

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**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**

AFONSO FERREIRA ÁVILA

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 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Qualidade de Energia.

Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia (CEQE)

**Orientadores: Professor Ivan José da Silva Lopes
Professor Glássio Costa de Miranda**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG**

BELO HORIZONTE

DEZEMBRO - 2005

AGRADECIMENTOS

Agradecer é saber dizer obrigado de forma sincera e verdadeira.

Ao Professor Ivan José da Silva Lopes, pela orientação, o constante apoio e dedicação, o que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Glásson Costa de Miranda, pela orientação, apoio técnico e o auxílio ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores do CPDEE/UFMG, que muito contribuíram com seus ensinamentos para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos amigos Alexandre Francisco Maia Bueno e José Aloíse Ragone Filho da CEMIG, que acreditaram e incentivaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu irmão Antônio Ferreira Ávila pelo incentivo na realização do Mestrado.

Aos meus pais, José Ávila e Maria Luzia, pelo exemplo, carinho e educação, pilares de minha formação.

E finalmente à minha esposa Sheila pelo carinho, compreensão e apoio no desenvolvimento e conclusão dessa nova etapa de minha vida profissional.

A todos o meu muito obrigado.

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Sheila
e as minhas filhas
Maria Adelaide e Maria Cândida.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo de desempenho de redes de distribuição aéreas rurais frente a descargas atmosféricas. Para tal, é utilizada uma metodologia de cálculo de desempenho baseada nos dados do Sistema de Localização e Detecção de Descargas Atmosféricas e da Operação do Sistema Elétrico.

A base de dados aplicada no desenvolvimento do trabalho é constituída de três fontes de informação: dados de descargas atmosféricas, extraídos a partir de registros do Sistema de Localização e Detecção de Descargas (SLT); dados da Operação do Sistema, representados pelos registros de interrupção fornecidos pelo Sistema de Controle de Interrupções da CEMIG (CONINT); e dos dados de topologia da rede e localização de equipamentos de proteção, fornecidos pelo Sistema de Gerência de Redes da CEMIG (GEMINI). São analisadas 5.379 ocorrências de desligamento do sistema e 737.747 descargas atmosféricas registradas no período de observação de 2001 a 2004.

A metodologia é aplicada a três alimentadores com níveis de isolamento de 95kV, 170kV e misto (95kV e 170kV), localizados na Regional Mantiqueira. O desempenho real desses alimentadores é comparado com o cálculo estimado baseado no IEEE Standard 1410.

O trabalho conclui pela viabilidade do uso do Sistema de Localização e Detecção de Descargas (SLT) e dos dados da Operação do Sistema (CONINT) como ferramenta de avaliação, diagnóstico e investigação crítica para melhoria de desempenho das redes de distribuição frente a descargas atmosféricas.

ABSTRACT

The work presents the results of a study based on the application of Lightning Location System (LLS) data and Interruptions data to analyze actual lightning performance of rural distribution lines at Minas Gerais State.

The work presents the data used in the development of the case study consisting of three sources of information: lightning data, extracted from LLS records; interruption data extracted from CONINT (a CEMIG's Interruption Control System) reports; topology data and location the protection equipment, supplied by GEMINI (a CEMIG's Management Network System).

The present work is based on the analysis of 5.379 interruptions and 737.747 lightning events recorded from 2001 to 2004.

The method consists of three stages: (1) lightning performance calculation, (2) analysis of lightning activity and system interruptions and (3) the correlation between them. The calculation process is based on the procedure of IEEE Standard 1410.

A case study is presented to show how different factors, such as structure degree of exposure (direct and indirect strikes), overvoltage levels and the basic insulation level affect the lightning performance of the distribution lines. The observed and calculated values are presented and compared for real networks different Basic Insulation Level (BIL).

The results demonstrate the usefulness of the proposed methodology as an evaluation tool for distribution network performance analysis.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA-2.1: MAPA DE DENSIDADE DE DESCARGAS (DESCARGAS/KM²/ANO)
- FIGURA-2.2: GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DE CORRENTE BASEADO NA FORMULA DE ANDERSON [ANDERSON, 1982]
- FIGURA-2.3: FORMA DE ONDA DE DESCARGA “TÍPICA” – PARÂMETROS
- FIGURA-2.4: DIAGRAMA BÁSICO DO MODELO ELETROGEOMÉTRICO
- FIGURA-2.5: GRÁFICO DE DISTÂNCIA CRÍTICA PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE DESCARGAS DIRETAS NA LINHA
- FIGURA-2.6: GRÁFICO – $N_G \times$ NÚMERO DE DESCARGAS DIRETAS/100KM/ANO
- FIGURA-2.7: FAIXA DE BLINDAGEM – LINHA PRÓXIMA DE ARBORIZAÇÃO
- FIGURA-2.8: USO DO MODELO ELETROGEOMÉTRICO E DO MODELO DE RUSCK PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE DESLIGAMENTOS POR TENSÕES INDUZIDAS E DESCARGA DIRETA.
- FIGURA-3.1: LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES DA REDE RINDAT
- FIGURA-4.1: LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DOS ALIMENTADORES DO ESTUDO DE CASO
- FIGURA-4.2: DIAGRAMA UNIFILAR DO ALIMENTADOR CNLU1-10
- FIGURA-4.3: DIAGRAMA UNIFILAR DO ALIMENTADOR RCA-10
- FIGURA-4.4: DIAGRAMA UNIFILAR DO ALIMENTADOR CNLU1-19
- FIGURA-4.5: INCIDÊNCIA MENSAL DE DESCARGAS PARA O PERÍODO 2001-2004
- FIGURA-4.6: DIAGRAMA DE CAUSAS DE DESLIGAMENTO DOS ALIMENTADORES
- FIGURA-4.7: ANÁLISE ESTRATIFICADA DE CAUSAS DE DESLIGAMENTO
- FIGURA-4.8: ANÁLISE DE CAUSAS PRIMÁRIAS DO ALIMENTADOR CNLU1-10
- FIGURA-4.9: ANÁLISE DE CAUSAS PRIMÁRIAS DO ALIMENTADOR RCA-10
- FIGURA-4.10: ANÁLISE DE CAUSAS PRIMÁRIAS DO ALIMENTADOR CNLU1-19
- FIGURA-4.11: GRÁFICO DE DESEMPENHO DA LINHA DE 95kV – ESTIMADO E REAL
- FIGURA-4.12: GRÁFICO DE FATOR DE BLINDAGEM PARA O ALIMENTADOR DE 95kV
- FIGURA-4.13: GRÁFICO DE DESEMPENHO DA LINHA DE 170kV – ESTIMADO E REAL
- FIGURA-4.14: CURVAS DE FATOR DE BLINDAGEM PARA LINHA COM NBI DE 170 kV
- FIGURA-4.15: ALIMENTADOR MISTO 95-170kV – ANÁLISE DE FAIXAS
- FIGURA-4.16: ANÁLISE COMPARATIVA DOS ALIMENTADORES – VALORES MÉDIOS

LISTA DE TABELAS

- TABELA-3.1: FORMATO DA BASE DE DADOS DE DESCARGA
- TABELA-3.2: FORMATO DA BASE DE DADOS DE INTERRUPÇÃO
- TABELA-3.3: FORMATO DA BASE DE DADOS DOS ALIMENTADORES
- TABELA-3.4: FORMATO DA BASE DE DADOS DE EQUIPAMENTOS
- TABELA-4.1: QUADRO COMPARATIVO DO NÚMERO DE DESCARGAS E N_G
- TABELA-4.2: NÚMERO DE DESLIGAMENTOS NO ANO - ALIMENTADOR CNLU1-10
- TABELA-4.3: NÚMERO DE DESLIGAMENTOS NO ANO - ALIMENTADOR RCA-10
- TABELA-4.4: NÚMERO DE DESLIGAMENTOS NO ANO - ALIMENTADOR CNLU1-19
- TABELA-4.5: COMPARATIVO DOS VALORES MÉDIOS DE DESLIGAMENTOS , FATOR DE BLINDAGEM E REDUÇÃO PERCENTUAL DO NÚMERO DE DESLIGAMENTOS/100KM/ANO

SIMBOLOGIA

CEMIG	COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS
IEEE	INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS
SLT	SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
CONINT	SISTEMA DE CONTROLE DE INTERRUPÇÕES DA CEMIG
GEMINI	SISTEMA DE GERÊNCIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DA CEMIG
LLP	LIGHTNING LOCATION AND POSITION
LPATS	LIGHTNING POSITION AND TRACKING SYSTEM
IMPACT	IMPROVED ACCURACY FROM COMBINED TECHNOLOGY
GPS	GLOBAL POSITION SYSTEM
RINDAT	REDE INTEGRADA DE DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
SIMEPAR	SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ
FURNAS	CENTRAIS ELÉTRICAS FURNAS S.A.
INPE	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
UTM	UNIVERSA TRANSVERSA MERCATOR
CFO	CRITICAL IMPULSE FLASHOVER VOLTAGE
DEC	DURAÇÃO EQUIVALENTE DE INTERRUPÇÕES POR CONSUMIDOR
N_G	DENSIDADE DE DESCARGAS [DESCARGAS/KM ² /ANO]
P(I)	FUNÇÃO DE DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE CORRENTE DE PICO
I	CORRENTE DE RETORNO (VALOR MÉDIO)
σ_{LNI}	DESVIO PADRÃO DO LOGARITMO DA CORRENTE DE RETORNO
$T_{10/90}$	INTERVALO DE TEMPO NA ONDA ENTRE 10% E 90%
$T_{30/90}$	INTERVALO DE TEMPO NA ONDA ENTRE 30% E 90%
R_s	DISTÂNCIA CRÍTICA PARA O CONDUTOR
R_G	DISTÂNCIA CRÍTICA PARA O SOLO
H	ALTURA DO POSTE
X	DISTÂNCIA HORIZONTAL DA DESCARGA PARA A LINHA
B	AFASTAMENTO DOS CONDUTORES NA CRUZETA (LARGURA DA ESTRUTURA)
N	NÚMERO DE DESCARGAS [DESCARGAS/100 KM/ANO]
N_s	NÚMERO DE DESCARGAS DEVIDO AO FATOR DE BLINDAGEM
S_F	FATOR DE BLINDAGEM
V_{MAX}	MÁXIMA TENSÃO INDUZIDA
Y	DISTÂNCIA ENTRE O PONTO DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA E A LINHA
V	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE DESCARGA
V_o	VELOCIDADE DA LUZ
Z_o	IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA
Y_{MIN}	MÍNIMA DISTÂNCIA PARA O QUAL A DESCARGA NÃO DESVIA DA LINHA
Y_{MAX}	MÁXIMA DISTÂNCIA
F_p	NÚMERO DE DESLIGAMENTOS /100KM/ANO

SUMÁRIO

	PÁG.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. DESEMPENHO ESTIMADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO.....	4
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESCARGA.....	5
2.4 MODELO ELETROGEOMÉTRICO E AS DESCARGAS DIRETAS E INDIRETAS.....	8
2.5 CÁLCULO DE DESEMPENHO ESTIMADO – PROCEDIMENTO.....	15
2.6 ESTADO DA ARTE.....	16
3. DESEMPENHO REAL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	20
3.1 INTRODUÇÃO	20
3.2 DADOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	20
3.3 DADOS DA OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	22
3.4 DADOS DE TOPOLOGIA DOS ALIMENTADORES	24
3.5 CÁLCULO DE DESEMPENHO REAL - PROCEDIMENTO.....	26
4. RESULTADOS	28
4.1 INTRODUÇÃO.....	28
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO – ALIMENTADORES E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	28
4.3 ANÁLISE DOS DADOS DE INTERRUÇÃO DOS ALIMENTADORES...	33
4.3.1 ALIMENTADOR CNLU1-10 – ANÁLISE DE INTERRUÇÕES.....	35
4.3.2 ALIMENTADOR RCA-10 – ANÁLISE DE INTERRUÇÕES.....	36
4.3.3 ALIMENTADOR CNLU1-19 – ANÁLISE DE INTERRUÇÕES.....	38

	PÁG.
4.4	CÁLCULO DE DESEMPENHO ESTIMADO E REAL DOS ALIMENTADORES..... 39
4.4.1	ALIMENTADOR CNLU1-10 – ANÁLISE DE DESEMPENHO..... 40
4.4.2	ALIMENTADOR RCA-10 – ANÁLISE DE DESEMPENHO..... 42
4.4.3	ALIMENTADOR CNLU1-19 – ANÁLISE DE DESEMPENHO..... 45
4.5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS..... 46
5.	CONCLUSÕES 50
5.1	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE..... 52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das principais atribuições das concessionárias de energia elétrica é um fornecimento confiável, seguro e econômico da eletricidade para os consumidores. A qualidade de energia não considera apenas a variação de tensão em torno do valor nominal, mas também o número e os tipos de distúrbios que podem afetar os serviços, tais como: variação de frequência, quedas de tensão temporárias, pequenas interrupções de energia dentre outras. Dentro deste contexto, uma das mais importantes fontes de distúrbio em sistemas de distribuição são as descargas atmosféricas indiretas e diretas que causam faltas transitórias ou permanentes.

O fenômeno da descarga atmosférica é responsável por aproximadamente 80% das interrupções acidentais causadas por fenômenos naturais, o que equivale a 40% do número total de interrupções sustentadas no Sistema de Distribuição da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Estes desligamentos representam 25% do DEC acidental da distribuição, o que corresponde a aproximadamente 1 hora e 50 minutos de interrupção por consumidor/ano [ROCHA, 1991].

Muitas concessionárias no Brasil têm estudado soluções de melhoria de desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Dentre as soluções estudadas, tem-se a adoção de estruturas com nível básico de isolamento (NBI) elevado, passando dos atuais 95kV para 170kV ou 300kV [CEMIG, 1997a].

A aplicação dos novos padrões de linhas de distribuição com nível básico de isolamento de 170 kV ou 300 kV, de forma intensa nas diversas áreas do Estado, resultaram no aumento do custo médio por quilômetro das redes de distribuição aéreas rurais. Para as linhas com NBI de 170 kV, o aumento médio do custo por estrutura situa-se em 33% em estruturas monofásicas e de 16% nas estruturas trifásicas [AVILA, 2004]. A redução dos índices de desligamento esperada pela adoção dos novos padrões, era de 44% para linhas com NBI de 170 kV e 54% para linhas com NBI de 300 kV [PAULINO, 1984],[CEMIG, 1991]. Em alguns alimentadores, em especial naqueles onde todos os circuitos apresentam o NBI de 170kV, o aumento do NBI correspondeu ao índice de redução de desligamentos esperado. Já na maioria dos alimentadores antigos, circuitos mistos com NBI de 95kV e 170kV, a melhoria do NBI das linhas não atingiu aos índices esperados.

Buscando melhor entender o problema de desempenho das redes de distribuição e linhas de transmissão, a CEMIG em conjunto com SIMEPAR, Furnas e o INPE, constituíram uma Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). Esses Sistemas utilizam informações de medições remotas de campo eletromagnético, sendo considerados uma importante ferramenta de monitoramento do fenômeno. O Sistema de Localização e Detecção de Descargas (SLT) fornece diversos dados sobre as descargas atmosféricas, constituindo uma das mais modernas ferramentas de avaliação da proteção e desempenho do sistema elétrico [MESQUITA, 2001].

Além do SLT, outra importante fonte de informação são os dados da Operação do Sistema, representados pelos registros do CONINT (Sistema de Controle de Interrupções da CEMIG). Os registros desse sistema permitem a estratificação e análise das causas das interrupções, sendo possível estabelecer uma relação temporal entre os dados de interrupções (dados da operação) e os dados do Sistema de Localização de Tempestades.

Adicionalmente, o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) através do Comitê de Transmissão e Distribuição tem realizado a publicação de diversos guias de aplicação, dentre eles o IEEE Standard 1410 [IEEE, 2004], procurando identificar as principais causas que influenciam no desempenho das linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas, e propondo ações para a redução do número de interrupções.

Neste contexto, este trabalho investiga o desempenho de alimentadores com diferentes valores de nível básico de isolamento, utilizando dados de descargas atmosféricas, fornecidos pelo Sistema de Localização de Tempestades, dados de operação do sistema representados pelos registros do Sistema de Controle de Interrupções da CEMIG, e o procedimento de cálculo definido pelo IEEE Standard 1410.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo de desempenho de redes de distribuição aéreas rurais frente a descargas atmosféricas, utilizando uma metodologia de cálculo de desempenho de linhas de distribuição baseada nos dados do Sistema de Localização e Detecção de Descargas Atmosféricas e da Operação do Sistema, mostrando a relação existente entre a incidência de descargas, as interrupções no fornecimento de energia e o nível de isolamento.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto compõe-se de cinco capítulos organizados da seguinte forma:

No capítulo 2, é apresentado o procedimento de cálculo de desempenho estimado das redes de distribuição frente a descargas atmosféricas, baseado no guia do IEEE Standard 1410.

O capítulo 3 apresenta a metodologia de cálculo de desempenho real das redes de distribuição frente a descargas atmosféricas baseado nos dados do SLT e do CONINT.

No capítulo 4, são apresentados os resultados da metodologia desenvolvida empregada em três alimentadores com diferentes níveis básicos de isolamento. Para cada alimentador, são obtidos o desempenho estimado e o real. Ao final é realizada uma análise dos resultados obtidos.

O capítulo 5 apresenta as principais contribuições do trabalho e propostas de continuidade.

2. DESEMPENHO ESTIMADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta a revisão de literatura sobre o tema desempenho de redes de distribuição de média tensão frente a descargas atmosféricas. São apresentados os principais tipos de sobretensões que afetam o sistema elétrico com ênfase nas descargas atmosféricas. A seguir, os parâmetros de descargas de interesse são discutidos juntamente com o modelo eletrogeométrico utilizado na determinação do número de descargas diretas e indiretas nas estruturas. Também é apresentada a metodologia de cálculo de desempenho estimado das redes de distribuição frente a descargas atmosféricas. O capítulo é concluído com a apresentação do “Estado da Arte” sobre o tema.

2.2 DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Apesar dos sistemas de energia operarem em regime permanente a maior parte do tempo, eles estão sujeitos a solicitações extremas de tensão e corrente, denominadas sobretensões e sobrecorrentes, respectivamente. Estas solicitações extremas são produzidas durante os transitórios no sistema elétrico [ARAUJO, 2005].

As sobretensões são tensões transitórias entre fase-terra ou fase-fase, variáveis no tempo, cujo valor máximo é superior ao valor de crista das tensões máximas de operação do sistema. Podem ser classificadas como sobretensões temporárias, sobretensões de manobra e sobretensões atmosféricas [ANDERSON, 1982]. As sobretensões temporárias e de manobra são de origem interna nos sistemas, e ocorrem quando da mudança da topologia. São geralmente causadas por manobras tais como energização e religamento, ocorrência ou eliminação de faltas, ressonância e ferroressonância, dentre outras [D’AJUZ et al, 1987].

As sobretensões atmosféricas são sobretensões de origem externa ao sistema elétrico, causadas pela incidência direta de descargas atmosféricas na linha ou próxima a ela. Nos Estados Unidos 65% dos desligamentos nos sistemas de 230kV e 26% nos sistemas de 345kV, são causados por descargas

atmosféricas [ARAUJO, 2005]. Dados do sistema de transmissão da CEMIG, para tensões acima de 230kV, indicam que 70% dos desligamentos se devem a descarga atmosférica, sendo que 20% destes são desligamentos permanentes [CARVALHO, 1997]. Estima-se de 5 a 10% das faltas originadas por descargas atmosféricas resultam em danos permanentes em equipamentos da distribuição [IEEE, 2004]. No sistema de distribuição de média tensão da CEMIG (tensões até 34.5kV) as descargas atmosféricas são responsáveis por aproximadamente 40% do número total das interrupções sustentadas [ROCHA, 1991].

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESCARGA

As descargas atmosféricas são um fenômeno aleatório, e a medição de suas características é extremamente difícil. Estudos estatísticos têm sido realizados por diversos pesquisadores, considerando os dados coletados em diversas regiões e durante vários anos [CHOWDURI, 1996].

A frequência de descargas nuvem-solo é um parâmetro de grande significado para a proteção do sistema elétrico contra descargas atmosféricas. O parâmetro que traduz esse valor é a densidade de descargas ao solo (N_G). Este índice estabelece uma medida do número médio de descargas que incidem no solo por ano, sendo expresso em número de descargas/km²/ano.

Quando se atribui determinado valor de N_G a uma região, deve-se considerar que, para áreas interiores, esta densidade de descarga pode variar em uma ampla faixa. Como exemplo, tem-se o próprio Estado de Minas Gerais, onde este índice oscila entre valores superiores a 10.0 descargas/km²/ano nas proximidades de Juiz de Fora e valores inferiores a 1.0 descarga/km²/ano no extremo norte do Estado, alcançando valores próximos a 6.0 nas regiões de Belo Horizonte e Uberaba, como apresentado na Figura 2.1.

Dessa forma, muitos pesquisadores buscam a constituição de mapas de densidade de descargas para regiões cada vez menores e com um volume de dados maiores, utilizando sistemas de localização de tempestades (Lightning Location System) e/ou redes de contadores de descargas (Flash Counter).

