THAÍS OHARA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ESTUDO DE TENSÕES
INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo
2004

THAÍS OHARA DE CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ESTUDO DE TENSÕES
INDUZIDAS EM LINHAS DE MÉDIA TENSÃO POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Alexandre Piantini

São Paulo
2004

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de junho de 2004.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Carvalho, Thaís Ohara de

Desenvolvimento de sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de média tensão por descargas atmosféricas / T.O. Carvalho. -- ed.rev. -- São Paulo, 2004.

137 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Sistemas elétricos de potência (Qualidade) 2.Proteção de sistemas elétricos 3.Distribuição de energia elétrica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Aos meus pais, Tadashi e Haruyo, que com muitos anos de sacrifícios e dedicação me apoiaram em todos os momentos de minha vida e ao meu marido, Ivo, que com amor e carinho me incentivou a tornar esse sonho possível.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Piantini pela constante dedicação e esmero.

Aos amigos Acácio, Paulo e Kodaira que colaboraram com grandes idéias em todas as fases deste trabalho.

Aos Professores Doutores Jorge M. Janiszewski e Ruy A. C. Altafim pelos sábios conselhos.

Aos Engenheiros Alexandre Camargo e René Magalhães C. Muniz pela imprescindível contribuição de trabalhos que auxiliaram a formar meu trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Alta Tensão que me ajudaram em muitos ensaios.

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia que forneceu todas as condições para o desenvolvimento deste trabalho.

Às amigas da Biblioteca do IEE, Fátima, Penha e Lourdes, por todas as pesquisas que fizeram para enriquecer meu conhecimento.

À Companhia Paulista de Força e Luz pelo suporte financeiro fornecido desde o começo do trabalho.

À todos que de forma direta ou indireta foram importantes para que esse trabalho fosse realizado.

Enfim, agradeço do fundo do coração.

RESUMO

A busca de uma melhor qualidade da energia passa necessariamente por um melhor entendimento dos fenômenos relacionados às descargas atmosféricas. No caso de redes de distribuição com tensões nominais inferiores a 69 kV, uma parcela significativa das interrupções se deve às sobretensões induzidas por descargas próximas às linhas.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver e implantar um sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas indiretas através da obtenção simultânea das formas de onda de tensões induzidas em duas linhas com diferentes configurações. Além das linhas, equipadas com divisores de tensão especialmente projetados para medições de tensões impulsivas, também fazem parte do sistema uma torre metálica para captação de descargas, construída nas proximidades das linhas, o sistema de medição instalado em sua base para registro de correntes de descargas que eventualmente incidam em sua estrutura e o programa computacional que gerencia os processos de aquisição e armazenamento de dados.

A metodologia adotada no estudo é pioneira no que se refere a descargas naturais, pois somente em pesquisa desenvolvida pelo Grupo de Alta Tensão e Descargas Atmosféricas (GATDA/USP) através de modelo em escala reduzida foram obtidos registros simultâneos de tensões induzidas pelas mesmas descargas em linhas de distribuição com e sem proteção. O presente estudo representa uma extensão da pesquisa realizada com modelo reduzido, sendo a metodologia anteriormente desenvolvida transportada para um sistema em escala real.

O sistema entrou em operação no final de fevereiro de 2002, tendo sido registradas várias formas de onda de tensões induzidas, comprovando o seu desempenho satisfatório. Este trabalho descreve os principais componentes do sistema e apresenta alguns dos resultados preliminares obtidos.

ABSTRACT

For improving the energy quality it is essential to understand the phenomena related to the lightning discharges. In the case of distribution networks with rated voltages lesser than 69 kV, there is a significant number of interruptions caused by overvoltages induced by lightning discharges near to the lines.

The aim of this work was to develop and to implement a system to study lightning induced voltages on distribution lines through simultaneous acquisition of induced voltages waveforms on two lines with different configurations. Besides the lines, equipped with voltage dividers specially designed to measure impulsive voltages, also belong to the system a metallic tower built in the vicinity of the lines, the measuring system installed at its base to register lightning currents that eventually hit it and the computer programme that manages the acquisition and data storage process.

The methodology adopted in the study is pioneer concerning natural lightning, since records of voltages induced simultaneously on unprotected and protected distribution lines by the same lightning event were obtained only in a previous research developed by the High Voltage / Lightning Research Group (GATDA/USP), by means of a scale model. The present study represents an extension of that research, so that the same methodology previously developed has been transferred to a real scale system.

The system started to operate in the end of February 2002 and several induced voltages waveforms have been registered, confirming its satisfactory performance. This Dissertation describes the system and its main components and shows some of the preliminary results obtained so far.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Estrutura do trabalho	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Experimentos envolvendo descargas naturais	6
2.2 Medições de descargas provocadas artificialmente	24
2.3 Estudos em modelo reduzido	29
3 METODOLOGIA	37
4 SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	41
4.1 Número médio anual estimado de descargas diretas na torre	41
4.2 Características da torre	44
4.3 Sistema de sinalização	53
5 LINHAS EXPERIMENTAIS	59
6 SISTEMAS DE MEDIÇÃO	78
6.1 Sistema de medição de correntes de descargas atmosféricas	78
6.1.1 Resistor “shunt”	82
6.1.1.1 Projeto do resistor “shunt”	84
6.1.1.2 Ensaios realizados	85
6.1.2 Controlador de descarga das baterias do sistema de medição de correntes	89

6.2 Sistema de medição de tensões induzidas	89
6.2.1 Divisores de tensão	92
6.2.1.1 Projeto e construção de um divisor de tensão	97
6.2.1.2 Ensaios realizados	100
6.2.1.2.1 Determinação do fator de escala	100
6.2.1.2.2 Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico	101
6.2.1.2.3 Medição da resposta ao degrau	101
6.2.2 Testes no sistema de medição	103
6.3 Funcionamento dos sistemas de medição	105
7 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	106
7.1 Programa computacional Teklink V2.1	107
7.2 Hardware acoplado ao programa Teklink - Sistema Multiplexador	109
7.3 Estação de medição	110
8 RESULTADOS PRELIMINARES	113
9 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Configuração instrumental (adaptada de [11]).....	7
Figura 2.2 - Diagrama de tempo do registrador de transitórios (adaptada de [11]).....	8
Figura 2.3 - Layout” da estação de potência a vapor Fukui e da linha de distribuição (adaptada de [4]).....	8
Figura 2.4 - Configuração da linha de distribuição, com dimensões em mm (adaptada de [4]).....	9
Figura 2.5 - Circuito casador instalado nos postes 1 e 17 [4].....	10
Figura 2.6 - Sistema de observação automático para tensões induzidas (adaptada de [4]).....	10
Figura 2.7 - Relação entre a tensão induzida na linha de distribuição e a tensão de saída do conversor O/E (adaptada de [4]).....	11
Figura 2.8 - Configuração tridimensional do topo da torre (adaptada de [14])...	13
Figura 2.9 - Diagrama de blocos do sistema 1 (adaptada de [14]).....	14
Figura 2.10 - Diagrama de blocos do sistema digital 2 (adaptada de [14]).....	14
Figura 2.11 - Estrutura típica dos postes da linha de teste (adaptada de [15]).....	15
Figura 2.12 - Visão geral da estação de gravação NEERI [15].....	16
Figura 2.13 - Conexões físicas (adaptada de [20]).....	20
Figura 2.14 - Esquema da estação ILYAPA (adaptada de [19]).....	20
Figura 2.15 - Diagrama unifilar da linha de distribuição experimental (adaptada de [21]).....	21
Figura 2.16 - Configuração do sistema de medição (adaptada de [22]).....	21
Figura 2.17 - Detalhe da distribuição de corrente entre os transdutores (adaptada de [25]).....	23
Figura 2.18 - Esquema de localização dos equipamentos utilizados (adaptada de [25]).....	24

Figura 2.19 - Esquema da linha de distribuição, da base de lançamento e a localização dos pontos de medição de campos (adaptada de [27]).....	25
Figura 2.20 - Instalações do Centro Internacional de Pesquisa e Teste de Descargas Atmosféricas (ICLRT) em Camp Blanding, Flórida (adaptada de [28]).....	27
Figura 2.21 - Modelo reduzido para estudos de tensões induzidas [10].....	30
Figura 2.22 - Planta de localização da linha de distribuição e do canal da descarga (adaptada de [42]).....	35
Figura 3.1 - Torre para captação de descargas.....	38
Figura 3.2 - Trecho das linhas experimentais.....	38
Figura 4.1 - Mapa de densidades de descargas atmosféricas para a terra (descargas/(km ² · ano)) no Brasil – Período de 1998 a 2001 [48].....	42
Figura 4.2 - Configurações de sistema de aterramento estudadas.....	47
Figura 4.3 - Circuito simplificado utilizado para analisar a tensão suportável em cada altura do conjunto de estais.....	48
Figura 4.4 - Forma de onda das correntes das descargas consideradas nas simulações no PSPICE® (1/50 µs).....	49
Figura 4.5 - Tensões em cada conjunto de estais em função do tempo de frente da corrente e da altura (resistência de aterramento R2 = 5 Ω).....	50
Figura 4.6 - Tensões em cada conjunto de estais em função do tempo de frente da corrente e da altura (resistência de aterramento R2 = 10 Ω).....	50
Figura 4.7 - Torre para captação de descargas [57].....	52
Figura 4.8 - Detalhe dos estais.....	52
Figura 4.9 - Sistema com grupo motor-alternador.....	54
Figura 4.10 - Esquema do sistema de alimentação com painéis solares.....	58
Figura 5.1 - Localização das linhas experimentais.....	59
Figura 5.2 - Detalhe da cruzeta de madeira de 6 m utilizada em toda extensão das linhas experimentais.....	60

Figura 5.3 - Forma de onda da corrente de descarga aplicada nas simulações.....	60
Figura 5.4 – Geometria simplificada da linha utilizada nas simulações.....	61
Figura 5.5 - Valores da tensão residual em função da corrente (8/20 μ s) dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO) utilizados nas simulações (resultados experimentais).....	61
Figura 5.6 - Tensões induzidas nos pontos 1 e 2 [63, 64].....	62
Figura 5.7 - Tensões induzidas nos pontos 1 e 2 [63, 64].....	63
Figura 5.8 - Tensões induzidas nos pontos 1 e 2 [63, 64].....	63
Figura 5.9 - Tensões induzidas nos pontos 3 e 4 [63, 64].....	64
Figura 5.10 - Tensões induzidas nos pontos 3 e 4 [63, 64].....	64
Figura 5.11 - Tensões induzidas nos pontos 3 e 4 [63, 64].....	65
Figura 5.12 - Traçado real das linhas experimentais com a localização dos pára-raios, torre e estação de medição.....	66
Figura 5.13 - Trecho das linhas experimentais.....	66
Figura 5.14 - Terminação das linhas experimentais (extremidade com ambas as linhas casadas).....	67
Figura 5.15 - Localização dos pontos de medição 1, 2, 3 e 4.....	68
Figura 5.16 - Pára-raios polimérico de óxido de zinco.....	68
Figura 5.17 - Determinação da curva $V(I_p) \times I_p$	70
Figura 5.18 - Curva $V(I_p) \times I_p$ dos pára-raios de óxido de zinco.....	71
Figura 5.19 - Casador de impedâncias de 470 Ω	72
Figura 5.20 - Circuito do ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico do casador.....	73
Figura 5.21 - Ensaio de medição de resposta ao degrau do casador.....	74
Figura 5.22 - Resposta típica de um divisor de tensão ao degrau unitário [67].....	75
Figura 5.23 - Resposta de um dos casadores ao degrau unitário.....	76

Figura 6.1 - Equipamentos do sistema de medição de correntes instalados na base da torre.....	78
Figura 6.2 - Esquema detalhado do sistema de medição de correntes.....	79
Figura 6.3 - Ensaio de interferência eletromagnética.....	79
Figura 6.4 - Forma de onda de corrente aplicada no resistor “shunt” ($I = 41,55 \text{ kA}$).....	80
Figura 6.5 - Gráfico ilustrativo da diferença de potencial no solo entre a torre e estação.....	80
Figura 6.6 - Circuito para medição de corrente impulsiva.....	83
Figura 6.7 - Circuito equivalente do resistor “shunt” para baixos valores ôhmicos.....	83
Figura 6.8 - Seção transversal da parte interna do resistor “shunt” [9].....	85
Figura 6.9 – Circuito de ensaio de impulso.....	86
Figura 6.10 - Aplicação de corrente impulsiva com amplitude de 6 kA.....	87
Figura 6.11: Aplicação de corrente impulsiva com amplitude de 41,55 kA.....	88
Figura 6.12 – Linhas experimentais. Localização dos pontos de medição 1, 2, 3 e 4.....	90
Figura 6.13 – Sistema de medição de tensões induzidas.....	90
Figura 6.14 – Detalhamento do sistema de medição de tensões induzidas.....	91
Figura 6.15 - Divisor de tensão com representação das capacitâncias parasitas [71].....	93
Figura 6.16 – Circuito equivalente do divisor resistivo [72].....	93
Figura 6.17 – Resposta do divisor resistivo ao degrau para diferentes valores de resistência [72]....	94
Figura 6.18 - Circuito equivalente do divisor capacitivo [72].....	94
Figura 6.19 – Resposta ao degrau do divisor capacitivo [72].....	95
Figura 6.20 – Resposta ao degrau do divisor capacitivo amortecido [72].....	95
Figura 6.22 – Resposta ao degrau do divisor misto [72].....	96

Figura 6.23 - Braço de baixa tensão [73].....	98
Figura 6.24 - Detalhe do resistor de baixa tensão [73].....	98
Figura 6.25 - Vista de um dos divisores de tensão construídos (braço de AT na parte externa da caixa e braço de BT interno à mesma) [73].....	99
Figura 6.26 - Detalhe da montagem do braço de baixa tensão no interior da caixa [73].....	99
Figura 6.27 – Montagem do ensaio de resposta ao degrau [73].....	102
Figura 6.28 - Resposta ao degrau de um dos divisores [73].....	103
Figura 6.29 – Comparação entre o sistema de medição desenvolvido (ponto 4, Fig. 6.13) e o sistema de referência.....	104
Figura 6.30 – Esquema elétrico de alimentação dos sistemas de medição de correntes e de tensões induzidas.....	105
Figura 7.1 - Sistema de medição e aquisição de dados de tensões induzidas.....	106
Figura 7.2- Diagrama de blocos do programa TekLink V 2.1.....	107
Figura 7.3 - Detalhamento do sistema de aquisição de dados desenvolvido para oito osciloscópios.....	110
Figura 7.4 – Interligação dos pontos de medição com a estação.....	111
Figura 7.5 – Sistema de aquisição de dados.....	112
Figura 8.1 - Ponto de medição de tensão induzida.....	113
Figura 8.2 - Comparação entre as tensões induzidas U_{ft} (calculada através da eq. 24) e V_{med} (medida no dia 17/03/2002, às 16h47'44'').....	115
Figura 8.3 - Corrente através do divisor de tensão do ponto de medição 1 em 17/03/02 às 16h47'44''.....	116
Figura 8.4 - Comparação entre tensões induzidas em dois pontos diferentes da mesma linha (2 e 4) [75].....	117
Figura 8.5 - Comparação entre tensões induzidas em dois pontos diferentes da mesma linha (1 e 3) [75].....	118
Figura 8.6 - Comparação entre tensões induzidas nas duas linhas – 30/01/04 17h16'31'' [75].....	119

Figura 8.7 - Tensões induzidas no ponto de medição 1 e 2 - 04/03/2002 (16h 16' 12'').....	120
Figura 8.8 - Tensões induzidas no ponto de medição 1 - 08/03/2002 (17h 56' 15'').....	120
Figura 8.9 - Tensões induzidas nas linhas experimentais – 17/03/2002 (16h 50' 27'').....	121
Figura 8.10 - Tensões induzidas nos pontos de medição 1 e 2 - 17/03/2002 (16h 47' 44'').....	123
Figura 8.11 - Eucalipto atingido em 17/03/2002 (16h 47' 44'') pela descarga atmosférica responsável pela indução das tensões apresentadas na Figura 8.10.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fatores de escala [7].....	30
Tabela 4.1 – Número médio anual de descargas diretas na torre (Nd).....	44
Tabela 4.2 – Valores medidos das resistividades do solo nas proximidades da torre.....	45
Tabela 4.3 – Resistividade do solo de 3 camadas.....	46
Tabela 4.4 – Tensão suportável por cada conjunto de estais.....	51
Tabela 5.1 – Valores das resistências de aterramento medidas em alguns pontos das linhas experimentais.....	67
Tabela 6.1 – Valores medidos de resistência do “shunt”.....	86
Tabela 6.2 - Dados de resistência elétrica e relação dos quatro divisores [73].....	99
Tabela 6.3 - Fatores de escala dos quatro divisores [73].....	101
Tabela 6.4 - Parâmetros da resposta ao degrau unitário dos quatro divisores de tensão construídos [73].....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
ERM	"Extended Rusck Model"
NEERI	"National Electrical Engineering Research Institute"
ESCOM	"Electricity Supply Commission"
CIGRÉ	"International Council on Large Electric Systems"
VHF	"Very High Frequency"
AM	Amplitude Modulada
BRD	Bobina de Rogowski Diferenciadora
BRI	Bobina de Rogowski Integradora
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EPRI	"Electrical Power Research Institute"
CFO	"Critical Flashover Overvoltage"
LTRs	"Lightning Transient Recorders"
NBI	Nível Básico de Isolamento
ICLRT	"International Center for Lightning Research and Testing"
PVC	"Poly Vinyl Chloride"
SPDs	"Surge Protective Devices"
m.r.s.	modelo do "return stroke"
GATDA/USP	Grupo de Alta Tensão e Descargas Atmosféricas da Universidade de São Paulo
NA	Normalmente Aberto
NF	Normalmente Fechado

CDEGS	“Current Distribution, Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure Analysis”
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
IEE/USP	Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo
IEEE	"Institute of Electrical and Electronics Engineers"
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GPS	"Global Positioning System"
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
rms	“root mean square”
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
PR's	Pára-raios
MC	Ponto de medição das correntes das descargas atmosféricas
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
UHF	“Ultra High Frequency”
RS-232	Porta de comunicação serial
ASCII	“American National Standard Code for Information Interchange”
COM	“Computer Output Microfilm ”
MUX	Sistema multiplexador
PC	"Personal Computer"
GMA	Grupo Motor-Alternador

LISTA DE SÍMBOLOS

E/O	eletro/ótico
O/E	ótico/elétrico
RC	resistivo/capacitivo
tc	constante de tempo
v	velocidade de propagação da corrente da descarga atmosférica
N_d	número médio anual de descargas diretas
Z_c	impedância característica
N_g	densidade de descargas para terra
T_d	nível ceráunico
R_a	raio de atração
h	altura da linha ou estrutura em relação ao solo
R_{am}	raio de atração médio
A	área de atração
ρ	resistividade elétrica
R_{at}	resistência de aterramento
P	potência
n_{nominal}	rotação nominal
U_{nominal}	tensão nominal
I_{nominal}	corrente nominal
I_{partida}	corrente de partida
η	rendimento
ZnO	óxido de zinco
I_m	corrente máxima de descarga atmosférica

b	a velocidade de propagação da corrente pelo canal da descarga em relação a velocidade da luz no vácuo
hn	comprimento do canal da descarga
x	distância entre o ponto de medição e o ponto da linha mais próximo à torre
xat	distância entre a extremidade em que ambas as linhas estão casadas e o pára-raios mais próximo.
xd	distância entre o ponto de medição de tensão e o pára-raios mais próximo
dl	distância entre as duas linhas
d	distância entre a linha e a torre
U_p	tensão de pico
I_p	corrente de pico
tf	tempo de frente da forma de onda
LC	indutivo/capacitivo
l	comprimento
T(t)	função integral de resposta ao degrau
g(t)	resposta ao degrau
O1	origem virtual da forma de onda
T_N	tempo de resposta experimental
T_α	tempo de resposta parcial
T_R	tempo de resposta residual
t_s	tempo de estabilização
T₀	tempo de distorção inicial
β	sobrelevação
R_{shunt}	resistor “shunt” desenvolvido

R_s	resistor “shunt” de referência
C_h	capacitância parasita do anel de equalização
C_p	capacitância parasita paralela
C_C	capacitância parasita entre objetos
C_e	capacitância parasita para a terra
V_1	tensão máxima induzida esperada nas linhas experimentais
V_2	tensão máxima de entrada do osciloscópio utilizado nas medições
R_1	resistor do braço de baixa tensão do divisor
R_2	resistor do braço de alta tensão do divisor
Rel	relação do divisor de tensão
$C1$	contator

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com a privatização das concessionárias, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vem exigindo que as mesmas busquem cada vez mais melhorar seus padrões de qualidade no fornecimento de energia. Os consumidores estão cada vez mais exigentes, de modo que para atender os anseios desse ascendente mercado as concessionárias têm aumentado seus investimentos em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias visando sempre a melhoria no fornecimento de energia. Logo, o estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas pode ser considerado um item essencial para a redução do número de interrupções. Apesar das sobretensões causadas por descargas indiretas apresentarem intensidades menores que as causadas por descargas diretas, destaca-se sua importância pelo fato de ocorrerem com maior frequência e, conseqüentemente, serem responsáveis pela maior parte das interrupções em sistemas elétricos de distribuição de classe igual ou inferior a 15 kV [1]. De acordo com informações obtidas junto à Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), o montante anual de prejuízos causados pelas descargas atmosféricas é da ordem de R\$ 1.400.000,00 (base março/2001).

Apesar do fenômeno das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas vir sendo estudado teórica e experimentalmente há muito tempo por pesquisadores de diversos países, sérias divergências são ainda verificadas entre as teorias existentes, mesmo quando não se considera na linha a presença do condutor neutro, cabo guarda e equipamentos mais complexos, como transformadores e pára-raios.

Em [2] foi desenvolvido um novo modelo, denominado “Extended Rusck Model” (ERM), utilizando-se como base a teoria de Rusck [3], porém com modificações tais que permitiram que se levasse em conta tanto os efeitos de descargas em estruturas metálicas como os efeitos do comprimento do canal de descarga, do comprimento e configuração da linha e da presença do “leader” ascendente. A comparação das tensões calculadas pelo modelo desenvolvido com resultados obtidos

experimentalmente no Japão [4-6] confirmou a melhora significativa no modelo de Rusck após a introdução das referidas modificações.

Embora o modelo matemático desenvolvido em [2] tenha sido validado através de comparações com resultados de pesquisas experimentais realizadas no Japão, julgou-se conveniente avaliar o seu desempenho em outras situações. Deve-se observar que, dada a complexidade do fenômeno, tal avaliação só pode ser feita caso sejam conhecidos todos os parâmetros que afetam significativamente as tensões induzidas. A dificuldade na obtenção de dados nessas condições é certamente uma das razões para a existência, ainda hoje, de teorias conflitantes. Assim, a limitação do número de casos disponíveis e o desconhecimento de parâmetros como por exemplo a velocidade de propagação da corrente, o comprimento do canal da descarga e a ocorrência ou não do “leader” ascendente, nas pesquisas japonesas, motivaram o desenvolvimento de um modelo em escala reduzida, o qual permitiu uma análise bem mais abrangente do fenômeno [7]. Posteriormente foi desenvolvida nova metodologia, a partir do modelo proposto em [2], a qual possibilita a determinação das tensões induzidas em situações em que a linha encontra-se protegida através de cabo-guarda e/ou pára-raios, considerando também a presença de transformadores e do neutro multiterrado. Em [8] são apresentados os resultados desse novo modelo para o caso de tensões induzidas em linhas aéreas quando da ocorrência de descargas atmosféricas em estruturas metálicas situadas em suas proximidades.

