



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**Estudo do desempenho de sistemas de
aterramento frente às descargas atmosféricas
em instalações de baixa e média tensão**

CEZAR JOSÉ SANT' ANNA

BAURU - SP

julho / 2005



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE BAURU

**Estudo do desempenho de sistemas de
aterramento frente às descargas atmosféricas
em instalações de baixa e média tensão.**

CEZAR JOSÉ SANT' ANNA

Orientador: **Prof. Adjunto André Nunes de Souza**

**Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia da
UNESP – Campus de Bauru, para
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Industrial.**

BAURU - SP

julho / 2005

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP – Bauru

Sant' Anna, Cezar José.

Estudo do desempenho de sistemas de aterramento frente às descargas atmosféricas em instalações de baixa e média tensão.

Cezar José Sant' Anna. – Bauru - [s.n.], 2005.

111 p.

Orientador: Prof. Adjunto André Nunes de Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista.

Faculdade de Engenharia de Bauru, 2005.

1. descargas atmosféricas. 2. aterramento. 3. dispositivos de proteção contra surtos. 4. surto de tensões. I – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru. II – Título.

Dedico esta dissertação com muito carinho e estima à minha esposa Linda Maria, pelo constante incentivo, pela grande compreensão durante as pesquisas, estudos e elaboração e pelo seu grande amor por mim, que foi a força mestra de tudo.

Agradecimentos

Agradeço aos meus filhos Paulo Cezar e Mayra, Lauro Cezar e Juliana, Cezar José Jr. e Maria Cecília e Marcos Cezar e Adriane, pela infinita compreensão e total e irrestrito apoio, aos meus pais Alexandre e Alzira e meus sogros Lauro e Neuza pelos constantes apoios de excelentes pais que são.

Agradeço aos meus irmãos: Alexandre e Derly, João Augusto e Mara, Reinaldo e Vera, Alzira Maria, João e Lane, José Mario e Mara e José Roberto e Cristina e aos sobrinhos e sobrinhas, sempre presentes em minha vida, que com os muitos incentivos, colaboraram para mais este degrau.

Ao meu orientador Prof. Adjunto André Nunes de Souza pelos seus ensinamentos, sugestões no decorrer do desenvolvimento deste trabalho e principalmente pela paciência, que me foi de muita valia nesta época em que ocorreram muitas atribuições em minha vida.

Este trabalho foi fruto de um estudo de muitos anos junto aos colegas da CESP Companhia Energética de São Paulo, hoje CTEEP Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, que através dos Engenheiros: João Aparecido Giampietro, Antonio Carlos Passos Sartin, Sérgio Steiner Gansauskas, Sergio Henrique Rennó e Alvingdo Olívio Dutra, Horácio Denis Pedrosa Pedro, Getulio Shiguero Iwahashi (*em memória*), agradeço a todos os colegas de profissão, pela total colaboração, na árdua tarefa de desenvolver um estudo pioneiro na área de aterramento.

Aos amigos, Prof. MSc. Rogério Andrade Flauzino, Prof. MSc. Rogério Thomazella, Prof. Maurício Kenfenis, Dr. Arnaldo G. Kanashiro e o Dr. Alexandre Piantini, em cujos conhecimentos me suportei para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos do Programa de Pós-Graduação, nas pessoas do Prof. Dr. Yukio Kobayashi, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, da Djanira Maria Amaral e da Iara Lúcia Brito dos Santos Supervisora da Seção-PG, pelas valiosas dedicações que com extremo bom senso, muito me incentivaram nesta jornada.

Aos Professores e Alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Faculdade de Engenharia de Bauru, pela aceitação sem barreiras e pelo apoio sempre sincero recebido durante todos caminhos que me foram necessários percorrer para concluir os estudos e este trabalho.

Aos meus professores da graduação da FEB Faculdade de Engenharia de Bauru, enquanto Fundação Educacional de Bauru: Lauro, Edwin, Porto, Ricardo, Ivo, Razuck e Ivan, que hoje ainda permanecem na UNESP e que me apoiaram para que pudesse estar no programa e aos professores Pedro e Porto pela gentileza com que me receberam e conduziram a qualificação do trabalho.

Aos proprietários, colegas, funcionários e meus alunos da Faculdade de Engenharia Elétrica de Ipaussu SP - INTESP, pelo apoio e incentivo aos estudos.