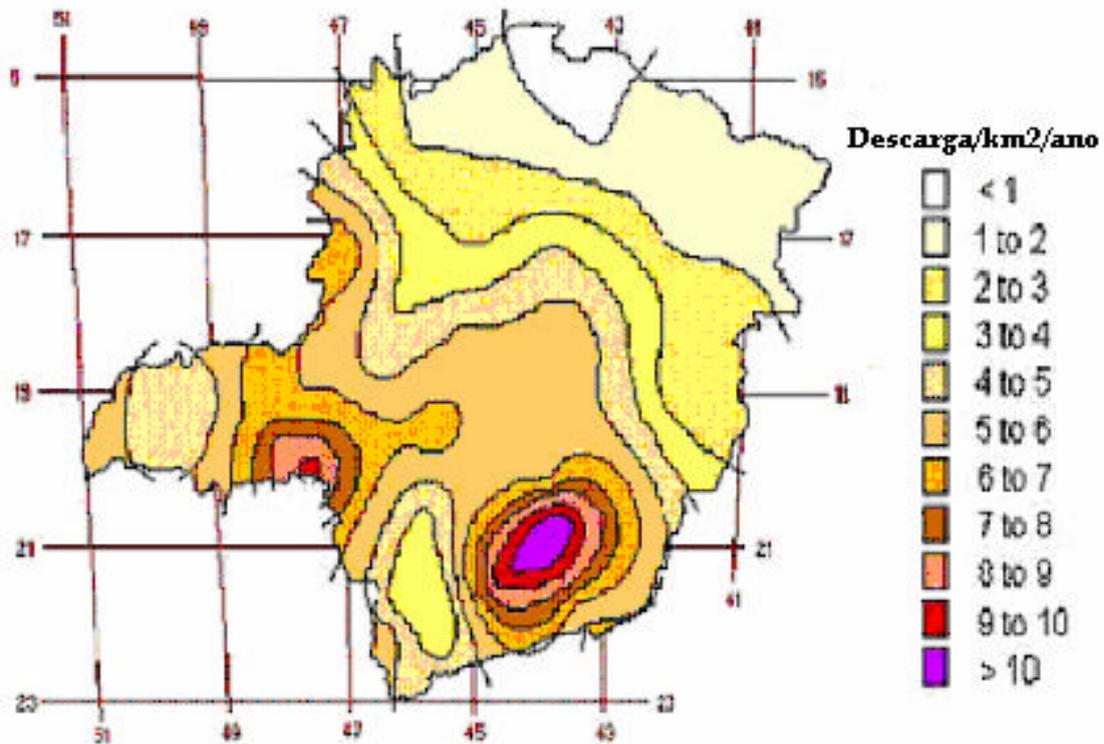


Figura-2.1: Mapa de densidade de descargas (descargas/km2/ano) Obtidos com contadores de descargas (fonte: CEMIG/período 1985-1995)

A análise estatística de dados de descargas levantada em todo o mundo demonstra que as variações da corrente de pico (I_p) apresentam uma distribuição log-normal [CHOWDHURI, 1996], equação (2.1):

$$p(I) = \frac{1}{s_{\ln I} I \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ln I - \ln \bar{I}}{s_{\ln I}} \right)^2 \right\}, \quad (2.1)$$

onde $P(I)$ é a função densidade de probabilidade da corrente de pico, e $\bar{I}, s_{\ln I}$ são os valores médio e o desvio padrão do logaritmo da corrente de retorno. Esses valores são referidos à primeira componente da descarga, que normalmente apresenta valores de pico mais elevados [CHOWDHURI, 2005].

A função de distribuição acumulada permite calcular a probabilidade da corrente de pico de uma descarga (I) ser igual ou maior que um determinado valor i_o . Essa função pode ser calculada a partir da equação simplificada [ANDERSON, 1982],

$$P(I \geq i_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_o}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.2)$$

Sua forma gráfica é apresentada na Figura-2.2

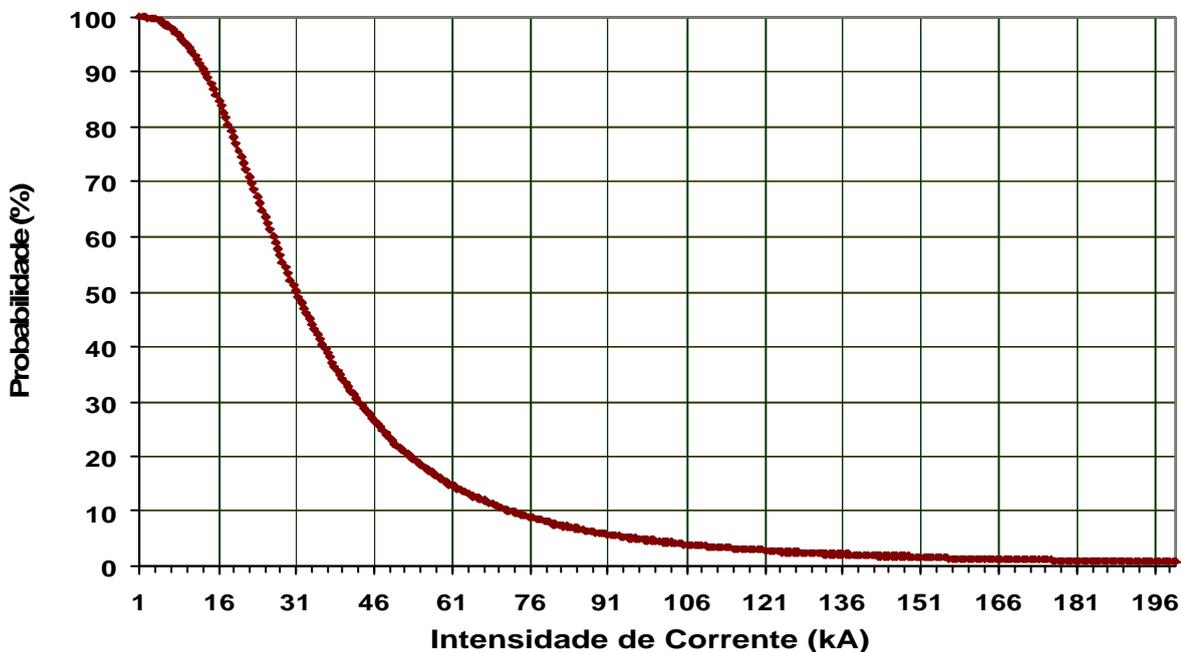


Figura-2.2: Gráfico de distribuição acumulada de corrente baseado na fórmula de Anderson [ANDERSON, 1982]

A forma de onda “típica” para uma descarga descendente negativa, [CIGRE, 1991], é mostrada na Figura 2.3. 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 corrente se encontram normalizados.

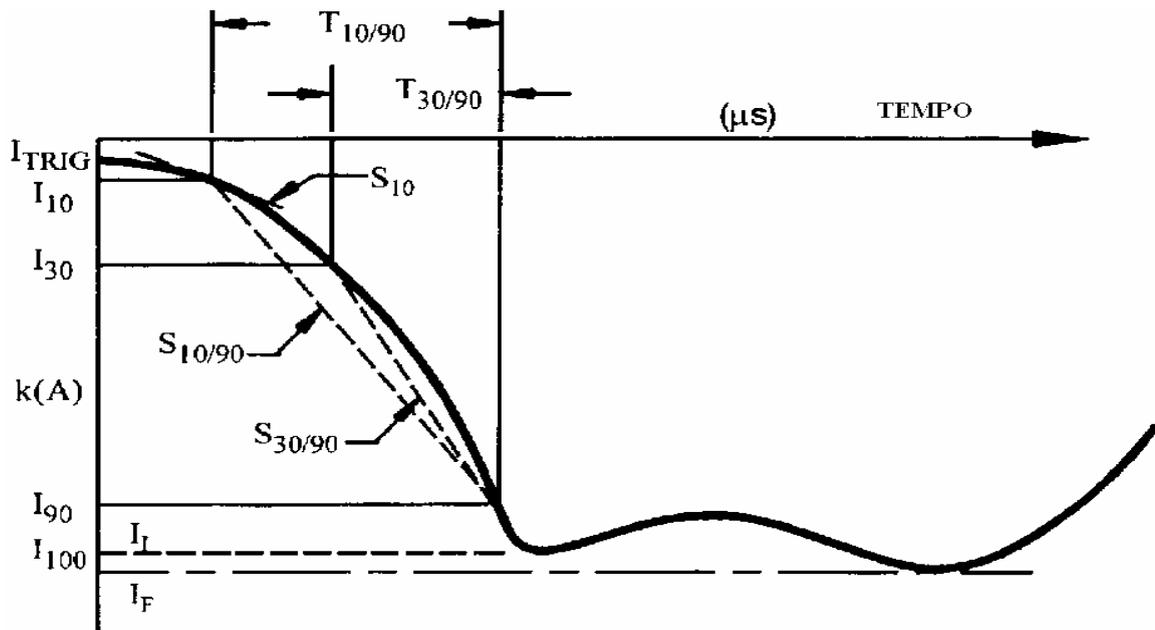


Figura-2.3: Forma de onda de descarga “típica” – Parâmetros

2.4 MODELO ELETROGEOMÉTRICO E AS DESCARGAS DIRETAS E INDIRETAS

Para a definição do sistema de proteção das linhas frente a descargas atmosféricas, é necessário conhecer o número de descargas que poderão atingir a linha e ao solo. Para tal, existe o modelo eletrogeométrico [WHITEHEAD, 1968], [GOLDE, 1977], [MOUSA, 1990] onde se estabelece uma relação entre a intensidade de corrente e a região de alcance da descarga piloto.

O modelo eletrogeométrico pode ser utilizado para estimar o fator de blindagem de uma porção específica de uma linha de distribuição [IEEE, 2004], 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 e depende da intensidade de corrente da descarga. O guia adota as equações de distância de atração, (2.3) e (2.4), e o diagrama da figura 2.4 [IEEE, 1990].

$$r_s = 10 \times I_0^{0,65} \quad (2.3)$$

$$r_g = 0,9 \times r_s = 9 \times I_0^{0,65} \quad (2.4)$$

Onde: r_s = distância crítica para o condutor [m],
 r_g = distância crítica para o solo [m],
 I_0 = amplitude de corrente da descarga [A].

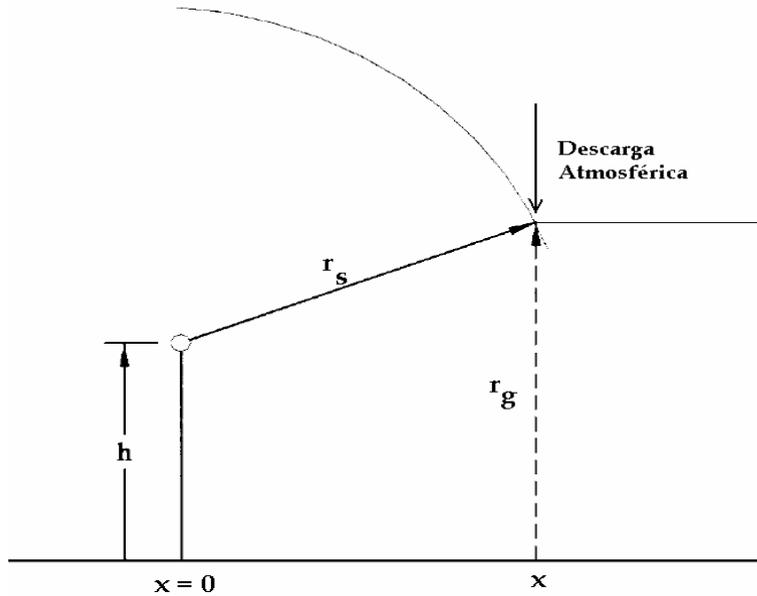


Figura-2.4: Diagrama Básico do Modelo Eletrogeométrico

A partir da Figura 2.4 e das equações (2.3) e (2.4) determina-se o valor da distância horizontal da descarga para a linha, representada pela equação (2.5).

$$r_s^2 = (r_g - h)^2 + x^2 \quad (2.5)$$

Onde: x = distância horizontal da descarga para a linha [m],
 h = altura do poste

A curva de distância crítica é representada na Figura 2.5, sendo uma função da corrente e de uma altura de poste definida, conforme apresentado na equação (2.5). Para esse exemplo, considerou-se o poste com altura de 10m. A área acima da curva representa a região na qual a descarga pode atingir a linha ao invés do solo, já a área abaixo da curva representa a incidência de descarga para o solo [SHORT, 1993].

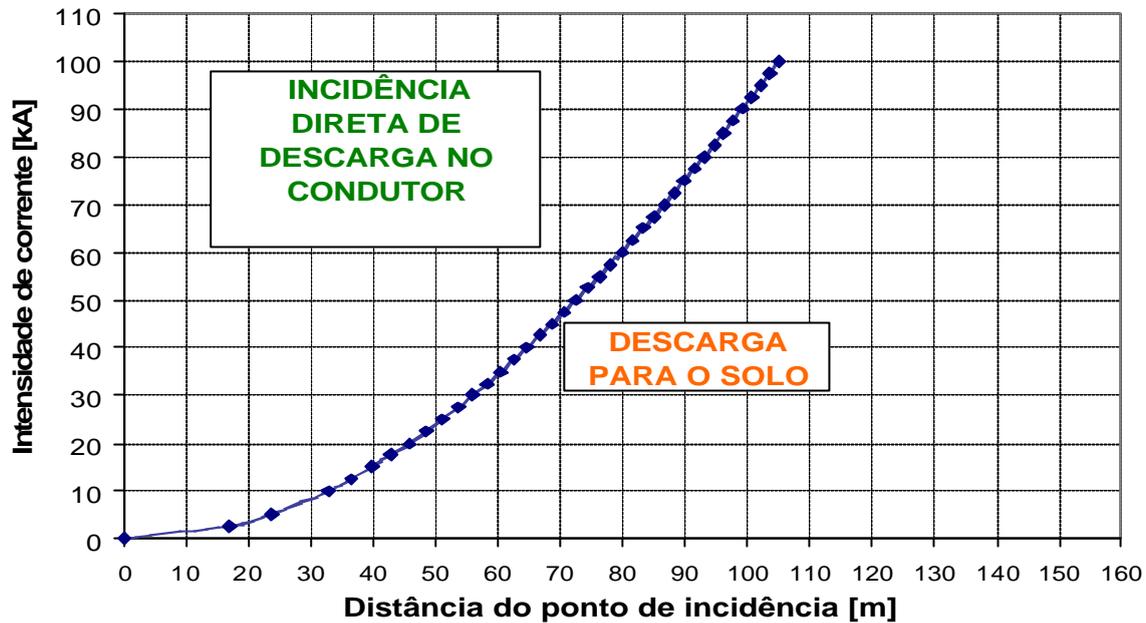


Figura-2.5: Gráfico de Distância Crítica para Determinação do Número de Descargas Diretas na Linha

Eriksson em sua pesquisa comprovou que existe uma relação entre a altura do poste e a incidência de descargas diretas nas estruturas [ERIKSSON, 1987a]. Essa relação permite estimar o número de descargas diretas na linha por ano para uma linha não blindada e em terreno aberto. A relação é apresentada na equação (2.6).

$$N = N_G \left(28 \times h^{0,6} + b \right) / 10 , \quad (2.6)$$

Onde: N_G = densidade de descargas [número de descargas/km²/ano],
 h = altura do poste [m],
 b = afastamento dos condutores na cruzeta (largura da estrutura) [m],
 N = número de descargas [interrupções/100km/ano].

A formula desenvolvida por Eriksson constitui uma alternativa ao modelo eletrogeométrico [IEEE, 2004]. Sendo, que para postes até 15m, o número de descargas diretas definidos pelo modelo eletrogeométrico são próximos dos valores calculados pela equação de Eriksson.

As linhas de distribuição da CEMIG possuem postes com altura variando de 9 a 13 m [CEMIG, 1997a]. A partir da equação (2.6) e dos valores de altura de postes padronizados pela CEMIG pode-se estimar o número de descargas diretas nas estruturas. O resultado é mostrado na Figura 2.6.

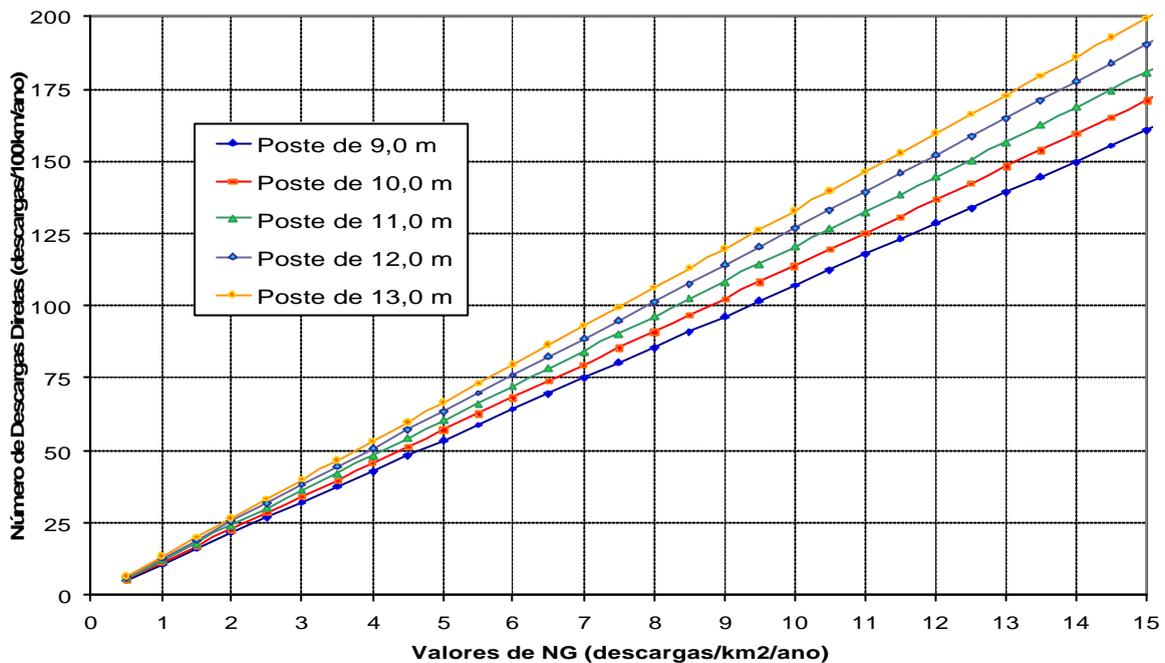


Figura-2.6: Gráfico – $N_G \times$ Número de descargas diretas/100km/ano.

Por outro lado, árvores, edificações e objetos próximos às linhas e as alturas relativas dos mesmos são fatores determinantes do número de descargas diretas nas linhas de distribuição. Esses objetos podem interceptar muitas descargas que poderiam cair diretamente na estrutura. As descargas interceptadas por objetos próximos passam a influenciar o desempenho das redes de forma indireta, ou seja, aumentando o efeito das tensões induzidas.

A exposição de uma linha de distribuição ao impacto de descargas atmosféricas depende de quanto essas se destacam no terreno. Em geral, estruturas localizadas em áreas limpas ou descampadas serão mais afetadas por descargas atmosféricas, do que aquelas circundadas por objetos próximos (árvores ou edifícios). O fator de blindagem (S_f) é definido como sendo a porção da linha protegida por objetos próximos. Dessa forma, o número de descargas (N_s) que podem atingir a linha a partir de N descargas incidentes é dado pela equação (2.7).

$$N_s = N \times (1 - S_f) \quad (2.7)$$

Um fator de blindagem 0.0 representa uma linha em um terreno plano sem blindagem por objetos próximos, e um fator 1.0 representa uma linha totalmente blindada de descargas diretas [IEEE, 2004].

Para se determinar o número de descargas para uma linha blindada por objetos próximos, todos os objetos localizados a uma distância de quatro vezes a altura da linha devem ser considerados no cálculo. Algum objeto, como árvores ou construções, cuja altura seja igual ou superior à altura da linha poderá reduzir a incidência de descargas diretas. Na prática, adota-se a largura de proteção ou blindagem como duas vezes a altura do objeto [IEEE, 1993a]. A Figura 2.7 apresenta um exemplo do uso da área de blindagem. Nesta figura um objeto de altura h , a uma distância “ x ” da linha de altura H , reduz a área de blindagem da linha de um valor S .