Apesar dos bons resultados obtidos nas diversas comparações realizadas, é sabido que a validação final de qualquer modelo matemático complexo deve ser feita com base em resultados de campo. Assim, este trabalho tem por objetivo apresentar um sistema desenvolvido para obtenção de dados de correntes de descargas atmosféricas reais e de tensões induzidas em linhas de distribuição com diferentes configurações, tendo como uma das metas futuras a confirmação da validade do modelo matemático proposto em [2] (ERM). Com a comprovação no campo da validade da metodologia desenvolvida ter-se-á uma ferramenta extremamente poderosa para avaliação do número de interrupções em linhas rurais e urbanas, protegidas com cabo guarda, pára-raios ou ambos, considerando-se os parâmetros relevantes envolvidos. Tal

metodologia poderá ser também aplicada na obtenção de subsídios para definição de critérios de instalação de pára-raios em transformadores de redes urbanas. Além disso, o sistema permitirá a análise do desempenho de linhas de distribuição de média tensão, com e sem proteção, face a descargas atmosféricas. Com base nesses resultados, serão definidos critérios para a utilização das técnicas mais eficazes que podem ser adotadas tendo em vista a melhoria do desempenho das linhas.

Em uma primeira etapa, o sistema estará voltado à obtenção de dados que permitam a avaliação da eficácia da instalação de pára-raios ao longo da linha, tendo em vista a redução das amplitudes das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas. Destaca-se aqui o pioneirismo da metodologia adotada neste trabalho, pois com exceção da pesquisa desenvolvida em [7], através de modelo em escala reduzida, não se tem conhecimento de outro estudo experimental no qual o efeito da utilização de pára-raios na redução das tensões induzidas tenha sido determinado diretamente. Assim, além de possibilitar uma avaliação direta da eficácia do sistema de proteção utilizado, os resultados obtidos permitirão a realização de comparações entre as tensões medidas induzidas na linha e as tensões calculadas através do ERM [8, 9]. Tais resultados representarão uma importante contribuição para o estado da arte do conhecimento do fenômeno, tendo em vista a escassez de dados de campo envolvendo registros simultâneos de tensões induzidas e correntes de descargas. Até o momento, apenas em pesquisas realizadas com descargas reais no Japão e com descargas atraídas por foguetes nos Estados Unidos tais registros foram obtidos simultaneamente.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e implantação de um sistema experimental para estudo de tensões induzidas em linhas aéreas de distribuição de média tensão devido a descargas atmosféricas indiretas. Tal sistema deverá possibilitar, em etapas futuras, a obtenção de quantidade estatisticamente relevante de formas de onda de tensões induzidas e, eventualmente, algumas formas

de onda de correntes de descargas incidentes diretamente em uma torre de captação. A análise dos resultados possibilitará a avaliação da adequabilidade de diferentes modelos teóricos para cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas por descargas atmosféricas indiretas, bem como a análise da eficácia de diferentes alternativas que podem ser empregadas para melhorar o desempenho das linhas, como por exemplo a instalação de pára-raios.

1.2 Estrutura do trabalho

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura considerando-se trabalhos experimentais sobre medições de correntes de descargas atmosféricas e/ou de tensões induzidas em linhas de distribuição.

O Capítulo 3 expõe a metodologia utilizada no desenvolvimento do sistema para estudo de correntes de descargas atmosféricas e de tensões induzidas em linhas de média tensão.

A partir do Capítulo 4 o trabalho proposto começa a ser realmente detalhado. Esse capítulo apresenta as características construtivas da torre de captação de descargas atmosféricas e o cálculo do eventual número de descargas incidentes na mesma.

No Capítulo 5 é feita a descrição das linhas experimentais, abordando suas configurações, localização e simulações computacionais realizadas através de um programa desenvolvido em [8-10] que comparam as tensões induzidas nas duas linhas monofásicas (protegida e não protegida) para verificar se a distância de separação entre as linhas é suficiente para que não haja influência significativa do dispositivo de proteção na tensão induzida na linha sem proteção.

O Capítulo 6 trata dos sistemas de medição de tensões e de correntes, enquanto que o programa computacional que gerencia toda a aquisição das formas de onda medidas é descrito no Capítulo 7. Todos os blocos que compõem o programa são mostrados,

assim como suas funções e características. Uma visão geral é dada através da apresentação da interface entre os sistemas de aquisição e medição. Neste capítulo ainda são fornecidas informações sobre o sistema multiplexador e a estação de medição onde se encontra o sistema de aquisição.

No Capítulo 8 são mostradas algumas formas de onda de tensões induzidas medidas nas linhas experimentais, ilustrando os resultados preliminares obtidos.

Finalmente, o Capítulo 9 relata as principais conclusões observadas ao longo do desenvolvimento do sistema e apresenta propostas de futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica das principais pesquisas experimentais envolvendo a medição de correntes de descargas atmosféricas e/ou de tensões induzidas em linhas de distribuição.

Na primeira parte são citadas pesquisas referentes a medições de parâmetros de descargas atmosféricas naturais; na segunda parte são apresentados dados sobre trabalhos experimentais com descargas atmosféricas provocadas artificialmente e, finalmente, na terceira parte são mostrados resultados de medições de correntes e de tensões induzidas em modelos reduzidos.

2.1 Experimentos envolvendo descargas naturais

Os trabalhos pioneiros envolvendo a medição simultânea de correntes de descargas atmosféricas e das respectivas tensões induzidas em linhas de distribuição foram conduzidos no Japão por Nakahori, Yokoyama e seus colaboradores [4, 11]. Inicialmente, o objetivo da pesquisa era estudar as características das descargas atmosféricas de inverno que são muito freqüentes no Japão. As correntes das descargas incidentes em uma torre metálica de 200 m de altura foram medidas e armazenadas pelo sistema automático de observação de descargas ilustrado na Fig. 2.1. As correntes das descargas incidentes na torre fluíam pelo resistor “shunt” ($2\text{ m}\Omega$) instalado em seu topo, sendo, inicialmente, divididas por um conversor eletro-ótico (E/O) em sinais elétricos positivos e negativos antes de serem convertidos em sinais óticos propriamente ditos. Cabos de fibra ótica transmitiam os sinais até uma sala de medição, onde um conversor ótico-elétrico (O/E) recompunha novamente os sinais elétricos. Todos os sinais envolvidos até essa etapa do sistema eram analógicos, sendo em seguida convertidos em digitais por um registrador de transitórios e armazenados temporariamente. Finalmente, estes sinais eram transferidos para um gravador de fita cassete e armazenados permanentemente.

Fig. 2.1 – Configuração instrumental (adaptada de [11]).

Como as correntes das descargas durante as tempestades de inverno no Japão apresentam longa duração, houve a necessidade de se otimizar a capacidade de 32.800 palavras do registrador de transitórios, ou seja, somente valores de corrente acima de um determinado patamar eram armazenados. A Fig. 2.2 mostra como as formas de ondas eram armazenadas. Um total de 21 correntes de descargas foram armazenadas e classificadas em três tipos, de acordo com a polaridade: positivas, negativas e bipolares.

Após um curto período do início das medições das correntes das descargas foi construída uma linha de distribuição monofásica para medir as tensões induzidas tanto por descargas atmosféricas incidentes na torre de 200 m quanto por descargas próximas à linha. A Fig. 2.3 mostra o "layout" do sistema de medição e aquisição de correntes e de tensões induzidas.

Fig. 2.2 – Diagrama de tempo do registrador de transitórios (adaptada de [11]).

Fig. 2.3 – “Layout” da estação de potência a vapor Fukui e da linha de distribuição (adaptada de [4]).

A linha, não energizada, tinha 820 m de comprimento, com intervalo de aproximadamente 50 m entre postes. O sistema de medição das tensões induzidas foi instalado no poste mais próximo da torre (poste nº. 5, à distância de aproximadamente 200 m). A Fig. 2.4 mostra que a configuração da linha experimental diferia da configuração das linhas de distribuição convencionais para que fosse possível estudar o efeito de blindagem do cabo guarda nas tensões

induzidas no condutor nº. 1 em relação às tensões induzidas no condutor nº. 2. O condutor nº. 3, utilizado como cabo guarda, foi instalado a uma altura de 10,5 m em relação ao solo, exatamente acima do condutor nº. 1. Durante as medições das tensões, variou-se o ponto de aterramento do cabo guarda, sendo que em algumas situações o mesmo permaneceu sem conexão à terra. Os condutores nº. 1 e nº. 2 foram posicionados à altura de 10 m em relação ao solo, sendo a distância entre eles igual a 2,4 m.

Fig. 2.4 – Configuração da linha de distribuição, com dimensões em mm (adaptada de [4]).

Para evitar a ocorrência de reflexões na linha foi necessário projetar uma combinação de impedâncias para casá-la. Esse conjunto de impedâncias, ilustrado na Fig. 2.5, foi instalado em ambas extremidades.

O sistema de observação mostrado na Fig. 2.6 registrava automaticamente as tensões induzidas nos condutores nº. 1 e nº. 2 do poste nº. 5. Os sinais de tensão eram reduzidos através de um divisor resistivo de relação 20.000/100. Logo em seguida, passavam por um circuito regulador de entrada e por um conversor eletro-ótico (E/O) que, inicialmente, os dividia em sinais elétricos positivos e negativos, antes da conversão em seus respectivos sinais óticos. Após a conversão, os sinais eram enviados até a sala de medição por cabos de fibra ótica, onde eram novamente convertidos em sinais elétricos através do conversor ótico-elétrico (O/E). Como no

caso das medições das correntes das descargas, esses sinais eram analógicos até a entrada do registrador de transitórios, que os convertia em digitais e os armazenava temporariamente. Finalmente, os sinais eram transferidos para um gravador de fita cassete e armazenados permanentemente.

Fig. 2.5 – Circuito casador instalado nos postes 1 e 17 [4].

De acordo com [4], as tensões de saída do conversor O/E foram ajustadas para serem proporcionais às tensões induzidas nas faixas de 0 a ± 10 kV e de ± 10 a ± 150 kV. Isso foi feito para melhorar a precisão das medições das tensões tanto para valores baixos como para altos. A Fig. 2.7 mostra a relação entre a tensão induzida e a tensão de saída do conversor O/E.

Fig. 2.6 – Sistema de observação automático para tensões induzidas (adaptada de [4]).

Fig. 2.7 – Relação entre a tensão induzida na linha de distribuição e a tensão de saída do conversor O/E (adaptada de [4]).

O sistema também contou com a instalação de câmeras fotográficas para a eventual localização de outros pontos de incidência de descargas (que não a torre).

Dando continuidade à pesquisa, foi utilizada uma torre de 150 m de altura, existente nas proximidades da torre de 200 m, para atrair mais descargas e possibilitar a medição de tensões induzidas em outro ponto da linha de distribuição (poste n°. 11 situado a 200 m da torre de 150 m) [5]. A configuração desse poste para medição das tensões induzidas foi a mesma do poste n°. 5, acrescida de um resistor “shunt” e de um conversor E/O para respectiva medição e aquisição da corrente que fluía do cabo guarda para a terra. Um nível de tensão induzida superior a 5 kV no condutor n°. 2 do poste n°. 5 ou no condutor n°. 1 do poste n°. 11 inicializava o processo de medição e aquisição. Assim como em [4], foram obtidas várias formas de onda de correntes e das respectivas tensões induzidas na linha e, também, fotografias das descargas que incidiam nas torres de 150 m e de 200 m de altura.

Para obter a distribuição das tensões induzidas ao longo da linha foram instalados equipamentos em mais outros dois postes (4 e 8). Analisando-se os resultados de tensões induzidas medidas na linha experimental no período de outubro de 1984 até março de 1988, verificou-se que a polaridade das tensões induzidas é oposta à das correntes das descargas, independentemente da estação do ano; geralmente, as

tensões induzidas possuem formas de onda unipolares; a tensão induzida máxima ocorre no ponto da linha de distribuição mais próximo do local de incidência da descarga [6].

Após alguns anos, o sistema de medição e de aquisição das correntes foi aprimorado e parâmetros importantes como os campos eletromagnéticos associados às descargas também foram medidos [12, 13]. Dentre as alterações implementadas no sistema de medição de correntes destaca-se a inclusão de um outro resistor “shunt” ($10\text{ m}\Omega$), com a função de melhorar a precisão das medições no caso de correntes de baixas amplitudes (200 A a 5 kA), enquanto o “shunt” antigo continuou sendo utilizado para medir correntes de valores mais elevados (4 kA a 250 kA). Na cabine de observação, a 630 m da torre de 200 de altura, foram instaladas câmeras fotográficas e câmeras de vídeo para aprimorar a observação das trajetórias das descargas. Os resultados obtidos mostraram que as descargas atmosféricas no inverno podem ser divididas em dois tipos: o primeiro, com formas de onda de curta duração, elevadas amplitudes e intensa luminosidade do canal; o segundo, com formas de onda de longa duração, baixos valores de crista e baixa luminosidade do canal.

Um outro grupo de pesquisadores japoneses, liderado por Goto, também mediu as correntes das descargas atmosféricas incidentes em uma torre durante as tempestades de inverno [14]. A medição das correntes foi realizada através de dois sistemas instalados no topo de uma torre de 150 m de altura, situada a 125 m acima do nível do mar. A Fig. 2.8 mostra a configuração dos dois sistemas de medição. O primeiro sistema era composto por dois “shunts” coaxiais, um de $2\text{ m}\Omega$, instalado em um captor tipo haste e outro, de $4\text{ m}\Omega$, instalado em um captor também tipo haste só que conectado a um condutor em forma de anel. Além dos “shunts”, o sistema era composto por conversores E/O e O/E, cabos de fibra ótica e registradores de transitórios controlados por computador. Foram utilizados três registradores de transitórios, dois com capacidade de memória de 32 kB e um de 64 kB. As memórias do dois primeiros registradores eram divididas em 5 partes; o intervalo de amostragem era de 100 ns com período delimitador mínimo de 0,5 ms, de modo a possibilitar o armazenamento de cinco “strokes” de uma mesma descarga. O terceiro

registrador, com intervalo de amostragem de $1\ \mu\text{s}$, foi utilizado para armazenar descargas múltiplas com correntes contínuas. A Fig. 2.9 mostra o diagrama de blocos desse sistema.

Fig. 2.8 – Configuração tridimensional do topo da torre (adaptada de [14]).

O segundo sistema consistia em um conjunto de 5 bobinas de Rogowski, um integrador passivo RC (constante de tempo t_c de 75 ms), conversores óticos, cabos de fibra ótica e registradores de transitórios controlados por computador. As 5 bobinas foram conectadas de forma a se obter as correntes totais das descargas incidentes na torre. Neste sistema foram utilizados inicialmente dois registradores de 8 bits, com capacidades de memória de 4 kB e 8 kB e intervalos mínimos de amostragem de 50 ns e $1\ \mu\text{s}$, respectivamente. Para se obter formas de onda mais precisas de correntes, a memória do registrador de transitórios mais rápido (4 kB) foi dividida em 4 partes e o intervalo de amostragem foi ajustado para $0,2\ \mu\text{s}$. Além disso, o registrador mais lento armazenava as descargas múltiplas e as correntes contínuas com intervalo de amostragem de $10\ \mu\text{s}$ ou $20\ \mu\text{s}$. Após alguns anos estes registradores foram substituídos por outros com capacidades de memória de 16 kB, 12 bits por palavra e intervalos de amostragem de $1\ \mu\text{s}$ e $10\ \mu\text{s}$, respectivamente. A Fig. 2.10 mostra o diagrama de blocos desse sistema.

Fig. 2.9 – Diagrama de blocos do sistema 1 (adaptada de [14]).

Fig. 2.10 - Diagrama de blocos do sistema digital 2 (adaptada de [14]).

Após a análise das medições, verificou-se que as descargas atmosféricas de inverno apresentam características diferentes das de verão. Dentre elas, destacam-se: o número de descargas positivas durante o inverno é muito maior do que durante o verão e, diferentemente do que ocorre no verão, as maiores amplitudes de corrente são associadas aos “strokes” subsequentes, e não ao primeiro.

Os trabalhos realizados por Eriksson et al [15, 16] foram motivados pela necessidade de uma melhor compreensão dos efeitos das descargas atmosféricas nas linhas de distribuição. A pesquisa, realizada na África do Sul, envolveu a medição de correntes incidentes diretamente em uma linha de distribuição de 11 kV não energizada, construída especialmente para essa pesquisa, e de sobretensões induzidas devido a descargas atmosféricas próximas a essa linha. A linha foi construída aproximadamente a 30 km de Pretória e tinha 9,9 km de comprimento, sendo retilínea na maior parte de sua extensão. A Fig. 2.11 mostra a configuração dos postes utilizados nessa linha.

Fig. 2.11 - Estrutura típica dos postes da linha de teste (adaptada de [15]).

Os postes eram de madeira, sendo as fases separadas por 1m e fixadas por isoladores de porcelana tipo pino. O tipo de estrutura de poste escolhido permitia a instalação de

um cabo guarda, que seria um estágio posterior do trabalho. As três fases da linha eram aterradas em uma das extremidades, ficando em aberto na outra. Duas estações de gravação foram construídas, sendo uma delas denominada NEERI – “National Electrical Engineering Research Institute”, localizada a 4,3 km da extremidade aterrada da linha e a outra, denominada ESCOM – “Electricity Supply Commission”, localizada nas proximidades da extremidade da linha em aberto.

A estação NEERI tinha como função principal a medição das tensões induzidas e a localização das descargas atmosféricas que as originaram. Na Fig. 2.12 tem-se uma visão geral dessa estação, que consistia basicamente em um sistema automático de medição e gravação das tensões induzidas, um sistema automático de fotografia e filmagem das descargas, dois contadores de descargas (“International Council on Large Electric Systems” (CIGRÉ), tipos 500 Hz e 10 kHz) e um gerador a diesel controlado pelo contador de descargas ou por um sistema de controle remoto via rádio.

Fig. 2.12 - Visão geral da estação de gravação NEERI [15].

Para medição das tensões induzidas nas três fases da linha foram utilizados divisores de tensão com isolamento de 250 kV, banda de frequência de 0 a 15 MHz e capacidade de resposta para ondas com tempo de subida de 0,2 μ s. Todas as medições de tensão tinham como referência uma malha de terra sob a estação. Os divisores de tensão e os instrumentos de medição foram conectados à malha de terra em um único ponto, de forma a garantir a mesma referência em todas as medições. Fotografias e vídeos das descargas atmosféricas eram utilizados para determinar a distância das mesmas à linha de distribuição, uma vez que era medido o tempo entre o relâmpago e o trovão. Todos os instrumentos da estação foram projetados para operação automática. Tanto o funcionamento do gerador a diesel como da instrumentação da estação era controlado de Pretória via rádio "Very High Frequency" (VHF). A estação ESCOM foi equipada com um divisor de tensão e três transdutores de corrente. Ambas estações foram equipadas com contadores de descargas para determinar a densidade de descargas nuvem-terra na região. Após a primeira temporada de medições, eles magnéticos foram montados junto aos condutores terra de cada poste ao longo da linha para possibilitar a medição das correntes incidentes diretamente na mesma.

A maioria das formas de onda de tensões induzidas medidas foi unipolar, de polaridade positiva, raramente excedendo 300 kV. Além disso, a distribuição calculada das amplitudes das correntes de descargas para terra foi similar à distribuição do CIGRÉ, com valor médio maior que 30 kA.

Durante duas estações de chuvas, Eriksson e seu grupo mediram correntes incidentes diretamente em uma linha de distribuição desprotegida e as tensões induzidas na mesma. Entretanto, na terceira temporada resolveram estudar o efeito dos pára-raios com e sem "gap" na redução das tensões induzidas [17]. Primeiro, a linha foi mantida não energizada e, depois, energizada para que fosse possível analisar o efeito da passagem das correntes das descargas nos pára-raios, com a linha energizada. Finalmente, instalaram vários transformadores na linha. Apesar de não se ter sido obtido uma quantidade de dados estatisticamente relevante e da configuração específica da linha, os pesquisadores fizeram algumas recomendações, como a

mudança da especificação dos pára-raios de 5 kA para 10 kA para a concessionária ESCOM (“Electricity Supply Commission”).

Um outro trabalho realizado por Geldenhuys, Eriksson e seus colaboradores [18] consistiu na construção de uma estação para medição das correntes das descargas atmosféricas incidentes em um mastro de 60 m de altura com estais feitos de material isolante, cuja base foi fixada no solo através de quatro isoladores. As correntes foram medidas através de instrumentos instalados na base do mastro, diferentemente de Nakahori [11], que mediu as correntes no topo da torre. Para minimizar a diferença de potencial entre a base do mastro e a sala de aquisição de dados foi construída uma malha de terra na base desse mastro. Além disso, um grupo motor-gerador foi utilizado para isolar a alimentação dos equipamentos de medição situados na base do mastro. Os instrumentos de aquisição foram colocados em uma sala situada a 10 m de distância do mastro. A sala foi construída como uma gaiola de “Faraday” e era ligada à base do mastro através de uma conexão de baixa impedância. Quando as descargas atingiam o mastro, as correntes passavam por um transformador de corrente de banda larga. Os sinais eram então gravados por um sistema digital de aquisição de dados totalmente automatizado (intervalo de amostragem de 50 ns), o qual era ativado por uma unidade especial de “trigger”. Outros três sistemas de gravação foram utilizados para fornecer informações adicionais e funcionar como um “back-up” na eventual falha do sistema de aquisição. Estes sistemas eram:

1. um centelhador que isolava o mastro do terra, sendo que, na incidência de descargas no mastro as correntes fluíam por ele, produzindo marcas de arco inconfundíveis em seus eletrodos;
2. elos magnéticos instalados no mastro, cuja função era medir a polaridade e o pico das correntes das descargas com precisão de aproximadamente 10 %;
3. um gravador digital alimentado por baterias. Esse sistema era capaz de gravar as formas de onda de descargas múltiplas, bem como as suas durações. As descargas eram gravadas com intervalos de amostragem variáveis, iniciando em 0,2 μ s, depois com 2 μ s, 40 μ s e por último 400 μ s.

Filmadoras e máquinas fotográficas foram colocadas em três diferentes pontos ao redor do mastro e usadas para identificar se as descargas foram ascendentes ou descendentes e estimar suas distâncias em relação ao mesmo. A densidade de descargas na região da torre foi medida por um contador de descargas à terra CIGRÉ 10 kHz.

Um grupo de pesquisadores colombianos, liderado por Torres et al [19 – 22], fez medições de correntes incidentes em uma torre e de tensões induzidas em uma linha de distribuição. No início, assim como em [11], mediu-se apenas as correntes. Um parâmetro significativo para a definição do tipo de descarga a ser estudada era a altura da torre. Se a torre fosse baixa (< 60 m), a probabilidade de ocorrer descargas descendentes seria muito maior do que a de ocorrer descargas ascendentes. Por essa razão, a torre foi construída com 30 m de altura, de modo a minimizar a ocorrência de descargas ascendentes. Entretanto, a altura final da estrutura incluindo a base e o captor do tipo Franklin era de 35 m. A torre escolhida era metálica, do tipo rádio amplitude modulada (AM) com estais feitos com isoladores poliméricos. A impedância de surto da torre era 175Ω , enquanto a impedância de aterramento medida na frequência de 1275 Hz era de 35Ω [19]. Em sua base de formato piramidal foi instalado o equipamento transdutor constituído por um tubo de aço vertical de 3 m de comprimento (pelo qual a corrente era conduzida até a terra), por uma bobina de Rogowski diferenciadora, por uma bobina de Rogowski integradora, por um resistor “shunt” e por um transformador de corrente Pearson (modelo 1423). O osciloscópio utilizado nas medições era digital, com largura de banda de 200 MHz para sinais não repetitivos. Cada equipamento de medição foi ligado ao osciloscópio através de um cabo coaxial RG58 de 5 m de comprimento. Esses cabos foram aterrados na base do resistor “shunt” e na entrada da sala de medição, como pode ser visto na Fig. 2.13.