À colega de profissão, MSc. Profa. Eng^a. Alzira Maria Sant' Anna, minha irmã, pelos constantes apoios e incentivos que muito me valeram nas horas difíceis.

A lei natural é a lei de Deus; é a única necessária à felicidade do homem; ela indica o que ele deve fazer ou não fazer e ele só se torna infeliz porque dela se afasta.

614, Livro dos Espíritos
Allan Kardec

Índice

	páginas
LISTA DE ABREVIATURAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO 1.	
INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos da dissertação	02
1.2 Motivações da dissertação	02
1.3 Organização da dissertação	03
1.4 Estudos pertinentes à dissertação	04
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE	
2.1 Revisão da literatura	07
CAPÍTULO 3. EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES	
3.1 Modelagem experimental da pesquisa sobre eletrodos de aterramento, tipo haste copperweld e tipo bloco de concreto	28
3.1.1 Elaboração e preparação experimental	29
3.1.2 Aparelhos para as medições	29
3.1.3 Medição da resistividade do solo	30
3.1.4 Haste copperweld e bloco de concreto	32
3.1.5 Medições da resistência de aterramento e da indutância	33
3.1.5.1 Medição 1 – Resistência de aterramento do bloco .	34
3.1.5.2 Medição 2 – Resistência de aterramento da haste .	34
3.1.5.3 Medição 3 – Resistência de aterramento da haste a uma distância fixa	34

3.1.5.4 Medição 4 – Resistência de aterramento e indutância	35
3.2 Simulações das tensões na MT e na BT	36
3.2.1 Surtos de tensões visto do lado da MT	37
3.2.2 Surtos de tensões visto do lado da BT	38

CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Modelagem experimental da pesquisa sobre eletrodos de aterramento tipo haste copperweld e tipo bloco de concreto	39
4.1.1 Valores da resistividade do solo	39
4.1.2 Valores da resistência de aterramento e indutância	42
4.1.2.1 Medição 1 – Resistência de aterramento do bloco de concreto	42
4.1.2.2 Medição 2 – Resistência de aterramento da haste tipo copperweld	43
4.1.2.3 Medição 3 – resistência de aterramento da haste tipo copperweld a uma distância fixa	44
4.1.2.4 Medição 4 – Indutância do bloco e da haste	45
4.2 Simulações das tensões na MT e na BT	46
4.2.1 Surtos de tensões visto do lado da MT	47
4.2.1.1 Surtos de tensões com $R_E = 12$ ohms	47
4.2.1.2 Surtos de tensões com $R_E = 22$ ohms	48
4.2.2 Surtos de tensões visto do lado da BT	49
4.2.2.1 Surtos de tensões com $R_E = 12$ ohms	49
4.2.2.2 Surtos de tensões com $R_E = 22$ ohms	50

CAPÍTULO 5 DISCUSSÕES E ANÁLISES DOS RESULTADOS

5.1 Discussões do experimento e das simulações computacionais ...	51
5.1.1 Modelagem experimental da pesquisa sobre eletrodos de aterramento, tipo copperweld e tipo bloco de concreto	51
5.1.1.1 Valores da resistividade do solo	51
5.1.1.2 Valores da resistência de aterramento e da indutância	52

5.1.2	Simulações das tensões na MT e BT	54
5.2	Análises e sugestões	54
5.2.1	Rede de distribuição de MT	55
5.2.2	Rede de distribuição de BT	59
5.2.3	Entrada de energia elétrica dos consumidores	60
5.2.3.1	Conjunto de medição sem DPS	61
5.2.3.2	Conjunto de medição com DPS	64
5.2.4	Instalações elétricas internas dos consumidores	67
5.2.4.1	Quadro de distribuição de energia sem DPSs	70
5.2.4.2	Quadro de distribuição de energia com DPSs	73
5.2.4.3	Conexão do ponto de aterramento do ETI e do seu DPS no eletrodo de aterramento	75
 CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		
6.1	Conclusões Gerais	79
6.1.1	Posto de transformação	79
6.1.2	Baixa tensão com neutro multiterrado	79
6.1.3	Instalações elétricas do consumidor	80
6.2	Futuras linhas de estudos	80
 REFERÊNCIAS		82
 GLOSSÁRIO		87
 ANEXO 1		
A1	Aterramentos e proteções dos equipamentos de comunicações .	91
A1.1	Antena para TV, Satélite, Rádio	91
A1.2	Sistema de Telefonia e outras comunicações via cabo .	93
A1.3	ETI Equipamentos de Tecnologia da Informação	93
 ANEXO 2		
	Fotografias	96