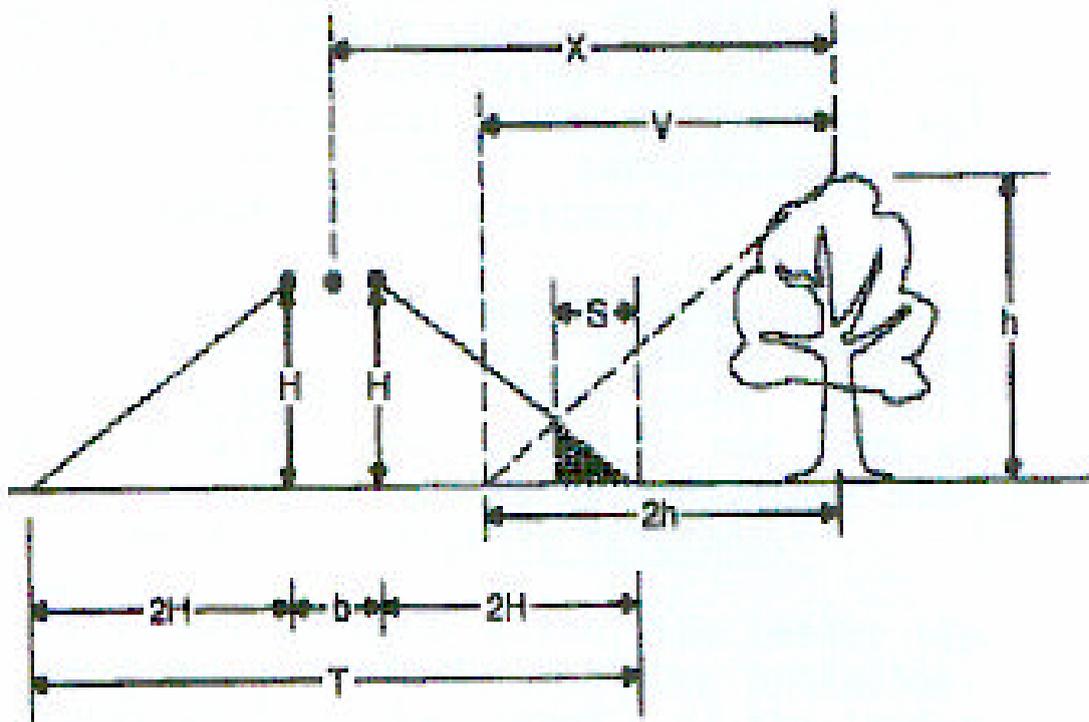


Figura-2.7: Faixa de blindagem – Linha próxima de arborização.

O nível básico de isolamento (NBI) das redes de distribuição de média tensão é relativamente baixo (95kV – rede antiga ou 170kV-rede nova) se comparado com isolamento das linhas de transmissão. Dessa forma, para as descargas diretas é inevitável o desligamento, pois essas descargas em geral causam sobretensões acima do suportável. Para as descargas laterais, onde os efeitos são de menor intensidade, pode-se adotar técnicas de forma a reduzir significativamente o número de desligamentos das redes de distribuição.

As sobretensões induzidas possuem o valor máximo em torno de 300kV [ERIKSSON, 1987b]. Dessa forma, as tensões induzidas passam a ser um parâmetro importante no desempenho das linhas de distribuição. 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 para o condutor fase. Segundo o guia esse valor varia de 0.6 a 0.9 [IEEE,2004].

O cálculo da tensão induzida [RUSCK, 1957] permite obter a máxima tensão induzida (V_{MAX}), em um condutor infinito sem descontinuidades, provocada por uma descarga próxima da linha (equação 2.8):

$$V_{Max} = \frac{Z_o I_o h}{y} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{n}{n_o} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{n}{n_o} \right)^2}} \right\}, \quad (2.8)$$

onde

- I_o = Corrente de pico de descarga,
- h = Altura media da linha em relação ao solo,
- y = Distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha,
- v = Velocidade de propagação da onda de descarga,
- v_o = Velocidade da luz,
- Z_o = Impedância característica.

A equação (2.8) é bastante utilizada pela comunidade científica, tendo sido testada, avaliada e estudada por diversos pesquisadores [LOPES, 1990],[BOAVENTURA, 1990], [STARLING, 1992],[PAULINO et.al, 1993] e [SILVA, 2001]. O seu desenvolvimento matemático baseado nas equações de Maxwell pode ser demonstrado com resultados experimentais. Dessa forma, o modelo proposto por RUSCK mostra-se adequado para o cálculo das tensões induzidas por descargas laterais.

Para estimar a frequência de desligamentos por descargas indiretas o guia do IEEE utiliza o método definido no IEEE Working Group Report [IEEE, 1990], baseado no modelo de Rusck e no trabalho estatístico de Chowdhuri [CHOWDHURI, 1989]. Para tal, é utilizado diagrama do modelo eletrogeométrico apresentado na Figura 2.8.

A mínima distância (Y_{min}), para o qual a descarga não desvia da linha é calculada pela equação (2.9).

$$Y_{MIN} = \sqrt{r_S^2 - (r_G - h)^2} \quad (2.9)$$

A máxima distância (Y_{max}) para cada corrente de pico de cada descarga é calculada resolvendo a equação (2.8) para Y , sendo I_0 o menor limite de corrente e fazendo $V_{Max}=1.5 \times CFO$, sendo o fator 1.5 obtido através da curva $V \times t$ do isolamento. Para valores de tensão induzida $\geq 1.5 \times CFO$, entre os valores de Y_{MIN} e Y_{MAX} , a linha poderá ser desligada por tensão induzida, já para valores de tensão induzida $< 1.5 \times CFO$ a linha não sofrerá perturbação.

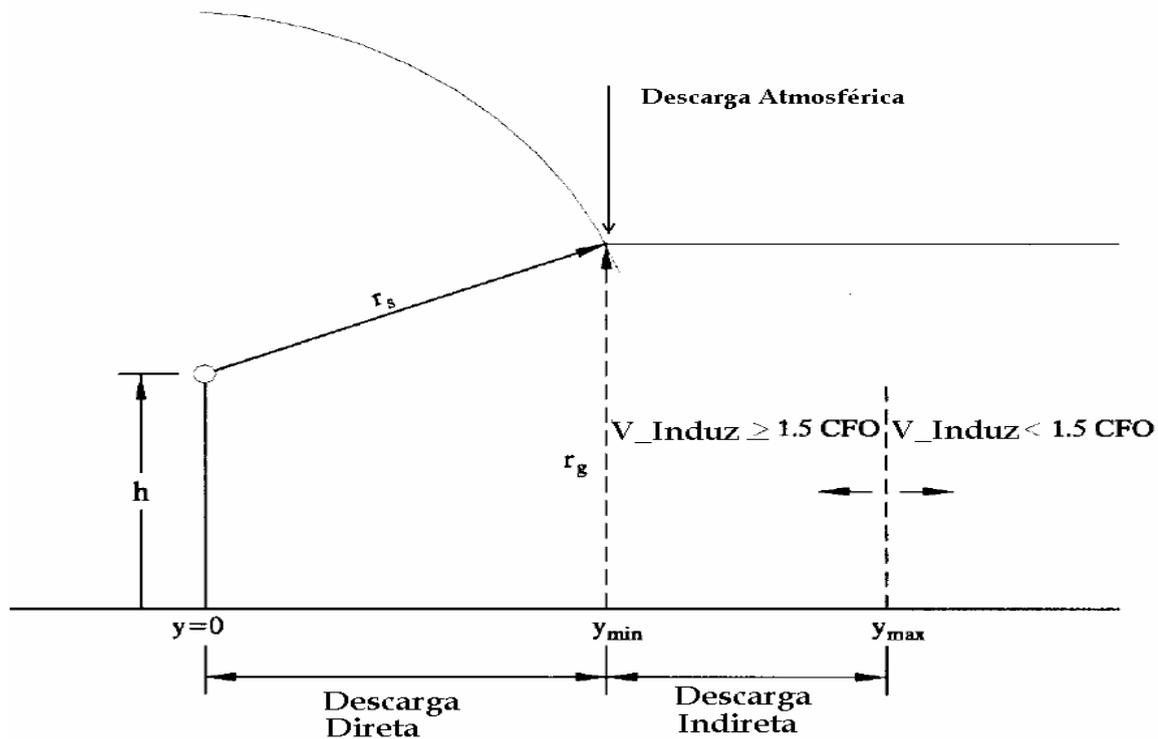


Figura-2.8: Uso do modelo eletrogeométrico e do modelo de Rusck para determinação do número de desligamentos por tensões induzidas e descarga direta

2.5 CÁLCULO DO DESEMPENHO ESTIMADO - PROCEDIMENTO

O guia do IEEE [IEEE, 2004], identifica as principais causas que influenciam no desempenho das redes de distribuição frente a descargas atmosféricas, e propõe opções para a redução do número de interrupções.

O procedimento de cálculo do desempenho estimado utilizado neste trabalho pode ser dividido nas seguintes etapas:

1ª. Cálculo das Descargas Diretas (F_d): para essa etapa é realizado o cálculo do número de descargas diretas na estrutura (F_d) através da equação (2.6). No cálculo das descargas diretas foram considerados dois valores extremos de fator de blindagem: 0,01 representando uma linha sem blindagem e 0,99 representando uma linha totalmente blindada. Para efeito de cálculo foi considerada a variação 0.05 para o fator de blindagem. A definição desses dois fatores de blindagem, valores extremos, tem por objetivo avaliar o grau de blindagem médio do alimentador em estudo, de acordo com o guia.

2ª. Cálculo das Descargas Indiretas (F_i): para o cálculo do número de descargas indiretas considerar a seguinte seqüência do processo de cálculo:

- Cálculo da distribuição de probabilidade acumulada da corrente de pico através da equação (2.2);
- Cálculo da distância máxima (Y_{MAX}) realizada através da equação (2.8), para cada valor de corrente de pico (I_o) para a qual a descarga pode produzir uma disrupção na linha;
- Cálculo da distância mínima (Y_{MIN}) para a qual a descarga não irá desviar da linha. Cálculo realizado através da equação (2.9).
- Cálculo do número de desligamentos por 100km de linha por ano. Este cálculo deve ser realizado considerando a somatória das contribuições para todos os intervalos considerados, e expressos pela equação (2.10).

$$F_i = 2 \times \sum_{i=1}^{200} (y_{i_{max}} - y_{i_{min}}) \times N_G \times P_i \times 10^{-3} \quad (2.10)$$

Onde:

$y_{i_{max}}$ = máxima distância para o qual a descarga não provoca tensão induzida;

$y_{i_{min}}$ = mínima distância crítica;

N_G = densidade de descargas;

P_i = distribuição de probabilidade acumulada para corrente I.

F_i = número de desligamentos/100km/ano

3ª. *Cálculo do Número Total de Desligamentos (F_t)*: para o cálculo do número total de desligamentos, foi considerada a contribuição das descargas diretas e indiretas (equação 2.11), conforme exemplo de aplicação apresentado no Anexo A do guia [IEEE, 2004].

$$F_t = F_d + 4 \times F_i \quad (2.11)$$

Onde:

F_t = número total de desligamentos [desligamentos/100km/ano];

F_i = número de desligamentos por descarga indireta;

F_d = número de desligamentos por descargas diretas.

A partir da metodologia descrita no guia do IEEE Standard 1410, pode-se determinar o número de desligamentos para um circuito aberto aterrado (sem blindagem) e para um circuito blindado por árvores e/ou edificações. Segundo o guia, o método descrito constitui uma forma simplificada para determinação do número de desligamentos para uma linha de distribuição provocada por uma descarga próxima [IEEE, 2004].

2.6 ESTADO DA ARTE

Desde os anos 1930, as pesquisas sobre descargas atmosféricas têm sido motivadas pela necessidade de redução de seus efeitos no sistema elétrico. Diversos pesquisadores têm publicado trabalhos, cujo tema principal é o desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas.

Em 1950, o AIEE Committee publica um trabalho propondo uma metodologia para o cálculo do desempenho frente a descargas atmosféricas para linhas de transmissão até 230kV [AIEE, 1950].

Em 1954, Golde realiza uma investigação das sobretensões provocadas por descargas atmosféricas em linhas de distribuição [GOLDE, 1954]. Neste trabalho, são analisados diversos aspectos das sobretensões em linhas de distribuição, entre os quais o mecanismo de formação da descarga atmosférica, o cálculo do raio de atração para os diversos tipos de linha, cálculo das amplitudes dos surtos indiretos, e a determinação da frequência de ocorrência dos surtos de descargas direta e indireta.

Em 1957, S. Rusck estabelece um modelo de cálculo de tensões induzidas para linhas, baseado nas equações de Maxwell permitindo calcular a máxima tensão induzida em uma linha de distribuição provocada por uma descarga incidindo nas suas proximidades [RUSCK, 1957].

CAPÍTULO 2 – DESEMPENHO ESTIMADO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO 17 FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Em 1982, o Electric Power Research Institute (EPRI) apresenta a 2ª. Edição do “Transmission Line Reference Book”, onde o capítulo 12 é dedicado ao cálculo do desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas [ANDERSON, 1982].

Em 1984, J. O. S. Paulino e C. A. L. Brandão publicam um trabalho de melhoria de desempenho de redes de distribuição. Esse trabalho apresenta um estudo de sobretensões devido a descargas atmosféricas, sendo calculado o desempenho das Redes de Distribuição, propondo alternativas para melhorar o desempenho das redes. Também, são apresentados os ensaios realizados em estruturas com cruzetas de 2400mm (padrão CEMIG), em postes de madeira e concreto, determinando-se o NBI das mesmas e os pontos fracos de cada uma delas [PAULINO, 1984].

Em 1987, Eriksson e Anderson publicam um estudo detalhado da incidência de descargas no sistema elétrico [ERIKSSON, 1987a]. Esse trabalho apresenta a relação entre o número de trovoadas por ano e a densidade de descargas. No mesmo ano, apresenta realiza um estudo propondo mudanças ao modelo eletrogeométrico até então utilizado [ERIKSSON, 1987b].

Em 1989, Chowdhuri publica um trabalho propondo um método para o cálculo do número de interrupções causadas por descargas próximas ao solo [CHOWDHURI, 1989].

Em 1990, Mousa e Srivastava publicam um trabalho propondo um modelo de cálculo de incidência de descargas em linhas de energia. Esse trabalho apresenta uma nova proposta de modelo eletrogeométrico [MOUSA e SRIVASTAVA, 1990].

Em 1990, são realizadas três dissertações de mestrado na UFMG, tendo como principal assunto cálculo de tensões induzidas em linhas [LOPES, 1990], [BOAVENTURA, 1990], e [FONSECA, 1990]. Lopes realizou a implementação da teoria de Rusck para uma linha finita e multi-aterrada, tendo desenvolvido uma metodologia de cálculo baseada na substituição das descontinuidades por fontes de correntes equivalentes, fazendo com que os seus efeitos fossem simulados em um programa de cálculo de transitórios. Boaventura realizou a investigação do fenômeno da tensão induzida utilizando técnicas de modelo reduzido em escala 1:200. Finalmente, Fonseca realizou o cálculo das tensões induzidas numa linha unifilar infinita com solo de resistividade nula, utilizando os modelos de Rusck e Uman, e comparando os resultados das simulações com os valores de medição.

Em 1991, A CEMIG publica o Estudo de Distribuição (ED-2.21) com a definição dos novos padrões de estruturas com nível básico de isolamento elevado [CEMIG, 1991].

Em 1991, o Grupo de Trabalho do Committee 33 do IEEE publica o guia para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão. Este trabalho constitui um dos documentos mais completos, apresentando alguns dados de medição de descargas, avaliação dos valores de densidade de descarga, parâmetros de descargas atmosféricas (forma de onda, tempo de crista, análise estatística da forma de onda, entre e outros), incidência de descarga e blindagem da linha, representação de modelos e estudo do fenômeno “backflashover” em linhas de transmissão [CIGRE, 1991].

Em 1992, R. P. Starling realiza a dissertação de mestrado na UFMG, com a abordagem na teoria de Rusck e a aplicação de modelos probabilísticos para o cálculo de tensões induzidas. Nesse trabalho, é realizada a aplicação do método de Monte Carlo para os dados de parâmetros de descarga e a sua implementação no algoritmo de cálculo de tensões induzidas em uma linha finita, desenvolvido por Lopes [LOPES, 1990]. São realizadas simulações do comportamento de uma linha real e comparados os resultados de medições realizadas nesta linha ao longo de dois anos [STARLING, 1992].

Em 1993, o Comitê de Transmissão e Distribuição do IEEE publica um relatório cujo tema é o cálculo do desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Este foi o primeiro trabalho de cálculo de desempenho de linhas, publicado pelo IEEE, cuja abordagem foi para linhas de distribuição [IEEE, 1993a].

Em 1993, é publicado um adendo ao relatório do Grupo de Trabalho do Committee 33, publicado em 1991. Neste trabalho são abordados a incidência de descargas diretas em linhas, da influência do fator de blindagem, os principais dos parâmetros das descargas, os efeitos das descargas próximas às linhas e no final é apresentado o procedimento de cálculo de desempenho [IEEE, 1993b].

Em 1997, o IEEE publica um guia de cálculo de desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Este trabalho aborda, de forma ampla, os principais parâmetros que influenciam o desempenho de linhas de distribuição [IEEE, 1997a]. No mesmo ano o IEEE publica o Standard 1243. O guia apresenta o cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. São discutidos os efeitos do tipo de isolamento, blindagem, aterramento e do tipo de estrutura no desempenho das linhas de

transmissão. Finalmente, é apresentada a aplicação do programa FLASH [IEEE, 1997b].

Em 2000, Melioupoulos e Kennedy, publicam um trabalho onde é realizado o estudo de desempenho para linhas de distribuição considerando a aplicação do Método de Monte Carlo [MELIOUPOULOS e KENNEDY, 2000].

Em 2001, J.P. Silva realiza a defesa da tese de Doutorado na UFMG, abordando a implementação do cálculo das tensões induzidas no EMTP. É desenvolvida uma metodologia RUSCK-EMTP para o cálculo de tensões induzidas, e implementada em uma linha com dois condutores verticais, variando os diversos parâmetros de descargas e observando a influência nos resultados obtidos. Os resultados são comparados com os do modelo em escala reduzida do CRIEPI e com as medições realizadas numa linha experimental do projeto desenvolvido pelo EPRI [SILVA,2001].

Em 2001, Nucci e Paolone publicam um trabalho comparativo de cálculo de tensões induzidas, considerando o modelo de Rusck e o modelo desenvolvido pelos autores, utilizando o programa LIOV, desenvolvido pela Universidade de Bologna-Itália, para o cálculo das tensões induzidas [NUCCI e PAOLONE, 2001]. Adicionalmente, em 2003, os autores, publicam outro trabalho onde realizam a comparação dos modelos de cálculo de tensões induzidas, tendo como base o procedimento definido pelo IEEE Standard 1410 [NUCCI e PAOLONE, 2003]

Em 2003, Savic propõe um método estatístico para o cálculo do número de falhas de isolamento em sistemas de distribuição devido a descargas diretas ou descargas laterais na estrutura [SAVIC, 2003].

Em 2004, é publicada a revisão do IEEE Standard 1410, apresentando opções para a redução do número de desligamentos por descargas atmosféricas em linhas de distribuição. O texto aborda aspectos do desempenho de linhas considerando os parâmetros de descargas, descargas diretas e indiretas, nível de isolamento das linhas, proteção das linhas com cabo pára-raios, e uso de pára-raios [IEEE, 2004]. O guia sintetiza toda a metodologia de cálculo de desempenho de linhas de distribuição, sendo detalhado alguns itens utilizados neste trabalho para o cálculo de desempenho estimado de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas.

3. DESEMPENHO REAL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para o estudo do desempenho real de redes de distribuição frente a descargas atmosféricas, utilizando dados da operação do sistema, topologia da rede e de incidência de descargas atmosféricas.

3.2 DADOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A CEMIG em conjunto com o SIMEPAR, FURNAS e INPE, constituiu uma Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), conforme apresentado na Figura 3-1. A interligação dos sistemas permitiu um melhor índice de detecção, maior precisão na localização e uma ampliação da área de cobertura do sistema, passando a abranger as regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil.



Figura-3.1: Localização dos sensores da rede RINDAT

Dois tipos básicos de sensores são utilizados pela rede RINDAT: LPATS e IMPACT. Enquanto os sensores LPATS registram somente a componente elétrica da radiação produzida pelas descargas, os sensores IMPACT registram tanto a componente elétrica como magnética. Além disso, os sensores apresentam diferenças na forma de processamento para determinar a localização e demais características das descargas. Após o registro dos sinais de descarga pelos sensores, esses são enviados às centrais de processamento para obter-se a localização e características das descargas. [DIAS, 2002]

A precisão das informações de localização das descargas atmosféricas do sistema é, em média, de 500 metros dentro do perímetro definido pela posição das estações remotas de recepção. O SLT opera através do sistema de posicionamento global (GPS), o qual proporciona informações de temporização de raios com resoluções de até 300 nanosegundos [DIAS, 2002].

Entre os principais parâmetros de descargas fornecidos pelo SLT destacam-se o ponto de localização da descarga, o instante de ocorrência do evento(ano/mês/dia e hora/minuto/segundo/milésimo), a amplitude da corrente de retorno, valores de tempo de frente e cauda, di/dt , multiplicidade da descarga, e a largura do pulso da forma de onda eletromagnética irradiada pelo fenômeno.

Para extração dos dados das descargas do SLT, foi considerada a condição padrão de operação do sistema. O ponto de incidência da descarga é determinado pela central de processamento do SLT utilizando uma técnica denominada interseções circulares [DIAS, 2002]. A localização do ponto de incidência da descarga é expressa em coordenadas geográficas (Latitude e Longitude), convertidas nesse trabalho para coordenadas UTM (Universa Transversa Mercator), expresso em coordenadas Norte (N) e Leste (E). Essa conversão é necessária, pois os dados do Sistema de Gerência de Redes da CEMIG, estão geo-referenciados na base cartográfica em UTM [CEMIG, 2002], [CEMIG, 2004].