Como o equipamento escolhido para auxiliar na medição de correntes era sensível à presença de objetos metálicos próximos ao tubo de aço, a base da torre foi construída com pilares e colunas de concreto, de modo a evitar interferência no funcionamento

desses equipamentos. A Fig. 2.14 mostra a base da torre e a estação de instrumentação nomeada ILYAPA.

Fig. 2.13 – Conexões físicas (adaptada de [20]).
 BRD – Bobina de Rogowski Diferenciadora
 BRI – Bobina de Rogowski Integradora

Fig. 2.14 – Esquema da estação ILYAPA (adaptada de [19]).

Como pode ser visto na Fig. 2.14, a estação de instrumentação foi construída sobre isoladores para evitar distorções nos sinais medidos e aumentar a segurança para as pessoas e equipamentos dentro dela. As medições das tensões induzidas foram feitas em apenas um ponto de uma linha de distribuição de 13,2 kV, trifásica e energizada, de aproximadamente 3 km de comprimento e 10 m de altura. O modelo da linha era

do tipo convencional, com ramificações e transformadores. A Fig. 2.15 mostra a configuração da linha e a localização dos pontos de medição de correntes e tensões induzidas.

Fig. 2.15 – Diagrama unifilar da linha de distribuição experimental (adaptada de [21]).

Os postes da linha eram metálicos e os condutores foram apoiados em isoladores de porcelana. As tensões induzidas foram medidas com o auxílio de um divisor capacitivo Pearson (modelo VD305A) com 300 kV de tensão máxima, relação de 4975:1 (obtida em laboratório), tempo de subida de 100 ns, faixa de frequências de 30 Hz a 4 MHz e capacitância total de 18 pF. O divisor capacitivo foi ligado ao osciloscópio através de um cabo coaxial blindado RG58 com 10 m de comprimento aterrado próximo ao divisor, conforme mostrado na Fig. 2.16. Para registrar os sinais utilizou-se um osciloscópio digital com banda de 25 MHz para sinais não repetitivos.

Fig. 2.16 - Configuração do sistema de medição (adaptada de [22]).

Até o momento, não foram apresentados registros simultâneos de correntes de descargas e das respectivas tensões induzidas. Com base nos sinais de tensão medidos, os pesquisadores concluíram que a amplitude da primeira crista pode ser menor que a das cristas subseqüentes, possivelmente devido às reflexões causadas pelo fato da linha ser trifásica e de ter dispositivos a ela acoplados. Os resultados das medições das tensões induzidas foram comparados com valores teóricos calculados através dos modelos de Rusck e de Agrawal, assumindo-se uma determinada amplitude e forma de onda para a corrente da descarga. As formas de onda medidas e calculadas apresentaram boa concordância apenas nos primeiros microsegundos. Provavelmente, a falta de conhecimento de parâmetros importantes como formas de onda das correntes das descargas, velocidades dos “return strokes”, campos eletromagnéticos, etc. e o fato de não ter sido consideradas as tensões induzidas nos ramais da linha foram a causa da concordância insatisfatória dessas formas de onda.

No Brasil, desde 1985 a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) faz a medição de parâmetros relacionados às correntes das descargas atmosféricas [23-25]. Uma estação de medição e aquisição foi projetada, tendo em vista a obtenção das formas de onda das correntes, dos respectivos campos elétricos associados e do número de descargas para a terra na região onde se situa a estação. Para captar as descargas atmosféricas foi construído um mastro de 60 m de altura no Morro do Cachimbo, a 15 km de Belo Horizonte. O mastro é isolado da terra por isoladores e é sustentado por estais fabricados com material isolante. Em sua base foi instalado o sistema de medição, composto por um transdutor (25 V/kA) em série com um resistor de $0,5 \Omega$ e por outro menos sensível (5 V/kA), em série com um “gap” de 0,5 mm. A Fig. 2.17 mostra que o conjunto resistor-transdutor está em paralelo com o “gap”-transdutor, de modo que os sinais inferiores a 20 kA fluem pelo transdutor mais sensível e os superiores, pelo menos sensível. As densidades dos fluxos magnéticos associados às correntes são medidas por elos magnéticos. Através desses dados é possível obter os valores de pico das correntes e compará-los com os registrados pelos osciloscópios.

Fig. 2.17 – Detalhe da distribuição de corrente entre os transdutores (adaptada de [25]).

O número de descargas nuvem-terra incidentes na região é fornecido por um contador CIGRÉ 10 kHz que funciona em várias bandas de frequência. Quando uma descarga é computada pelo contador, um sinal é enviado para a cabine de instrumentação, que inicia o processo de aquisição de dados de correntes, de campos elétricos e das fotografias e dos vídeos do canal das descargas. O campo elétrico é registrado no nível do solo por um “moinho de campo” (“field mill”). Duas estações remotas foram construídas para alojar equipamentos que fotografam e filmam as descargas, possibilitando a reconstituição tridimensional do canal da descarga e a determinação do tipo de descarga incidente na torre (descendente ou ascendente). A Fig. 2.18 apresenta a disposição das instalações.

De novembro de 1985 a janeiro de 1994 foram registradas 63 descargas diretas no mastro. Observou-se que as intensidades das correntes, em regiões tropicais, são 21 % superiores às descargas incidentes em regiões temperadas do hemisfério norte, sendo o número de descargas subsequentes duas vezes maior [26].

Fig. 2.18 – Esquema de localização dos equipamentos utilizados (adaptada de [25]).

2.2 Medições de descargas provocadas artificialmente

P. P. Barker e seus colaboradores [27] realizaram, nos EUA, medições simultâneas de tensões induzidas e de campos elétrico e magnético devidos a descargas provocadas artificialmente por foguetes, apresentando também medições da forma de onda da corrente da descarga. O objetivo primordial do trabalho, apoiado pelo “Electric Power Research Institute” (EPRI), era obter dados para aperfeiçoar algoritmos de cálculo de descargas disruptivas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas.

As descargas eram provocadas por meio do disparo de foguetes que arrastavam um fio de cobre de 0,2 mm de diâmetro. Quando o foguete atingia altura suficiente, uma descarga era provocada, vaporizando o fio. A primeira descarga de retorno resultante não era considerada, aproveitando-se os resultados referentes às descargas subsequentes, bem após a vaporização do fio. Para o estudo das tensões induzidas foi construída uma linha experimental de 682 m com dois condutores separados de 1,83 m na vertical, suportados por 15 postes de madeira espaçados de cerca de 49 m,

conforme indicado na Fig. 2.19. As linhas não continham nenhum equipamento e o condutor inferior, adotado como neutro, era aterrado nas duas extremidades e também no poste 9, ponto de medição de tensão induzida, estando a resistência de aterramento na faixa de $30\ \Omega$ a $75\ \Omega$. O condutor superior, a 7,5 m de altura, foi utilizado para as medições e tinha em cada uma de suas extremidades um resistor de $455\ \Omega$ conectado entre ele e o neutro. Para minimizar a ocorrência de descargas disruptivas, a linha foi construída com tensão crítica de descarga disruptiva (CFO) de cerca de 500 kV, superior à CFO de linhas de distribuição convencionais.

Fig. 2.19 – Esquema da linha de distribuição, da base de lançamento e da localização dos pontos de medição de campos (adaptada de [27]).

A corrente da descarga era medida por meio de transformadores de banda larga e resistores “shunt” localizados no lançador dos foguetes. A corrente no lançador, provocada pelo foguete, passava através desses sensores antes de atingir a terra. Registradores de transitórios (LTRs) e osciloscópios digitais (LeCroy 9314 e Nicolet Pro-90) foram usados para gravar os sinais dos transformadores e dos “shunts”. Os osciloscópios digitais foram instalados a cerca de 100 m do lançador e conectados aos sensores por meio de fibras óticas. Um intervalo de amostragem de 20 ns foi utilizado no digitalizador LeCroy 9314. Intervalos de amostragem de 100 ns e 2 μ s foram usados para os osciloscópios Nicolet Pro-90 de 8 e 12 bits, respectivamente. Como elementos de segurança para as medições (“backup”), os LTRs foram instalados na base do lançador e amostravam a corrente com intervalos de 200 ns para uma duração de varredura de 1 s. O osciloscópio utilizado para medição das

correntes das descargas foi usado como "mestre" para fazer o "trigger" dos osciloscópios de medida das tensões induzidas. Cabos de fibras óticas foram utilizados para a transmissão dos sinais de controle de "trigger". As tensões induzidas eram medidas no meio da linha e em suas extremidades por meio de divisores de tensão resistivos, de banda larga. Esses divisores tinham um tempo de subida de cerca de 30 ns, que foi considerado mais do que suficiente para essa aplicação.

As formas de onda das tensões induzidas foram amostradas a intervalos de 100 ns pelos osciloscópios digitais Nicolet e a intervalos de 200 ns pelos LTRs. Os osciloscópios foram instalados em estruturas blindadas e conectados aos divisores de tensão através de fibras óticas. Os LTRs estavam localizados em cada divisor e conectados diretamente ao sensor por um cabo de sinal blindado, sendo "disparados" independentemente.

O campo magnético axial foi medido a 50 m e a 110 m do ponto de descarga através de sensores de campo magnético de espaço livre, com banda de 2 kHz a 150 MHz. A medição do campo elétrico era realizada nos mesmos pontos através de sensores esféricos com banda de 1 kHz a 150 MHz. Sinais dos dois tipos de sensores eram transmitidos através de fibras óticas a osciloscópios digitais com intervalo de amostragem de 20 ns. Para ambas as medições (campos magnético e elétrico) a banda era limitada a 30 MHz pelo osciloscópio digital.

As conclusões do trabalho ressaltaram que os valores de pico das tensões medidas são 63 % maiores que as calculadas pela teoria de Rusck. Isto deveria aumentar as taxas de ocorrência de descarga disruptiva previstas, mas como o nível básico de isolamento (NBI) é definido com a forma de onda normalizada (1,2/50 μ s) e as tensões medidas resultaram com tempos de frente maiores e duração menor, esse efeito deveria ser atenuado. Apesar dos pára-raios não terem sido instalados na linha, concluiu-se que o espaçamento entre eles deve ser menor que 400 m para minimizar a ocorrência de descargas disruptivas.

Dando seqüência ao estudo iniciado por Barker [27], um outro grupo de pesquisadores, continuou medindo correntes e tensões induzidas na linha de distribuição monofásica por descargas atmosféricas provocadas por foguetes. Além disso, o grupo começou a avaliar o desempenho de pára-raios em resposta a descargas diretas nesta mesma linha [28, 29]. Foram realizadas algumas modificações na infra-estrutura nesta nova etapa do estudo. A nova instalação do centro de pesquisas “International Center for Lightning Research and Testing” (ICLRT), em Camp Blanding, compreende uma linha de distribuição aérea, um cabo subterrâneo, transformadores “padmount” e uma entrada de consumidor (residência simulada). A linha aérea tem cerca de 730 m de extensão, ao invés dos 682 m anteriores, como indicado na Fig. 2.20. Ela é constituída por dois condutores separados por 1,8 m na vertical e montados em isoladores com tensão crítica de descarga disruptiva de 500 kV. O condutor superior corresponde à fase, enquanto que o neutro é representado pelo condutor inferior. A linha é terminada por sua nova impedância característica, igual a 500Ω . O cabo subterrâneo, coaxial, com 735 m de comprimento, é coberto com uma camada isolante, estando contido num eletroduto de “poly vinyl chloride” (PVC) enterrado à profundidade de 0,9 m.

Fig. 2.20 – Instalações do Centro Internacional de Pesquisa e Teste de Descargas Atmosféricas (ICLRT) em Camp Blanding, Flórida (adaptada de [28]).

A técnica utilizada para iniciar as descargas é basicamente a mesma de [27] e consiste no lançamento de um pequeno foguete com um fio de cobre bem fino amarrado em sua cauda e preso no solo [29]. Quando o sensor de campo elétrico mede um valor na faixa de 4 kV/m a 10 kV/m, sabe-se que existe a iminência de uma descarga, sendo então lançado o foguete. Ao atingir 200 m a 300 m de altitude, o

campo próximo à ponta do foguete aumenta de tal forma que ocorre a formação do “leader” ascendente, que vaporiza o fio e inicia a chamada corrente contínua inicial. Após o término da corrente contínua, em geral, inicia-se a primeira descarga subsequente, que, assim como as demais, segue o caminho traçado pelo fio. A unidade de lançamento de foguetes vista na Fig. 2.20 foi montada sobre uma torre de 11 m localizada a 20 m da linha aérea, entre os postes 9 e 10.

Várias configurações foram testadas e as descargas provocadas foram direcionadas ora a um dos condutores da linha ora à unidade de lançamento. A configuração 96-A [28] foi a única em que as descargas provocadas artificialmente foram dirigidas ao aterramento na base de lançamento. Com isso, foi possível a medição das correntes e tensões induzidas na linha. O cabo subterrâneo não foi conectado à linha aérea e os transformadores foram desconectados do cabo subterrâneo. Não foram utilizados pára-raios na linha e o condutor neutro foi aterrado nos postes 1, 9 e 15. Nas outras configurações analisou-se o desempenho dos pára-raios quando descargas diretas incidiam na linha. As descargas foram direcionadas ora para o condutor fase ora para o condutor neutro. Além disso, várias combinações foram feitas para estudar o comportamento de um sistema de distribuição quando submetido a correntes de descargas atmosféricas. O cabo aterrado foi conectado à linha em alguns casos; os transformadores eram conectados ou não ao cabo subterrâneo; os pára-raios foram instalados no primário do transformador e em alguns pontos da linha e o neutro foi aterrado em vários pontos da linha aérea: em cada pára-raios, na entrada do consumidor e na estação de instrumentação 4. Os dispositivos de proteção contra surtos (SPDs) foram instalados na entrada do consumidor.

Nos testes realizados em 1997 a ênfase da pesquisa foi dada aos efeitos de descargas diretas no aterramento do sistema de proteção da residência simulada, tendo a entrada do consumidor sido ligada ao secundário do transformador na estação de instrumentação 1. Este transformador estava conectado ao cabo subterrâneo, mas o cabo não foi ligado à linha aérea. Os condutores neutros estavam aterrados na entrada do consumidor, no transformador da estação de instrumentação 1 e na estação de instrumentação 4. O aterramento da residência simulada consistia de duas

hastes verticais interconectadas, separadas por cerca de 3 m. A linha aérea foi configurada como em 96-A [28] em todos os experimentos de 1997. Em relação à configuração 96-A, 30 % da corrente total no neutro das extremidades da linha correspondiam às correntes induzidas. Considerando as outras configurações, os pára-raios absorveram maior quantidade de energia quando instalados bem próximos ao ponto de incidência das descargas. A quantidade de energia absorvida variou entre 5 % e 15 % da capacidade máxima de energia dos mesmos, sendo associada às descargas de retorno individuais.

2.3 Estudos em modelo reduzido

O trabalho desenvolvido no Instituto de Eletrotécnica e Energia [7-10, 30-41] teve como objetivo estudar o comportamento das tensões induzidas e analisar quantitativamente a influência de vários parâmetros em suas amplitudes e formas de onda. A pesquisa objetivou ainda a análise da eficácia de diferentes alternativas de proteção tendo em vista a melhoria do desempenho de linhas de distribuição face a descargas atmosféricas. Diferentemente das pesquisas citadas anteriormente, que envolveram descargas naturais, esse estudo foi realizado utilizando-se um modelo em escala reduzida. A vantagem desse método é que após a implementação do modelo, as descargas podem ser simuladas em qualquer ponto, quantas vezes forem necessárias e com as características desejadas. Além disso, os ensaios são realizados em condições controladas, com o conhecimento de todos os parâmetros com influência relevante no mecanismo de indução das tensões. O fator de escala para comprimento do modelo era 1:50, sendo que a Tabela 2.1 apresenta os fatores para outras grandezas importantes.

Em uma primeira etapa [7], o modelo construído era composto por duas linhas de distribuição, sendo que uma delas era a linha de referência (monofásica), ou seja, sem nenhum dispositivo de proteção. Na outra, trifásica, com configuração horizontal e sem ramais, estudou-se o efeito de pára-raios e de cabo guarda, bem como a influência de vários parâmetros como impedâncias de aterramento, locais e número de pontos de aterramento, pontos de medição das tensões induzidas, altura

dos condutores e do cabo guarda em relação ao solo, amplitude e forma de onda da corrente, etc.. A Fig. 2.21 apresenta uma visão geral do modelo.

Tabela 2.1 – Fatores de escala [7].

Grandeza	Fator de escala
comprimento	1:50
tempo	1:50
condutividade	50:1
permeabilidade	1:1
permissividade	1:1
velocidade	1:1
resistência	1:1
capacitância	1:50
indutância	1:50

As linhas tinham 28 m de extensão (correspondendo a 1,4 km no sistema real), eram casadas em ambas extremidades para evitar a ocorrência de reflexões e estavam à mesma distância do modelo do “return stroke” (m.r.s.), correspondente a 70 m. O plano de terra, considerado condutor perfeito, foi construído com chapas de alumínio totalizando uma área correspondente a $1,4 \times 0,45 \text{ km}^2$.

Fig. 2.21 – Modelo reduzido para estudos de tensões induzidas [10].

Em [30], como a representação do canal do “return stroke” foi feita utilizando-se o Modelo da Linha de Transmissão, a velocidade de propagação pôde ser determinada por

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

sendo

L - indutância distribuída (H/m);

C – capacitância distribuída (F/m).

O m.r.s. foi construído dispondo-se helicoidalmente um condutor de cobre de 0,7 mm de diâmetro em um tubo de PVC de 25,4 mm de diâmetro e 12 m de altura, de forma que ao variar-se o espaçamento entre as espiras pôde-se ajustar os parâmetros L e C do canal a fim de se obter a velocidade de propagação de 11 % da velocidade da luz no vácuo para 323 espiras por metro de tubo [30, 31]. A determinação da velocidade e da impedância característica do m.r.s. foi feita através da análise das reflexões do sinal aplicado por um gerador de degrau ligado a sua entrada, com a outra extremidade em aberto.

A utilização do modelo em escala reduzida para estudo de sobretensões devido a descargas atmosféricas implica na necessidade de geração de correntes bastante íngremes, isto é, com tempos de subida da ordem de nanossegundos. Isto decorre da teoria da modelagem, pois quando o meio é o mesmo para os dois sistemas, os fatores de escala para tempos e comprimentos são iguais. Assim, para um modelo em escala 1:50, o tempo de frente do impulso necessário para simulação de uma corrente de descarga típica (subida em torno de 3 μs) seria da ordem de 60 ns. A técnica aplicada na pesquisa para geração de correntes com frentes ríspidas consistiu na utilização de um cabo blindado, carregado através de uma fonte de tensão contínua [10]. Para medição das correntes foi utilizada uma ponta de prova A6302 da Tektronix®, que permitia a realização de medições desde corrente contínua até 50 MHz, através da associação de um gerador Hall e um transformador de corrente, cujos sinais eram combinados em um amplificador AM503, ligado à ponta. O

sistema de medição resultante tinha tempo de subida ≤ 7 ns e tensão máxima de isolamento igual a 500 V [10].

Para medição das tensões induzidas foram utilizadas pontas de prova de alta impedância associadas a um osciloscópio de armazenamento digital. A taxa de amostragem do osciloscópio utilizado para as medições era de 500 MS/s (faixa de resposta de 200 MHz).

Nessa primeira etapa foram obtidas as seguintes conclusões [7]:

- o valor máximo de tensão induzida ocorre no ponto da linha mais próximo ao local de incidência da descarga;
- o tempo de frente da corrente tem efeito significativo nas formas de onda das tensões induzidas;
- as tensões induzidas são proporcionais à altura da linha.

Vários testes realizados em [34] permitiram avaliação, para uma situação representativa de condições reais, da influência do intervalo entre os pontos de aterramento, do valor da resistência de aterramento e da posição relativa entre o cabo guarda e os condutores fase. Em relação à utilização de cabos guarda foi concluído que, independentemente da altura do cabo guarda, as tensões induzidas sofrem reduções mais acentuadas à medida em que diminuem os intervalos entre os pontos de aterramento; o efeito do cabo guarda torna-se mais significativo à medida em que aumenta o seu acoplamento com os condutores fase e à medida que aumenta a corrente que circula para terra; a redução da resistência de aterramento implica em aumento da corrente para terra, o que traz como consequência uma redução mais significativa da tensão induzida.

Após a análise do cabo guarda como dispositivo de proteção, foi estudado o efeito dos pára-raios na redução das tensões induzidas. O modelo de pára-raios era um circuito composto por diodos e resistores [35-38]. Para comprovar a validade do modelo desenvolvido foram realizados ensaios para obtenção da curva característica $U \times I$ de pára-raios de distribuição típicos, tanto de carboneto de silício como de

óxido de zinco. Muitos ensaios em condições controladas foram realizados para avaliação de parâmetros como o espaçamento entre pára-raios, resistência de aterramento, amplitude da corrente do “return stroke”, relação entre a distância entre o local de incidência das descargas e os pára-raios. Através da análise dos resultados foram obtidas as seguintes conclusões principais:

- de maneira geral, para resistências de aterramento superiores a 50Ω e forma de onda de corrente da descarga fixa, as relações entre valores de pico das tensões induzidas em linhas com e sem pára-raios praticamente independem da amplitude da corrente da descarga;
- para a mesma amplitude, um aumento na taxa de variação da corrente no tempo (dI/dt) reduz a eficácia dos pára-raios;
- sob condições favoráveis é possível obter reduções da ordem de 80 % nos valores das tensões induzidas (isto é, tensões com amplitudes de aproximadamente 20 % daquelas que seriam induzidas em linhas sem proteção). Nas situações mais desfavoráveis analisadas, a redução obtida foi de aproximadamente 20 %;
- à medida que o espaçamento diminui, o efeito dos pára-raios se torna mais acentuado;
- a resistência de aterramento tem maior influência na eficiência da proteção, principalmente quando a descarga incide em frente ao conjunto de pára-raios;
- melhores resultados são obtidos quando da instalação de pára-raios nas três fases. Em relação à utilização de pára-raios apenas na fase central, a diferença é significativa apenas quando os resultados são comparados àqueles obtidos nas fases externas.

Em uma outra etapa do estudo, foram analisadas as características das tensões induzidas em linhas de distribuição urbanas [39-41]. As simulações foram feitas considerando-se o neutro e as presenças de ramais, de edifícios maiores e menores que as linhas e de equipamentos como pára-raios e transformadores. As tensões induzidas não são afetadas somente pela presença de ramais, mas, também, pelas condições de suas extremidades. No caso de ramais longos ou terminados em pára-raios, as tensões induzidas tendem a diminuir. Quanto menor a distância entre o ponto de medição e o ramal mais próximo, maior a redução. Por outro lado, se os

ramais são abertos, as tensões induzidas podem aumentar quando a distância entre o ponto de medição e o ramal mais próximo se torna menor. A presença de edifícios pode reduzir o campo eletromagnético e, conseqüentemente as tensões induzidas. Entretanto, estruturas altas podem atrair descargas próximas à linha e, por conseqüência, elevadas sobretensões podem ser induzidas mesmo quando as correntes das descargas forem de intensidade moderada. Os autores ressaltam, contudo, que nos testes realizados as edificações foram simuladas por meio de estruturas metálicas conectadas ao solo, o que é a situação mais favorável em termos de redução das amplitudes das tensões induzidas. Embora para o fenômeno estudado árvores e edifícios possam ser considerados bons condutores, uma simulação perfeita por meio do modelo em escala 1:50 construído requereria o uso de materiais com condutividades 50 vezes maiores que aquelas correspondentes aos materiais utilizados em edificações reais, visto que o fator de escala para a condutividade é o inverso daquele para comprimentos. Por essa razão os resultados apresentados são qualitativos e devem ser vistos como limites, isto é, em situações reais a redução das tensões causada pela presença de estruturas próximas à linha será menor do que aquela obtida através dos testes realizados [39].