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transients Program
AWG	American Wire Gauge
BEP	Barramento de Equipotencialização Principal
BIL	Basic Insulation Level
BT	Rede de distribuição de baixa tensão classe de tensão 220/127 volts ou 380/220 volts
BWG	Birmingham Wire Gauge
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DPS	Dispositivo de Proteção de Surtos
ELETRORAS	Centrais Elétricas do Brasil S.A.
EMTP	Electromagnetic Transients Program

ETI	Equipamento de Tecnologia da Informação
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
MT	Rede de distribuição de média tensão classe de tensão 15 kV
NBI	Nível Básico de Impulso
PE	Condutor de aterramento do esquema de ligação TN-S
PEN	Condutor de aterramento e condutor neutro em um mesmo condutor no esquema de ligação TN-C
QD	Quadro de distribuição de energia elétrica
QM	Quadro de medição de energia elétrica
Rat	Resistência de aterramento
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TELEBRAS	Telecomunicações Brasileiras AS
TSI	Tensão Suportável de Impulso
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNIMAR	Universidade de Marília
USP	Universidade de São Paulo
ZnO	Óxido de Zinco

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Medição da resistividade através do método de Wenner .	30
Figura 3.2 – Posicionamentos das medições da resistividade e posicionamentos da haste e do bloco	31
Figura 3.3 – Haste tipo copperweld	32
Figura 3.4 – Desenho do aço embutido no bloco de concreto	32
Figura 3.5 – Armadura de aço para confecção do bloco de concreto .	33
Figura 3.6 – Aparelho da INSTRUM DEIM 1 K	35
Figura 3.7 – Circuito da MT e BT com diagrama do transformadorKANASHIRO (2001)	37
Figura 4.1 – Gráfico da curva da resistividade	41
Figura 4.2 – Valores das resistências de aterramento do . bloco de concreto	43
Figura 4.3 – Valores das resistências de aterramento da haste tipo copperweld	44
Figura 4.4 – Circuito da MT e BT com diagrama do transformador KANASHIRO (2001)	46
Figura 4.5 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da MT com $R_E = 12 \Omega$	47
Figura 4.6 – Representações das tensões a 150 metros do transformado do lado da MT com $R_E = 12 \Omega$	47
Figura 4.7 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da MT com $R_E = 22 \Omega$	48

Figura 4.8 – Representações das tensões a 150 metros do transformador do lado da MT com $R_E = 22 \Omega$	48
Figura 4.9 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da BT com $R_E = 12 \Omega$	49
Figura 4.10 – Representações das tensões junto à carga do lado do BT com $R_E = 12 \Omega$	49
Figura 4.11 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da BT com $R_E = 22 \Omega$	50
Figura 4.12 – Representações das tensões junto à carga do lado da BT com $R_E = 22\Omega$	50
Figura 5.1 –Posto de transformação	55
Figura 5.2 – Posto de transformação com blocos de concreto como eletrodo de aterramento e alteração da topologia do condutor de aterramento	56
Figura 5.3 – Poste de concreto como eletrodo e condutor de descida	58
Figura 5.4 – Rede de distribuição urbana com neutro multiterrado ..	59
Figura 5.5 – Diagrama da entrada de energia do consumidor	62
Figura 5.6 – Conjunto de medição de energia elétrica, no esquema TN-S sem DPSs	63
Figura 5.7 – Conjunto de medição de energia elétrica, no esquema TN-S com DPS	65
Figura 5.8 – Esquema TN-S no quadro de distribuição a partir do esquema TN-C no quadro de medição	71
Figura 5.9 – Esquema TN-S no quadro de distribuição a partir do esquema TN-S do quadro de medição	72
Figura 5.10 – Instalação de DPS em quadro de distribuição com chave seca tipo pacco sem fusíveis	73