O formato da base de dados de descarga, utilizados nesse estudo, é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela -3.1: Formato da base de dados de descarga

Coord_N	Coord_E	Corrente	T_frente	T_cauda	di_dt	Ano	Mês	Dia	Hora	Minuto	Segundo	Milésimo
657293,22	7674177,00	-13	3	51	0	2003	1	2	20	12	10	357404900
653908,45	7674596,23	7	1	51	0	2003	1	2	21	24	45	194975100
653013,33	7673342,41	16	2	51	0	2003	1	4	4	5	8	49623600
657060,49	7671555,31	-10	3	51	0	2003	1	13	18	13	31	897396700

3.3 DADOS DA OPERAÇÃO DO SISTEMA

O levantamento de dados da operação é realizado através do Sistema de Controle de Interrupções da CEMIG (CONINT) [CEMIG, 1997b]. O Sistema CONINT é um programa de registro e controle das interrupções da Distribuição. A cada evento de interrupção, as informações da ocorrência são armazenadas. Os próprios eletricitistas regionais das áreas de operação e manutenção são responsáveis pelo registro das informações utilizando um POP (Procedimento Operacional Padrão) específico para execução da tarefa. Após a entrada manual de dados, faz-se a análise de consistência dos dados emitindo relatórios específicos.

As informações de interrupções utilizadas no desenvolvimento desse trabalho foram extraídas de relatórios do CONINT. Depois de extraídos, os dados foram classificados segundo os grupos de causas de ocorrências:

- *GRUPO 1: DETALHAMENTO DAS CAUSAS* – Essa tabela possui 8 (oito) grupos de causas de interrupções. Cada grupo possui um conjunto de eventos, que pode ser apontado como origem da causa da interrupção.

Os grupos de causas de interrupções são classificados em: (1) Causas externas a distribuição, (2) Programada, (3) Fenômenos Naturais, (4) Meio Ambiente, (5) Falha Humana (Turma própria), (6) Falha Humana (Turma empreiteira), (7) Falhas em Equipamentos e (8) Outras Causas.

- *GRUPO 2: EQUIPAMENTO* – Essa tabela informa qual equipamento operou ou falhou e a causa da falha/operação. Os principais equipamentos cadastrados são: regulador de tensão, autotransformador, chave fusível repetidora, chave a óleo, chave fusível, transformador, rele de proteção, banco de capacitores, cobertura protetora, transformador autoprottegido, disjuntor, religador, seccionalizador, trafo de aterramento, transformador convencional. O objetivo dessa tabela é classificar os equipamentos por causa de falha.
- *GRUPO 3: CONDIÇÃO ATMOSFÉRICA* – Essa tabela informa a condição atmosférica, quando da ocorrência da interrupção. São as seguintes condições atmosféricas classificadas: tempo limpo, tempo encoberto, chuva, tempestade, ventania, indefinido.

- **GRUPO 4: TIPO DE REDE** – Essa tabela informa qual o tipo de rede onde ocorreu interrupção. As redes de distribuição são classificadas em rede convencional urbana, rede convencional rural, rede protegida urbana, rede protegida rural, rede isolada urbana, rede isolada rural e subterrânea.
- **GRUPO 5: TIPO DE TRECHO** – Essa tabela informa em qual trecho da linha ocorreu a interrupção. Os trechos são classificados em tronco, derivação e rede secundária.

A análise dos dados foi realizada através da aplicação de filtros de informação nos relatórios do CONINT, sendo extraídas as informações de cada alimentador considerando somente os fenômenos naturais do GRUPO 1; religador automático, seccionador e chave fusível repetidora no GRUPO 2; chuva, tempestade e ventania no GRUPO 3, rede convencional no GRUPO 4 e a interrupção no trecho tronco ou em ramais no GRUPO 5.

O formato da base de dados do Sistema CONINT é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela-3.2: Formato da base de dados de interrupções

Nº Doc.	Tipo	Nº da	Início	Final	Duração	Grupo/ Causa	RA	Equip.	Operado	CA.	TT.	TR.	SE/Alimentador	Transformador
41073	I	290589	01/01/2001 00:00:00	01/01/2001 00:00:00	0,00	8/7	3	22	926810	6	4	2	RCA / 10	
41074	I	290589	01/01/2001 00:00:00	01/01/2001 00:00:00	0,00	8/7	3	22	926810	6	4	2	RCA / 10	
41076	I	290589	01/01/2001 00:00:00	01/01/2001 00:00:00	0,00	8/7	3	22	926810	6	4	2	RCA / 10	
41075	I	290589	01/01/2001 00:00:00	01/01/2001 00:00:00	0,00	8/7	3	22	926810	6	4	2	RCA / 10	
3535574	I	254490	02/01/2001 16:22:00	02/01/2001 17:17:00	55,00	3/2		7		3	6	2	RCA / 10	7-21831-1-10
3550130	I	254576	03/01/2001 16:17:00	03/01/2001 17:43:00	86,00	3/2		7		3	6	2	RCA / 10	7-10579-1-10
3554920	I	280859	04/01/2001 05:42:00	04/01/2001 09:43:00	241,00	3/2		24	77777	3	5	2	RCA / 10	
3560004	I	281236	04/01/2001 12:42:00	04/01/2001 15:53:00	191,00	3/2		24	77777	3	5	2	RCA / 10	
3561995	I	257561	04/01/2001 14:23:00	05/01/2001 18:29:00	1.686,00	3/2		7		3	6	2	RCA / 10	7-77210-1-10
3575155	I	281362	04/01/2001 19:24:00	05/01/2001 16:42:00	1.278,00	3/2		24	99999	3	5	2	RCA / 10	
3583846	I	257981	06/01/2001 11:57:00	06/01/2001 12:41:00	44,00	4/3		7		1	6	1	RCA / 10	9-27247-1-25
3584438	I	257997	06/01/2001 14:16:00	06/01/2001 15:37:00	81,00	3/2		7		2	6	2	RCA / 10	7-94465-1-5
3584916	I	258007	06/01/2001 16:40:00	06/01/2001 18:48:00	128,00	3/2		7		2	6	2	RCA / 10	7-11498-1-15
3614887	I	258140	09/01/2001 09:07:00	09/01/2001 10:27:00	80,00	8/9		7		2	6	2	RCA / 10	7-23543-1-5
3621967	I	258173	09/01/2001 15:16:00	09/01/2001 16:01:00	45,00	8/9		7		2	6	2	RCA / 10	7-14302-1-15
3628304	I	285648	10/01/2001 07:13:00	10/01/2001 09:25:00	132,00	3/2		24	99999	2	5	2	RCA / 10	
3649074	I	285938	11/01/2001 13:36:00	11/01/2001 13:59:00	23,00	3/2		24	74371	3	5	2	RCA / 10	
3659169	I	286026	12/01/2001 09:43:00	12/01/2001 11:50:00	127,00	8/9		24	77780	2	5	2	RCA / 10	
3672957	I	286414	13/01/2001 09:17:00	13/01/2001 14:25:00	308,00	3/2		24	77908	2	5	2	RCA / 10	

Após a classificação dos registros, conforme os filtros de informação especificados, todos os eventos foram organizados em ordem cronológica de tempo de acordo com a ocorrência do evento.

3.4 DADOS DE TOPOLOGIA DOS ALIMENTADORES

O Projeto GEMINI é o desenvolvimento de um sistema de apoio às atividades envolvidas na Gerência do Sistema Elétrico de Distribuição. O sistema é composto por um banco de dados geográficos, função de processamento gráfico e de imagens, componentes de entrada e saída de dados e interface gráfica homem/máquina. As informações da rede de distribuição e de mapeamento são cadastradas de forma referenciada ao Sistema de Coordenadas UTM. Dos dois módulos principais do projeto GEMINI, o CARTOR é aquele responsável pela produção e obtenção e atualização de mapeamento em meio digital. A gerência da rede de distribuição fica a cargo do módulo PROLUX. O PROLUX integra em um único banco de dados as Redes de Distribuição Primária e Secundária, informações de clientes, informações de equipamentos de proteção, entre outras e disponibiliza ferramentas para subsidiar as atividades do processo de Distribuição de energia elétrica [CEMIG, 2002], [CEMIG, 2004].

Todos os equipamentos, postes, estruturas, proteção, ramais, consumidores e vãos do sistema elétrico são cadastrados e geo-referenciados. Dessa forma, é possível localizar e extrair a topologia dos alimentadores, com tronco, ramais, vãos, e equipamentos de proteção, sendo possível obter a localização das descargas atmosféricas em relação ao alimentador, identificando, por exemplo, em que trecho do alimentador ocorreu o maior número de descargas; a localização dos equipamentos de proteção do alimentador, e a identificação da área de densidade de descarga expresso no mapa isoceraúnico.

Para a localização e representação geográfica do alimentador (tronco e ramais), foi utilizado o programa de mapeamento geo-referenciados MAPINFO. O MAPINFO permite a representação de dados geográficos e tabelas no mesmo ambiente.

Para a definição da topologia do alimentador, foram utilizados os dados extraídos dos relatórios do Sistema de Gerência de Redes da CEMIG, GEMINI-PROLUX. Desses relatórios são retirados todos os pontos do alimentador (tronco e ramais) geo-referenciados, as coordenadas dos pontos fonte e carga, tamanho do vão (distância calculada), bitola, tipo e seção do cabo condutor no vão. A tabela 3.3 apresenta o formato da base de dados dos alimentadores utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Tabela-3.3: Formato da base de dados dos alimentadores

Tipo de Condutor	Bitola Condutor	N-Fonte	E-Fonte	N-Carga	E-Carga	Dist.Calc.
Alumfnio-CA	336,4 MCM -	622703	7714676	622775	7714681	72,17
Alumfnio-CA	336,4 MCM -	622775	7714681	622740	7714370	312,96
Alumfnio-CAA	336,4 MCM -	622740	7714370	622857	7714315	129,28
Alumfnio-CAA	336,4 MCM -	622857	7714315	623737	7713911	968,31
Alumfnio-CA	336,4 MCM -	623737	7713911	623824	7713860	100,85
Alumfnio-CA	1/0 AWG - 53,43	623824	7713860	624035	7713670	283,94
Alumfnio-CAA	1/0 AWG - 53,43	624035	7713670	624106	7713608	94,26
Alumfnio-CAA	1/0 AWG - 53,43	624106	7713608	624129	7713588	30,48
Alumfnio-CAA	1/0 AWG - 53,43	624106	7713608	624173	7713684	101,32
Alumfnio-CAA	1/0 AWG - 53,43	624106	7713608	624090	7713591	23,35
Alumfnio-CA	4 AWG - 21,15 mm ²	624090	7713591	624042	7713515	89,89
Alumfnio-CA	2 AWG - 33,63 mm ²	624042	7713515	623914	7713273	273,77
Alumfnio-CAA	1/0 AWG - 53,43	624129	7713588	625150	7715401	2080,72
Alumfnio-CAA	4 AWG - 21,15 mm ²	625150	7712790	624550	7712660	613,92
Alumfnio-CAA	4 AWG - 21,15 mm ²	625150	7712790	625210	7712375	419,31

As informações dos equipamentos instalados ao longo do alimentador são também extraídas do banco de dados do GEMINI-PROLUX, tais como: nome do alimentador, número do equipamento, tipo de equipamento, corrente nominal de operação, capacidade de interrupção, operação (fechado ou aberto), condição planejada de operação, tipo de operação (com carga ou sem carga), fuso e coordenadas. O formato da base de dados de equipamentos utilizado no desenvolvimento desse trabalho é apresentado na Tabela 3.4.

Tabela-3.4: Formato da base de dados de equipamentos

Alim	N.º	Tipo	Corr Nom	Cap Int	Oper	Planej	Tipo Abertura	ENDEREÇO	Fuso	Abs	Ord
CNLU07	35319	Chave Fustvel	100	10.0	F	F	Load Buster	PROXIMO CONSUMIDOR 07 - FL 42-17-12	23	623412	7719973
CNLU07	32052	Chave Fustvel	100	10.0	F	F	Load Buster	PX RUR 421715-13 GAGE-LAFAIETE	23	623522	7715093
CNLU07	34329	Chave Fustvel	100	10.0	F	F	Load Buster	DER P/RUA CLEBER CAND D LOBO, 320	23	623525	7717890
CNLU07	116958	Chave Fustvel	100	4.0	F	F	Load Buster	DERIV. AMACRUZ E VIAÇ CRISTO REI	23	623527	7717888
CNLU07	32038	Chave Fustvel	100	10.0	F	F	Load Buster	PX RUR 421715-14 GAGE-LAFAIETE	23	623531	7715127
CNLU07	32871	Chave Fustvel	100	2.0	F	F	Load Buster	PX RUR 421715-77 GAGE-LAFAIETE	23	623534	7715176
CNLU07	32037	Faca Unipolar	400	0.0	F	F	Load Buster	BR 040 23370 (DISMOVE) BARREIRA-LAF	23	623558	7717224
CNLU07	34998	Chave Fustvel	100	10.0	F	F	Load Buster	BR 040, 22500 - CONTAUTO	23	623567	7718033

3.5 CÁLCULO DO DESEMPENHO REAL - PROCEDIMENTO

Essa seção define o procedimento básico para o cálculo de desempenho real dos alimentadores, a partir dos dados de descarga, de operação do sistema e de topologia dos alimentadores.

O cálculo do desempenho real dos alimentadores é realizado em quatro etapas:

- Seleção e identificação dos equipamentos: através dos dados do GEMINI-PROLUX, são selecionados os equipamentos de proteção (religadores, seccionalizadores, e chave fusível repetidora) para o alimentador em estudo.
- Filtragem dos dados da operação (CONINT): nessa etapa, são selecionados, para cada alimentador, os eventos registrados como descarga atmosférica e atuação da proteção (caracterizados pela operação de religadores, seccionalizadores e chave fusível repetidora). Durante a montagem dos filtros de dados, são utilizados como parâmetros de consistência dos filtros a condição atmosférica (Grupo 3), tipo de rede (Grupo 4), e trecho tronco e ramais (Grupo 5).

Para o evento registrado como descarga atmosférica foram consideradas as seguintes condições de filtragem de dados: grupo 1 – fenômeno descarga atmosférica, causa descarga atmosférica e grupo 3 – condição atmosférica – tempo de chuva, tempo encoberto, vento ou tempestades.

Para o evento religamento automático foram consideradas as seguintes condições de pesquisa: grupo 1 – equipamentos de falha – religador automático ou seccionalizador e grupo 2 – religador ou seccionalizador bloqueado. Não foram considerados os religamentos com sucesso, interrupção momentânea, mas somente os registros de interrupção sustentada.

Para os equipamentos de proteção, foi utilizada como chave de acesso a identificação dos equipamentos selecionados nos relatórios do GEMINI-PROLUX.

Depois de selecionados os registros de descarga e de atuação da proteção, são totalizados o número de eventos por mês/ano de forma a estabelecer a relação entre o número de desligamentos/100km/ano \times mês/ano de ocorrência para cada tipo de evento (descarga e/ou atuação da proteção).

- Seleção dos registros de descargas atmosféricas: nessa etapa são selecionados os registros fornecidos pelo SLT agrupados por ano e mês de ocorrência. A partir da definição da área de abrangência do alimentador e dos dados de descargas totalizados por ano, é calculada a densidade de descarga por quilometro quadrado para o ano.
- Obtenção da relação entre o número de interrupções e a incidência de descargas: essa etapa utiliza as informações da filtragem dos dados da operação (CONINT) e dos registros de descargas (SLT). Os dados de ambos os blocos de informação são analisados, tendo como base comum a mesma cronologia de tempo. Dessa forma, pode-se estabelecer uma relação entre a densidade de descarga e o número de interrupções para um determinado alimentador. Os pontos definidos nessa relação são plotados no gráfico de densidade de descargas versus número de interrupções ($N_g \times F_p$) assumindo uma relação linear entre esses eles.

A relação linear entre os dados parte do princípio, que em uma região com elevada densidade de descargas poderá ocorrer um número de desligamentos também elevado. Uma densidade de descargas nula corresponderá a zero em desligamentos por descargas atmosféricas.

Finalmente é realizada a representação da relação entre os valores de densidade de descargas (descarga/km²/ano) e o número de desligamentos (interrupção/100km/ano) considerando-se uma faixa delimitada por duas retas: o limite inferior corresponde aos desligamentos tendo como causa registrada “descarga atmosférica”, e o limite superior corresponde à soma dos desligamentos registrados como “descarga atmosférica” e “atuação da proteção”.

4. RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo apresenta os resultados de um Estudo de Caso desenvolvido a partir das metodologias descritas nos capítulos anteriores. O capítulo inicia-se com a descrição dos alimentadores estudados, em seguida faz-se uma análise de sua exposição a descargas atmosféricas e dos dados de interrupção a partir dos dados da operação. São apresentados os cálculos de desempenho real e estimado, para os alimentadores e os resultados comparados entre si. O capítulo termina com uma discussão de resultados.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO – ALIMENTADORES E DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para a definição da área de estudo foi escolhida a Regional Mantiqueira. O Sistema de Distribuição Regional da Mantiqueira é formado de 35 subestações com 150 alimentadores distribuídos entre essas subestações. A escolha da Regional Mantiqueira se deve a três fatores: o elevado índice de incidência de descargas atmosféricas na região (média de 6,5 descargas/km²/ano), o maior número de sensores na área e a boa eficiência do sistema de localização de tempestades na região de 90 a 95% [DIAS, 2002].

Dentro da Regional Mantiqueira foram escolhidos três alimentadores baseados na extensão total e no nível básico de isolamento dos mesmos. Dois alimentadores estão localizados na região de Conselheiro Lafaiete e um na região de Rio Casca. Conforme apresentado na Figura 4.1. A região apresenta um valor de resistividade média do solo de 1670Ω×m e profundidade equivalente de 12 m [CEMIG, 1992].

O alimentador CNLU1-10, localizado na subestação Conselheiro Lafaiete 1 (CNLU1) da Cidade de Conselheiro Lafaiete (MG), corresponde ao 4º alimentador de um total de 7 alimentadores da SE. Este alimentador possui 439,68 km de extensão, sendo 10,24 km no trecho do tronco e 429,44 km nos ramais (96,13 km trifásicos e 333,31 km monofásicos). Ao longo do alimentador estão instalados 5 religadores automáticos, 4 seccionadores, 2 reguladores de tensão, 1 banco de capacitores, 165 chaves fusíveis, 116 chaves faca e 926 pára-raios de MT (449 no circuito 1Ø e 477 no circuito 3Ø). O alimentador atende a 8065 clientes distribuídos entre as localidades de Catas Altas da Noruega, Ouro Preto, Conselheiro Lafaiete, Ouro Branco, Piranga e Itaperava, possuindo nível básico de isolamento de 95kV ao longo

de toda sua extensão. A Figura 4.2 apresenta o diagrama unifilar do alimentador CNLU1-10.

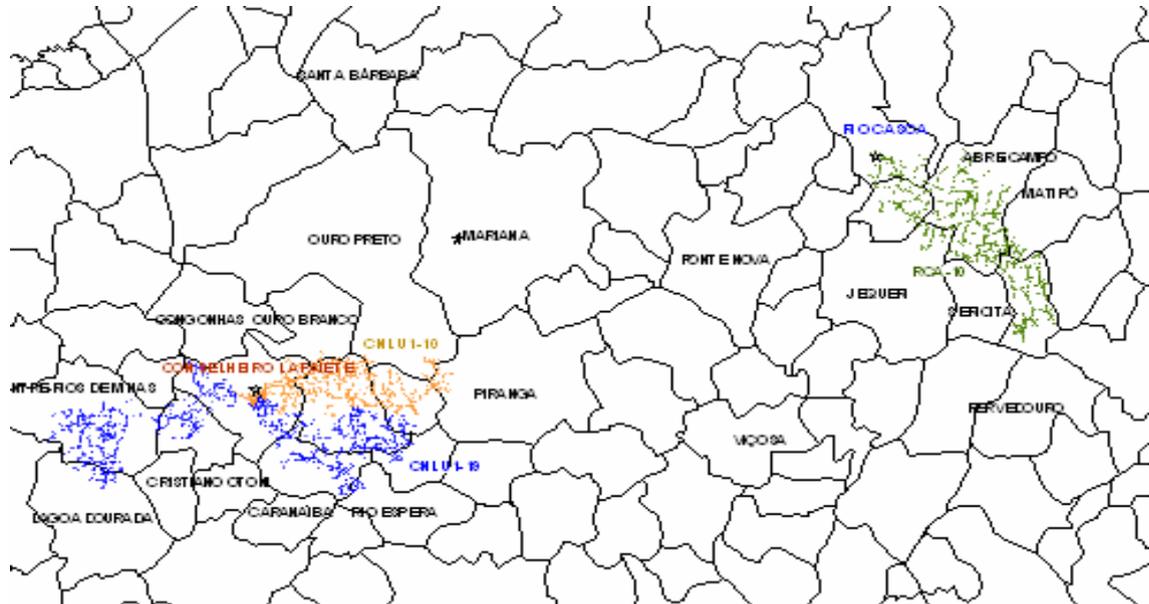


Figura-4.1: Localização Geográfica dos Alimentadores do Estudo de Caso

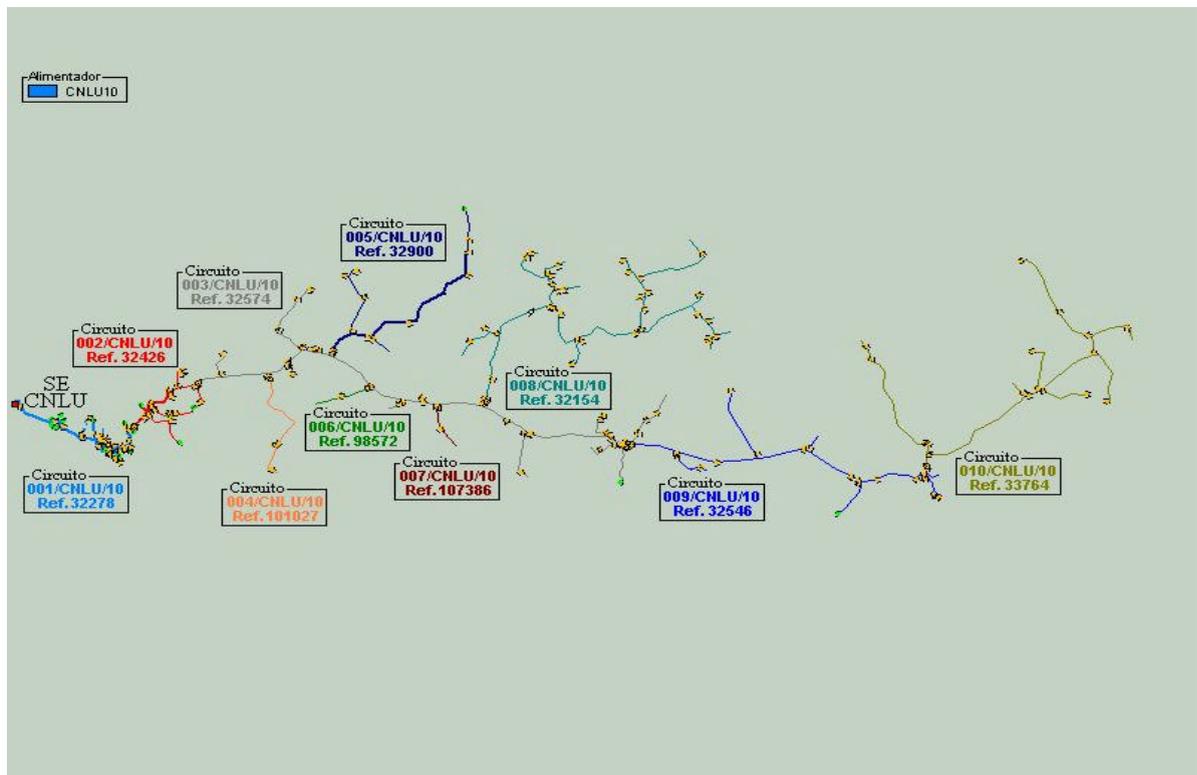


Figura-4.2: Diagrama unifilar do alimentador CNLU1-10.