Um outro grupo que lidou com modelo reduzido foi o de Ishii e seus colaboradores [42]. As formas de onda das correntes das descargas, das tensões induzidas em uma linha aérea e dos campos elétricos verticais e horizontais associados foram medidas em um modelo com fator de escala 1:20, no qual a condutividade do solo não era infinita. Além disso, tensões induzidas foram calculadas através dos modelos de Agrawal [43] para solo com condutividade igual a 0,06 S/m e de Rusck [3] para solo condutor perfeito. As formas de ondas calculadas foram comparadas às medidas. Para se determinar as características elétricas do solo, campos elétricos horizontais também foram calculados e comparados aos medidos. O modelo do canal da descarga, de 28 m de comprimento foi construído com fio de cobre de 0,5 mm de diâmetro, enrolado ao redor de uma haste isolante de 1,5 cm de diâmetro. Este conjunto era suspenso por um balão. Os pulsos de corrente injetados na base do canal se propagavam a uma velocidade de 125 m/ μ s e eram refletidos em seu topo (extremidade em aberto). A medição das formas de onda das correntes foi feita na

base do canal, utilizando-se um transformador de corrente com faixa de frequências de 8,5 a 100 MHz. A Fig. 2.22 mostra o modelo da linha de distribuição, de 25 m de extensão, situado a aproximadamente 7,5 m do canal da descarga. Seus cabos de cobre de 0,5 mm de diâmetro foram instalados a 0,5 m do solo. As extremidades da linha eram deixadas em aberto ou terminadas com resistências de $430\ \Omega$. As tensões induzidas foram medidas em ambas as extremidades da linha através de pontas de prova com impedância de entrada de 20 pF e faixa de frequências de 0 a 100 MHz.

Fig. 2.22 – Planta de localização da linha de distribuição e do canal da descarga (adaptada de [42]).

As faixas de frequência em que foram medidos os campos elétricos verticais e horizontais eram de 2 kHz a 20 MHz e de 6,4 kHz a 6 MHz, respectivamente. Os campos elétricos verticais e horizontais foram medidos por antenas montadas em uma caixa isolada da terra através de um prato de 15 mm de espessura feito de material isolante. Uma comparação foi feita aplicando-se os métodos de Rusck [3] e Agrawal [43] no cálculo de tensões induzidas em uma linha finita, considerando o solo condutor perfeito. Verificou-se que os dois métodos obtiveram o mesmo valor de tensões. Os resultados das comparações entre as tensões medidas e calculadas revelaram que a condutividade do solo tem efeito significativo nas formas de onda dessas tensões. Se o local de incidência da descarga for próximo a uma extremidade da linha, as tensões induzidas nesta extremidade são tão maiores quanto menor for a condutividade do solo.

Ao final da análise de todos trabalhos aqui apresentados comprovou-se que, com exceção da pesquisa realizada pelo Grupo de Alta Tensão e Descargas Atmosféricas da Universidade de São Paulo (GATDA/USP), através de modelo reduzido, a eficácia dos pára-raios na redução de tensões induzidas em linhas de distribuição nunca foi determinada diretamente. Este trabalho representa, portanto, uma extensão do estudo anterior, buscando-se agora o desenvolvimento de um sistema que permita

a avaliação das tensões induzidas por descargas atmosféricas reais e a análise da eficácia de diferentes alternativas para melhoria do desempenho de linhas de distribuição face a descargas indiretas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema contempla a obtenção de registros simultâneos de correntes de descargas atmosféricas incidentes em uma torre e das correspondentes tensões induzidas em duas linhas experimentais monofásicas, não convencionais, situadas nas proximidades da mesma.

Com relação ao desenvolvimento do sistema propriamente dito, a metodologia adotada consistiu no projeto, construção e testes dos seguintes componentes:

- torre para captação de descargas atmosféricas;
- linhas experimentais;
- sistema para medição de correntes de descargas incidentes na torre;
- sistema para medição de tensões induzidas nas linhas experimentais.

Além disso, foram definidas as características a serem atendidas pelo programa computacional para gerenciamento e aquisição dos dados provenientes dos sistemas de medição, o qual foi elaborado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

A Fig. 3.1 mostra a torre, de 62,5 m de altura, feita de aço galvanizado. Para que as correntes incidentes na torre não sejam desviadas do resistor de medição e fluam até o sistema de aterramento, sua base é isolada da terra por isoladores de porcelana tipo suporte cilíndrico e seus estais são formados por um conjunto de bastões isolantes engastados.

As linhas experimentais são monofásicas, sustentadas pelos mesmos postes e têm aproximadamente 2,7 km de comprimento. Na linha mais afastada da torre foram instalados pára-raios e na linha mais próxima não foi instalado nenhum dispositivo de proteção. Essas duas linhas são separadas por cruzetas de madeira de 6 m de comprimento. Através de simulações computacionais realizadas com o ERM verificou-se que o efeito da distância de separação entre as duas linhas, em termos de

acoplamento, não é significativo. A Fig. 3.2 apresenta, a título de ilustração, um dos trechos das linhas experimentais.

Fig. 3.1 – Torre para captação de descargas.

Fig. 3.2 – Trecho das linhas experimentais.

As tensões induzidas na linha protegida são medidas em dois pontos estratégicos localizados a distâncias de 30 m e 181 m em relação ao pára-raios mais próximo. Na linha sem proteção os pontos de medição estão localizados em frente aos pontos correspondentes à linha com pára-raios. Têm-se, então, dois pontos de medição em cada linha. Nas duas extremidades da linha monofásica sem proteção foram

colocados resistores com valor de resistência igual ao da impedância característica da linha ($Z_c = 470 \Omega$) para evitar a ocorrência de reflexões. Já a linha com proteção está casada em uma extremidade, sendo que na outra foi instalado pára-raios.

O sistema de medição de correntes de descargas foi instalado na base da torre e é composto por um resistor “shunt”, também especialmente desenvolvido para este trabalho, um osciloscópio digital, uma bateria, um carregador de baterias, um contator e três pára-raios. Para a medição das correntes das descargas, instalou-se na base da torre um resistor “shunt” por onde toda corrente flui até atingir o sistema de aterramento. Na iminência de uma tempestade, a alimentação da rede no ponto de medição da corrente é desligada por meio do seccionamento de um trecho do cabo aéreo de alimentação. Isto provoca a abertura dos contatos normalmente abertos (NA) do contator (cuja bobina deixou de ser energizada) e o carregador é desligado da rede, enquanto a bateria é ligada ao osciloscópio através dos contatos normalmente fechados (NF) do mesmo contator. Quando as medições são encerradas, o trecho do cabo é conectado novamente ao circuito, restabelecendo-se a conexão da rede com o carregador e desligando-se, ao mesmo tempo, o osciloscópio da bateria.

O sistema de medição das tensões induzidas, em cada ponto de medição, é composto por dois divisores de tensão, dois osciloscópios, uma bateria, um carregador, dois contadores e dois pára-raios, sendo acionado através de disjuntores. O funcionamento do sistema de medição, aquisição e armazenamento de dados das tensões é similar ao de corrente. Há um conjunto de alimentação (bateria, carregador, contator, pára-raios) para cada dois osciloscópios situados no mesmo poste, devido à proximidade entre os equipamentos.

Após as medições das tensões e das correntes, as formas de onda são transmitidas via fibra ótica para uma estação de medição blindada localizada nas proximidades da torre. A aquisição é gerenciada e controlada por um programa computacional desenvolvido especialmente para essa finalidade. Na estação foi colocado um computador com um sistema multiplexador, o qual está conectado através de “mini

modems” de comunicação via fibra ótica com os 5 osciloscópios (um na base da torre e quatro nos postes). O computador armazena as informações obtidas das medições das correntes na torre e das tensões induzidas nas duas linhas, nos dois pontos de medição escolhidos.

O fato de se estimar um pequeno número de descargas diretas na torre, em torno de 1 descarga a cada ano e meio, não limita o número de tensões medidas nas duas linhas, tendo em vista que todas as descargas próximas às mesmas induzem tensões. Obviamente as amplitudes das tensões induzidas dependem da intensidade e da forma de onda das correntes das descargas, além da proximidade do local de incidência em relação às linhas, entre outros parâmetros.

O sistema visará, em uma primeira etapa, conhecer as características dos surtos induzidos e obter dados que permitam a avaliação da eficácia da instalação de pára-raios ao longo de linhas de distribuição, tendo em vista a melhoria do seu desempenho frente a descargas atmosféricas indiretas. Destaca-se que a metodologia desenvolvida é pioneira uma vez que possibilitará, pela primeira vez, a obtenção de subsídios para avaliação direta da efetividade da utilização de pára-raios, tendo em vista a redução das amplitudes das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas naturais, através das comparações entre as tensões induzidas pelas mesmas descargas em linhas com e sem pára-raios.

CAPÍTULO 4

SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Neste capítulo são descritas as características da torre para captação de descargas atmosféricas, construída dentro da área do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE/USP).

4.1 Número médio anual estimado de descargas diretas na torre

A torre tem 62,5 m de altura e o cálculo do número médio anual de descargas diretas (Nd) foi feito a partir do número anual de descargas para terra por quilômetro quadrado da região e da sua área de atração.

Para determinar o valor de Nd é necessário o conhecimento da densidade de descargas para terra (Ng). É recomendável que a determinação desse parâmetro, definido como o número anual de descargas para terra por quilômetro quadrado em uma determinada região, seja feita diretamente através de aparelhos ou sistemas projetados para essa finalidade [44]. Entretanto, quando Ng não é conhecida, é procedimento usual relacioná-la com o nível ceráunico (Td), definido como o número de dias do ano com incidência de trovoadas.

Em 1987 Eriksson propôs [45], após um período de seis anos de pesquisas na África do Sul, o uso da expressão:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \left(\frac{\text{descargas}}{\text{km}^2 \cdot \text{ano}} \right) \quad (2),$$

recomendada pelo Grupo de Trabalho do “Institute of Electrical and Electronics Engineers” (IEEE) relativo ao Desempenho de Linhas de Transmissão face a Descargas Atmosféricas [46].

Considerando-se $T_d = 70$ dias do ano com incidência de trovoadas para a cidade de São Paulo [47], obtém-se para N_g o valor de aproximadamente 8 descargas/($\text{km}^2 \cdot \text{ano}$).

Em 2002, o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) apresentou um trabalho propondo o mapa de densidades de descargas para terra por ano do Brasil indicado na Fig. 4.1. Este mapa foi obtido considerando-se uma relação de descargas entre nuvens / descargas nuvem-terra constante e igual a 1,5 [48]. As densidades de descargas para o solo foram obtidas comparando-se dados de satélite que registram todas as descargas com dados do sistema de detecção e localização de descargas instalado nas regiões sudeste e norte do Brasil. Devido ao curto período de observação, ainda é difícil atribuir com precisão uma incerteza aos resultados apresentados na Fig. 4.1.

Fig. 4.1 - Mapa de densidades de descargas atmosféricas para a terra (descargas/($\text{km}^2 \cdot \text{ano}$)) no Brasil – Período de 1998 a 2001 [48].

De acordo com a Fig. 4.1, a densidade de descargas para terra da cidade de São Paulo está na faixa de 4 a 8 descargas/($\text{km}^2 \cdot \text{ano}$).

Quando o canal da descarga atmosférica se aproxima de uma estrutura, há o surgimento de cargas de polaridade contrária às do canal em seu topo. A concentração dessas cargas vai aumentando com a aproximação do canal até dar início ao “leader” ascendente. O raio de atração (R_a) representa a distância a partir da qual a descarga passa a ser atraída pela estrutura. Uma forma de se calcular o raio de atração é relacioná-lo com a altura (h) da estrutura. Em [49] propõe-se a expressão:

$$R_a = 2 \cdot h \quad (3).$$

Para a torre construída, $R_a=125$ m. Embora um cálculo mais rigoroso do número de descargas diretas em uma determinada estrutura deva levar em conta a dependência de R_a com a corrente da descarga, normalmente utiliza-se um raio de atração médio (R_{am}) que considera a incidência média de descargas em estruturas ou linhas com alturas inferiores a 100 m. Como resultado de inúmeras observações experimentais, Eriksson propôs em [44] a fórmula de cálculo do raio de atração médio adotada pelo Grupo de Trabalho do IEEE relativo ao Desempenho de Linhas de Distribuição face a Descargas Atmosféricas [50]:

$$R_{am} = 14 \cdot h^{0,6} \quad (4),$$

com R_{am} e a altura h expressos em metros. Para a torre construída, $R_{am} = 167,4$ m.

Após a determinação do raio de atração, é necessário calcular a área de atração da torre ($A=\pi \cdot R^2$, onde R indica o raio de atração). Utilizando-se para R os valores determinados através das eqs. (3) e (4), obtêm-se as áreas de $0,05 \text{ km}^2$ e de $0,09 \text{ km}^2$, respectivamente.

Finalmente, conhecendo-se a área de atração da torre e a faixa de valores de N_g da cidade de São Paulo [48], pode-se estimar o número de descargas incidentes na torre multiplicando-se os valores de N_g e de A , conforme indicado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Número médio anual de descargas diretas na torre (Nd).

Ng	$Nd = Ng \cdot \pi \cdot R_a^2$	$Nd = Ng \cdot \pi \cdot R_{am}^2$
4	0,20	0,36
6	0,30	0,54
8	0,40	0,72

Considerando-se $Ng = 8$ descargas / (km²·ano) e a área de atração da torre calculado a partir do seu raio de atração médio (R_{am}), o número anual de descargas diretas na torre é 0,72, ou seja, aproximadamente 1 descarga a cada ano e meio. Entretanto, quando se considera o valor médio de Ng da cidade de São Paulo como 6 descargas/(km²·ano) [48] e o raio de atração da torre dado por R_{am} , tem-se Nd igual a 0,54, ou seja, aproximadamente uma descarga direta a cada dois anos. Conforme indicado na Tabela 4.1, dependendo dos valores adotados para Ng e para o raio de atração (R_a e R_{am}), Nd pode variar de 0,20 a 0,72, ou seja, o tempo médio entre duas descargas diretas na torre pode variar entre um ano e meio a cinco anos.

4.2 Características da torre

A torre foi construída para funcionar como um captor de descargas atmosféricas. Entretanto, possui algumas características de construção específicas para possibilitar que as correntes nela incidentes possam ser medidas com precisão ao passarem pelo resistor “shunt” situado em sua base (vide subitem 6.1).

Antes de ser iniciada a construção da torre foi feita a sondagem do terreno para verificar o tipo de solo, a suportabilidade em relação ao peso da estrutura e à tração dos estais.

A torre é do tipo estaiada e foi feita de aço galvanizado. Tem base metálica quadrada, sendo o restante de seu corpo formado por doze seções treliçadas com 35 cm de lado e 5 m de comprimento. Essa estrutura foi projetada para suportar uma carga horizontal de 300 kg aplicada em seu topo, atuando em qualquer direção sob vento

com velocidade de 30 m/s. Em seu topo foi colocado um captor tipo Franklin de latão cromado com 4 pontas. Esse captor é ligado ao resistor “shunt” por um condutor de descida de cobre nu de 35 mm².

A primeira característica peculiar da torre é que sua base metálica foi isolada da terra para evitar que parte das correntes das descargas seja desviada do condutor de descida, deixando, conseqüentemente, de ser medida. Para isso foram utilizados quatro isoladores de porcelana tipo suporte cilíndrico, cujo nível básico de isolamento (NBI) é 650 kV [51], valor de isolação suficiente para suportar o nível de tensão máximo dimensionado para o sistema de medição de correntes.

Somando-se o comprimento de todas as seções da torre, o resultado é 60 m, porém, levando-se em consideração o tamanho do captor Franklin, dos isoladores e da base metálica da torre, a sua altura total é de 62,5 m.

Após as correntes das descargas passarem pelo resistor “shunt”, elas escoam através do condutor de descida para o sistema de aterramento. Para avaliar qual seria a melhor configuração para o sistema de aterramento, tendo em vista obter um baixo valor de impedância, fez-se a medição das resistividades do solo (ρ) pelo Método de Wenner, cujos valores constam na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Valores medidos das resistividades do solo nas proximidades da torre.

Espaçamento (m)	$\rho_{\text{medida}} (\Omega \cdot \text{m})$
1	165
2	140
4	100
6	65
8	50
16	22,5
32	13,2

A partir dos valores medidos foi possível determinar o número de camadas do solo, com seus respectivos valores de resistividade e espessura. A Tabela 4.3 mostra os valores obtidos através de simulações no software CDEGS® (“Current Distribution, Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure Analysis”), onde foi utilizado um módulo cuja função foi interpretar os dados de medição das resistividades e determinar um modelo de estrutura para o solo analisado. O software utilizou algoritmos de minimização para fazer o melhor ajuste entre os resultados medidos e calculados das resistividades do solo. Com os resultados obtidos foram feitas algumas simulações no CDEGS® para avaliar qual tipo de configuração de sistema de aterramento seria mais viável técnica e economicamente. As configurações típicas estudadas estão ilustradas na Fig. 4.2.

Tabela 4.3 – Resistividade do solo de 3 camadas.

ρ ($\Omega \cdot m$)	Espessura (m)
169,6	2,1
60,6	5,4
12,0	infinita

Em todas as configurações utilizou-se hastes de aço revestidas por cobre com 3 m de comprimento, 5/8” de diâmetro, interligadas por cordoalhas de cobre nu de 35 mm² localizadas a 50 cm de profundidade. A distância de 3 m entre as hastes foi a mesma para todas as configurações estudadas. As resistências de aterramento (R_{at}) obtidas nas simulações para cada configuração foram:

- configuração 1 – $R_{at} = 28,6 \Omega$;
- configuração 2 – $R_{at} = 8,2 \Omega$;
- configuração 3 – $R_{at} = 6,6 \Omega$;
- configuração 4 – $R_{at} = 5,8 \Omega$;
- configuração 5 – $R_{at} = 4,6 \Omega$.

Fig. 4.2 – Configurações de sistema de aterramento estudadas.

- a) Configuração 1: apenas uma haste
- b) Configuração 2: 3 hastes em triângulo equilátero mais 1 no centro
- c) Configuração 3: 4 hastes em quadrado mais 1 no centro
- d) Configuração 4: 5 hastes alinhadas
- e) Configuração 5: 6 hastes em anel mais 1 no centro

Após a construção do sistema de aterramento (configuração 5), mediu-se a resistência com o aparelho de medição Megger em duas condições distintas: solo bem seco (sem chover há um mês) e em solo úmido. Os valores medidos em solos seco e úmido foram 10Ω e 5Ω , respectivamente.

Os estais das torres são geralmente feitos de cabo de aço. Entretanto, para evitar que parte das correntes incidentes na torre fossem desviadas do condutor de descida sem

passar pelo resistor “shunt”, foi indispensável a utilização de material isolante. Em primeiro lugar, o material deveria ter as seguintes características essenciais: alta resistência mecânica, baixa absorção de água e ser insusceptível aos raios ultravioleta. A pesquisa realizada mostrou que polímeros como polietileno e poliamida são susceptíveis aos raios ultravioleta e absorvem umidade, respectivamente [52]. Entretanto, a fibra de vidro é um ótimo isolante elétrico e térmico, possui alta resistência mecânica, alta resistência à oxidação, resistência à umidade, baixo custo e pouco peso [53]. Levando-se em consideração todas as características citadas, optou-se pela utilização da fibra de vidro em forma de bastões com 2,2 m de comprimento e 18,5 mm de diâmetro.

Os estais compostos por bastões foram colocados a cada 10 m de altura em três direções para que a torre possa suportar ventos até 108 km/h. De acordo com ensaio de tensão disruptiva de impulso atmosférico realizado no Laboratório de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP, cada bastão possui um NBI de 800 kV. Como o custo da utilização da fibra de vidro em toda extensão dos estais ultrapassaria a verba disponível para a construção da torre, fez-se um estudo a fim de otimizar a quantidade de bastões por altura. Para isso, verificou-se o nível de tensão que cada conjunto de estais por altura deveria suportar sem ocorrência de “flashover” sobre os bastões isolantes, levando-se em consideração as reflexões sofridas pelas ondas de tensão no topo e na base da torre. Várias simulações foram feitas com o “software” PSPICE® utilizando o circuito simplificado indicado na Fig. 4.3.

Fig. 4.3 – Circuito simplificado utilizado para analisar a tensão suportável em cada altura do conjunto de estais.

As descargas foram representadas através de uma fonte de corrente (I1) com resistência interna igual a $3\text{ k}\Omega$ [54]. O tipo de forma de onda considerada foi a ilustrada na Fig. 4.4, com amplitude de 30 kA , tempo de cauda de $50\text{ }\mu\text{s}$ e tempos de frente variando de $1\text{ }\mu\text{s}$ a $10\text{ }\mu\text{s}$. A torre foi representada como uma linha de transmissão com impedância característica de $357\text{ }\Omega$, calculada de acordo com a expressão abaixo, válida para torres com formato cilíndrico [55]:

$$Z_c = 60 \cdot \left[\ln \left(\frac{\sqrt{2} \cdot 2h}{r} \right) - 1 \right] \cong 357\Omega \quad (5),$$

em que $r = \frac{\text{perímetro médio}}{2\pi}$.

Fig. 4.4 – Forma de onda das correntes das descargas consideradas nas simulações no PSPICE® (1/50 μs).

A resistência de aterramento (R_2) foi variada, considerando-se os valores de $5\text{ }\Omega$ (medido em solo úmido) e $10\text{ }\Omega$ (medido em solo seco).

As Figs. 4.5 e 4.6 mostram o nível de tensão que aparece em cada conjunto de estais por altura, ao incidir uma descarga atmosférica com intensidade de corrente de 30 kA na torre, considerando-se resistências de aterramento (R_2) de $5,0\text{ }\Omega$ e $10,0\text{ }\Omega$.

Figura 4.5 – Tensões em cada conjunto de estais em função do tempo de frente da corrente e da altura (resistência de aterramento $R_2 = 5 \Omega$).

Figura 4.6 – Tensões em cada conjunto de estais em função do tempo de frente da corrente e da altura (resistência de aterramento $R_2 = 10 \Omega$).

Analisando-se os resultados das simulações apresentados nas Figs. 4.5 e 4.6, conclui-se que o nível de tensão em cada conjunto de estais e a diferença de tensão entre os

mesmos diminuem com o aumento do tempo de frente da corrente da descarga. O efeito de atenuação do pico da onda de tensão proporcionado pelas ondas que são refletidas nos pontos de descontinuidade da torre (topo e base) são menos perceptíveis nos conjuntos de estais mais altos (62,5 e 52,5 m), principalmente quando a frente de onda da corrente é ríspida. Isso ocorre pelo fato do tempo de propagação das ondas refletidas ser diretamente proporcional à altura do conjunto de estais em questão.

O número de bastões utilizados foi definido pelo nível de tensão obtido nas simulações acrescido de um fator de segurança e, também, pelo recurso financeiro disponível. De acordo com esses critérios, 186 bastões foram distribuídos entre dezoito estais (em seis níveis e três direções), como apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Tensão suportável por cada conjunto de estais.

Altura (m)	Número de bastões/cabo	Tensão suportável (MV) ⁽¹⁾
62,5	12	9,6
52,5	11	8,8
42,5	11	8,8
32,5	10	8,0
22,5	10	8,0
12,5	8	6,4

⁽¹⁾ Para formas de onda de correntes de descargas com tempo de frente de 1 μ s, considerando distribuição linear de tensão (NBI de 800 kV/bastão obtido em ensaio).