Figura 5.11 – Instalação de DPS em quadro de distribuição com disjuntor termomagnético como chave geral	74
Figura 5.12 – Pontos de força com terceiro pino equipotencializado através do aço embutido no concreto da edificação	76
Figura 5.13 – Detalhes do ponto de força com PE conectado ao aço	77
Figura 5.14 – Aço da armadura de concreto	78
Anexo Figura 1 – Aterramento das antenas	91
Anexo Figura 2 – Colocação de DPS no condutor da antena	92

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Valores medidos no posicionamento 1	39
Tabela 4.2 – Valores medidos no posicionamento 2	39
Tabela 4.3 – Valores medidos no posicionamento 3	40
Tabela 4.4 – Valores das medições das resistências e resistência média	40
Tabela 4.5 – Cálculo das resistividades	41
Tabela 4.6 – Resistências de aterramento do bloco de concreto	42
Tabela 4.7 – Resistências de aterramento da haste tipo copperweld .	44
Tabela 4.8 - Resistência de aterramento da haste copperweld a uma distância Fixa	45
Tabela 4.9 – Valores da Rat e da indutância da haste copperweld	45
Tabela 4.10 - Valores da Rat e da indutância do bloco de concreto	45

SANT'ANA, C. J. *Estudo do desempenho de sistemas de aterramento frente às descargas atmosféricas em instalações de baixa e média tensão*. Bauru, 2005. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

RESUMO

O presente trabalho possui como linha mestra a apresentação de proposições técnicas para as instalações de baixa e média tensão na incidência de descargas atmosféricas, visando diminuir danos nos equipamentos elétricos dos consumidores.

Para a realização dessas proposições foram estudados e analisados diversos casos relacionados ao sistema de aterramento recomendados pelas normas e publicações técnicas. A diretriz metodológica adotada nesta pesquisa incorporou estudos correlatos já consolidados, experimentos e também simulações computacionais.

Os resultados obtidos foram analisados levando-se em conta a influência dos sistemas de aterramento e seus componentes, tais como: tipos de eletrodos, solo, tipo de condutor de descida e dispositivos de proteção contra surtos.

Palavras-Chave:

1. Descargas Atmosféricas. 2. Aterramento. 3. Dispositivos de Proteção contra Surtos. 4. Surto de Tensões.

SANT'ANA, C. J. *Study of grounding systems performance related to lightning in low and medium voltage systems*. Bauru, 2005. 111 p. Dissertation (Master's Degree Industrial Engineering) – University of Engineering, Campus of Bauru city, Brazil, UNESP Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

ABSTRACT

The master line of this present study consists of the presentation of technical propositions related to low and medium tension installations in the incidence lightning, aiming to decrease damages on consumer's electrical equipment.

For the accomplishment of those propositions, several cases related to the earthing systems recommended standards and publications have been studied and analyzed. The methodological directive adopted in the present research has been incorporated already consolidated correlate studies consolidated, experiments, as well as digital simulations.

The results obtained have been analyzed taking into account the influence of the earthing systems and their components, such as: electrodes, soil, descending conductors and protection devices.

Palavras-Chave:

1. Lightning.
2. Grounding.
3. Protection lightning.
4. Outbreak Voltage.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de formação das descargas atmosféricas ainda não está bem consolidado no meio científico, porém os estudos dos parâmetros das descargas, principalmente as que se dirigem ao solo estão muito avançados. Muitas pesquisas publicadas nessa área mostram as magnitudes das correntes elétricas que assolam tanto as redes de energia elétrica, como as propriedades, animais, pessoas, etc. Não há como evitar que as descargas atmosféricas atinjam um determinado local, também nem sempre se consegue que as descargas atmosféricas sejam desviadas para uma determinada estrutura, que pode ser o pára-raios, em vista disso, elas podem atingir direta ou indiretamente as redes de energia elétrica, provocando os surtos de tensões que se propagam nos condutores até atingirem as instalações elétricas dos consumidores, danificando os equipamentos elétricos e causando acidentes com as pessoas.

Para que um sistema de distribuição de energia elétrica de MT e BT, possa atender corretamente e com qualidade os consumidores, os surtos de tensões devidos às descargas atmosféricas diretas e indiretas, devem ter suas correntes drenadas para os sistemas de eletrodos de aterramento do posto de transformação, para os sistemas de eletrodos de terra da BT com neutro multiterrado e para os sistemas de eletrodos de aterramento das instalações elétricas dos consumidores, utilizando para isso os pára-raios de linha da MT, o neutro multiterrado da BT e os DPS das instalações elétricas dos consumidores.