O segundo alimentador escolhido, RCA-10 está localizado na subestação Rio Casca (RCA) da cidade de Rio Casca (MG). A subestação possui 4 alimentadores, sendo dois alimentadores urbanos (RCA-06 e 07) e dois em área rural (RCA-10 e 11). Este alimentador possui 633,17 km de extensão total, sendo 9,25 km no trecho do tronco e 642,42 km nos ramais (187,10 km trifásicos e 455,42 km monofásicos). Ao longo do alimentador estão instalados 6 religadores automáticos, 2 seccionalizadores, 122 chaves fusíveis, 12 chaves faca e 1742 pára-raios de MT (1220 no circuito 1Ø e 522 no circuito 3Ø). O alimentador atende a 5575 clientes distribuídos entre as localidades de Rio Casca, Santo Antônio do Grama, Abrecampo, Matipó, Jequeri, Pedra Bonita e Santa Margarida, possuindo o NBI de 170kV ao longo de toda sua extensão. A Figura 4.3 apresenta o diagrama unifilar do alimentador RCA-10.

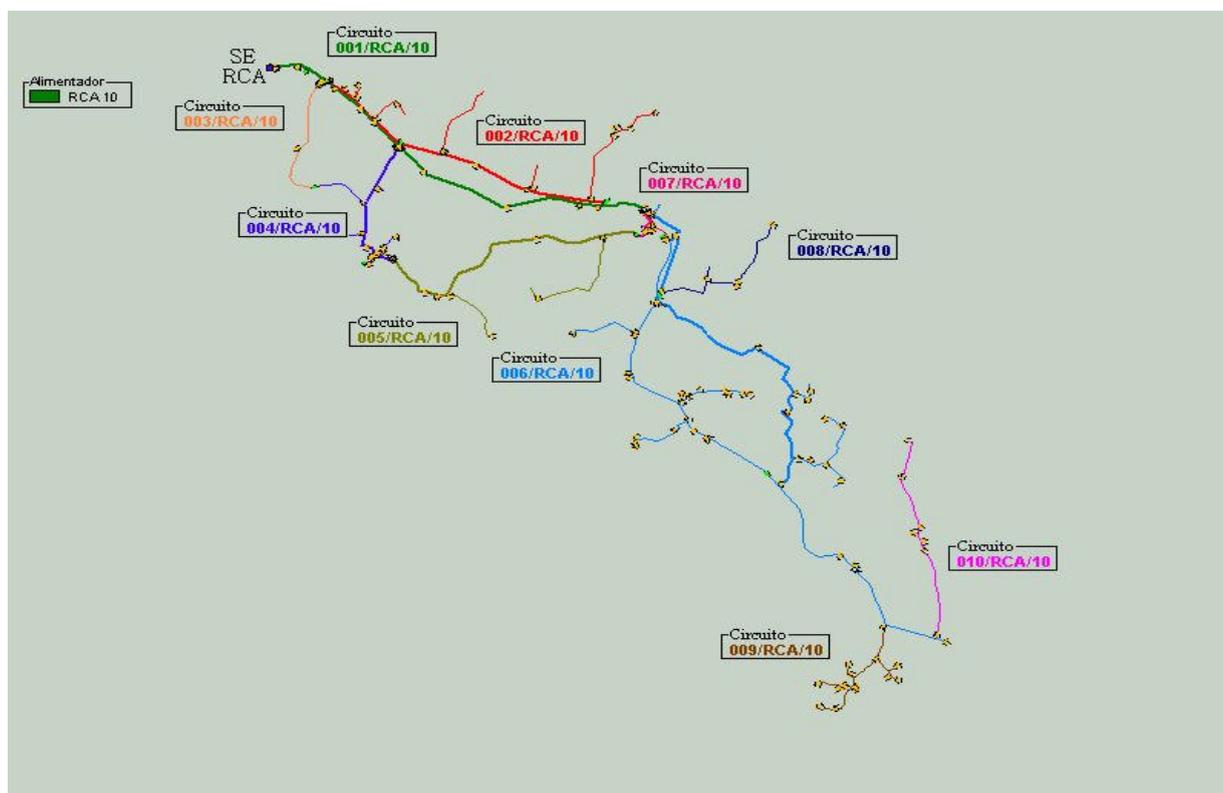


Figura-4.3: Diagrama unifilar do alimentador RCA-10

O terceiro alimentador, CNLU1-19, localizado na subestação Conselheiro Lafaiete 1 (CNLU1), da cidade de Conselheiro Lafaiete (MG), corresponde ao 6º. alimentador da SE, possuindo 786,10 km de extensão total, sendo 11,0 km no trecho do tronco e 775,09 km nos ramais (164,70 km trifásicos e 610,39 km monofásicos). Ao longo do alimentador estão instalados: 1 banco de capacitores, 141 chaves faca, 233 chaves fusíveis, 18

chaves repetidoras de MT, 2 reguladores de tensão, 7 religadores automáticos, 2 seccionadores e 613 pára-raios de MT (367 no circuito 1Ø e 246 no circuito 3Ø). O alimentador atende a 7605 clientes distribuídos nas localidades de Rio Espera, Queluzito, Conselheiro Lafaiete, Entre Rios de Minas, Lagoa Dourada, Lamin, Catas Altas da Noruega, e Santana dos Montes, apresentando um trecho tronco com NBI de 170kV e os demais ramais com NBI de 95kV. A Figura 4.4 apresenta o diagrama unifilar do alimentador CNLU1-19.

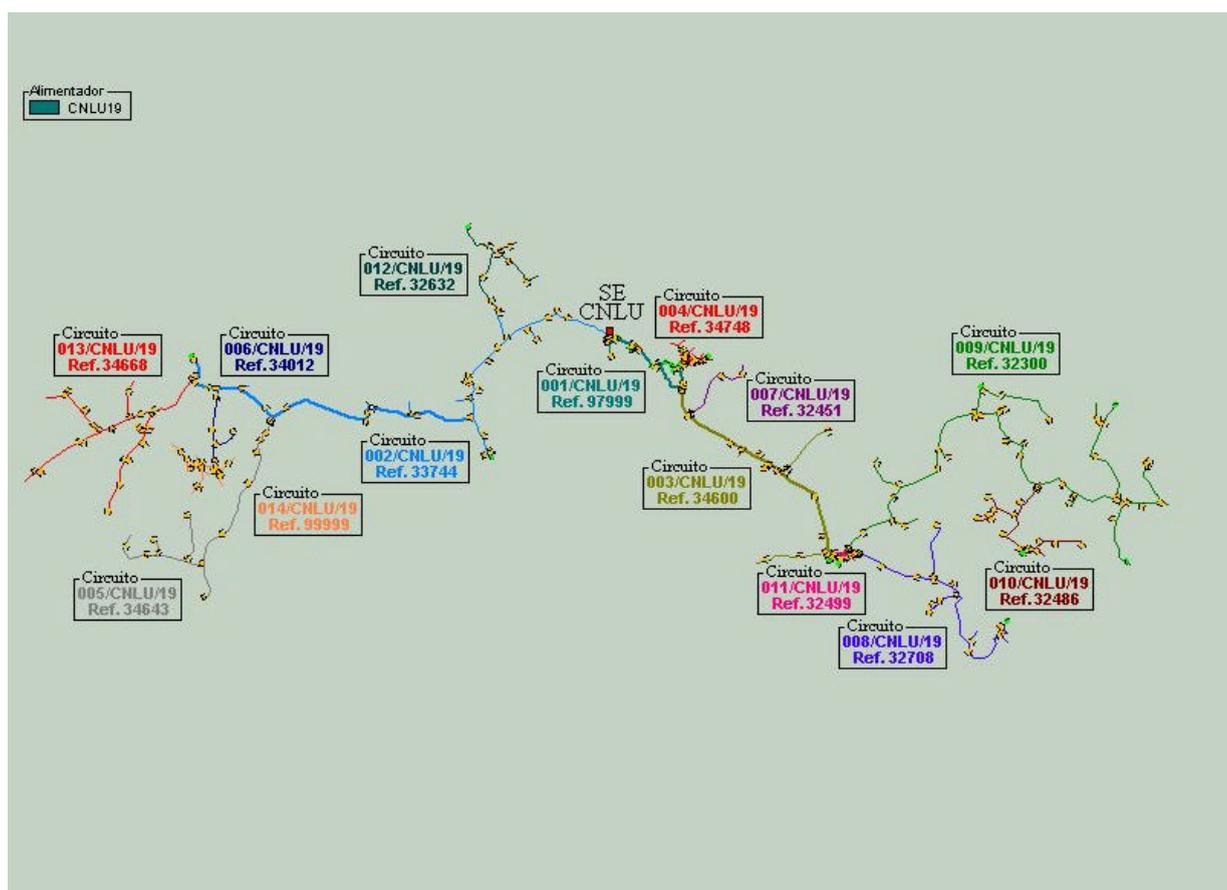


Figura-4.4: Diagrama unifilar do alimentador CNLU1-19

Para o período de estudo, 2001 a 2004, foram registradas 737.747 descargas em uma área de abrangência de 29.100 km². A Figura 4.5 apresenta a incidência mensal de descargas do período. Observa-se que 90% das ocorrências estão entre os meses de setembro a março, correspondendo a estação de chuvas da região sudeste. Para as três estações de chuva, 2001-2002, 2002-2003 e 2003-2004, os valores de pico de incidência de descarga foram: 45.875 em fevereiro de 2002, 54.595 em janeiro de 2003 e 35.445 em fevereiro de 2004.

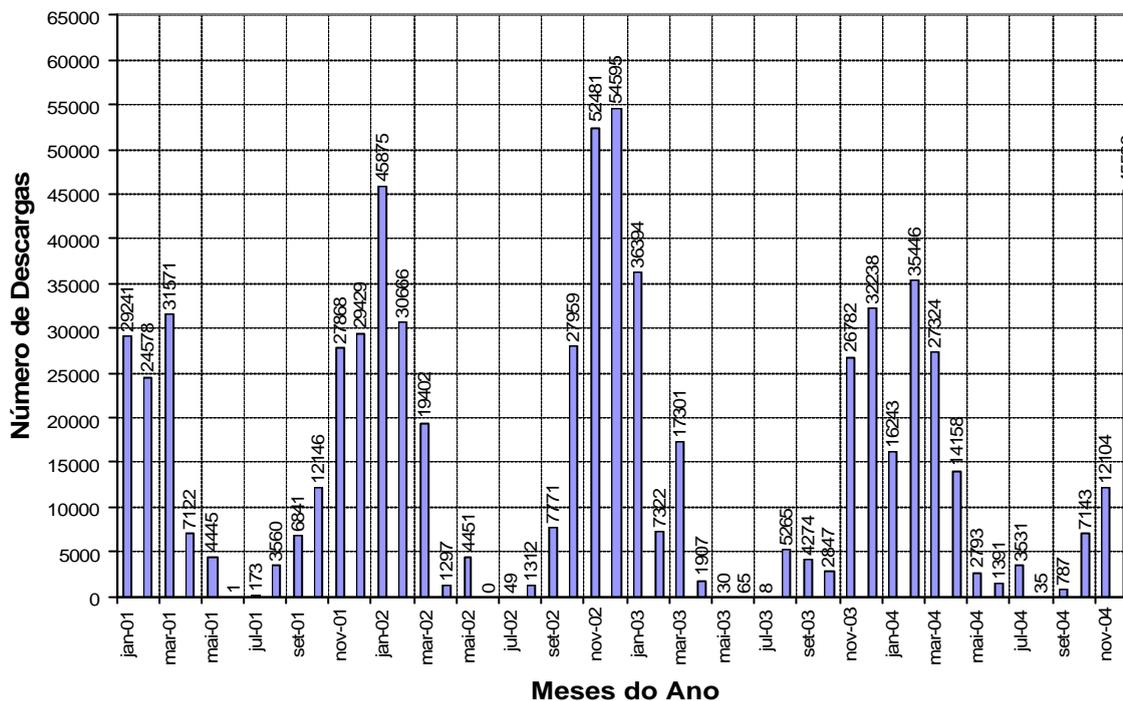


Figura-4.5: Incidência mensal de descargas para período 2001-2004.

A incidência das descargas, quando separadas por períodos anuais, permitem calcular o valor de densidade de descarga (N_G) e comparar com os valores de N_G extraídos dos mapas de curvas isoceraúnicas (valores tabelados). A Tabela 4.1 apresenta a variação anual do N_G e o valor médio para o período de 4 anos, observando-se a característica sazonal do valor de N_G ao longo dos anos.

Tabela-4.1: Quadro comparativo do número de descargas e N_G

ANO	NÚMERO DE DESCARGAS	N_G /ANO
2001	176.975	6,08
2002	245.858	8,45
2003	134.433	4,62
2004	166.481	5,72
2001-2004	737.747	6,22 (1)
Valor do mapa		6,50 (2)

(1) Valor de densidade de descarga calculada para os 4 anos

(2) Valor extraído do mapa de densidade descarga

4.3 ANÁLISE DOS DADOS DE INTERRUPÇÃO DOS ALIMENTADORES

Para a análise dos dados de interrupção foram considerados 56.587 registros do CONINT no período 2001-2004, correspondendo aos dados de interrupção dos alimentadores das Regionais de Conselheiro Lafaiete e Ponte Nova (região de Rio Casca). Na base de dados estão incluídos registros de interrupção programada, acidental, momentânea, sustentada e da geração/transmissão.

O gráfico da Figura 4.6 apresenta a análise de causas de desligamentos agrupadas para os três alimentadores em estudo. Pode-se observar que as causas “fenômenos naturais” e “sistema” (atuação da proteção, religamento automático entre outras causas) correspondem a quase 70% do total das interrupções. Os menores índices de desligamento são devido à falha de equipamento com 2% do total das interrupções.

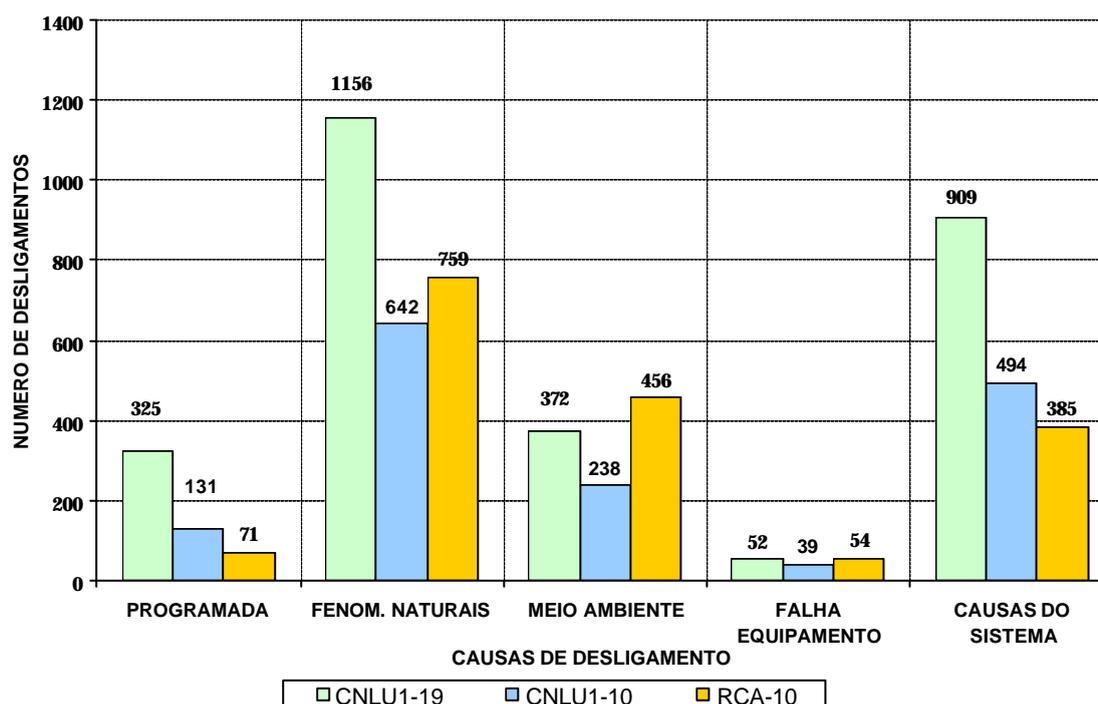


Figura-4.6: Diagrama de causas de desligamento dos alimentadores

Realizando uma análise por causa específica, obtém-se o gráfico da Figura 4.7, onde são apresentadas como principais causas os eventos de interrupção programada (construção, manutenção e operação), fenômenos naturais (vento, descarga atmosférica e temporal), meio ambiente (contato de árvores, animais e pássaros na linha, queimada, vandalismo e outras causas

do meio ambiente), falha de equipamentos, e atuação do sistema (sobrecarga, religamento automático, emergência e outras causas).

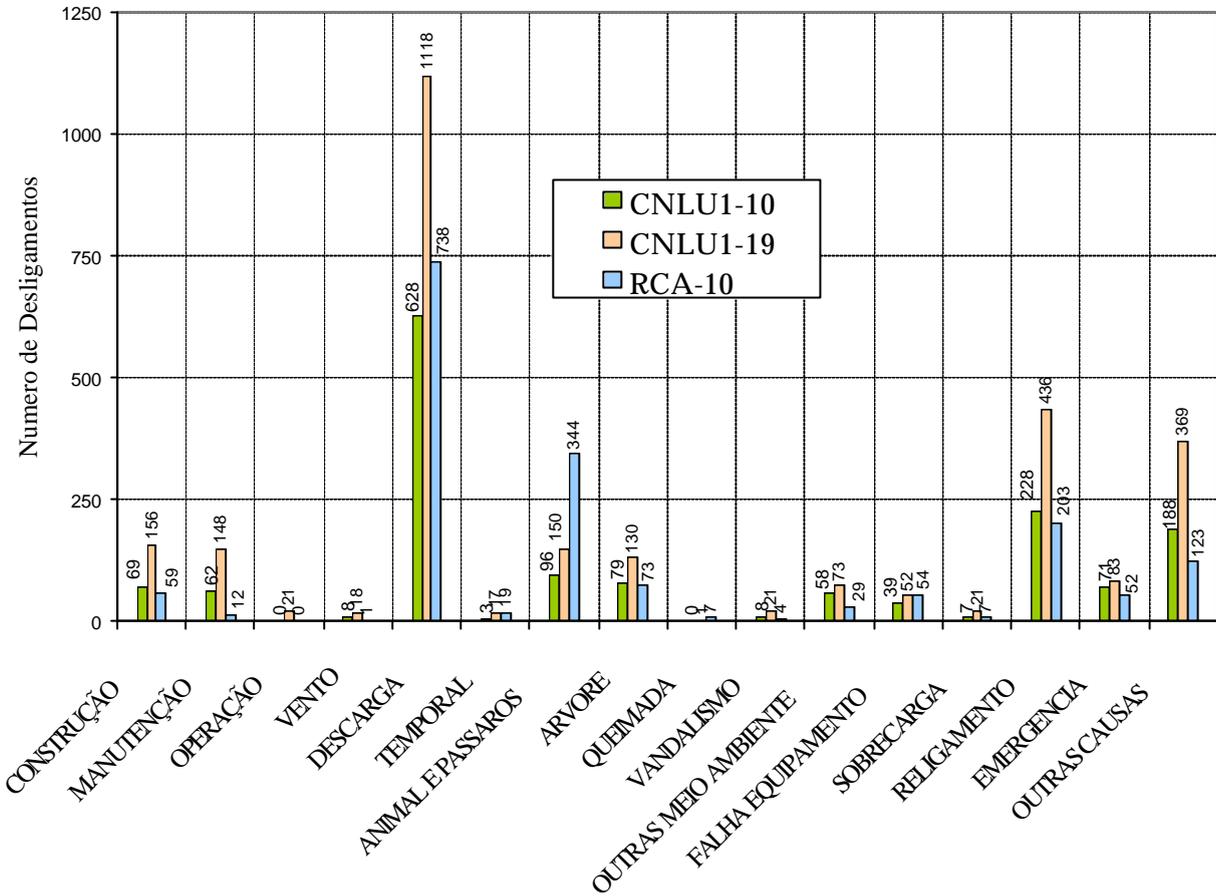


Figura-4.7: Análise estratificada de causas de desligamento

O gráfico da Figura 4.7 mostra que as principais causas de desligamento no sistema de distribuição são as descargas atmosféricas (42%), contato acidental com animais, pássaros e árvores (24%), religamento automático (12%), construção (3,5%), falha de equipamento (3,0%), emergência (3,0%) e causas diversas (11,5%).