Para a distribuição de bastões mostrada na Tabela 4.4, calculou-se a corrente máxima suportável pelos estais sem a ocorrência de “flashover”. Esse cálculo resultou em um corrente de 90 kA, com tempo de frente de 1 μ s quando a resistência de aterramento for 10 Ω (solo seco). Como é sabido, correntes com amplitudes elevadas como 90 kA dificilmente têm tempo de frente tão ríspido como 1 μ s [56]. Além disso, o efeito de ionização do solo não foi levado em consideração. As Fig. 4.7 e 4.8 mostram os detalhes da torre para captação de descargas.

Fig. 4.7 – Torre para captação de descargas [57].

Fig. 4.8 – Detalhe dos estais.

4.3 Sistema de sinalização

De acordo com o parecer do Quarto Comando Aéreo Regional, a torre deve ter balizamento diurno e noturno, tendo em vista evitar acidentes aéreos. Assim, para o balizamento diurno, a torre foi pintada com cores contrastantes e para balizamento noturno foi requerida a instalação de lâmpadas em seu topo e em seu segmento intermediário. Foram então instaladas quatro lâmpadas incandescentes de 100 W/220 V ligadas à rede elétrica por um cabo de 2 mm².

A princípio, alimentar as lâmpadas pela rede elétrica convencional parecia não ocasionar nenhum problema para o funcionamento do sistema. Entretanto, analisando-se cuidadosamente a forma de alimentação empregada, verificou-se um ponto crítico a ser solucionado. Na incidência de uma descarga direta na torre, parte significativa da corrente poderia ser desviada para o cabo de alimentação, elevando o potencial dos edifícios situados nas proximidades da mesma. Com isso, a precisão das medições das correntes seria sensivelmente prejudicada. Para que a porcentagem das correntes desviadas fosse desprezível, foi necessário isolar eletricamente a alimentação das lâmpadas da rede elétrica. Para sanar esse problema foram estudadas várias formas de alimentar as lâmpadas sem interferir na medição das correntes, dentre as quais destacam-se:

- 1) utilização de grupo motor-alternador;
- 2) utilização de gerador a combustível;
- 3) utilização de painéis solares .

Qualquer uma das três soluções isolaria eletricamente a rede da alimentação das lâmpadas; a primeira foi a escolhida por ser totalmente automatizada e apresentar baixo custo. A Fig. 4.9 mostra a configuração desse sistema.

Fig. 4.9 – Sistema com grupo motor-alternador.

O grupo motor-alternador é composto por:

- protetores contra chuva (chapéu de alumínio e tubo de fenolite);
- motor monofásico (potência (P): 1 CV, rotação nominal (n_{nominal}): 3520 rpm, tensão nominal (U_{nominal}): 110/220 V, corrente nominal (I_{nominal}): 14,4/7,2 A e corrente de partida (I_{partida}) = $7 \times I_{\text{nominal}}$), fabricação WEG;
- isolador de porcelana tipo suporte cilíndrico, modelo TR 288, NBI 650 kV, fabricação da Isoladores Santana S/A;
- correia de borracha tipo V com 1,6 m de distância entre polias;
- alternador Bosch de 14 V, 55 A;
- bateria automotiva de 12 V, 100 Ah;
- inversor (tensão de saída (rms): 115 V CA (corrente alternada) ± 5 %; frequência de saída: 60 Hz $\pm 0,01$ %; tensão de entrada: 10 a 15 V CC (corrente contínua), potência de pico: 1 kW e potência de uso contínuo: 800 W; rendimento (η): 85-90 %, fabricação STATPOWER Technologies Corporation;
- placa metálica para sustentação do grupo;
- isoladores, classe 15 kV, NBI 110 kV, fabricação Porcelana Industriais Germer S/A.;

- relés fotoelétricos (12 V e 127 V);
- contatores;
- relés de sobrecarga.

Como pode ser visto na Fig. 4.9, o grupo motor-alternador foi montado na direção vertical para facilitar o alinhamento da correia, devido ao seu tamanho. O alternador foi colocado ao lado da parte inferior do isolador de suporte cilíndrico, estando sujeito a um nível de tensão próximo ao da base da torre. Entretanto, está montado em cima de uma placa metálica que está sobre isoladores de 110 kV de NBI. Já o motor, que está no nível de tensão da estação, foi instalado em cima do isolador de suporte cilíndrico, cujo NBI é 650 kV. Como dito anteriormente, além do isolador de suporte cilíndrico, a correia de borracha também tem o papel de isolar o motor do alternador.

Ao anoitecer, o relé fotoelétrico de 127 V aciona o motor que está conectado à rede elétrica. Esse motor gera potência mecânica que é transmitida ao alternador através de polias e de uma correia de borracha. Por sua vez, o alternador transforma a potência mecânica em elétrica, que carrega a bateria. A tensão 12 V CC armazenada na bateria é convertida em tensão 127 V CA, que alimenta as lâmpadas. A correia de borracha foi submetida a 30 impulsos atmosféricos (polaridades positiva e negativa), com forma de onda de tensão normalizada ($1,2 / 50 \mu s$) e intensidade até 400 kV. Não ocorreu nenhuma descarga disruptiva, portanto a correia utilizada de 1,6 m de distância de arco (entre polias) suporta um nível de tensão de pelo menos 400 kV. O conjunto formado pelo isolador tipo suporte cilíndrico e pela correia tem uma função essencial nesse sistema, que é isolar eletricamente a alimentação das lâmpadas da rede elétrica. Ao amanhecer, quando o motor pára de funcionar, o relé fotoelétrico de 12 V, montado entre a bateria e o inversor, desliga as lâmpadas, evitando que haja descarregamento desnecessário da bateria. Na eventual falta de energia durante a noite, a bateria pode suprir as lâmpadas por um período de 12 horas.

Esse sistema assegura que, na eventualidade de incidência de uma descarga na torre, praticamente toda (senão toda) a corrente fluirá através do resistor “shunt” ($3,28 \text{ m}\Omega$), garantindo uma medição correta.

A outra opção compreenderia o uso de um gerador a gasolina. Considerando um gerador com potência nominal de 800 W, tensão de saída 110 V, consumo de 1,2 l/h, ter-se-ia uma autonomia de aproximadamente 19 horas para alimentar as quatro lâmpadas ($P_{\text{consumida}} \cong 135 \text{ W}$). O custo do gerador seria mais baixo que o do sistema com grupo motor-alternador, porém, um fator importante a ser considerado seria o custo do combustível (4 l/dia). Além disso, esse sistema não seria totalmente automatizado devido à necessidade de encher o tanque de combustível diariamente.

Uma outra solução analisada para alimentar as lâmpadas foi a utilização de painéis solares. O dimensionamento do número de painéis necessários para alimentar as quatro lâmpadas de 100 W/220 V em 127 V é descrito a seguir:

Potência total das lâmpadas = 135 W;

Tempo estimado de funcionamento diário = 12 h;

Consumo diário total = 1620 Wh/dia.

Como a latitude da cidade de São Paulo é $23^\circ 33' \text{ S}$, valor medido pelo “Global Positioning System” (GPS), os painéis devem ser montados a um ângulo de 30° em relação ao solo para otimizar a irradiação solar incidente [58].

Irradiação diária média mensal global em plano inclinado, 30° , IEE/USP [58] = $3,75 \text{ kWh/m}^2$ (referência maio/01 – menor irradiação registrada)

Como as lâmpadas são alimentadas em corrente alternada, é necessário utilizar um inversor, cujo rendimento é 75 %, de acordo com [59], para uma potência de 300 W. Logo:

$$P_{\text{entrada inversor}} = \frac{1620 \text{ Wh/dia}}{0,75} = 2160 \text{ Wh/dia} \quad (6).$$

Utilizando-se uma bateria de 12 V, tem-se que o consumo diário requerido para alimentar as lâmpadas é dado por:

$$\text{Capacidade da bateria} = \frac{2160 \text{ Wh / dia}}{12 \text{ V}} = 180 \text{ Ah / dia} \quad (7).$$

De acordo com o fabricante Power Battery Company [60], para que a bateria tenha uma vida útil de 1250 a 1500 ciclos, a descarga deve ser limitada em apenas 25 % da sua capacidade. Portanto, a capacidade do banco de baterias deve ser:

$$\text{Banco de baterias} = \frac{180 \text{ Ah / dia}}{0,25} = 720 \text{ Ah / dia} \quad (8).$$

Como a bateria escolhida tem um rendimento de 90 %, os painéis devem fornecer uma potência dada pela eq.(9):

$$P_{\text{saída painéis}} = \frac{2160 \text{ Wh / dia}}{0,9} = 2400 \text{ Wh / dia} \quad (9).$$

Para limitar a redução da vida útil do banco de baterias, restringiu-se sua descarga em, no máximo, 50 %, resultando em dois dias de autonomia. Os painéis são comercializados por uma unidade de potência padrão chamada Watt pico (Wp), que é a quantidade de potência que um dispositivo fotovoltaico pode fornecer em um dia ensolarado, com temperaturas baixas [61]. A equação abaixo fornece a potência total dos painéis, levando-se em consideração as perdas (20 %) na sua eficiência ocasionada pela elevação de temperatura.

$$P_{\text{total painéis}} = 1,2 \cdot \frac{2400 \text{ Wh / dia}}{3,75 \text{ Wh / m}^2} = 768 \text{ Wp} \quad (10).$$

A Fig. 4.10 apresenta um desenho esquemático do sistema de alimentação.

Fig. 4.10 – Esquema do sistema de alimentação com painéis solares.

Considerando-se o painel SP 75, de fabricação Siemens [62], que tem potência de 75 Wp, tensão e corrente nominais de 17 V e 4,4 A, respectivamente, o número de painéis necessários é calculado por

$$\text{Número de painéis} = \frac{768\text{Wp}}{75\text{Wp}} \cong 10 \quad (11).$$

O custo total desse sistema de alimentação utilizando energia solar é extremamente elevado em relação à alternativa escolhida.

CAPÍTULO 5

LINHAS EXPERIMENTAIS

A Fig. 5.1 mostra a localização das linhas de distribuição monofásicas dentro do Campus da Universidade de São Paulo, na cidade de São Paulo.

Fig. 5.1 – Localização das linhas experimentais.
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas; IEE – Instituto de Eletrotécnica e Energia

As linhas experimentais são monofásicas, têm aproximadamente 2,7 km de comprimento, não estão energizadas, são compostas por condutores de alumínio protegidos com seção de 240 mm^2 e altura média de 10 m em relação ao solo. Em uma linha foram instalados pára-raios e, na outra, nenhum dispositivo de proteção. Essas duas linhas são sustentadas pelos mesmos postes e instaladas nos extremos de cruzetas de madeira com dimensões de 6 m (Fig. 5.2).

Para verificação do efeito da distância de separação entre as linhas monofásicas (tamanho da cruzeta) e a ordem de grandeza das tensões induzidas nos dois condutores no caso de incidência de descargas diretas na torre, foram feitas diversas simulações utilizando-se o modelo ERM proposto em [2, 8] e validado e aprimorado

em [10]. Nas simulações a linha foi representada através de uma geometria simplificada, retilínea. Utilizou-se uma forma de onda de corrente de descarga típica ($2/40\ \mu\text{s}$), mostrada na Fig. 5.3.

Fig. 5.2 – Detalhe da cruzeta de madeira de 6 m utilizada em toda extensão das linhas experimentais.

Fig. 5.3– Forma de onda da corrente de descarga aplicada nas simulações.

A Fig. 5.4 apresenta a configuração utilizada nas simulações, com medidas próximas das reais, onde estão representados os pontos de medição das tensões induzidas (1, 2, 3 e 4). Os pára-raios considerados nas simulações foram os de óxido de zinco (ZnO) sem gap, com a curva $U \times I$ mostrada na Fig. 5.5.

Fig. 5.4 – Geometria simplificada da linha utilizada nas simulações.

Fig. 5.5 – Valores da tensão residual em função da corrente (8/20 μ s) dos pára-raios de óxido de zinco (ZnO) utilizados nas simulações (resultados experimentais).

As Figs. 5.6 a 5.11 mostram comparações entre tensões fase-terra calculadas nos pontos de medição para várias amplitudes de correntes de descargas atmosféricas incidentes na torre. Em cada figura são apresentadas três curvas que correspondem a:

- curva (1) – tensão induzida na linha desprotegida sem a presença da linha com pára-raios;
- curvas (2) e (3) – tensões induzidas na linha sem e com proteção, respectivamente, quando distam 6 m entre si.

As grandezas indicadas nas Figs. 5.6 a 5.11 têm o seguinte significado:

I_m – corrente máxima da descarga atmosférica;

R_{at} – resistência de aterramento;

b – velocidade de propagação da corrente pelo canal da descarga em relação à velocidade da luz no vácuo;

h – altura da linha em relação ao solo;

h_n – comprimento do canal da descarga;

x – distância entre o ponto de medição e o ponto na linha mais próximo à torre;

x_{at} – distância entre a extremidade em que ambas as linhas estão casadas e o pára-raios mais próximo;

x_d – distância entre o ponto de medição e o pára-raios mais próximo;

d_l – distância entre as duas linhas;

d – distância entre a linha e a torre.

Fig. 5.6 - Tensões induzidas nos pontos 1 e 2 [63, 64].

1 – condutor isolado

2 – condutor sem pára-raios

3 – condutor com pára-raios

Fig. 5.7 - Tensões induzidas nos pontos 1 e 2 [63, 64].

1 – condutor isolado
2 – condutor sem pára-raios
3 – condutor com pára-raios

Fig. 5.8 - Tensões induzidas nos pontos 1 e 2 [63, 64].

1 – condutor isolado
2 – condutor sem pára-raios
3 – condutor com pára-raios

Fig. 5.9 - Tensões induzidas nos pontos 3 e 4 [63, 64].

1 – condutor isolado
 2 – condutor sem pára-raios
 3 – condutor com pára-raios

Fig. 5.10 - Tensões induzidas nos pontos 3 e 4 [63, 64].

1 – condutor isolado
 2 – condutor sem pára-raios
 3 – condutor com pára-raios

Fig. 5.11 - Tensões induzidas nos pontos 3 e 4 [63, 64].

- 1 – condutor isolado
- 2 – condutor sem pára-raios
- 3 – condutor com pára-raios

Embora o ideal fosse a construção de linhas distintas e equidistantes da torre, verificou-se através da análise das Figs. 5.6 a 5.11 que as diferenças entre as tensões fase-terra do condutor isolado (curva 1) e do condutor sem pára-raios (curva 2) não são elevadas, indicando que a distância de 6 m é adequada para que os pára-raios da linha protegida não interfiram significativamente nas tensões induzidas na linha sem proteção, ao menos no que se refere aos valores de crista.

A Fig. 5.12 fornece as dimensões reais das linhas experimentais e mostra a localização dos pára-raios. Nas duas extremidades da linha monofásica sem proteção foram colocados resistores com valor de resistência igual ao da impedância característica da linha (Z_c) para “casar” as impedâncias, evitando reflexões das ondas de tensão. Já a linha com proteção está casada em uma extremidade para evitar, também que, ondas refletidas provoquem o aumento dos valores das tensões induzidas medidas pelos osciloscópios situados nos pontos de medição 2 e 4. A outra extremidade foi terminada através de um pára-raios. As Figs. 5.13 e 5.14 mostram um trecho e uma das extremidades das linhas experimentais, respectivamente.

Fig. 5.12 – Traçado real das linhas experimentais com a localização dos para-raios, torre e estação de medição.

Fig. 5.13 – Trecho das linhas experimentais.

Fig. 5.14 – Terminação das linhas experimentais (extremidade com ambas as linhas casadas).

Os pontos de medição 1, 2, 3 e 4, as extremidades das linhas e o ponto onde foi instalado o pára-raios 1 foram aterrados por cabos de cobre nu com seção de 16 mm^2 e hastes de aço revestidas por cobre, com $3/8''$ de diâmetro e 3 m de comprimento. A Tabela 5.1 apresenta os valores de resistência de aterramento medidos nos cinco pontos descritos anteriormente, sob a condição de solo bem seco (sem chover há um mês), utilizando-se um medidor de resistência de terra (Megger®). A Fig. 5.15 apresenta as medidas reais do trecho das linhas experimentais de maior importância pelo fato de abranger os pontos de medição das tensões induzidas e os pára-raios. Além disso, nas proximidades desse trecho foram construídas a torre e a estação de medição.

Tabela 5.1 – Valores das resistências de aterramento medidas em alguns pontos das linhas experimentais.

Local de medição	Resistência de aterramento (Ω)
Pontos de medição 1 e 2	4
Pontos de medição 3 e 4	4
Local de instalação do PR 1 (Fig. 5.15)	45
Local de instalação do PR 2 (Fig. 5.15)	95
Extremidade mais afastada dos pontos de medição	22,5

eliminam os efeitos da indutância dos circuitos de teste, de forma que os valores de crista das tensões residuais obtidos nos ensaios são superiores aos valores reais. Essas diferenças tendem a aumentar à medida que as correntes se tornam mais íngremes, sendo então recomendável adotar como valor de tensão residual aquele correspondente ao instante em que a corrente atinge seu valor máximo, principalmente quando os tempos de frente (t_f) são inferiores a $4\text{ }\mu\text{s}$ [10]. Nesse instante as quedas de tensão nas indutâncias do circuito são nulas, uma vez que a taxa de variação da corrente é igual a zero.

A fim de se determinar a curva característica $U(I_p) \times I_p$ dos pára-raios, quatro amostras foram submetidas a aplicações de impulsos de correntes com forma de onda normalizada ($8/20\text{ }\mu\text{s}$). Vale a pena ressaltar que, de acordo com a norma [65] devem ser aplicados impulsos de corrente com amplitudes de 0,5, 1 e 2 vezes a corrente nominal do pára-raios. Entretanto, esse procedimento não foi adotado, pois as amplitudes de corrente que fluem pelo pára-raios quando são induzidas tensões nas linhas muito raramente excedem $1,5\text{ kA}$ [10, 66]. O valor de crista da corrente foi aumentado gradualmente até atingir o valor nominal da corrente de descarga do pára-raios. Para compor a curva característica foram medidos os respectivos valores de tensão para alguns valores de corrente. Observou-se que enquanto os valores de corrente não eram suficientes para que a resistência não-linear do pára-raios sofresse uma redução significativa, não era possível obter formas de onda de corrente normalizadas. Isso ocorreu devido às limitações do circuito LC do gerador de impulso de corrente conectado em série com o pára-raios. A Fig. 5.17 mostra o circuito e uma foto do ensaio. A curva da Fig. 5.18 foi obtida a partir dos valores de crista das ondas de correntes e de tensões medidas nos pára-raios ensaiados no circuito indicado na Fig. 5.17.

(a)

(b)

Figura 5.17 – Determinação da curva $U(I_p) \times I_p$.a) Circuito de ensaio do pára-raios Z_{nO}

b) Foto do circuito de ensaio.

Fig.5.18 – Curva $U(I_p) \times I_p$ dos pára-raios de óxido de zinco.

O outro dispositivo utilizado na linha, o casador de impedâncias, foi projetado para ter um valor de resistência igual ao da impedância característica da linha (Z_c), evitando, assim, reflexões das ondas de tensões induzidas. Como a linha está a 10 m do solo e os condutores utilizados têm raio de 8,8 mm, o valor resultante da impedância característica da linha é de aproximadamente 464 Ω . Os casadores de impedâncias construídos têm valor ôhmico (medido) de aproximadamente 470 Ω e são constituídos por duas bobinas iguais enroladas em um tubo de PVC de 8,5 cm de diâmetro. As bobinas foram enroladas paralelamente, uma de cada vez, em sentido contrário uma da outra, para anular o fluxo magnético criado por cada uma delas e conseqüentemente minimizar o valor da indutância. Para isolar eletricamente uma espira da outra foram feitas ranhuras em toda a extensão do tubo, diminuindo o diâmetro externo do mesmo para 8,2 cm. O material utilizado para a construção das bobinas foi uma liga austenítica para condutores caloríferos (Nikrothal® 80, níquel - 80 % e cromo - 20 %, de fabricação Kanthal), com diâmetro de 0,4 mm e resistência igual a 8,67 Ω/m a 20 °C.

Conforme dito anteriormente, para tornar a impedância do casador menos indutiva, as duas bobinas foram enroladas paralelamente uma à outra dentro dos sulcos de 1,3 mm de largura. Conseqüentemente, para manter o valor final da impedância em

470 Ω , cada bobina foi dimensionada para ter um valor de resistência de 940 Ω . O cálculo do número de espiras por bobina e do comprimento mínimo de tubo é dado pelas eqs. (12) a (15):

$$\text{Comprimento}_{\text{total/bobina}} = \frac{R_{\text{bobina}}}{R / m_{20^{\circ}\text{C}}} = \frac{940}{8,67} = 108,42 \text{ m} \quad (12),$$

$$\text{Perímetro}_{\text{tubo}} = \pi d = \pi \cdot 8,2 = 25,76 \text{ cm} \quad (13),$$

$$\text{Número de espiras} = \frac{l_{\text{total/bobina}}}{\text{Perímetro}_{\text{tubo}}} = \frac{108,42 \cdot 10^2}{25,76} = 421 \text{ espiras} \quad (14),$$

$$\begin{aligned} \text{Comprimento}_{\text{tubo}} &= \text{Número de espiras} \cdot \text{passo[m]} \cdot 2 \text{ bobinas} \\ &= 421 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 1,1 \text{ m} \end{aligned} \quad (15).$$

Os três casadores construídos foram submetidos aos ensaios de tensão suportável de impulso atmosférico e de medição de resposta ao degrau. A Fig. 5.19 mostra o casador de impedâncias sem o tubo externo de proteção.

Fig. 5.19 – Casador de impedâncias de 470 Ω .

Para determinação da tensão suportável de impulso atmosférico, cada casador foi submetido a vinte impulsos de 200 kV com forma de onda 1,1/27 μs , sendo dez com polaridade negativa e dez com positiva. O tempo de cauda das formas de onda de

tensão foi menor que o normalizado ($50\ \mu\text{s}$) pelo fato do capacitor do circuito do gerador de impulso de tensão ter um valor fixo e a resistência do casador ser muito baixa. Os resultados do ensaio foram satisfatórios, pois não ocorreu nenhuma descarga disruptiva durante as aplicações dos impulsos. A Fig. 5.20 mostra o circuito do ensaio.

Fig. 5.20 – Circuito do ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico do casador.

Para verificar se os casadores de impedância possuíam características indutivas relevantes quando comparadas com as resistivas, fez-se um ensaio para determinação do comportamento dinâmico dos mesmos. Então, aplicou-se formas de onda de tensão em degrau, com amplitude de $90\ \text{V}$ e tempo de subida de $3\ \text{ns}$, ao conjunto formado pelo casador de $470\ \Omega$ e por um resistor de baixo valor ($25\ \Omega$). Este conjunto funciona como um divisor de tensão e a resposta ao degrau foi medida no resistor de menor valor, como mostrado na Fig. 5.21.

Com isso é possível determinar os parâmetros de resposta ao degrau, importantes para verificar o comportamento dinâmico do casador. A Fig. 5.22 apresenta uma forma de onda típica de resposta ao degrau unitário [67].

(a)

(b)

Fig. 5.21 – Ensaio de medição de resposta ao degrau do casador.

a) Circuito de ensaio

b) Foto do ensaio.

Os parâmetros podem ser expressos por meio da função integral de resposta ao degrau:

$$T(t) = \int_{0}^t (1 - g(t)) dt \quad (16),$$

na qual $g(t)$ é a resposta ao degrau unitário vista na Fig. 5.22 e O1 a origem virtual da resposta determinada pela interseção do eixo dos tempos com uma linha tangente definida pela porção mais inclinada da frente da onda $g(t)$.

Fig. 5.22 – Resposta típica de um divisor de tensão ao degrau unitário [67].