Em relação aos surtos incidentes, direta ou indiretamente na MT, nem toda a corrente é escoada pelos pára-raios para o sistema de eletrodos de aterramento, uma parte dela flui através do transformador para a rede de baixa tensão, são as tensões residuais transferidas, indicadas nos catálogos dos

pára-raios pelos fabricantes. Essa transferência normalmente danifica o transformador e ocasiona interrupções de energia elétrica, caso ultrapasse o NBI do transformador. O neutro da BT, conectado no mesmo ponto de terra dos pára-raios de linha, tem seu potencial elevado devido aos surtos que os pára-raios desviam para o eletrodo de aterramento. Essa elevação de potencial se estende também aos sistemas de eletrodos de terra dos consumidores, principalmente os que estão ao redor do posto de transformação.

As elevações de potenciais e as transferências de surtos da MT para a BT, além de danificarem os transformadores da concessionária, danificam também os equipamentos elétricos instalados nas propriedades dos consumidores. Esses custos, somados aos das interrupções de energia elétrica, acarretam altas indenizações a serem pagas aos consumidores, indenizações essas de responsabilidade das Concessionárias de Energia Elétrica e das Companhias de Seguros. Muitas vezes os custos das interrupções são pagos pelos consumidores, custos esses decorrentes da falta de energia elétrica, devido aos surtos de tensões, que provocam danos nos equipamentos, porém eles só serão verificados muito tempo após a causa. Isso impossibilita a cobrança dos custos de manutenção ou substituição dos equipamentos, das Concessionárias e das Companhias de Seguro.

1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é apresentar um estudo do desempenho dos sistemas de aterramento, frente às descargas atmosféricas, em instalações elétricas de MT e BT, propondo soluções técnicas que propiciem diminuir os danos nos equipamentos elétricos dos consumidores.

1.2 MOTIVAÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Todos os anos muitos consumidores vêm seus equipamentos elétricos serem danificados pelos surtos de tensões, provocados pelas descargas atmosféricas.

As concessionárias de energia elétrica além de arcarem com os custos da reforma ou troca dos equipamentos danificados dos consumidores, também arcam com o ônus da substituição e reforma dos muitos transformadores danificados pelos surtos de tensões que se originam das descargas atmosféricas.

Estes estudos foram direcionados no sentido de se obter um eficiente sistema de eletrodos de aterramento nos postos de transformação, nos pontos de aterramento do neutro da BT, neutro multiaterrado e em se obter um eficiente sistema de proteção e de eletrodos de aterramento junto às instalações elétricas dos consumidores.

As contribuições de ordem prática deste autor foram advindas do longo período de estudos que ocorreram durante a vida profissional, como técnico da CPFL, como engenheiro autônomo e como engenheiro da CESP, que após a privatização de parte da empresa, a área de transmissão de energia elétrica transformou-se na CTEEP. Esses estudos propiciaram propor alterações na área de proteção e aterramento das instalações elétricas dos consumidores, frente aos surtos de tensões, ocasionados pelas descargas atmosféricas. Durante esses períodos de estudos, a possibilidade de utilização do aço existente no concreto das fundações dos edifícios e no poste de concreto de sustentação das redes de MT e BT, como captor, condutor e eletrodo de terra, foi se tornando uma realidade, motivando dessa forma o fortalecimento do estudo, onde os eletrodos de aterramento são o aço e o concreto.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2, denominado de Estado da Arte, estão relacionadas as obras bibliográficas necessárias para o estudo científico retrospectivo. As diretrizes metodológicas que nortearam as experiências com o bloco de concreto e a haste tipo copperweld e também as simulações utilizando o ATP, encontram-se no Capítulo 3. São apresentados no Capítulo 4 os resultados das experiências e simulações. As discussões sobre os resultados do Capítulo 4 e as Análises estão apresentadas no Capítulo 5. Finalmente as conclusões

pertinentes ao desenvolvimento da dissertação e propostas para trabalhos futuros, são apresentadas no Capítulo 6. Os custos do experimento prático foram financiados pelo autor da dissertação.