Para todos os três alimentadores em estudo, as causas analisadas apresentaram a mesma tendência de efeito e evolução, podendo-se afirmar que as principais causas de interrupção são as descargas atmosféricas, religamento automático e contato acidental de pássaros, animais e árvores com a linha de distribuição.

4.3.1 Alimentador CNLU1-10 – Análise de Interrupções

A Tabela 4.2 apresenta o número de desligamentos do alimentador CNLU1-10, considerando todos os registros onde a causa primária de interrupção foi identificada como descarga atmosférica ou religamento automático, no período 2001-2004, considerando-se a mesma cronologia de tempo dos registros de descargas fornecidos pelo SLT.

Tabela-4.2: Número de Desligamentos no Ano – Alimentador CNLU1-10

Ano	Causa: Descarga Atmosférica	Causa: Religamento Automático	Total Geral de Desligamentos
2001	295	86	762
2002	354	144	776
2003	238	311	624
2004	350	309	706
2001-2004	1237	850	2868

A Tabela 4.2 mostra que o número de religamentos automáticos foi maior para os anos 2003 e 2004, se comparados com os períodos anteriores, devidos provavelmente, à intensa atividade de descargas atmosféricas na região durante a estação chuvosa de 2002/2003 e 2003/2004, a grande extensão do alimentador, e o baixo nível de isolamento (95kV) o que fez com os religadores atuassem com maior frequência.

A Figura 4.8 apresenta a variação do número de desligamentos ordenados por mês de ocorrência para o alimentador CNLU1-10, onde as principais causas apresentadas foram o religamento automático e descarga atmosférica.

Para as estações chuvosas 2001/2002 (09/2001 a 03/2002) e 2002/2003 (09/2002 a 03/2003) o número de desligamentos por descarga atmosférica foi de 2 a 7 vezes maior do que o número de interrupções por religamento automático. Duas são as prováveis razões para essa diferença: o fato de que nem todas as descargas resultam na atuação ou bloqueio do religador e o baixo valor de NBI da linha. Contudo, para o período de chuvas 2003/2004 (09/2003 a 03/2004) o número de religamento automático foi superior ao número de descargas atmosféricas. A possível, explicação está na condição de meio ambiente (contato de árvores, pássaros e animais na linha, temporal, queimadas, outras causas de meio ambiente) apresentada no gráfico da Figura 4.7.

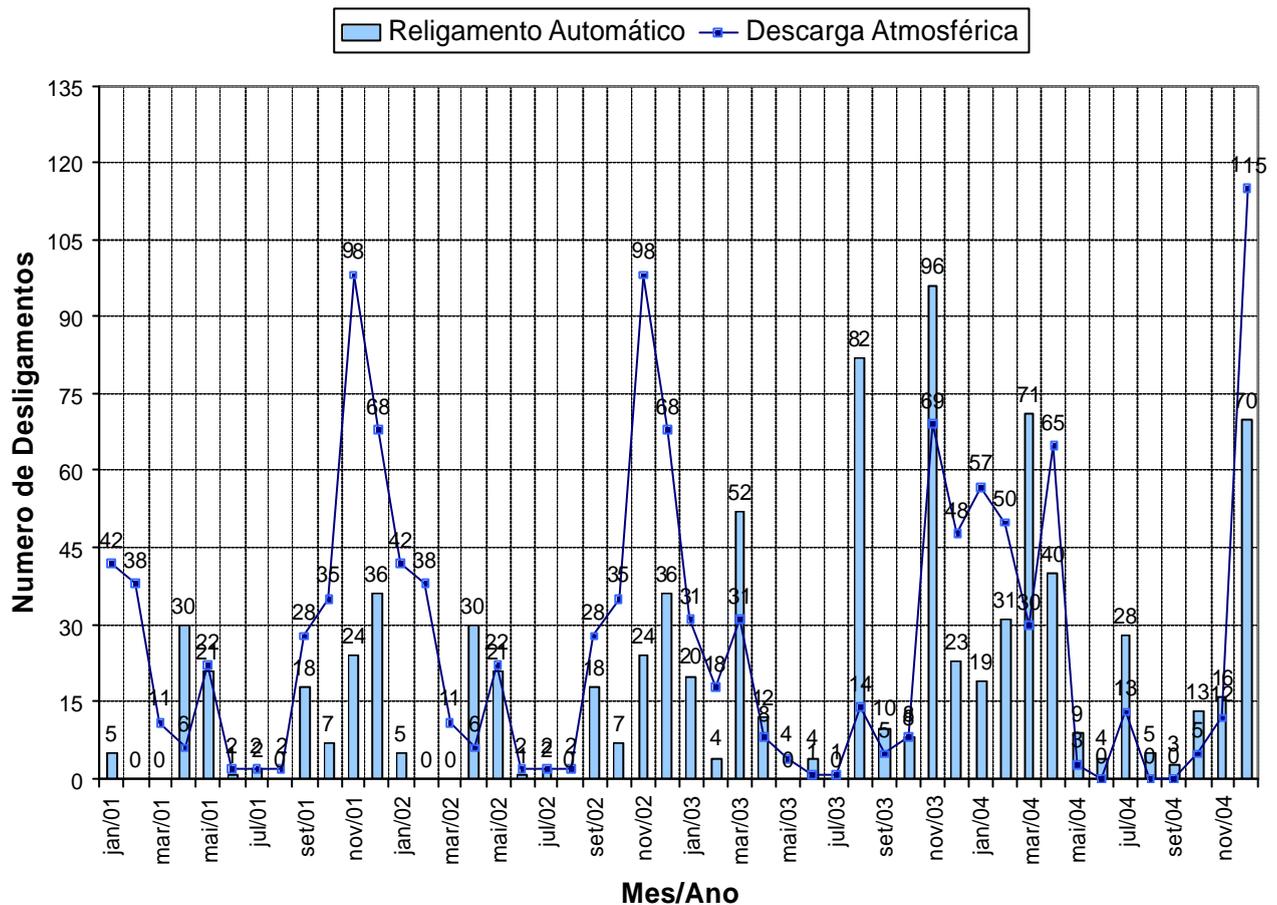


Figura-4.8: Análise de causas primárias do alimentador CNLU1-10

4.3.2 Alimentador RCA-10 – Análise de Interrupções

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da pesquisa no banco de dados de interrupções (CONINT), e os valores agrupados por ano para o alimentador RCA-10.

A tabela mostra que para o período chuvoso 2002-2003 e 2003-2004 o número de atuações dos religadores foi muito maior se comparado com o período 2001-2002. Três são as hipóteses que explicam essa variação: a mudança no ajuste dos tempos de atuação dos religadores realizado pela operação; maior atividade elétrica na região (maior número de incidência de descargas para o período 2002/2003); e a possibilidade de algumas das atuações dos religadores por contato com a arborização ou uma causa semelhante (pássaros ou animais na linha).

Tabela-4.3: Número de desligamentos no Ano – Alimentador RCA-10

Ano	Causa: Descarga Atmosférica	Causa: Religamento Automático	Total Geral de Desligamentos
2001	227	45	272
2002	365	27	392
2003	159	204	363
2004	226	374	600
2001-2004	977	736	1713

A Figura 4.9 apresenta a análise da variação do número de desligamentos ordenados por mês de ocorrência, onde as principais causas apresentadas foram religamento automático e descargas atmosféricas. Existe uma relação entre o número de descargas e o religamento automático. Sabe-se, que nem toda descarga resultará no bloqueio do religador, contudo o número de religamentos é maior em alguns meses. Essa diferença pode ser creditada ao contato eventual entre a linha e arborização ou a ação de animais ou pássaros na linha. Essa condição pode ser verificada através dos dados do CONINT e da Figura 4.7.

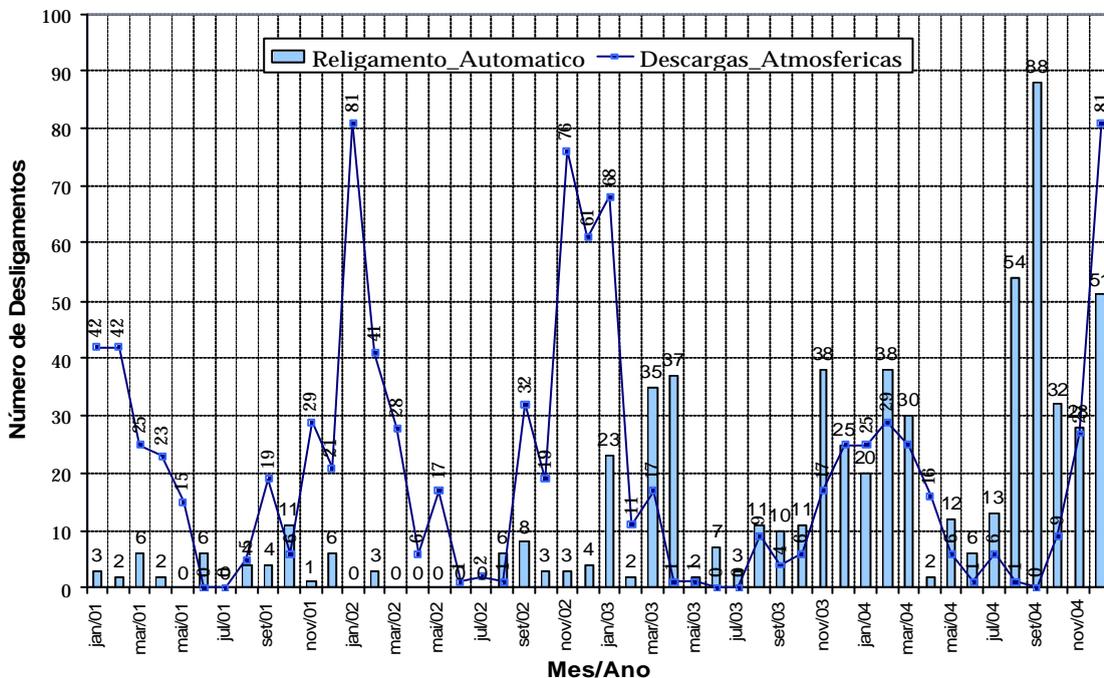


Figura-4.9: Análise de causas primárias alimentador RCA-10

4.3.3 Alimentador CNLU1-19 – Análise de Interrupções

A Figura 4.10 apresenta a evolução do número de religamentos automático e descargas para o alimentador CNLU1-19. Para o período de chuvas 2003/2004 a frequência de atuação do religador foi maior, se comparado com os períodos anteriores. O baixo valor de NBI (95 kV) dos diversos ramais monofásicos, que compõem o alimentador pode ser apontado como uma das possíveis causas do aumento do número de religamento automático no período.

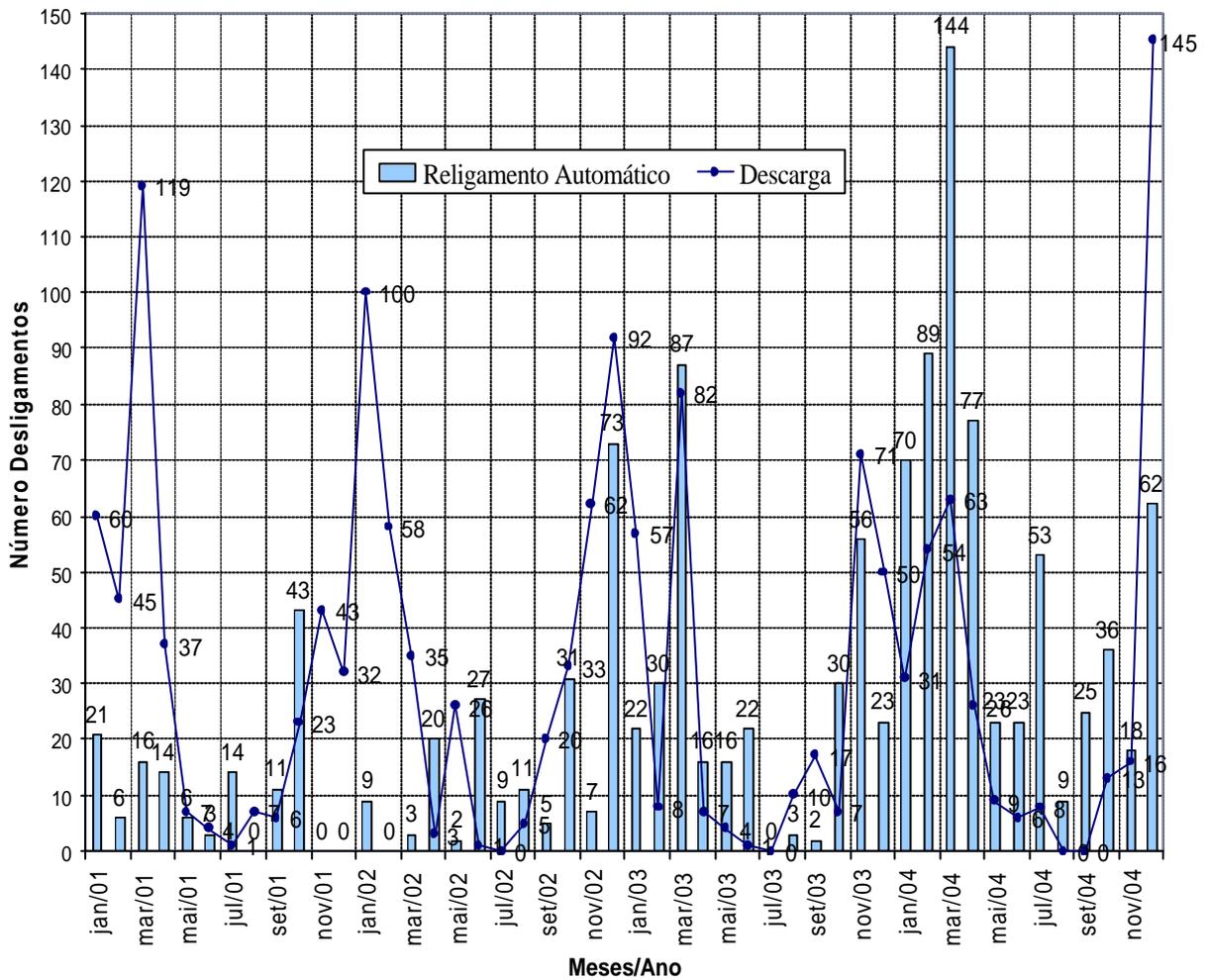


Figura-4.10: Análise de causas primárias do alimentador CNLU1-19

A Tabela 4.4 apresenta a evolução das principais causas primárias de desligamento para o alimentador CNLU1-19.

Tabela-4.4: Número de desligamentos no Ano – Alimentador CNLU1-19

Ano	Causa: Descarga Atmosférica	Causa: Religamento Automático	Total Geral de Desligamentos
2001	384	134	518
2002	435	197	632
2003	314	307	621
2004	371	629	1000
2001-2004	1504	1267	2771

Da mesma forma do alimentador CNLU1-10 (95kV), para o período 2003 a 2004 o número de religamentos automáticos foi superior ao número de descargas. As causas possíveis do aumento do número de desligamentos são as mesmas apresentadas no item 4.3.1.

4.4 CÁLCULO DE DESEMPENHO ESTIMADO E REAL DOS ALIMENTADORES

Para o cálculo de desempenho estimado, realizado segundo o procedimento definido no capítulo 2, foram considerados os seguintes dados:

- Número de descargas diretas calculado conforme procedimento descrito no item 2.5. Para o cálculo das descargas diretas, foi adotada a altura média dos postes de 10m e a largura da estrutura em 2.4m ao longo de todo o alimentador.
- Número de descargas indiretas calculadas conforme procedimento do item 2.5. Contudo, para o cálculo das tensões induzidas foi considerado o fator de redução de sobretensão nos isoladores igual a 0.9 (condição conversadora).
- Valor do NBI definido para o alimentador do estudo (95 ou 170kV).

Na transformação do valor de NBI para CFO foi utilizada a equação (4.1), considerando o desvio padrão (σ) igual a 3% de CFO. Essa transformação faz-se necessária para o cálculo do número de desligamentos por descargas laterais próximas, conforme procedimento descrito no item 2.5.

$$CFO = \frac{NBI}{(1 - 1,28 \times \sigma)} \quad (4.1)$$

- Fator de blindagem de 0.01 para a 1ª. condição de cálculo, ou seja, linha sem blindagem e o fator de blindagem de 0.99 para a 2ª. condição de cálculo, ou seja, linha totalmente blindada por objetos próximos. Os valores de fator de blindagem foram calculados considerando a variação de 0.05.
- Valores de N_G variando de 0.0 a 10.0 descargas/km²/ano com o intervalo de 0.5 descarga/km²/ano. Os limites de variação foram definidos de forma a manter a mesma escala de valores do mapa de curvas isoceraúnicas apresentadas no capítulo 2.

Para o cálculo do desempenho real da linha, foram considerados os registros de interrupções do CONINT e a aplicação da metodologia apresentada no capítulo 3. Em cada alimentador, é realizada também uma estimativa do fator de blindagem médio da instalação.

4.4.1 Alimentador CNLU1-10 – Análise de Desempenho

Esse alimentador apresenta-se com o nível de isolamento básico de 95kV em toda a sua extensão (tronco e ramais). O gráfico da Figura 4.11 apresenta os resultados do cálculo de desempenho para a condição estimada e real representado no eixo das abscissas o valor de N_g [descargas/km²/ano] e no eixo das ordenadas o valor de F_p [Número de Interrupções/100km/ano].

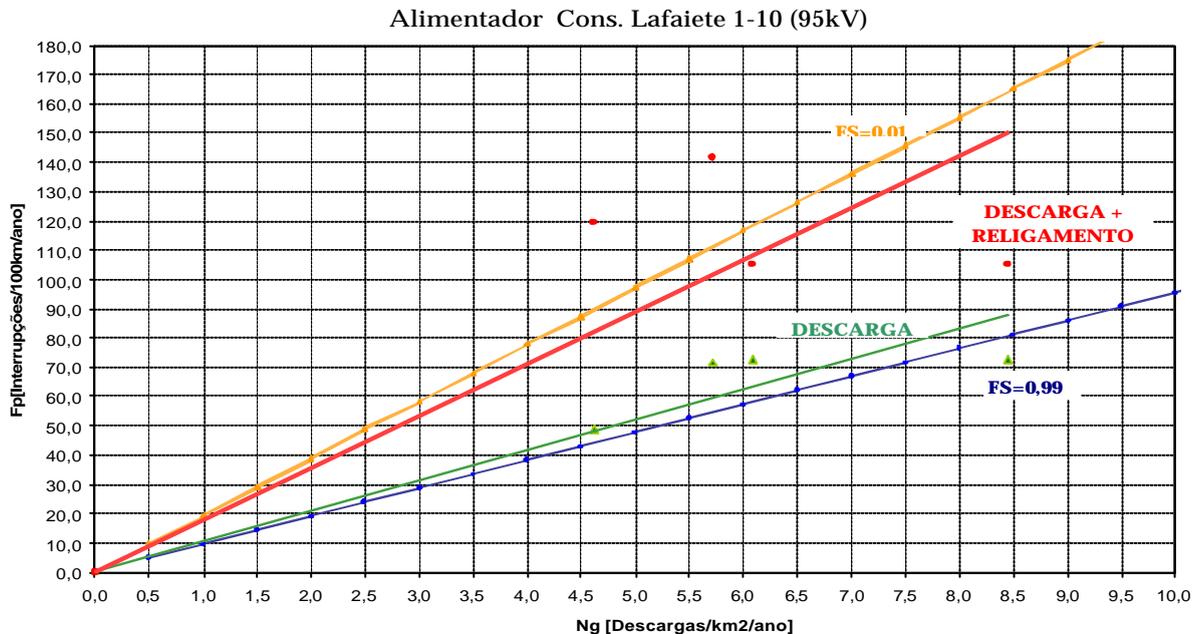


Figura 4.11: Gráfico de Desempenho da Linha de 95kV – Estimado e Real

Considerando o valor de N_G igual a 6,22 descargas/km²/ano, valor médio para o período 2001-2004, têm-se os seguintes valores limites de desligamento/100km/ano:

1. *Real*: limite superior 110 desligamentos/100km/ano considerando a somatória dos eventos registrados como descargas atmosféricas e religamento automático e o limite inferior 64 desligamentos/100km/ano considerando apenas os eventos registrados como descargas atmosféricas.
2. *Estimado*: limite superior 120 desligamentos/100km/ano calculados para o fator de blindagem igual a 0,01 (linha sem blindagem por objetos próximos) e o limite inferior 58 desligamentos/100km/ano para o fator de blindagem igual a 0,99 (linha totalmente blindada por objetos próximos).