Os parâmetros são definidos da seguinte forma:

- tempo de resposta experimental (T_N) é o valor da integral da resposta ao degrau em $t_{\max}$:

$$T_N = T(t_{\max}) \quad (17),$$

sendo $t_{\max}$ o maior tempo de frente do sinal a ser medido;

- tempo de resposta parcial (T_α) é o máximo valor da integral de resposta ao degrau. Geralmente $T_\alpha = T(t_1)$, na qual t_1 é o tempo quando $g(t)$ atinge pela primeira vez a amplitude unitária;
- tempo de resposta residual ($T_R(t_i)$) é a diferença entre o tempo de resposta experimental e o valor da integral de resposta ao degrau em um tempo específico t_i , sendo $t_i < t_{\max}$:

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i) \quad (18);$$

- tempo de estabilização (t_s) é o menor valor de tempo (t) para o qual o tempo de resposta residual $T_R(t)$ se torna e se mantém menor que 2 % de t_s :

$$|T_N - T(t_s)| < 0,02 \cdot t_s \quad (19);$$

- tempo de distorção inicial (T_0) é área limitada pelo eixo dos tempos, por $g(t)$ e pela reta tangente usada para determinar $O1$;
- sobrelevação (β) é a diferença entre o máximo valor da resposta normalizada $g(t)$ e a unidade:

$$\beta = [\max[g(t)] - 1] \cdot 100\%. \quad (20).$$

A título de ilustração, a Fig. 5.23 mostra a resposta de um dos casadores construídos ao degrau unitário.

Fig. 5.23 - Resposta de um dos casadores ao degrau unitário.

Como pode ser observado na Fig. 5.23, os parâmetros de resposta ao degrau de um dos casadores foram:

- $T_N = 22,8 \text{ ns}$;
- $T_\alpha = 23,4 \text{ ns}$;
- $t_s = 93 \text{ ns}$;
- $\beta = 13 \%$;
- $T_0 = 1,9 \text{ ns}$.

Os outros casadores apresentaram respostas ao degrau semelhantes à apresentada na Fig. 5.23, considerada adequada para sua finalidade com base nos tempos de frente das tensões induzidas típicas (da ordem de alguns microssegundos).

CAPÍTULO 6

SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Este capítulo descreve o princípio de funcionamento, a construção e as características dos sistemas de medição de correntes de descargas atmosféricas e de tensões induzidas por descargas indiretas nas duas linhas de distribuição experimentais.

6.1 Sistema de medição de correntes de descargas atmosféricas

O sistema de medição de correntes é composto por um resistor “shunt”; um osciloscópio digital Tektronix® modelo TDS 3012 com largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem de 1 GS/s; um banco de baterias chumbo-ácidas (uma de 35 Ah e duas de 100 Ah); um carregador de baterias; um contator Siemens; três dispositivos de proteção contra surtos (SPD’s – “Surge Protective Devices”) Raychem, modelo LVA-280, tensão e corrente nominais de 280 V e 10 kA, respectivamente, e um controlador de descarga de baterias. Todos os equipamentos foram instalados dentro de caixas metálicas montadas na base da torre, como mostra a Fig. 6.1. A Fig. 6.2 apresenta uma das caixas, com os equipamentos do sistema de medição de correntes, além de alguns dispositivos do sistema de aquisição de dados, dentre eles o “mini modem” e os cabos de fibra ótica.

Fig. 6.1 – Equipamentos do sistema de medição de correntes instalados na base da torre.

Fig. 6.2– Esquema detalhado do sistema de medição de correntes.

Alguns testes foram realizados para verificar o comportamento do osciloscópio abrigado dentro da caixa metálica quando da passagem de correntes de amplitudes elevadas no resistor “shunt” que está a apenas 1,5 m da mesma. A Fig. 6.3 apresenta a montagem do ensaio realizado. A Fig. 6.4 mostra uma das formas de onda de correntes aplicadas no resistor “shunt”, com tempo de frente de 7,70 μs e amplitude de 41,55 kA. Os valores das correntes variaram de 3,50 kA a 41,55 kA. Em nenhuma aplicação foram constatados ruídos significativos causados pelo campo eletromagnético.

Fig. 6.3 – Ensaio de interferência eletromagnética.

Fig. 6.4 – Forma de onda de corrente aplicada no resistor “shunt” ($I = 41,55$ kA).

A alimentação em CA do carregador de baterias do sistema de medição de correntes é aérea para evitar que as diferenças de potencial causadas no solo por descargas atmosféricas incidentes na torre sejam transferidas para a estação e possam danificar os equipamentos nela contidos. Essa forma de alimentação foi adotada pela facilidade em isolar o potencial da base da torre em relação ao da estação. A Fig. 6.5 ilustra, qualitativamente, como se dá a variação do potencial na região correspondente entre a torre e a estação de medição para o caso de uma descarga incidente na torre.

Fig. 6.5 – Gráfico ilustrativo da diferença de potencial no solo entre a torre e estação.

Inicialmente pretendia-se evitar a transferência de potencial da base da torre para a estação através de uma chave-faca. Entretanto, para a resistência de aterramento medida de $5\ \Omega$ na base da torre e considerando uma descarga com amplitude de 80 kA, o nível de isolamento que a chave deveria suportar seria de 400 kV. Como o custo de uma chave com NBI de tal valor seria muito elevado, optou-se por um simples seccionamento do cabo de alimentação, ou seja, a interrupção é feita retirando-se um trecho do cabo para que a isolamento elétrica necessária entre o sistema de alimentação da corrente e a alimentação da rede seja obtida pela rigidez dielétrica do ar. O osciloscópio é alimentado exclusivamente por baterias. Isso é necessário para se evitar que as diferenças de potencial no solo causadas por descargas incidentes na torre possam danificar os equipamentos contidos na estação de medição. Além disso, a medição das correntes não seria afetada na ocorrência de eventuais interrupções no fornecimento de energia. Durante os fins de semana, a alimentação do sistema de medição é mantida por um banco de baterias com autonomia de aproximadamente 60 horas.

As caixas foram submetidas a um ensaio para verificação do nível máximo de temperatura em seu interior quando expostas à elevada intensidade de raios solares. Esse efeito é importante quando se utilizam equipamentos eletrônicos sensíveis. O procedimento do ensaio foi colocar as caixas sob exposição solar durante três dias típicos de verão. A máxima temperatura registrada foi de $40\ ^\circ\text{C}$ e de acordo com o manual do osciloscópio TDS 3012 Tektronix®, o mesmo pode suportar até $50\ ^\circ\text{C}$ (em operação) ou $60\ ^\circ\text{C}$ (não operando). A caixa que contém o carregador de baterias possui aletas de ventilação devido à elevação extra de temperatura causada pelo aquecimento do transformador.

Visando verificar a eficiência das vedações das caixas, as mesmas foram submetidas a chuvas de intensidade variando de moderada a alta. Não foi constatada nenhuma espécie de vazamento. Entretanto, para minimizar a umidade dentro das caixas foi colocada sílica-gel em seus interiores e todos os eletrodutos de acesso às mesmas foram vedados com espuma de poliuretano expandido.

6.1.1 Resistor “shunt”

A corrente da descarga atmosférica que atinge a torre flui totalmente pela mesma pois, como mencionado no Capítulo 4, em sua base foram instalados isoladores e seus estais foram confeccionados de material isolante. Antes de atingir a terra, a corrente total da descarga passa pelo resistor “shunt”, onde é medida. Entretanto, observa-se que a forma de onda da corrente medida não é igual à do canal da descarga, devido às diferenças de impedâncias ($Z_{\text{canal}} \neq Z_{\text{torre}} \neq Z_{\text{aterramento}}$) ao longo do caminho percorrido pela corrente. Sendo assim, há reflexões na base e no topo da torre, alterando a forma de onda da corrente. Atualmente está sendo desenvolvido pelo Grupo de Alta Tensão e Descargas Atmosféricas (GATDA/USP) um procedimento para “descontaminar” a corrente, isto é, obter, a partir da corrente medida, a corrente real no canal da descarga (por exemplo, [68]).

Após as correntes das descargas atmosféricas serem, inicialmente, captadas pela torre, são medidas por meio de um resistor “shunt” acoplado a um osciloscópio digital. A decisão pelo uso de um resistor “shunt” desenvolvido em [69], deu-se em função das suas características, com elevada relação sinal-ruído, fácil calibração em tensões impulsivas e em corrente contínua e resistência praticamente constante para toda a faixa de frequências considerada (< 10 MHz).

Do ponto de vista construtivo os resistores “shunt” podem ser tubulares ou do tipo “wirewound”. As configurações tubulares são geralmente aplicadas em medições de correntes de curta duração, similares àquelas geradas pelas descargas atmosféricas, com valores de resistências variando de 0,1 a 100 m Ω , por serem os menos susceptíveis à influência de campos eletromagnéticos. Já os “wirewound” são normalmente construídos com resistências que variam de 50 m Ω a 10 Ω , normalmente dedicados à medição de baixas correntes. A Fig. 6.6 apresenta um circuito de medição de correntes de descargas atmosféricas, no qual o resistor “shunt” ideal pode ser representado por uma impedância puramente resistiva em seus terminais.

Fig. 6.6 – Circuito para medição de corrente impulsiva.

Neste caso, a corrente a ser medida pode ser determinada pela lei de Ohm:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R} \quad (21).$$

Na prática, entretanto, para resistores com baixos valores ôhmicos submetidos a correntes com valores muito elevados, as indutâncias intrínsecas tornam-se não desprezíveis. Desta forma, a queda de tensão $e(t)$ é obtida considerando o circuito equivalente da Fig. 6.7:

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (22),$$

em que R e L representam a resistência e a indutância do “shunt”, respectivamente.

Fig. 6.7 – Circuito equivalente do resistor “shunt” para baixos valores ôhmicos.

Como a indutância intrínseca L pode introduzir sérias distorções nas formas de ondas, deve ser mantida tão pequena quanto possível. Esta condição de baixo valor indutivo é alcançada pelo resistor “shunt” tubular, em que o campo magnético interno é praticamente nulo para uma distribuição de corrente uniforme.

6.1.1.1 Projeto do resistor “shunt”

O resistor “shunt” desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) [69] tem 108,8 mm de comprimento e 57,7 mm de diâmetro e possui algumas características inovadoras. A primeira diz respeito ao elemento resistivo, que é completamente diferente dos convencionais, compostos por ligas de níquel, cromo e ferro. O elemento desenvolvido é de aço inoxidável tipo 309 – classe dos austeníticos, não magnéticos, com resistividade $\rho = 7,8 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$, permeabilidade magnética relativa igual a 300 e capacidade térmica para suportar altos valores de correntes a serem medidas, de 2 kA a 100 kA.

Para possibilitar a medição de correntes de até 100 kA com o osciloscópio TDS 3012 Tektronix®, que possui entrada máxima de 400 V utilizando suas pontas de prova padrão, o resistor “shunt” deveria ter o valor ôhmico máximo de 4 m Ω . Tendo em vista a obtenção de um valor tão baixo de resistência, foi necessário usar o elemento resistivo tubular até atingir espessura em torno de décimos de milímetro. Entretanto, tubos com paredes tão finas não apresentam praticamente resistência mecânica. Sendo assim, a usinagem da parede de 0,15 mm de espessura só foi possível após ter sido acoplado um tubo de fenolite ao elemento resistivo. A espessura reduzida das paredes do elemento resistivo também se mostrou essencial para a diminuição da indutância intrínseca, por compensar a alta permeabilidade relativa do aço, em torno de 300. A Fig. 6.8 apresenta um desenho esquemático da parte interna do resistor “shunt” desenvolvido.

Fig. 6.8— Seção transversal da parte interna do resistor “shunt” [9].

Para minimizar o efeito da variação das resistências de contato na medição da diferença de potencial entre as extremidades do resistor, foram instaladas duas peças isolantes entre as tampas superiores e inferiores do mesmo. Vale a pena salientar que no resistor tubular a medição da tensão é feita por um terminal separado dos conectores de corrente. O resistor "shunt" desenvolvido possui, também, um cilindro externo de alumínio que conduz a corrente de retorno, conseqüentemente contribuindo para a redução da indutância.

6.1.1.2 Ensaios realizados

Para determinar as características dinâmicas do resistor “shunt” foram realizados alguns ensaios no Laboratório de Pára-raios do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE/USP).

O circuito de ensaio, que pode ser visto na Fig. 6.9, é basicamente um circuito RLC superamortecido, em que C é um banco de capacitores com $2,25 \mu\text{F}$, L é uma indutância de $30 \mu\text{H}$, Rshunt é o resistor “shunt” desenvolvido e Rs Haefely é o resistor “shunt” padrão, de fabricação Haefely. Além disso, fazem parte do circuito dois blocos de óxido de zinco de 4 kV, cuja função é evitar oscilações no impulso gerado.

Fig. 6.9– Circuito de ensaio de impulso.

Para cada valor de corrente aplicado, obteve-se um valor medido do resistor “shunt”, conforme apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores medidos de resistência do “shunt”.

Amplitude da corrente aplicada (kA)	Valor do “shunt” (mΩ)
3,50	3,32
6,00	3,32
11,70	3,36
20,60	3,25
37,75	3,22
41,55	3,22
Valor médio: 3,28	

As Figs. 6.10 e 6.11 mostram as respostas do resistor “shunt” desenvolvido e do “shunt” Haefely para correntes de 6 kA e 41,55 kA, respectivamente. Como pode-se observar, o “shunt” desenvolvido apresenta respostas muito próximas às do “shunt” de referência. Neste ensaio também foi possível verificar que o circuito de medição do sinal proveniente do “shunt” desenvolvido não sofreu interferência eletromagnética, tendo em vista que o osciloscópio acoplado ao mesmo estava dentro

de uma caixa metálica aterrada. Entretanto, o mesmo não aconteceu com as formas de onda medidas com o “shunt” Haefely.

(a)

(b)

Fig. 6.10 - Aplicação de corrente impulsiva com amplitude de 6 kA.
a) formas de onda sobrepostas (b) formas de onda deslocadas para visualização.

(a)

(b)

Fig. 6.11: Aplicação de corrente impulsiva com amplitude de 41,55 kA.
 a) formas de onda sobrepostas (b) formas de onda deslocadas para visualização.

6.1.2 Controlador de descarga das baterias do sistema de medição de correntes

Em geral as baterias de 12 V não devem ser descarregadas a um nível de tensão menor que 10,5 V para que não haja diminuição da sua vida útil. Por esse motivo, foi desenvolvido um controlador de descarga de baterias para o sistema de medição de correntes [70]. No caso do sistema de medição de tensões induzidas a carga das baterias é acionada automaticamente, depois de cumprido o período programado de medições, através de um temporizador situado na estação de medição. Entretanto, para iniciar a carga das baterias que alimentam o osciloscópio de medição de correntes é necessário acoplar, fisicamente, o trecho retirado do cabo de alimentação da rede elétrica, pois não foi possível o uso do temporizador pelo fato do nível de isolamento necessário entre o circuito do carregador de baterias e a estação ser de aproximadamente 400 kV.

O banco de baterias instalado na base da torre alimenta o osciloscópio durante o período de medições. Durante esse tempo as baterias estão em processo de descarga contínua e quando o nível de tensão das mesmas atinge o mínimo (10,5 V), o osciloscópio deve ser desligado. Quando as baterias são desconectadas dos osciloscópios, podem sofrer elevação de seus níveis de tensão para valores acima de 10,5 V, porém não têm carga suficiente para fornecer a corrente necessária para alimentar o osciloscópio novamente. Desta forma, o osciloscópio somente pode ser religado quando as baterias atingirem um nível de tensão superior a 13,5 V, sendo então capazes de fornecer a corrente requerida. Esse nível de tensão somente é alcançado após um período de carga.

6.2 Sistema de medição de tensões induzidas

Como foi dito no Capítulo 5, a medição das tensões induzidas é feita em dois pontos da linha protegida por pára-raios (pontos 2 e 4) e em dois pontos da linha desprotegida (pontos 1 e 3). A Fig. 6.12 apresenta a localização desses pontos.

Fig. 6.12 – Linhas experimentais. Localização dos pontos de medição 1, 2, 3 e 4.

Como pode ser visto na Fig. 6.12, os pontos 1 e 2 estão situados um ao lado do outro e o mesmo acontece com os pontos 3 e 4. A Fig. 6.13 apresenta a disposição das caixas que contêm os equipamentos para medição das tensões induzidas.

Fig. 6.13 – Sistema de medição de tensões induzidas.

O sistema de medição de tensões induzidas nos pontos 1 e 2 é composto por dois divisores de tensão; dois osciloscópios digitais Tektronix[®], modelo TDS 3012; uma bateria chumbo-ácida; um carregador de baterias; dois contatores Siemens e dois SPD's Raychem, modelo LVA-280, tensão nominal 280 V e corrente nominal 10 kA. O acionamento do sistema é feito através de disjuntores situados na estação de medição. Nos pontos 3 e 4 foram instalados os mesmos tipos de equipamentos dos pontos 1 e 2.

A alimentação CA do sistema de medição é subterrânea para evitar que sejam induzidas tensões nos cabos de alimentação por ocasião das descargas. A Fig. 6.14 mostra cada divisor de tensão instalado em sua respectiva caixa blindada, onde foi alojada a resistência da parte de baixa tensão do divisor; o osciloscópio e suas pontas de prova e o “mini modem” de fibra ótica assíncrono Blackbox[®], modelo ME605A-MST. Os osciloscópios são alimentados exclusivamente por baterias, visando o aumento da confiabilidade do sistema de medição. O contator utilizado tem como função controlar remotamente o sistema e isolar a rede da bateria.

Fig. 6.14 – Detalhamento do sistema de medição de tensões induzidas.

Há um conjunto de alimentação (bateria, carregador, contator, SPD's) para cada dois osciloscópios situados no mesmo poste devido à proximidade entre os equipamentos, como indicado na Fig. 6.13. A bateria foi instalada próxima ao osciloscópio, para evitar a queda de tensão na alimentação.

As caixas utilizadas no sistema de medição de tensões também foram testadas quanto ao efeito de temperatura e umidade como descrito no item 6.1. De modo a minimizar a umidade dentro das caixas foi colocada sílica-gel dentro delas e foram vedados com poliuretano expandido todos os eletrodutos de acesso às mesmas. Além disso, as caixas onde as baterias foram colocadas possuem aletas para aumentar a ventilação.

6.2.1 Divisores de tensão

Os divisores são equipamentos fundamentais na medição de valores elevados de tensão e têm a função de reduzir esses valores a valores possíveis de serem medidos por instrumentos de medição utilizados normalmente como por exemplo osciloscópios. Os divisores podem ser construídos com resistores, capacitores ou ainda com combinações desses dois elementos. Entretanto, indutores normalmente não são utilizados devido à dificuldade em se construir tais elementos sem uma considerável capacitância associada. Os elementos que constituem o divisor são geralmente colocados dentro de recipientes de forma cilíndrica contendo substâncias isolantes. A altura do divisor depende do nível de tensão disruptiva desejado. As partes que constituem um divisor são: um braço de alta, em que se conecta o condutor de alta tensão e um braço de baixa, ao qual se liga o cabo de medição.

Para divisores utilizados em alta tensão, conseqüentemente com alturas elevadas, o efeito das capacitâncias parasitas pode prejudicar o comportamento dos mesmos [71]. Apesar de existirem vários tipos de capacitâncias parasitas, como indicado na Fig. 6.15, normalmente apenas a capacitância parasita para a terra é considerada, em função de seu efeito sobre o divisor.

A redução do efeito das capacitâncias parasitas para a terra é obtida através da instalação de eletrodos de equalização que uniformizam a distribuição de potencial ao longo da coluna do divisor. Além disso, a utilização desses eletrodos pode minimizar o efeito corona.

Fig. 6.15 - Divisor de tensão com representação das capacitâncias parasitas [71].
 C_h – capacitância parasita do anel de equalização, C_p – capacitância parasita paralela,
 C_c – capacitância parasita entre objetos e C_e – capacitância parasita para a terra.

A Fig. 6.16 mostra o circuito equivalente de um divisor resistivo que somente deve ser empregado se sua resistência for baixa o suficiente para que as capacitâncias parasitas não influenciem significativamente seu comportamento dinâmico. Como pode ser visto na Fig. 6.17, quando o valor da resistência é alto o divisor responde lentamente e sem sobrelevação, enquanto que para valores pequenos a resposta é rápida, porém com elevada sobrelevação.

Fig. 6.16 – Circuito equivalente do divisor resistivo [72].

O divisor capacitivo, cujo circuito equivalente é apresentado na Fig. 6.18, é aparentemente ideal para medição de impulsos. No entanto, além de uma pequena resistência inerente a qualquer capacitor real, existe também uma indutância associada. A Fig. 6.19 mostra a resposta ao degrau desse tipo de divisor, que apresenta intensas oscilações. Por essa razão esse divisor é sensível a impulsos de tensão com tempos de frente pequenos e a tensão de saída pode oscilar mesmo com a

aplicação de impulsos não-oscilantes. Sendo assim, o divisor capacitivo não é adequado para medir impulsos cortados na frente ou com frente ríspida.

$L/R = 10 \text{ nsec};$	$C_e = 40 \text{ pF};$	$C_p = 1 \text{ pF}$	R_{crit}
(1) $R = 30 \text{ k}\Omega$			15.5 k Ω
(2) $R = 10 \text{ k}\Omega$			8.9 k Ω
(3) $R = 3 \text{ k}\Omega$			4.85 k Ω
(4) $R = 1 \text{ k}\Omega$			2.8 k Ω
$L/R = 10 \text{ nsec};$	$C_e = 12 \text{ pF};$	$C_p = 1 \text{ pF}$	
(5) $R = 10 \text{ k}\Omega$			13.4 k Ω

Fig. 6.17 – Resposta do divisor resistivo ao degrau para diferentes valores de resistência [72].

Fig. 6.18 - Circuito equivalente do divisor capacitivo [72].

Para reduzir a intensidade das oscilações que ocorrem na resposta ao degrau do divisor capacitivo, pode-se conectar resistores em série com os capacitores, formando um divisor capacitivo amortecido. Se os valores desses resistores não forem altos, mas apenas suficientes para amortecer as oscilações, é possível obter bom desempenho. A Fig. 6.20 ilustra a resposta ao degrau desse tipo de divisor.

Fig. 6.19 – Resposta ao degrau do divisor capacitivo [72].

O divisor misto é formado por capacitores e resistores em paralelo, como indicado na Fig. 6.21. A função dos capacitores (C'_p), que neste caso são capacitores reais instalados, é reduzir o efeito das capacitâncias para terra (C'_e). A Fig. 6.22 apresenta a resposta ao degrau de um divisor misto. Entretanto, a descontinuidade observada na curva $g(t)$ da Fig. 6.22 inviabiliza o uso deste tipo de compensação (adicionar capacitores em paralelo com os resistores) para o tratamento de fenômenos com pequeno tempo de duração.

Fig. 6.20 – Resposta ao degrau do divisor capacitivo amortecido [72].

Fig. 6.21 - Circuito equivalente do divisor misto [72].

Fig. 6.22 – Resposta ao degrau do divisor misto [72].

6.2.1.1 Projeto e construção de um divisor de tensão

Neste trabalho optou-se pelo divisor resistivo levando-se em consideração as suas características de desempenho, as formas de onda das tensões induzidas a serem medidas e a grande experiência do GATDA/USP no projeto e construção deste tipo de divisor. Como dito no Capítulo 5, a medição das tensões induzidas foi feita em dois pontos da linha experimental, sendo que em cada ponto são medidas as tensões nas linhas protegida e sem proteção. São necessários, portanto, quatro divisores de tensão.

