueno, C.T.N. Mineta, A.J. Monteiro & J.M. Alves, AES-Eletropaulo, P.H. Mendonça, R.J. Bacheга & M.L.B. Martinez, Federal University of Itajubá, “Lightning Performance Improved Method Applied to AES – Eletropaulo Utility 13,8 kV Medium Voltage Distribution”, Power Tech, 2005 IEEE Russian, 27-30 June 2005.
- [21] Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Mario Paolone, “Estimation of the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters at Ground Level From the Data Recorded by Instrumented Towers”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004.
- [22] Nagaraj Baliyepalli, Subrahmayam S. Venkata, Charles W. Richter, Jr., Richard nD. Christie, and Vito J. Longo, “Distribution System Reliability Assessment Due to the Lightning Storms”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 3, July 2005.
- [23] Marco Saran, Manuel Martinez, Rafael Bonon, Hermes Oliveira, Carlos Nucci, Mario Paolone, “Comparative Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Designs Submitted to the Induced Voltages”, Power Tech 2007, IEEE Lausanne, 1-5 July 2007, page – 766 – 771.
- [24] ERIKSON, A. J., ANDERSON, J.G.; “The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, no.2, pp. 859-870, July 1987a.
- [25] Estudo de Distribuição – “Proteção Contra Sobretensões em Redes de Distribuição Aéreas” – ED-3.4 – Cemig - Cia. Energética de Minas Gerais S. A. - setembro de 1995.
- [26] IEEE-EEI Committee Report, “Extra High Voltage Line Outages”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-86, no. 5, page 547, may 1967.

- [27] Ivan José da Silva Lopes – “Estudo do comportamento de um condutor multi-aterrado frente a tensões induzidas por descargas atmosféricas” - Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – 1990.
- [28] Tarcísio Antônio Santos de Oliveira – “Cálculo de tensão induzida por descargas atmosféricas em linhas aéreas de energia e cabos telefônicos: uma abordagem pela teoria de circuitos” – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais – 2001.
- [29] Joaquim Paulo da Silva – “Cálculo de tensão induzida por descarga atmosférica: implementação da teoria de Rusck no EMTP” - Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais – 2001.
- [30] Hileman, Andrew R., “Insulation Coordination for Power Systems”- Edition Marcel Dekker, Inc., 1999.