Os valores limites da condição real, estão muitos próximos dos valores calculados pela metodologia do guia do IEEE Std. 1410 (cálculo estimado de desempenho). Essa aproximação de valores indica que o guia apresenta resultados compatíveis com os dados reais da operação.

Observa-se que os valores de desempenho estimado, contêm os valores de desempenho real. Dessa forma, para uma linha com NBI de 95kV, e conhecidos os valores de N_G da região e o fator de blindagem da linha, é possível estimar o número de desligamentos/100km/ano a partir do gráfico da Figura 4.11.

A faixa de variação da condição real, diferença entre o limite superior e inferior, é bastante ampla com 46 desligamentos/100km/ano. Contudo, para a condição estimada essa variação é ainda maior com o valor de 62 desligamentos/100km/ano.

O gráfico da Figura 4.12 apresenta a variação do número de desligamentos em função do fator de blindagem por objetos próximos. Nesse cálculo foram considerados os seguintes valores de fator de blindagem: 0.01 (condição de linha sem blindagem), 0.10, 0.25, 0.35, 0.50 (valor mediano), 0.75, 0.85 e 0.99 (condição da linha com blindagem por objetos próximos).

Para o N_G de 6.22 descargas/km²/ano, o número de desligamentos varia de 58 (FS = 0.99) a 120 (FS = 0.01) desligamentos/100km/ano, com o valor médio de 89 desligamentos/100km/ano (FS = 0.55). Comparando as figuras 4.11 e 4.12, pode-se estimar o fator de blindagem médio real da linha é menor ou igual a 0.58.

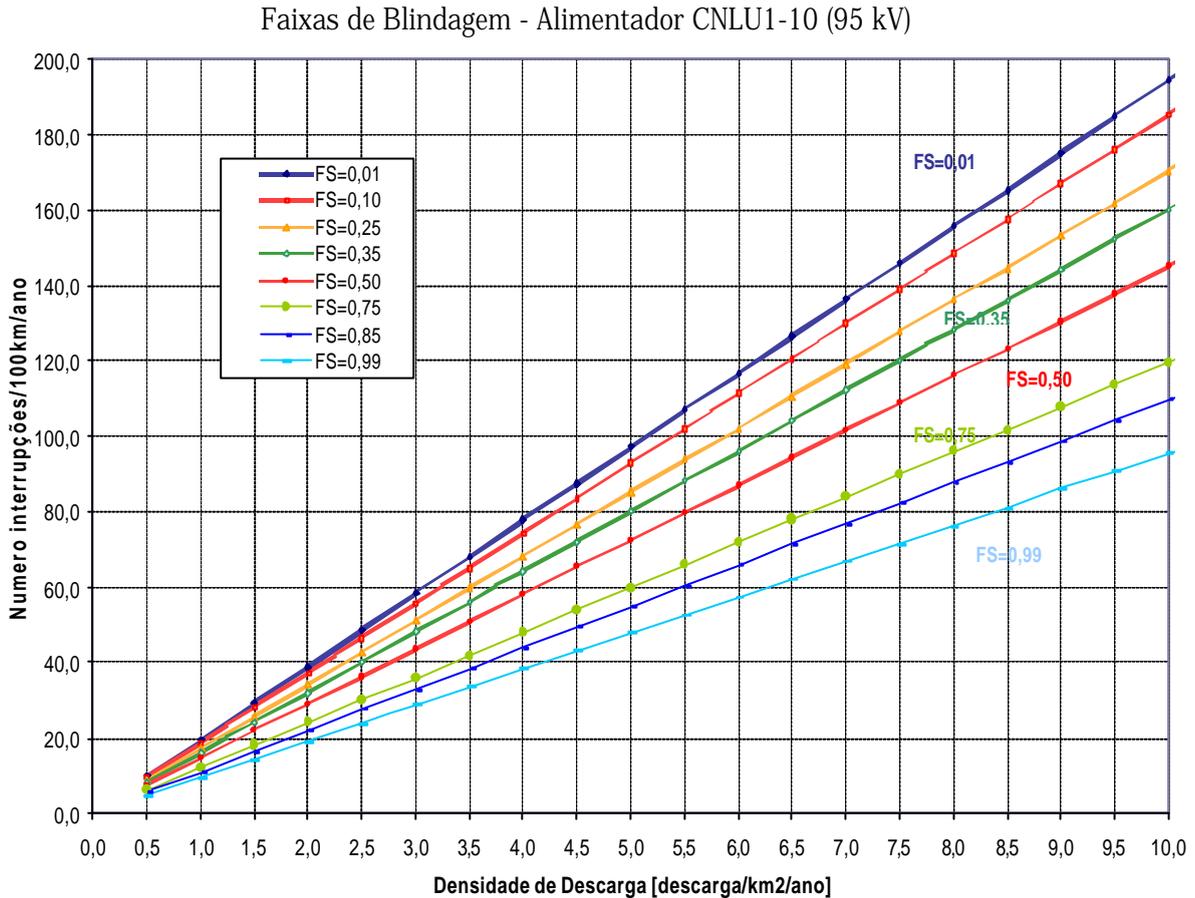


Figura-4.12: Gráfico de fator de blindagem para o alimentador de 95kV

4.4.2 Alimentador RCA-10 – Análise de Desempenho

O alimentador RCA-10 (Rio Casca-10) caracteriza-se por apresentar o nível básico de isolamento em 170 kV em toda sua extensão (ramais e tronco). Para o cálculo de desempenho foram considerados os mesmos dados da condição de cálculo do item 4.4 com o valor de NBI de 170kV para o alimentador RCA-10.

A Figura 4.13 apresenta os resultados do cálculo de desempenho para condição estimada e a real, representada na forma do gráfico ($N_g \times F_p$).

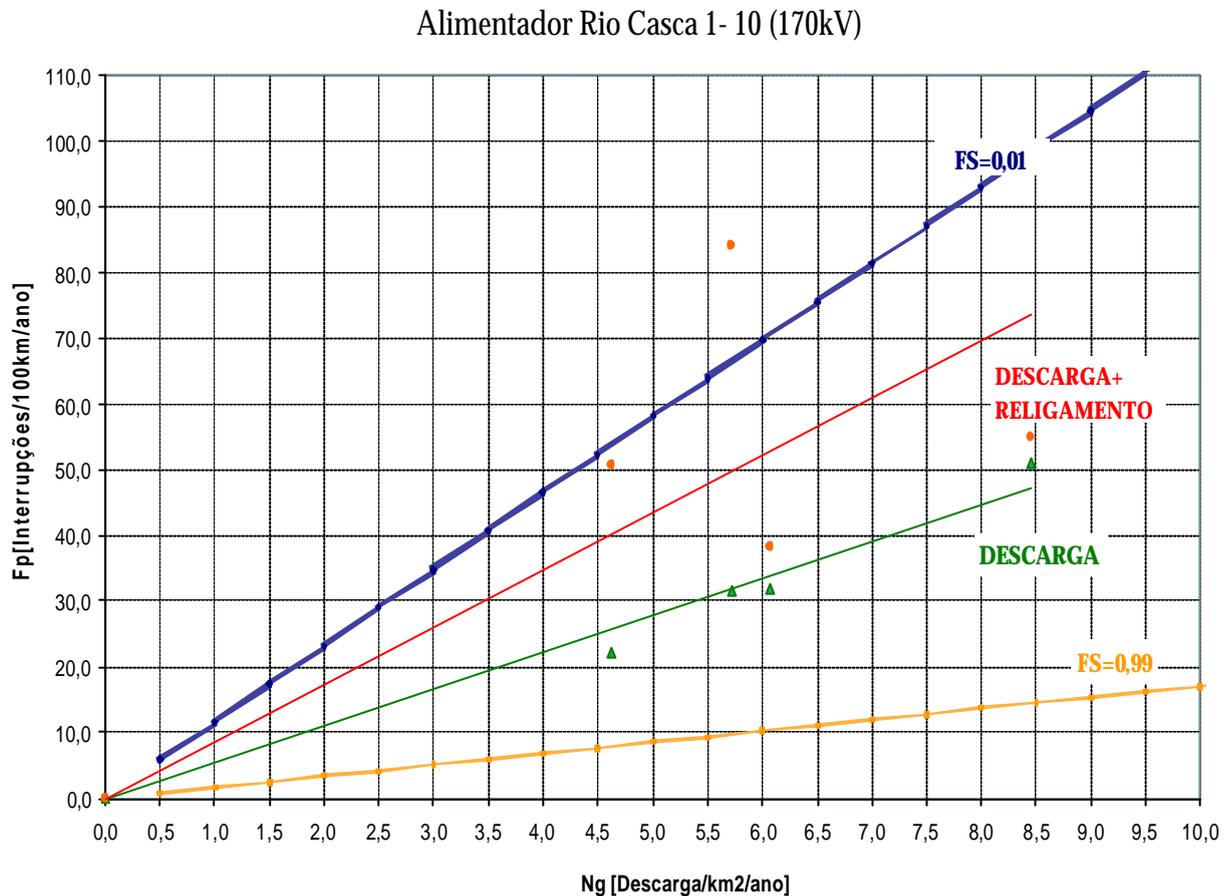


Figura-4.13: Gráfico de desempenho da linha de 170kV – Real e Estimado.

Considerando o valor de N_G igual a 6.22 descargas/km²/ano, têm-se os seguintes valores de desligamentos /100km/ano:

- (1) *Real*: limite superior 52 desligamentos/100km/ano (evento : descargas atmosféricas+ religamento automático) e inferior 35 desligamentos /100km/ano (evento: descargas atmosféricas);
- (2) *Estimado*: limite superior 72 desligamentos/100km/ano (FS=0.01 – linha sem blindagem por objetos próximos) e inferior 10 desligamento/100km/ano (FS=0.99 – linha com blindagem por objetos próximos).

Comparando os valores desligamentos para a condição real, pode-se observar uma estreita faixa de variação $\Delta=17$ desligamentos/100km/ano. Contudo, para a condição estimada essa variação é maior $\Delta=62$ desligamentos/100km/ano. A faixa de variação da condição real, representa a influência do evento religamento automático no desempenho da linha, já que apenas os eventos com o bloqueio do religador foram considerados na totalização, não sendo considerados os religamentos momentâneos com sucesso.

Comparando os resultados das Figuras 4.13 e 4.14 pode-se estimar o fator de blindagem médio para a condição real do alimentador RCA-10, sendo menor ou igual a 0.43.

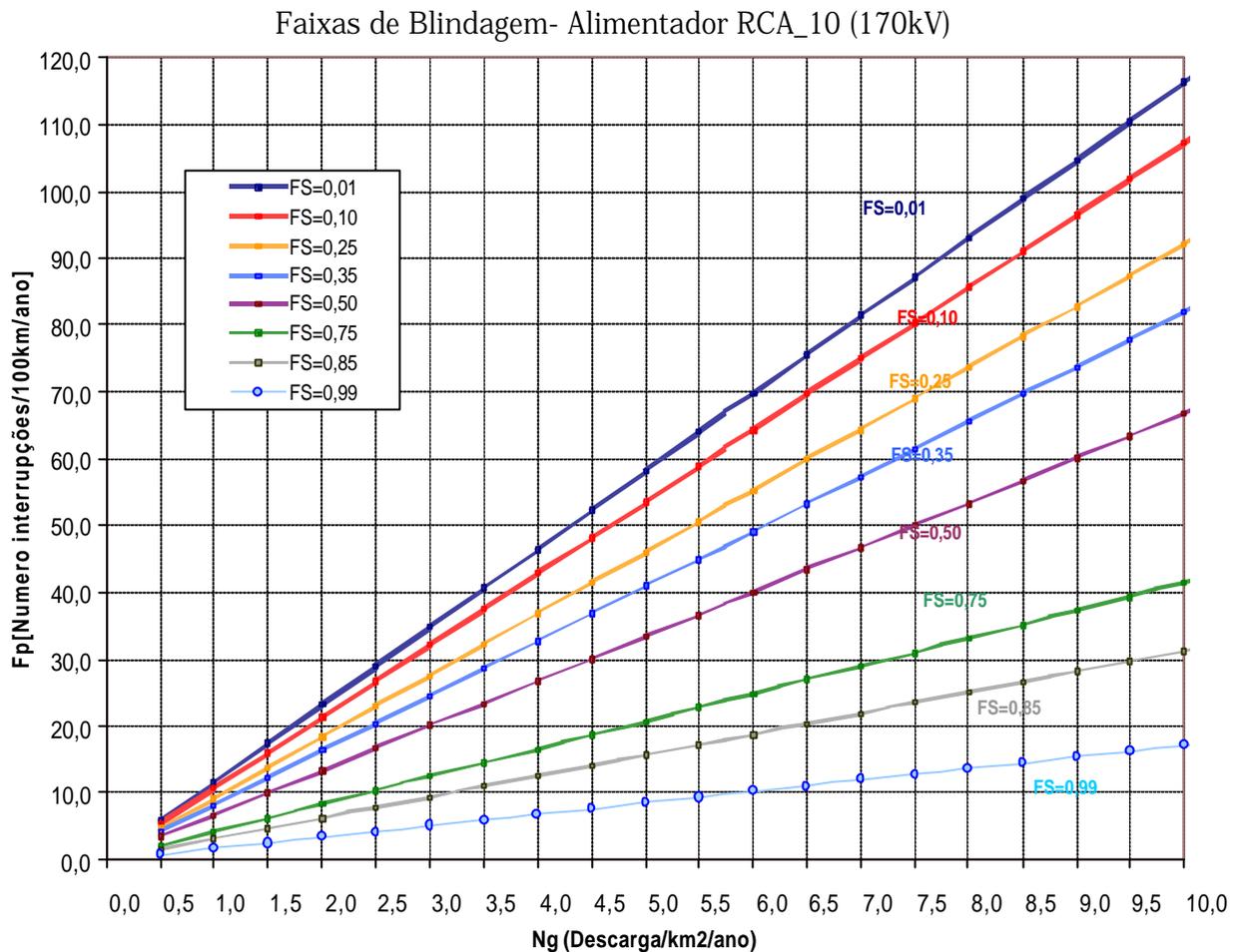


Figura-4.14: Curvas de fator de blindagem para linha com NBI de 170kV

4.4.3 Alimentador CNLU1-19 – Análise de Desempenho

O alimentador CNLU1-19 (Conselheiro Lafaiete 19) apresenta-se com o nível básico de isolamento (NBI) de 170kV na extensão do tronco e 95kV nos ramos, constituindo dessa forma um alimentador com característica mista.

Para o cálculo do desempenho, foram utilizados os dois valores de NBI, 95kV e 170kV, de forma a definir os limites extremos das faixas de desempenho. Os demais parâmetros são os mesmos definidos nos itens anteriores.

A Figura 4.15 apresenta o gráfico de desempenho para a condição real e estimada. São apresentados os limites superiores e inferiores para a condição de NBI de 95kV e 170kV (cálculo estimado), além dos valores reais do alimentador CNLU1-19.

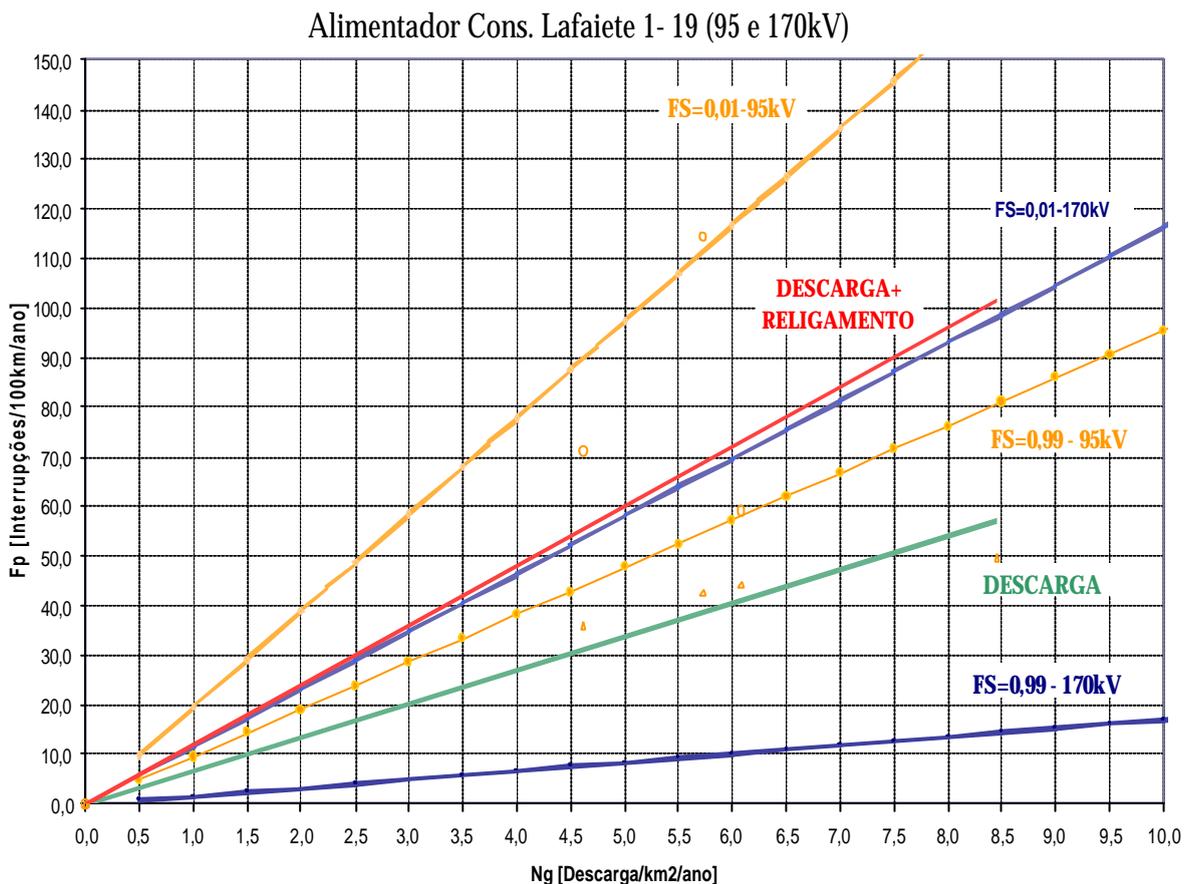


Figura-4.15: Alimentador Misto 95-170kV – Análise de Faixas

Considerando o valor de N_G igual a 6.22 descargas/km²/ano têm-se os seguintes valores de desligamentos:

- (1) *Real*: limite superior 75 desligamentos/100km/ano (evento : descargas atmosféricas + religamento automático) e inferior 42 desligamentos/100km/ano (evento: descargas atmosféricas);
- (2) *Estimado para o NBI de 95kV*: limite superior 120 desligamentos/100km/ano (FS=0.01) e inferior 78 desligamentos/100km/ano (FS=0.99);
- (3) *Estimado para o NBI de 170kV*: limite superior 72 desligamentos/100km/ano (FS=0.01) e inferior 10 desligamentos/100km/ano (FS=0.99).

Comparando os dados de desempenho real com o estimado, pode-se perceber que o alimentador possui o seu desempenho influenciado pelo trecho de 170kV. Essa condição é demonstrada pela coincidência dos valores da condição real superior (descarga + religamento) e o limite superior do trecho de 170kV (FS=0.01).

Comparando os gráficos da Figuras 4.12, 4.14 e 4.15 foi possível determinar o fator de blindagem médio para o alimentador CNLU1-19, sendo esse valor menor ou igual a 0.23.

4.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os dados do CONINT permitem identificar as principais causas de desligamentos para os alimentadores estudados. Pode-se constatar a partir deles que as principais causas de desligamento são: descarga atmosférica, religamento automático e intervenções na linha por contato de animais, aves ou árvores. As duas primeiras causas (descarga atmosférica e religamento automático) possuem uma forte dependência. Em muitos casos, a descarga atmosférica provoca uma perturbação no sistema elétrico, podendo originar uma atuação do religador. Da mesma forma, as intervenções na linha por contato eventual também provocam a atuação do religador.

A análise do desempenho considerando valores extremos de faixas pode representar uma indicação do número de desligamentos diferente dos índices praticados pela operação. Dessa forma, uma melhor análise seria pelo valor médio dos índices de desligamento.

O gráfico da Figura 4.16 apresenta o valor médio para a condição real de operação dos três alimentadores estudados.