A técnica para construção desse tipo de divisor consiste em enrolar, sobre um tubo de PVC, duas camadas de fio resistivo em sentidos opostos de modo que, ao conectá-las em paralelo, são eliminados os efeitos de indutância. Para isso foram utilizados fios isolados. Os cálculos para o projeto do divisor foram realizados em função das máximas tensões esperadas na linha experimental (V_1), 250 kV, e da máxima tensão de entrada do osciloscópio de medição (V_2), 400 V. Com esses dados foi calculada a relação do divisor:

$$Re1 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{250000}{400} = 625 \quad (23).$$

Por questão de arredondamento, essa relação foi fixada em 600. Definida a relação de tensões, foram determinadas as resistências de alta (AT) e baixa tensão (BT), fixando o resistor de AT em 15 k Ω (2 camadas em paralelo de 30 k Ω cada), para não introduzir uma carga apreciável na linha ou prejudicar o comportamento dinâmico do divisor. Então, tem-se para o resistor de BT:

$$R_2 = \frac{R_1}{Re1 - 1} \quad (24)$$

em que R_1 - resistência do braço de alta tensão e

R_2 - resistência do braço de baixa tensão,

resultando $R_2 = 25 \Omega$.

Em seguida foram especificados os componentes e as características físicas do divisor. Os resistores foram construídos utilizando-se fios de níquel – cromo, sendo a altura do braço de alta tensão do divisor construído igual a 95 cm [73].

Outro aspecto importante levado em consideração foi a variação da resistência com a temperatura durante a passagem do impulso atmosférico. Sendo assim, a massa foi avaliada de forma que, quando da aplicação de impulsos plenos, o aumento de temperatura não supere os 100 °C, levando a uma variação de resistência menor que 1 % [73].

A montagem do resistor de baixa tensão foi feita no interior de um conector "Ultra High Frequency" (UHF) para facilitar a conexão dos cabos de ligação com o osciloscópio. A Fig. 6.23 mostra o resistor de baixa tensão, o qual foi instalado numa caixa metálica em que também foi colocado o osciloscópio para a medição das tensões induzidas. A Fig. 6.24 apresenta um zoom do resistor de BT do divisor.

(a)

(b)

Fig. 6.23 - Braço de baixa tensão [73].
 (a) montado (b) desmontado e expandido.

Fig. 6.24 - Detalhe do resistor de baixa tensão [73].

Na Tabela 6.2 são apresentados os valores medidos de resistências e relação de tensão dos quatro divisores construídos. A Fig. 6.25 apresenta uma vista de um divisor e a Fig. 6.26 mostra o detalhe do posicionamento do braço de baixa tensão na caixa.

Tabela 6.2 - Dados de resistência elétrica e relação dos quatro divisores [73].

Divisor	R_1 (k Ω)	R_2 (Ω)	Relação calculada
1	14,98	25,5	588
2	15,06	25,8	585
3	15,09	25,6	590
4	15,06	25,6	589

Fig. 6.25 - Vista de um dos divisores de tensão construídos (braço de AT na parte externa da caixa e braço de BT interno à mesma) [73].

Fig. 6.26 - Detalhe da montagem do braço de baixa tensão no interior da caixa [73].

6.2.1.2 Ensaios realizados

Os divisores foram avaliados através dos ensaios de tensão suportável de impulso atmosférico, medição de resposta ao degrau e determinação do fator de escala. O primeiro verifica se o divisor suporta a tensão para a qual ele foi projetado, o segundo avalia seu comportamento dinâmico e o terceiro determina o fator de escala do divisor já instalado na sua respectiva caixa metálica onde se encontra o osciloscópio designado para cada divisor.

6.2.1.2.1 Determinação do fator de escala

A determinação do fator de escala para o sistema de medição de tensões induzidas foi realizada por comparação com um sistema de referência (divisor de tensão resistivo R500 Haefely) ligado em paralelo. Foram aplicados em cada divisor 5 impulsos atmosféricos com forma de onda normalizada (1,2/50 μ s) com polaridade positiva e 5 impulsos com polaridade negativa. A Tabela 6.3 apresenta os resultados para os quatro divisores, com o uso dos seus respectivos osciloscópios e pontas de prova (2 canais).

Tabela 6.3 - Fatores de escala dos quatro divisores [73].

Divisor	Fator de Escala			
	pol. positiva		pol. negativa	
	canal 1	canal 2	canal 1	canal 2
1	548	548	547	547
2	599	598	603	595
3	601	587	607	595
4	604	610	600	604

6.2.1.2.2 Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico

Em cada divisor foram aplicados 15 impulsos de tensão com o tempo de frente de $3,9 \mu\text{s}$, tempo até o meio valor de $50 \mu\text{s}$ e valor de crista de 250 kV, em ambas as polaridades. Os quatro divisores suportaram os impulsos, sem nenhuma ocorrência de descarga disruptiva.

6.2.1.2.3 Medição da resposta ao degrau

Este ensaio consiste na aplicação de um degrau de tensão no divisor, medindo a resposta na baixa tensão. Com isso é possível determinar os parâmetros de resposta ao degrau definidos no Capítulo 5, importantes para verificar o comportamento dinâmico do divisor. A Fig. 6.27 apresenta o esquema de montagem (tipo reta) utilizado para o ensaio de resposta ao degrau dos divisores. Foi utilizado um gerador de degrau Haefely com tensão interna CC de $90 \text{ V} \pm 10 \%$, tempo de subida menor que 3 ns e a resposta foi analisada através de um programa computacional visando a determinação dos seus parâmetros, definidos em [67]. A Fig. 6.28 mostra a resposta ao degrau de um dos divisores construídos e a Tabela 6.4 resume os resultados do cálculo dos parâmetros para os quatro divisores. Com base nos parâmetros apresentados na Tabela 6.4 pode-se dizer que os divisores de tensão construídos são adequados para medir tensões induzidas em redes primárias devido a descargas atmosféricas.

(a)

(b)

Fig. 6.27 – Montagem do ensaio de resposta ao degrau [73].
 a) Esquema b) Foto

Fig. 6.28 - Resposta ao degrau de um dos divisores [73].

Tabela 6.4 - Parâmetros da resposta ao degrau unitário dos quatro divisores de tensão construídos [73].

Divisor	Canal	T_N (ns)	T_α (ns)	β %	t_s (ns)	T_0 (ns)
1	1	24,8	26,1	4,7	44	3,5
1	2	25,5	25,9	5,0	44	3,9
2	1	24,2	24,4	4,9	44	4,7
2	2	23,8	24,2	4,7	41	4,8
3	1	25,5	25,6	4,0	43	4,5
3	2	25,5	25,8	4,1	41	5,4
4	1	24,7	25,2	4,8	44	3,3
4	2	24,0	24,2	4,4	42	5,1

6.2.2 Testes no sistema de medição

No caso do sistema de medição de tensões induzidas, de forma a verificar a confiabilidade dos valores medidos, foram realizados testes de medição e comunicação entre os osciloscópios e o computador instalado na estação. Os testes consistiram em aplicar, através de um gerador portátil, impulsos normalizados de

tensão (1,2/50 μ s), com amplitudes de até 10 kV nas linhas e comparar as medições realizadas pelo sistema de medição descrito anteriormente com outro sistema de medição do Laboratório de Alta Tensão do IEE/USP, adotado como padrão. O sistema de medição adotado como padrão consistiu em um divisor de tensão resistivo de relação 172, um cabo coaxial e um osciloscópio Tektronix® TDS 3012. O sistema padrão foi instalado inicialmente junto aos pontos de medição 3 e 4. Aplicando o impulso na linha, obtiveram-se duas medições através dos dois sistemas. Através da comparação entre as tensões medidas mostradas na Fig. 6.29, verificou-se que o sistema de medição e de aquisição é perfeitamente confiável, já que foram obtidos resultados similares para os outros três sistemas de medição de tensões induzidas (pontos de medição 1, 2 e 3 indicados na Fig. 6.12).

Fig. 6.29 – Comparação entre o sistema de medição desenvolvido (ponto 4, Fig. 6.12) e o sistema de referência.

6.3 Funcionamento dos sistemas de medição

O funcionamento dos sistemas de medição de correntes e tensões induzidas é similar. Na iminência de uma tempestade a alimentação do ponto de medição das correntes é desligada por meio do seccionamento de um trecho do cabo de alimentação instalado em um poste próximo à estação de medição. Isto provoca a abertura dos contatos NA do contator C1 indicado na Fig. 6.30 (cuja bobina deixou de ser energizada) e o carregador de baterias é desligado da rede, enquanto a bateria é ligada ao osciloscópio através dos contatos NF do mesmo contator. Para evitar sobretensões que poderiam danificar o sistema, a rede está protegida através de SPD's instalados nas entradas de alimentação do carregador de baterias e do osciloscópio. Quando as medições são encerradas, o trecho do cabo é conectado novamente ao circuito, restabelecendo-se a conexão da rede com o carregador de baterias e desligando-se, simultaneamente, o osciloscópio da bateria.

No caso do sistema de medição de tensões induzidas, o esquema de alimentação é similar, sendo a abertura dos contatos NA e fechamento dos contatos NF do contator feitos através de um temporizador previamente programado (oito horas). Da mesma maneira que ocorre com o sistema de medição de correntes, a alimentação da rede é desconectada do carregador de baterias e, simultaneamente, a bateria é acoplada ao osciloscópio.

Fig. 6.30 – Esquema elétrico de alimentação dos sistemas de medição de correntes e de tensões induzidas.

Os sinais elétricos registrados pelos cinco osciloscópios (um para corrente e quatro para tensão) são convertidos em óticos pelos “mini modems”. Em seguida, são transmitidos via fibra ótica até outros “mini modems” situados dentro da estação de medição, que os convertem novamente em sinais elétricos. Por último, esses sinais são armazenados em um banco de dados.

CAPÍTULO 7

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A Fig. 7.1 mostra um diagrama esquemático do sistema de aquisição dos dados, provenientes de um dos osciloscópios que mede tensões induzidas em um ponto de uma das linhas experimentais.

Fig. 7.1 - Sistema de medição e aquisição de dados de tensões induzidas.

Observando-se a Fig. 7.1, nota-se que ao ser induzida tensão nas linhas experimentais, flui corrente pelo divisor de tensão. Através das pontas de prova do osciloscópio TDS 3012 Tektronix®, que estão conectadas aos terminais do resistor de baixa do divisor, mede-se o valor de tensão induzida na linha. O sinal é registrado na memória interna do osciloscópio, cuja saída RS232 é conectada a um “mini modem” assíncrono da BlackBox®, modelo ME605A-MST, que converte este sinal elétrico digital em sinal ótico. Esse sinal é transmitido por fibra ótica para a estação de medição, onde ocorre a conversão do sinal ótico em sinal elétrico por um segundo “mini modem” do mesmo tipo. O sinal é introduzido em um sistema multiplexador, melhor detalhado no item 7.2, e posteriormente inserido na porta serial do computador que o armazena.

No início do período de medições, o osciloscópio é posto no modo de espera (“single sequence”), aguardando um sinal acima de um valor de disparo previamente ajustado. Quando ocorre uma tensão induzida com valor superior a esse nível o osciloscópio é acionado, armazenando a forma de onda em sua memória interna. A cada intervalo de tempo anteriormente selecionado o programa TekLink, em sua

configuração automática, verifica a existência de novos sinais nas memórias de todos os osciloscópios através do envio de sinais de controle a cada um deles. Se qualquer um dos osciloscópios não está em modo de espera, significa que há novas formas de onda registradas. Sendo assim, o programa inicia a aquisição de acordo com a seqüência de leitura desejada. As formas de onda adquiridas pelo programa computacional são armazenadas em um banco de dados. Após o ciclo de aquisição, os osciloscópios são novamente colocados no modo de espera. Não havendo novos eventos, o programa aguarda um pequeno intervalo de tempo, geralmente um minuto, e inicia uma nova busca, repetindo todo o ciclo. Além do modo de aquisição automática, o programa permite ao usuário realizar aquisições manuais não repetitivas de qualquer osciloscópio ligado ao sistema.

7.1 Programa computacional Teklink V2.1

O principal componente do sistema de aquisição de dados é o programa computacional desenvolvido na EESC/USP [70] em Delphi 5 para plataforma Windows 95/98. A função do programa TekLink V2.1 é adquirir e armazenar as formas de onda das correntes das descargas atmosféricas e das tensões induzidas registradas pelos osciloscópios do sistema de medição. O programa pode ser visto de forma esquematizada na Fig. 7.2.

Fig. 7.2- Diagrama de blocos do programa TekLink V 2.1.

No bloco “**Arquivo**” é possível abrir uma nova planilha para introduzir novos dados, inclusive manualmente; abrir arquivos contendo dados e salvá-los; importar e exportar os dados no formato ASCII.

No bloco “**Gráfico**” os dados armazenados ou provenientes de uma planilha podem ser analisados através de gráficos, em que as escalas são automaticamente calculadas para maximizar a visualização na tela. A partir de um menu secundário, este bloco possui ainda as opções desenhar, configurar e imprimir gráfico, além de exportá-lo no formato “Bitmap”.

O bloco “**Aquisição de dados**” é o mais importante do programa e através de seus vários menus e sub-menus é possível escolher o tipo de aquisição (manual ou automática); definir as portas seriais nas quais os diferentes osciloscópios estão conectados; efetuar testes de comunicação entre o programa e os osciloscópios; verificar automaticamente se as portas de comunicação serial COM estão disponíveis ou não para servir como porta de entrada dos dados vindos do sistema multiplexador, cuja conexão com o computador foi testada automaticamente; selecionar de forma manual uma porta do sistema multiplexador; definir os parâmetros de comunicação; definir os pontos iniciais e finais de uma aquisição; definir os intervalos de tempo entre duas aquisições e escolher o nome do campo dos registros do banco de dados que identifica cada aquisição.

No bloco “**Histórico**” é possível armazenar todas as operações efetuadas durante um período de funcionamento do sistema de aquisição de dados. Quando o programa é iniciado, abaixo do menu principal, abri-se uma janela que mostra instantaneamente cada ação executada pelo mesmo. Um sistema de cores indica a normalidade ou não da operação: vermelho significa a ocorrência de erros graves, amarelo é um sinal de alerta e verde denota operações bem sucedidas. Além disso, é possível salvar o histórico de cada dia de medição em um arquivo a ser armazenado em um outro banco de dados.

O bloco “**Análise**” tem como função processar os dados das planilhas para obter informações úteis de formas de onda senoidais, tais como comprimento de onda, valor rms e valor DC.

No bloco “**Armazenamento de dados**” os dados das tensões induzidas e das correntes das descargas são armazenados em um banco de dados. Uma característica importante do banco de dados desenvolvido é que somente dados provenientes do “hardware” de aquisição de dados são considerados, desprezando-se informações de planilhas introduzidas manualmente. Com isso, há um aumento da confiabilidade do sistema de aquisição e inibição de entrada de dados espúrios. Cada forma de onda armazenada pelo programa é identificada pela data, horário e número de pontos previamente definido para cada onda. Sendo assim, a procura pelas formas de onda é rápida e fácil.

7.2 Hardware acoplado ao programa Teklink - Sistema Multiplexador

A conexão entre os “minimodem” é feita com fibra ótica do tipo “full duplex”, viabilizando a comunicação completa em padrão RS232 entre o computador e os osciloscópios. Além de transmitir os dados, este tipo de comunicação permite que os osciloscópios sejam controlados remotamente.

O sistema multiplexador (MUX) ilustrado na Fig. 7.3 possibilita a conexão de até oito “mini modems” RS232 à porta serial do computador. Seu controle é efetuado também pelo programa TekLink através da porta paralela do mesmo computador.

Fig. 7.3 – Detalhamento do sistema de aquisição de dados desenvolvido [70].

7.3 Estação de medição

O computador no qual foi instalado o programa de aquisição de dados foi alocado dentro de uma estação de aço, com 6 m de comprimento, 2,5 m de largura e pé direito de 2,3 m, está situada a cerca de 40 m da torre de captação de descargas. A Fig. 7.4 mostra a localização da estação de medição em relação aos outros componentes do sistema. A estação abriga também alguns equipamentos que servem para iniciar o funcionamento do sistema de medição de tensões induzidas.

Quando uma descarga atmosférica incide na torre são gerados campos elétricos e magnéticos com espectro cobrindo uma faixa que se estende desde baixas frequências até cerca de 1 MHz. Para reduzir a influência desses campos sobre o sistema de aquisição de dados, a estação foi construída com chapas de material ferromagnético com aproximadamente 2 mm de espessura (aço). Cuidados especiais foram tomados em relação ao efeito de aberturas na blindagem, visando obter perfeita continuidade dos materiais condutores das paredes e dos acessos. Nas janelas foram instaladas grades de metal conectadas com a estrutura da estação.

Como visto no Capítulo 6, as medições das correntes das descargas e das tensões induzidas nas linhas são realizadas através de osciloscópios instalados no local onde se está medindo o sinal, de modo que a aquisição das formas de onda armazenadas

nos osciloscópios é feita através de uma conexão “full duplex” de fibra ótica entre o computador e cada osciloscópio, para ter o controle completo do osciloscópio à distância. Destaca-se que os dados medidos são transmitidos de forma digital, aumentando significativamente a confiabilidade na reprodução destes sinais. Para realizar essa conexão utiliza-se um “mini modem” assíncrono ligado à porta serial RS232 do osciloscópio e outro “mini modem” ligado à porta serial de um sistema multiplexador (MUX), como mostra a Fig. 7.5. Este multiplexador tem como finalidade permitir a conexão de até oito “mini modems” à porta serial RS232 do computador. O computador executa um programa que controla a aquisição de dados dos cinco osciloscópios utilizados.

Fig. 7.4 –Interligação dos pontos de medição com a estação.
MC – medição de corrente; GMA – grupo motor-alternador; 1, 2, 3 e 4 – pontos de medição de tensões induzidas.

Fig. 7.5 – Sistema de aquisição de dados.
PP - porta paralela.

Outra opção seria colocar os osciloscópios na estação de medição e fazer as medições à distância. Para isso os sinais elétricos provenientes dos divisores de tensão e do resistor “shunt” passariam por um conversor eletro-ótico (como por exemplo um transmissor de sinal de vídeo via fibra ótica) e transmitidos até a estação via fibra ótica. Já na estação, o sinal ótico seria convertido para sinal elétrico pelo conversor ótico-elétrico e medido através de um osciloscópio digital. O maior problema de se utilizar esse sistema é que seria necessário um divisor de tensão que reduzisse as tensões induzidas nas linhas para um valor máximo de 1 Vpp, que é a tensão máxima de entrada do transmissor de sinal de vídeo via fibra ótica, modelo XMTR 3110-7 [74]. A construção de um divisor com essa relação seria muito difícil, uma vez que resultaria em um valor muito baixo para a resistência de baixa tensão. Além disso, reduzindo-se a tensão induzida para esse valor, o sistema de medição ficaria muito mais sensível a ruídos e a erros de medição. Por esse motivo foi escolhido o primeiro sistema, ou seja, colocar os osciloscópios no local onde são feitas as medições e fazer a aquisição via fibra ótica dos dados já na forma digital.

CAPÍTULO 8

RESULTADOS PRELIMINARES

Este item tem por objetivo apresentar alguns resultados preliminares obtidos pelo sistema, implantado no final de fevereiro de 2002. Durante as primeiras medições ocorreram alguns problemas no funcionamento do sistema de aquisição que impossibilitaram o armazenamento das formas de onda de tensões induzidas nos quatro osciloscópios simultaneamente. Entretanto, após a realização de alguns ajustes esses problemas foram sanados e todas as formas de onda registradas nos osciloscópios foram armazenadas no banco de dados.

As tensões induzidas registradas pelos osciloscópios não são exatamente iguais às tensões fase-terra, pois não são medidas as quedas de tensão na indutância do condutor de descida e na resistência de aterramento. Para verificar essa diferença, foram realizadas simulações considerando o circuito indicado na Fig. 8.1.

Fig. 8.1 – Ponto de medição de tensão induzida.

U_{ft} – tensão fase-terra

i – corrente através do divisor de tensão

R_{AT} e R_{BT} – resistências de AT e BT do divisor de tensão, respectivamente

V_{med} e $V_{med_{BT}}$ – tensões medidas no divisor e no resistor de BT, respectivamente

L – indutância do condutor de descida

$R_{ater.}$ – resistência de aterramento

Osc. – osciloscópio.

Analisando-se o circuito da Fig. 8.1 obtêm-se as equações:

$$\begin{cases} U_{ft} = (V_{med_{BT}} \cdot \text{relação}_{divisor}) + R_{ater.} \cdot i + L \frac{di}{dt} \\ V_{med_{BT}} = R_{BT} \cdot i \end{cases} \quad (25)$$

$$(26)$$

Através da eq. (26), obtêm-se a corrente que flui pelo divisor de tensão, já que os valores de $V_{med_{BT}}$ e R_{BT} são conhecidos. Após o cálculo da corrente, a tensão fase-terra é obtida através da eq. (25), pois todos os componentes da mesma têm valores conhecidos.

Conforme dito anteriormente, as tensões registradas nos osciloscópios não são exatamente iguais às tensões induzidas fase-terra. Entretanto, as diferenças são muito pequenas em função da alta impedância do divisor. A título de ilustração, a Fig. 8.2 apresenta uma comparação entre a tensão induzida registrada em 17/03/2002 no ponto de medição 1 e a tensão calculada de acordo com a eq. (25). Para a indutância L do condutor de descida (14,8 m de comprimento) considerou-se o valor $1,39 \mu\text{H/m}$, com base em [47]. Nota-se, conforme esperado, que as quedas de tensão na indutância e na resistência são muito menores que a tensão sobre o divisor, podendo ser desprezadas. Portanto, daqui em diante assumir-se-á que as tensões induzidas registradas correspondem às tensões fase-terra. A título de ilustração, a Fig. 8.3 apresenta a corrente através do divisor de tensão.

A Fig. 8.4 mostra resultados de medições nos pontos 2 e 4, com as duas linhas com a mesma configuração, isto é, sem pára-raios e casadas em ambas as extremidades. Embora haja uma distância de 154 m entre os dois pontos de medição, observa-se que nos dois casos apresentados as formas de onda são bastante semelhantes. Resultados similares foram obtidos para os pontos de medição 1 e 3, conforme indicado na Fig. 8.5.

(a)

(b)

Fig. 8.2 – Comparação entre as tensões induzidas U_{ft} (calculada através da eq. 24) e V_{med} (medida no dia 17/03/2002, às 16h47'44").

a) ondas superpostas

b) ondas deslocadas no tempo

Fig. 8.3 – Corrente através do divisor de tensão do ponto de medição 1 em 17/03/02 às 16h47'44".

Ainda com as duas linhas exatamente na mesma configuração, foram comparadas as tensões induzidas tanto nos pontos 1 e 2 como nos pontos 3 e 4. A Fig. 8.6 mostra que em ambos os casos as formas de onda também são muito semelhantes. Observe-se, porém, uma certa diferença a partir de um determinado instante (aproximadamente $13 \mu\text{s}$ após o início das ondas, o que corresponde a $t \cong 18 \mu\text{s}$ nos gráficos apresentados na Fig. 8.6). Esta diferença deve-se provavelmente ao fato de que, na ocasião, conforme confirmado após uma inspeção visual, dois pontos na linha que contém os pontos de medição 1 e 3 estavam encostando em galhos de árvores. Portanto, devido às reflexões nesses pontos, era de se esperar uma certa redução das tensões induzidas nessa linha em relação às induzidas na outra, que está mais afastada das árvores. O instante exato em que essas diferenças aparecem depende da posição relativa entre o local de incidência da descarga e os pontos de medição. Quanto menor a distância entre o local de incidência da descarga e o ponto de medição em relação à distância entre o ponto de incidência da descarga e o local onde o galho de árvore está encostado na linha, maior o tempo decorrido entre o início da onda (no ponto de medição) e a chegada das ondas refletidas. Por outro lado, quanto maior esta relação, menor será a diferença entre os instantes de início da onda e de chegada da onda refletida. Com base nessas considerações pode-se supor que no caso da Fig. 8.6 a descarga provavelmente ocorreu a uma distância em

relação aos pontos de medição bem menor que em relação ao ponto de contato do galho na linha.