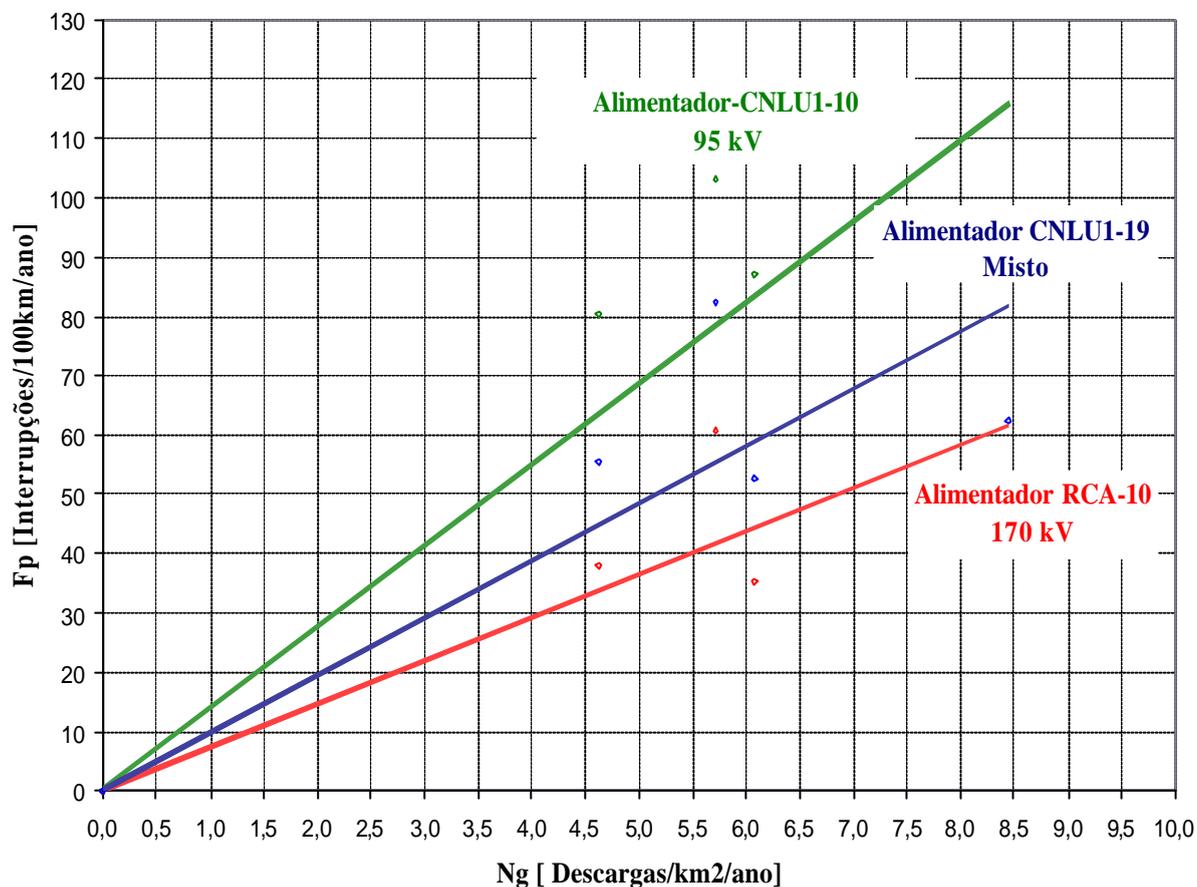


Figura-4.16: Análise comparativa dos alimentadores – Valores Médios

Considerando o valor de N_G igual a 6.22 descargas/km²/ano, obtém-se o valor médio para cada alimentador do estudo, sendo: 85 desligamentos/100km/ano para o alimentador CNLU1-10 (95kV), 59 desligamentos/100km/ano para o alimentador CNLU1-19 (misto/ 95 e 170kV) e 46 desligamentos/100km/ano para o alimentador RCA-10 (170kV).

A tabela 4.5 apresenta o quadro comparativo de desempenho médio para os três alimentadores, seus respectivos fatores de blindagem estimados pelo valor médio e os percentuais de redução do número de desligamentos.

Tabela-4.5: Comparativo dos Valores Médios de Desligamentos, Fator de Blindagem e Redução Percentual do Número de Desligamentos/100km/ano.

	F_p (médio) (1)	F.S Estimado (2)	% Redução (3)
CNLU1_10 (95kV)	85	0.58	
CNLU1_19 (95 e 170 kV)	59	0.23	31%
RCA_10 (170 kV)	46	0.43	46%

(1) F_p = Número de Desligamentos médio/100km/ano

(2) FS = Fator de blindagem médio estimado para o valor médio do número de desligamentos/100km/ano.

(3) % Redução do Número de desligamentos.

Valores obtidos para o N_G = 6,22 descargas/km²/ano.

Comparando o desempenho médio real entre os alimentadores de 170kV (RCA-10) e o de 95kV (CNLU1-10), percebe-se que a adoção do alimentador de 170kV representa uma redução do número de desligamentos/100km/ano de 46%, já considerando o fator de blindagem da linha. Porém, a mudança do alimentador de 95kV para um alimentador misto, com trechos de 170kV e de 95kV, poderá corresponder a uma redução média de 31% no número de desligamentos.

A tabela 4.5 apresenta os valores de fator de blindagem médio para os alimentadores estudados. Esses valores foram determinados a partir dos gráficos das Figuras 4.12, 4.14 e 4.16. O fator de blindagem médio definido para cada alimentador, pode variar ao longo de toda a extensão do alimentador. Observa-se, que o alimentador CNLU1-10 (95kV) apresenta o maior fator de blindagem, o alimentador RCA-10 (170kV) um valor intermediário e o alimentador CNLU1-19(misto) o menor valor entre os três.

Os gráficos das Figuras 4.11, 4.13 e 4.15 apresentam a mesma tendência de crescimento das faixas entre os valores reais e estimados. Considerando, que no processo de cálculo estimado o número de descargas indiretas foi multiplicado por um fator igual a 4 (quatro), conforme expresso na equação (2.11), percebe-se que esse valor corresponde a uma aproximação do modelo da condição estimada para a condição real. No cálculo das tensões induzidas, foi utilizado o fator 0.9, representando a redução de sobretensões nos isoladores, pela presença do condutor neutro na linha. Esse valor é

considerado conservador, embora a redução das tensões induzidas pela presença do neutro seja maior do que o estimado.

O modelo de cálculo do desempenho estimado, definido pelo guia do IEEE apresenta algumas limitações, entre as quais citamos: o cálculo das tensões induzidas é realizado considerando a condição de uma linha infinita com resistividade do solo ideal; não foram consideradas as atuações dos pára-raios de MT; a atuação dos religadores/seccionalizadores também não é considerada; na linha existem descontinuidades; os valores de aterramento de equipamentos; o valor real de resistividade do solo; condutor neutro com múltiplos aterramentos; a influência da tensão induzida de uma descarga “iluminando” mais de um ponto do alimentador, a topologia da rede, entre outros fatores. Segundo o guia o processo de cálculo constitui uma representação simplificada, contudo o modelo apresenta resultados próximos dos dados reais.

A presença dos dados da operação do sistema, representado pelo cálculo de desempenho real, permite uma avaliação do modelo de cálculo definido pelo guia. A análise dos resultados do cálculo real e estimado, demonstram que os valores são próximos, apesar das limitações do modelo do guia.

A avaliação do desempenho por valores médios permite uma melhor compreensão dos índices reais e estimados, embora a avaliação por faixas limites mostre as condições extremas, ou seja, o número mínimo e máximo de desligamentos que podem ocorrer.

5. CONCLUSÕES

A partir do levantamento de dados do Sistema de Interrupções da CEMIG (CONINT), é possível determinar os três eventos mais frequentes associados a desligamentos em linhas de distribuição: descargas atmosféricas (40%); contato eventual da arborização ou pássaros na linha (21%), e religamento automático (12%). Já as falhas de equipamentos correspondem a 3% do total de desligamentos e a manutenção programada 4%. Dessa forma, as descargas atmosféricas contribuem com mais de 50% dos desligamentos no sistema de distribuição.

Estudo realizado considerando os dados de descargas, para o período 2001 a 2004, permitiu a avaliação da densidade anual de descargas. Pode-se perceber a variação sazonal do número de descargas ao longo do período de quatro anos analisados. Contudo, para o valor médio dos anos de estudo, esse se aproxima do valor definido no mapa de curvas isoceráunicas. Dessa forma, pode-se considerar que os dados do Sistema de Localização de Tempestades, quando trabalhados ao longo de diversos anos apresentam valores próximos dos mapas de curvas isoceráunicas.

No desenvolvimento desse trabalho, foi considerada uma amostra de dados do CONINT e do SLT de 4 (quatro) anos. A amostra de dados, foi definida considerando a disponibilidade de dados do SLT (a partir de 1998) e do CONINT (a partir de 2000) para o mesmo período de anos, e a configuração do número de sensores da RINDAT (25 sensores a partir de 2001). Para essa configuração foram analisados 737.747 registros de descargas atmosféricas e 56.587 registros de interrupções. Uma comparação histórica ideal seria um período de 10 (dez) anos. Contudo, para esse período estima-se um volume de 1.850.000 registros de descargas atmosféricas e 142.500 registros de interrupções.

O estudo do desempenho real do alimentador CNLU1-10 de 95kV mostrou um número médio de interrupções de 85 desligamentos/100km/ano. O alimentador CNLU1-10 apresentou o pior desempenho entre os todos os alimentadores do Estudo de Caso. O fator de blindagem médio para o alimentador CNLU1-10 é de 0.58.

O desempenho do segundo alimentador, RCA-10 de 170kV, é o melhor dos três alimentadores do estudo. Os índices de interrupções situam-se entre 35 e 52 desligamentos/100km/ano para a condição real e de 10 a 72 desligamentos/100km/ano para a condição estimada. O índice médio de interrupções é de 46 desligamentos/100km/ano e o fator de blindagem médio é

0,43. O alimentador apresenta um desempenho em média 46% melhor do que o alimentador CNLU1-10 de 95kV.

O terceiro alimentador analisado CNLU1-19, possui o trecho tronco com o NBI de 170kV e os ramais com NBI de 95kV. Os índices de interrupções da condição real situam-se entre 42 e 75 desligamentos/100km/ano, um valor médio de 59 desligamentos/100km/ano e um fator de blindagem médio de 0,23. Este alimentador apresenta um desempenho em média 31% melhor do que o alimentador CNLU1-10 de 95kV.

De maneira geral, os três alimentadores estudados possuem baixos valores do fator de blindagem médio ($<0,58$) valores esses típicos de instalações rurais. Contudo, deve-se considerar que esse fator representa uma média de diversos trechos do alimentador com e sem blindagem por objetos próximos. Dessa forma o fator de blindagem por objetos próximos não deve ser interpretado como um “fator de ajuste”, mas como uma variável que pode influenciar no desempenho final da linha frente as descargas atmosféricas.

Na elaboração do Estudo de desempenho real foram considerados todos os registros de descargas atmosféricas e de religamento automático. Ambos registros foram extraídos do banco de dados do CONINT. Para os registros de religamento automático, foram considerados apenas os registros de bloqueio do religador, ou seja, interrupção sustentada. Não foram considerados os religamentos com sucesso, ou seja, interrupção momentânea. Essa diferença, indica que o número de religamento automático possa ter sido maior do que o número considerado no Estudo. Porém, para efeitos práticos foram consideradas apenas as interrupções sustentadas, onde o tempo de duração foi maior ou igual a 3 (três) minutos.

O modelo de cálculo de desempenho, apresentado no guia do IEEE Standard 1410 representa uma formula simplificada de cálculo. Existem algumas limitações do modelo, contudo os resultados reais e estimados apresentam valores próximos entre si, indicando uma boa aproximação do modelo. A comparação dos resultados dos cálculos estimados e reais, permitiu uma melhor compreensão do modelo de cálculo e de suas limitações. A simplicidade do modelo, indica que ele pode ser aprimorado e aperfeiçoado.

Esse trabalho envolveu uma árdua pesquisa no banco de dados da Operação do Sistema (CONINT) e do Sistema de Localização de Tempestades (SLT). A seleção, filtragem, preparação e ordenação desses dados, constituem etapas importantes no processo de cálculo. Dessa forma, faz-se necessária uma avaliação criteriosa dos dados do CONINT (operação) de maneira a permitir uma “filtragem” mais precisa das causas de desligamentos. Da

mesma forma a análise dos dados do SLT deve ser realizada com critério, pois sendo o SLT um sistema automatizado podem existir valores extremos discrepantes na base de dados do Sistema.

Uma importante contribuição desse trabalho foi à possibilidade de se calcular o fator de melhoria de desempenho real para o alimentador de 170kV. Guardadas as devidas particularidades do alimentador, constata-se, que o número de desligamentos 46% inferior no alimentador com NBI de 170kV é muito próximo do valor especificado no Estudo de Distribuição – Padrões de Montagem de Estruturas de NBI Elevado [CEMIG, 1991], estudo este baseado em resultados dos projetos de pesquisas e ensaios elétricos realizados pela CEMIG em parceria com a UFMG, durante os anos 80 e 90.

A metodologia desenvolvida para o cálculo do desempenho real dos alimentadores baseada nos dados de incidência de descargas e nas informações da operação do sistema permitiu a avaliação do número de desligamentos através de faixas limites extremas e do valor médio. O trabalho conclui pela viabilidade da utilização dos dados da Operação do Sistema (CONINT) e do Sistema de Localização de Tempestades (SLT). Da mesma forma a metodologia apresentada pelo guia pode ser verificada e comparada com os valores reais de desligamentos, demonstrando a validade dos seus resultados.

5.1 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Diversos são os aspectos complementares, que podem ser analisados em trabalhos futuros, entre os quais citamos:

- A partir dos dados de incidência de descargas determinar a distribuição acumulada de probabilidade de corrente para o Estado de Minas Gerais.
- Expandir o estudo para outras áreas do Estado, considerando diferentes valores de densidade de descargas e utilizar o valor de distribuição acumulada de probabilidade de corrente calculada para o Estado.
- Avaliar o desempenho de uma linha rural considerando a atuação de pára-raios instalados ao longo do alimentador.
- Avaliar o desempenho da linha considerando um estudo de transitórios, onde deverão ser considerados os efeitos de descargas em todos os pontos do alimentador, ramais e tronco.

- Simular o desempenho do alimentador para uma configuração mista de ramais de 95 kV e 170kV e tronco de 170kV. Essa simulação tem por objetivo determinar o percentual de melhoria de desempenho do alimentador considerando um aumento do número de ramais de 170kV.

- Avaliar as larguras de faixa de servidão das linhas de distribuição considerando a aplicação dos fatores de blindagem podendo-se chegar ao fator de blindagem de diferentes alimentadores com o mesmo nível de isolamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIEE Committee Report;” **A Method of Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines**”;AIEE *Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 69,pp.1187-1196,1950.

ANDERSON, J.G.,” **Lightning Performance of Transmission Lines**”, *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*, Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, 1982, ch. 12.

ARAÚJO,A.E.A.,NEVES,W.L.A.;”**Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia Elétrica**”, livro, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2005, p.261.

AVILA, A.F., LOPES, I.J.S., MIRANDA, G.C.;”**Utilização do SLT na Avaliação do Desempenho de Redes de Distribuição Aéreas Rurais frente à Descarga Atmosférica**”; Anais do Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - XVI-SENDI, Brasília-DF; Novembro,2004

BOAVENTURA, W.C; “**Estudo de Tensões Induzidas em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido**”; Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1990.

CARVALHO, A.M; DINIZ, J.H; CHERCHIGLIA, L.C.L; “**Obtenção de Densidade de Descargas Atmosféricas para Terra através de Contadores de Descargas, Dias de Trovoadas Ouvidas e Sistema de Localização de Tempestades**”; II SIPDA (Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas), 28 Junho a 3 Julho, Guaratinguetá – SP, Brasil, 1992.

CEMIG; “**ND-2.2 Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais**”; Belo Horizonte-MG; Outubro;1997a

CEMIG; “**ED-3.14 Critérios para Aterramentos de Redes de Distribuição**”; Belo Horizonte-MG; Setembro;1992

CEMIG; “**ED-1.26 Controle de Interrupções por Computador – Sistema CONINT Manual de Utilização em Microcomputador**”; Belo Horizonte-MG; Novembro;1977b

CEMIG; “**ED-1.33 Projeto GEMINI – Gerência de Redes de Distribuição – Módulo de Operação – Simulação de Manobras**”; Belo Horizonte-MG; Julho, 2004

CEMIG; “**ED-1.34 Projeto GEMINI – Gerência de Redes de Distribuição – Módulo de Cadastro – Manual de Utilização**”; Belo Horizonte-MG; Outubro, 2002

CEMIG; “**ED-2.21 Padrões de Estruturas com NBI Elevado**”; Belo Horizonte-MG; Novembro;1991

CIGRE Working Group 33.01 (Lightning), “**Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines**”, CIGRE Brochure 63, Paris, Oct. 1991.

CHOWDHURI, P.; “**Estimation of Flashover Rates of Overhead Distribution Power Lines by Lightning Strokes to nearby Ground**”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no.3,pp. 1982-1989, July 1989.

CHOWDHURI, P., et.al;”**Parameters of Lightning Strokes: A Review**”,*IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.20,no.1,pp.346-358, January, 2005.

CHOWDHURI, P.;”**Electromagnetic Transients in Power Systms**”, livro,England, Research Studies Press Ltd., 1996, p.397.

DIAS, R.N; “**Aplicações do SLT em Proteção Elétrica: Constituição de Base de Dados para Análise de Incidência de Descargas em Linhas de Transmissão**”; Orientador: Silvério Visacro Filho: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Julho de 2002.

D’AJUZ, A.”**Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**”, livro, Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987, 435p.

ERIKSSON, 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.

ERIKSSON, A.J., "An Improved Electromagnetic Model for Transmission Line Shielding Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD-2, no.3, pp. 871-8886, July 1987b.

FONSECA, A. F. L.; "Cálculo Analítico do Campo Eletromagnético e da Resposta Transitória de uma Linha Unifilar Infinita devido à Incidência de uma Descarga Atmosférica sobre o Solo de Resistividade Nula"; Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1990.

GOLDE, R.H.;"Lightning Surges on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and Direct Lightnig Strokes",*Transactions of American Institute of Electrical Engineers*,pp.437-447, June 1954.

IEEE Std. 1410; "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distributions Lines"; IEEE Power Engineering Society, 1997a

IEEE Std. 1243; "IEEE Design Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission"; IEEE Power Engineering Society, 1997b

IEEE Std. 1410; "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distributions Lines"; IEEE Power Engineering Society, 2004

IEEE Working Group Report;"Calculating the Lightning Performnce of Distribution Lines",*IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.5, no.3,pp.1408-1417, July 1990

IEEE Working Group Report;"Estimating he Lightning Performnce of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models",*IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.8, no.8,pp.1254-1266, July 1993b

LOPES, I. J. S.; "Estudo do Comportamento de um Condutor Multi-aterrado frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas"; Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1990.

MESQUITA, C.R; “**Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas**”; Orientador: Silvério Visacro Filho: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Junho de 2001.

MOUSA, A.M., SRIVASTAWA, K.D.;"**Modeling of Power Lines in Lightning Incidence Calculations**",*IEEE Transactionson Power Delivery*, vol.5, no.1, pp.303-310, January, 1990.

MELIOPOULOS, A.P.S., KENNEDY, G.; “**Statistical Lightning Performance Evaluation of Overhead Distribution Lines**”, *25thInternational Conference on Lightning Protection – ICLP 2000*, pp. 541-546, 2000

NUCCI, C.A., BORGHETTI, A., PAOLONE, M., “**Lightning Performance of Distribution Lines: Sensitivity to Computational Methods and to Data**”, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting , 2001, Vol 2., pp. 796-798, 2001*

PAULINO, J. O. S; BRANDÃO, C. A. L; “**Estudo do Desempenho de Estruturas de Distribuição Face a Descargas Atmosféricas**”, Anais do IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – IX-SENDI, Salvador-Bahia; Setembro, 1984.

PAULINO,J. O. S.; LOPES, I. J. S.; BOAVENTURA, W.C.; STARLING, R. P.; FILHO, J.P.; “**Validation of Rusck Theory for the Lightning Induced Voltage Calculation on Distribution Lines**”, *8th International Symposium of High Voltage Engineering*, Yokohama, Japan, pp.261-263, August 1993.

ROCHA, R.C.C., SOARES, M.R.; “**Estruturas de NBI Elevado**”; Anais do Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – XI-SENDI, Blumenal-SC; Outubro, 1991

RUSCK,S.; “**Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks**”; *Transactions of the Royal Institute of Technology*, Stockholm, no. 120, 1957.

SAVIC, M.S.;"**Medium Voltage Distribution Systems Lightning Performance Estimation**",*IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.18, no. 3, pp.910-914, July 2003.

SILVA, J.P.; **“Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP”**; Orientadores: Prof. Dr. Antonio Emilio Anghueth de Araújo e Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino: Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Junho de 2001.

STARLING, R. P.; **“Estudo da Aplicação da Teoria de Rusck e de Modelos Probabilísticos ao Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas”**; Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1992.

SHORT, T. A., ANDERSON, J.G.; **“Algoritms for calculation of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines”**, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, no.3, pp.1217-1225, July, 1993.