Fig. 8.4 - Comparação entre tensões induzidas em dois pontos diferentes da mesma linha (2 e 4) [75].
a) dia 23/01/2004 (17h52'50") b) dia 30/01/2004 (17h16'31")

(a)

(b)

Fig. 8.5 - Comparação entre tensões induzidas em dois pontos diferentes da mesma linha (1 e 3) [75].
 a) dia 07/03/2003 (18h30'14'') b) dia 30/01/2004 (17h16'31'')

(a)

(b)

Fig. 8.6 - Comparação entre tensões induzidas nas duas linhas – 30/01/04 17h16'31" [75].

a) pontos 1 e 2

b) pontos 3 e 4

As Figs. 8.7 a 8.10 apresentam outros resultados de medições de tensões induzidas, porém com pára-raios na linha que contém os pontos de medição 2 e 4, conforme indicado na Fig. 5.12.

Fig. 8.7 – Tensões induzidas nos pontos de medição 3 e 4 - 04/03/2002 (16h 16' 12").

Fig. 8.8 – Tensões induzidas no ponto de medição 1 - 08/03/2002 (17h 56' 15").

(a)

(b)

Fig. 8.9 – Tensões induzidas nas linhas experimentais – 17/03/2002 (16h 50' 27'').

a) pontos de medição 1 e 2

b) pontos de medição 3 e 4

Observando-se as formas de onda apresentadas na Fig. 8.7, pode-se notar que as amplitudes das tensões induzidas não foram suficientes para que os pára-raios (ZnO, classe 10 kA e tensão nominal 12 kV) atuassem. A tensão medida na linha sem pára-raios apresentou menor amplitude que a registrada na linha com pára-raios pelo fato de ambas extremidades da linha sem pára-raios estarem casadas. Como os valores das tensões induzidas foram relativamente baixos, as impedâncias instantâneas dos pára-raios não foram reduzidas significativamente pelos surtos e, assim, o coeficiente de reflexão na extremidade da linha com pára-raios apresentou valor positivo, o que resultou em uma tensão, nesta linha, com amplitude superior àquela correspondente à linha sem pára-raios.

Apenas uma forma de onda foi registrada no caso da Fig. 8.8. Houve alguns problemas de comunicação do programa computacional com os outros osciloscópios, que impossibilitaram o armazenamento das tensões induzidas.

A Fig. 8.9 apresenta as formas de onda das tensões induzidas nas duas linhas, por uma mesma descarga, nos pontos de medição 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Pode-se observar que, também neste caso, os pára-raios não atuaram, de modo que as tensões medidas na linha com pára-raios atingiram valores superiores às tensões correspondentes na linha sem pára-raios devido às reflexões sofridas pelas ondas na extremidade próxima aos pontos de medição.

Apesar do sistema não fornecer a localização dos pontos atingidos pelas descargas atmosféricas, em pelo menos um caso esse ponto pôde ser determinado com exatidão. Através da constatação de queda de uma descarga atmosférica em um eucalipto situado a aproximadamente 61 m de distância da linha experimental e da análise das amplitudes e dos instantes de registro das tensões induzidas nesse dia, foi possível concluir que as tensões apresentadas na Figura 8.10, medidas nos pontos 1 e 2, foram induzidas por essa descarga. A título de ilustração, a Figura 8.11 mostra os danos sofridos pelo eucalipto atingido.

Fig. 8.10 – Tensões induzidas nos pontos de medição 1 e 2 - 17/03/2002 (16h 47' 44").

Fig. 8.11 – Eucalipto atingido em 17/03/2002 (16h 47' 44") pela descarga atmosférica responsável pela indução das tensões apresentadas na Figura 8.10.

As tensões mostradas na Figura 8.10 foram as que atingiram as maiores intensidades registradas pelo sistema até o momento. Devido à atuação dos pára-raios, houve uma redução na amplitude da tensão induzida na linha protegida. Os níveis de “offset” dos osciloscópios situados nos pontos de medição 3 e 4 estavam com valores elevados devido à variação de temperatura. Por essa razão, os osciloscópios foram disparados por sinais menores que o valor ajustado para o “trigger”, o que impediu a obtenção das tensões induzidas nesses pontos.

Conforme pode-se observar a partir dos registros obtidos, o sistema está funcionando adequadamente.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo desenvolver e implantar um sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas indiretas.

Durante o desenvolvimento do sistema foram projetados, construídos e testados sistemas de medição de tensões e de correntes que, associados a osciloscópios e a um computador, permitem a captura e o armazenamento de dados referentes às formas de onda das tensões induzidas em duas linhas de distribuição e das correntes de descargas que eventualmente atinjam diretamente a torre construída nas proximidades das linhas, respectivamente. O sistema de aquisição de dados é controlado por um programa computacional dedicado, sendo a comunicação de dados realizada por cabos de fibra ótica visando minimizar o efeito dos campos eletromagnéticos devido às descargas atmosféricas.

A medição das tensões induzidas é realizada em duas linhas de distribuição não energizadas e não convencionais, sendo que uma delas possui pára-raios instalados e a outra não tem nenhum dispositivo de proteção conectado. Nessas linhas foram instalados os divisores de tensão que permitem a obtenção das formas de onda das tensões.

O sistema entrou em operação no final de fevereiro de 2002, tendo sido observadas várias formas de onda de tensões induzidas, comprovando o seu desempenho satisfatório. Até o momento não foi registrada nenhuma ocorrência de descarga direta na torre, embora o sistema esteja apto a efetuar medições de corrente assim que for solicitado.

Cabe enfatizar que a logística e o arranjo elaborados para garantir o bom desempenho do sistema, em conjunto com o desenvolvimento dos seus vários componentes, indicam uma importante contribuição para o estudo de descargas

atmosféricas. O sistema desenvolvido poderá ser incrementado para investigar outros dispositivos de proteção, outras configurações de linhas, etc..

Ressalta-se o caráter pioneiro da metodologia empregada neste trabalho, pois somente no estudo em modelo reduzido realizado pelo GATDA/USP [7-10, 30-41] foram obtidos dados simultâneos de tensões induzidas pelas mesmas descargas em linhas de distribuição com e sem pára-raios. Este estudo representa uma extensão da pesquisa realizada com modelo reduzido, sendo a metodologia anteriormente desenvolvida transportada para um sistema em escala real. Pode-se, portanto, medir concomitantemente as tensões induzidas em linhas de distribuição com e sem proteção por descargas naturais. Em função de seu pioneirismo e de suas vantagens, espera-se que este procedimento seja também adotado em outras pesquisas que tenham objetivos semelhantes.

Com base na ampla revisão bibliográfica realizada, destaca-se que em nenhum outro estudo experimental realizado nessa área os sinais registrados de tensões induzidas foram enviados de forma digital do sensor para o computador. Destaca-se que essa forma de transmissão aumenta a confiabilidade na reprodução dos sinais para posterior análise.

Com as próximas temporadas de chuvas espera-se obter registros suficientes para formar um conjunto de dados estatisticamente relevante que possibilite, futuramente, a avaliação quantitativa dos benefícios proporcionados pela presença de pára-raios em termos da melhoria do desempenho de linhas de distribuição face a descargas atmosféricas indiretas. Finalmente espera-se, com os resultados das observações, avaliar a adequação de modelos existentes para o cálculo de tensões induzidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUSE, J.; LARSEN, V.; OLSEN, K. A complete simulation / calculation model for lightning overvoltages in power systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING AND POWER SYSTEMS, London., 1984. **Proceedings. ICLP.** London., 1984. p. 21-5.
- [2] PIANTINI, A. **Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas.** 1991. 205 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.
- [3] RUSCK, S. Induced lightning over-voltages on power-transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low-voltage networks. **Transactions of the Royal Institute of Technology**, n. 120, p. 1-118, 1958.
- [4] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; TAKANISHI, A. Simultaneous measurement of lightning induced voltages with associated stroke currents. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 102, n. 8, p. 2420-27, 1983.
- [5] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; YAMAZAKI, N. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 2, p. 129-39, 1986.
- [6] YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; FUKUI, S. Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines (II). **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 4, p. 2196-2203, 1989.
- [7] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. An experimental study of lightning induced voltages by means of a scale model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21., Berlin, 1992. **Proceedings. ICLP.** Berlin, 1992. paper 4.08, p. 195-199.
- [8] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 34, n. 5, p. 2799-2802, 1998.

- [9] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. The Extended Rusck Model for calculating lightning induced voltages on overhead lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 7., Curitiba, 2003. **Proceedings. SIPDA**. São Paulo, 2003, p. 151-155.
- [10] PIANTINI, A. **Tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas aéreas, rurais e urbanas, considerando diferentes métodos de proteção - modelagens teórica e experimental e aplicação ao cálculo de interrupções**. 1997. 316 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.
- [11] NAKAHORI, K.; EGAWA, T.; MITANI, H. Characteristics of winter lightning currents in Hokuriku district. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 101, n. 11, p. 4407-12, 1982.
- [12] ASAKAWA, A.; MIYAKE, K.; YOKOYAMA, S.; SHINDO, T.; YOKOTA, T.; SAKAI, T. Two types of lightning discharges to a high stack on the coast of the sea of Japan in winter. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 12, n. 3, p.1222-31, 1997.
- [13] SHINDO, T.; ASAKAWA, A.; YOKOTA, T.; WADA, A.; YOKOYAMA, S.; SAKAI, T. Characteristics of lightning strokes to a high stack in winter season in Japan. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24., Birmingham, 1998. **Proceedings. ICLP**. Birmingham, 1998. p. Ib.4/54-9.
- [14] GOTO, Y.; NARITA, K.; KOMURO, H.; HONNA, N. Current waveform measurement of winter lightning struck an isolated tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 20., Interlaken, 1990. **Proceedings. ICLP**. Interlaken, Swiss Electrotechnical Association, 1990. p. 1.9P/1-1.9P/6.
- [15] ERIKSSON, A. J.; MEAL, D. V. Lightning performance and overvoltage surge studies on a rural distribution line. **IEE-Proceedings-C-Generation,-Transmission-and-Distribution**, v. 129, n. 2, p. 59-69, Mar. 1982.

- [16] ERIKSSON, A. J.; STRINGFELLOW, M. F.; MEAL, D. V. Lightning – induced overvoltages on overhead distribution lines **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.101, n. 4, p. 960-8, 1982.
- [17] ERIKSSON, A. J.; PENMAN, C. L.; MEAL, D. V. A review of five years' lightning research on an 11 kV test-line. **Elektron Journal-Paper**. p. 32-36. Aug. 1984.
- [18] GELDENHUYS, H. J.; ERIKSSON, A. J.; BOURN, G. W. Fifteen years data of lightning current measurements on a 60 m mast. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 19., Graz, 1988. **Proceedings. ICLP**. Graz, 1988. p. 1.7/451-456.
- [19] TORRES, H.; TRUJILLO, O.; AMÓRTEGUI, F.; HERRERA, F.; PINZÓN, G.; QUINTANA, C.; GONZÁLEZ, D.; RONDÓN, D.; SALGADO, M.; AVILA, D. Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 11., London, 1999. **Proceedings: ISH**. London, 1999.
- [20] TORRES, H.; PÉREZ, E.; HERRERA, J.; SALGADO, M.; QUINTANA, C.; RONDÓN, D.; AVILA, D.; GONZÁLEZ, D. Analysis of a non-identifying lightning stroke polarity measured in a natural lightning experimental station in Colombia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, 2., Belo Horizonte, 2000. **Proceedings. GROUND'2000**. Belo Horizonte, 2000. p. 19-23.
- [21] TORRES, H.; SALGADO, M.; PÉREZ, E.; HERRERA, J.; YOUNES, C.; QUINTANA, C.; RONDÓN, D.; AVILA, D.; GONZÁLEZ, D. A comparison between theoretical and experimental lightning induced voltages in tropical zone. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, 2., Belo Horizonte, 2000. **Proceedings. GROUND'2000**. Belo Horizonte, 2000. p. 25-28.
- [22] TORRES, H.; SALGADO, M.; PÉREZ, E.; HERRERA, J.; YOUNES, C.; QUINTANA, C.; RONDÓN, D.; AVILA, D.; GONZÁLEZ, D. Lightning

induced voltages measured in a high lightning activity zone and its comparison with theoretical values. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25., Rhodes, 2000. **Proceedings. ICLP.** Rhodes, 2000. p. 553-557.

- [23] SCHROEDER, M. A. O.; SOARES, A. J.; VISACRO, S. F.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; SOUZA, V. J.; DINIZ, J. H.; CARVALHO, A. M. Evaluation of directly measured lightning parameters. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo, 1999. **Proceedings. SIPDA.** São Paulo, 1999. p. 7-11.
- [24] MELLO, J. C. D.; SCHROEDER, M. A. O.; SOARES JR, A.; VISACRO FILHO, S. Enhancement of Morro do Cachimbo station facilities for measurement of lightning currents. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, 2., Belo Horizonte, 2000. **Proceedings. GROUND'2000.** Belo Horizonte, 2000. p. 11-13.
- [25] SCHROEDER, M. A. O.; SOARES JR, A.; VISACRO FILHO, S. The Brazilian experience on measurement of lightning parameters by means of instrument towers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING, 3., Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings. GROUND'2000.** Belo Horizonte, p. 123-127.
- [26] TRIGINELLI, W. A. C.; CARVALHO, A. M.; DINIZ, J. H.; CHERCHIGLIA, L. C. L. Descargas atmosféricas - principais parâmetros aplicáveis a estudos de engenharia. In: INTERNATIONAL SEMINARIUM ON LIGHTNING AND LIGHTNING PROTECTION, 3., São Paulo, 1994.: **Proceedings. SIPDA.** São Paulo, 1994. p. 1.1-1.14.
- [27] BARKER, P. P.; SHORT, T. A.; EYBERT-BERARD, A. R.; BERLANDIS, J. P. Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2., p. 980-995, 1996.

- [28] FERNANDEZ, M. I.; RAMBO, K. J.; STAPLETON, M. V.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Review of triggered-lightning experiments performed on a power distribution system at camp blanding, Florida, during 1996 and 1997. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham 1998. **Proceedings. ICLP**. Birmingham 1998. p. 1 a.6/29-35.
- [29] RAKOV, V. A. Rocket-triggered lightning experiments at Camp Blanding, Florida. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 5., São Paulo, 1999**Proceedings. SIPDA**. São Paulo, 1999. p. 375-388.
- [30] PIANTINI, A.; KAMEYAMA F. H.; OLIVEIRA J. J.; SATO Y.; PINHEIRO W.; JANISZEWSKI J. M.; MALIMPENSA G. F.; MATSUO N. M.; NASAKI S. Estudo experimental de tensões induzidas por descargas atmosféricas através de modelo reduzido. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 11., Blumenau, 1992. **Anais. SENDI**. Blumenau: CELESC, 1992. 22 p.
- [31] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Modelo reduzido de linha aérea para estudo de sobretensões induzidas. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, n.237, p. 55-57, dez. 1993.
- [32] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Lightning induced voltages on overhead lines: the effects of ground wires. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 19., Budapest, 1994. **Proceedings. ICLP**. Budapest, 1994. R3b-08.
- [33] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Comportamento de tensões induzidas em linhas aéreas e efeito do cabo guarda. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., Recife, 1994. **Anais. SENDI** Recife, 1994..
- [34] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Uso do cabo guarda em linhas aéreas para proteção contra descargas atmosféricas indiretas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS

- ATMOSFÉRICAS, 3., São Paulo, 1994. **Proceedings. SIPDA.** São Paulo, 1994. p. 4.9-4.17.
- [35] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Use of surge arrester for protection of overhead lines against nearby lightning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 10., Montréal, 1997. **Proceedings. ISH.** Montréal, 1997. p. 213-216.
- [36] PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. Lightning induced voltages on distribution lines protected with surge arresters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 14., Birmingham, 1997. **Proceedings. CIRED.** Birmingham: 1997. p.73-74.
- [37] PIANTINI, A. ; JANISZEWSKI, J. M. Surtos induzidos por descargas atmosféricas indiretas em linhas protegidas por pára-raios. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, 4., São Paulo, 1997. **Proceedings. SIPDA.** São Paulo, 1997. p. 99-104.
- [38] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Simulação de pára-raios em escala reduzida para estudo de sobretensões. **Eletricidade Moderna**, n. 293, p. 100-109, ago. 1998.
- [39] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Lightning induced voltages on distribution lines close to buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25., Rhodes, 2000. **Proceedings. ICLP.** Rhodes, 2000. 6.17.
- [40] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Lightning induced voltages on distribution transformers – the effects of line laterals and of nearby buildings. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 6., São Paulo, 2001. **Proceedings. SIPDA.** São Paulo, 2001. p. 77-82.
- [41] PIANTINI, A. JANISZWESKI, J. M. Influência de ramais e edificações nas tensões induzidas em linhas de distribuição urbanas devido a descargas

atmosféricas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., Salvador, 2002. **Anais. SENDI**. Salvador, 2002.

- [42] ISHII, M.; MICHISHITA, K.; HONGO, Y. Experimental study of lightning induced voltage on an overhead wire over lossy ground. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 41 n. 1, p. 39-45, 1999.
- [43] AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXANI, S. H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field **IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility** , v. EMC-22, n. 2, p.119-129, 1980.
- [44] PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. **Desempenho de redes aéreas de distribuição face a descargas atmosféricas**. São Paulo, Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica, CED 120/STRA001/RL 002/OR, out. 1994.
- [45] ERIKSSON, A. J. The incidence of lightning strokes to power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 2, n. 3, pp. 859-70, July 1987.
- [46] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 1243** : IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines. 1997.
- [47] LEITE, D. M.; LEITE, C. M. **Proteção contra descargas atmosféricas**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Mydia, 1997.
- [48] PINTO, I. R. C. A; PINTO JR. O. Lightning distribution in Brazil from 1998 to 2001 based on LIS data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3rd BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002.: **Proceedings. GROUND'2002**. p. 71-73.
- [49] ERIKSSON, A. J.; MEAL, D. V. The incidence of direct lightning strokes to structures and overhead lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

LIGHTNING AND POWER SYSTEMS, London., 1984. **Proceedings. ICLP**
p. 67-71.

- [50] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS **.IEEE Std 1410**. IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines. 1997.
- [51] Isoladores Santana S/A. Pedreira. Apresenta os tipos de isoladores utilizados em subestação. Disponível em: <<http://www.isoladores-santana.com.br/produtos/subest/subcilin.htm>>. Acesso em 09 de dez. 2003.
- [52] Brydson, J. A. **Plastic Materials**. Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd., 1995. Cap. 10, p. 220. Cap. 18, p 470-471.
- [53] Coordenadoria Executiva de Cooperação Universitária e de Atividades Especiais. São Paulo. Apresenta informações sobre fibra de vidro. Disponível em: <<http://www.cecae.usp.br/aprotec/respostas/RESP59.htm>> . Acesso em 09 de dez. 2003.
- [54] LAT, M. V.; CARR, J. **Application guide for surge arresters on distribution systems**. Toronto, Canadian Electrical Association, 1988.
- [55] ANDERSON, J. G. Lightning Performance of transmission lines. In: Electric Power Research Institute. **Transmission line book**. Califórnia: Electric Power Research Institute, 1987. p.545-575.
- [56] ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. A Summary of lightning parameters for engineering applications. In: CIGRÉ: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRICAL SYSTEMS, Paris, Aug. 1980. (WG 33-01).
- [57] PIANTINI, A.; OHARA, T.; SILVA NETO, A.; JANISZEWSKI, J. M.; ALTAFIM, R. A. C; RONCOLATTO, R. A. A full-scale system for lightning data acquisition, with special reference to induced voltages on distribution lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING

- & 3rd BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings. GROUND**. p. 123-127.
- [58] ROSA, D. J. M.; ZILLES, R. Caracterização da energia solar disponível na região do Lagamar, município de Cananéia. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., Campinas, 2002. **Anais: AGRENER 2002**. Campinas, 2002. p. 1-10.
- [59] DBM Sistemas LTDA. Santa Rita do Sapucaí. Apresenta informações sobre inversores e reatores. Disponível em:
<<http://www.dbmsistemas.com.br/invreat.htm>>. Acesso em 10 de dez. 2002.
- [60] SEC POWER COM. IMPORT. EXPORT.LTDA. **Manual de serviço de campo de baterias de chumbo ácido reguladas por válvula**. São Paulo: Power Battery Company, 2002. 53 p.
- [61] STRONG, S. J.; SCHELLER, W. G. **The Solar Electric House: energy for the environmentally-responsive, energy-independent home**. Massachusetts, Sustainability Press., 1993. Cap. 3, p. 55.
- [62] Siemens S/A. São Paulo. Apresenta informações sobre tipos de painéis solares. Disponível em: <<http://www.siemens.com.br/energia/pdf/47.pdf>>. Acesso em 05 de dez. 2002.
- [63] PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; SILVA NETO, A.; , J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; NOGUEIRA, A. L. T. Sistema para estudo de tensões induzidas em LD's por descargas atmosféricas – Resultados preliminares. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2., Salvador, 2003. **Anais . Citenel II**. Brasília: ANEEL, 2003. v. I, p.103-108.
- [64] PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; SILVA NETO, A.; , J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; NOGUEIRA, A. L. T. A system for lightning induced voltages data acquisition - preliminary results. In. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 7., Curitiba, 2003. **Proceedings. SIPDA**. São Paulo: Lene Gráfica e Editora, 2003. p.156-161.

- [65] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60099-4**: Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Switzerland, 1998.
- [66] YOKOYAMA, S. Distribution surge arrester behavior due to lightning induced voltages. IEEE Transactions on Power Delivery, v.1, n.1, p.171-8, Jan. 1986.
- [67] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60060-2**: High-voltage test techniques - Part 2: Measuring Systems. Switzerland, 1996.
- [68] OHARA, T.; SILVA NETO, A. **Descontaminação de correntes de descargas atmosféricas medidas em torres**. 2002. Trabalho apresentado na disciplina PEA 5762 – Desempenho de linhas aéreas face a descargas atmosféricas, São Paulo, 2002.
- [69] CAMARGO, A. M. **Desenvolvimento de resistor shunt para medidas de correntes impulsivas em especial para aquelas oriundas de descargas atmosféricas**. 2003. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.
- [70] ALTAFIM, R. A. C.; MUNIZ, R. M. C.; CAMARGO, A. M.; SARTORI, J. C.; DOMINGUES, C.; SILVA NETO, A. **Sistema de Aquisição de Dados - Programa Computacional de Aquisição de Dados TEKLINK V2.1**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia, Abr. 2002. (DATNAS 001/ 005/OR).
- [71] ASSIS, L. D.; PIANTINI A. **Divisores para medição de impulso de alta tensão**. São Paulo, 1994. 18 p. - documento técnico - Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo.
- [72] KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S. **High voltage engineering fundamentals**. New York: Pergamon Press, 1984. 498 p.
- [73] BRAZ, C. P.; KODAIRA, C. Y. **Divisor para medição de sobretensões induzidas por descargas atmosféricas**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia, Dez. 2001. (DATNAS 001/NT004/OR).

- [74] Communications Specialties Inc. Nova Iorque. Apresenta as especificações do Transmissor de sinal de vídeo via fibra ótica. Disponível em: <www.commspecial.com>. Acesso em: 05 de fev. 2001.
- [75] CARVALHO, T. O.; PIANTINI, A.; SILVA NETO, A.; , J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; NOGUEIRA, A. L. T. Medições de tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas. Artigo submetido à apreciação da Comissão Organizadora do XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 16., Brasília, 2004.