1.4 ESTUDOS PERTINENTES À DISSERTAÇÃO

A compilação durante anos, dos estudos relacionados a esta dissertação, proporcionou a publicação de muitos trabalhos, dentre o quais estão estes 14 títulos de artigos completos e um manual de aterramento de ETI:

SANT' ANNA, C. J., SOUZA, A. N., SANT' ANNA, A. M e SANT' ANNA, P. C. The Use of Steel Built into Concrete Blocks, Pole (Stake) Like, as a Rod for the Dissipation of Lightning. Accepted **works** in: VIII SIPDA International Symposium of Lightning Protection. 21st to 25th November 2005. São Paulo: IEE/USP, 2005.

SANT' ANNA, C. J., SOUZA, A. N. e SANT' ANNA, P. C. The Use of Steel Built into Concrete Blocks, Pole (Stake) Like, as a Rod for the Dissipation of Lightning. Accepted **works** in: Third International Symposium on Power Quality SICEL 2005. 16th November to 18th November of 2005. Santa Fé de Bogotá, Colômbia: UNC/ACIEM. 2005

SARTIN, A. C. P. e SANT' ANNA, C. J. Aterramento nas estações de telecomunicações de uma empresa de energia. **rti Redes, Telecom e Instalações**, São Paulo, ano IV, n. 45, p. 42-49, fev. 2004.

SANT' ANNA, C. J. TOSATO I. N. e SANT' ANNA, A. M. A proposal of grounding of the RF cable shielding and radio-antenna grounding in a telecommunication site. In: VII SIPDA International Symposium of Lightning Protection, 11, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IEE/USP, 2003. p. 57-61.

SANT' ANNA, C. J. e SANT' ANNA, A. M. Utilization of the steel structure of the buildings as a part of the grounding system. In: VII SIPDA International Symposium of Lightning Protection, 11, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IEE/USP, 2003. p. 191-195.

SANT' ANNA, C. J., SANT' ANNA, A. M., SOUZA, A. N., THOMAZELLA, R. The low impedance of the grounding system when the steel in the concrete of the buildings' foundations is used and the tension outbreak is provoked by atmospheric discharges close to transformers. In: VII SIPDA International Symposium of Lightning Protection, 11, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: IEE/USP, 2003. p. 202-206.

SARTIN, A. C. P. e SANT' ANNA, C. J. Como evitar interferências eletromagnéticas em usinas e subestações. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, ano XXXI, n. 348, p 192-197, março 2003.

SANT' ANNA, C. J. Aterramento de equipamentos de telecomunicações utilizando o aço das fundações. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, ano XXXI, n. 348, p 50-65, março 2003.

SANT' ANNA et al, Telecommunication Station grounding system installed inside of command building of the 440 kV substation of Ribeirão Preto. In: Ground'2002 International Conference on Grounding and Earthing and 3RD Wae Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, 11, 2002, Rio de Janeiro RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, LRC/ELAT UFMG/CEMIG, 2002, p 363-368.

SANT' ANNA, C. J. et al. **Manual de Aterramento e Proteção dos Equipamentos de Tecnologia da Informação**: manual de orientação. São Paulo: CTEEP Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, 2001. 86 p. (Série Informação e Divulgação, 011).

SANT' ANNA, C. J. e SARTIN, A. C. P. Aterramento e proteção de equipamentos de telecomunicações. In: SICEL'2001 Simposio Intenacional sobre Calidad de la Energia da Colômbia, 12, 2001, Santa Fé de Bogotá. **Anais CD...** Santa Fé de Bogotá, Universidad Nacional de Colômbia, ACIEM e ICONTEC, CD, 2001.

SANT' ANNA, C. J. e SANT' ANNA, A. M. Como utilizar as teorias disponíveis na proteção e aterramento de ETI Equipamentos de Tecnologia da Informação. No: 8º ENIE Encontro Nacional de Instalações Elétricas, 08, 2001, São Paulo. **Anais** ... São Paulo, Eletricidade Moderna e rti Redes, Telecom e Instalações, CD, 2001.

SANT' ANNA, C. J. A practical case of lightning protection for sensitive electronic equipment. In: Ground'2000 International Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, UFMG, LATER, SB-RAI, DELT, p. 195-198, 2000.

SANT' ANNA, C. J, SOUZA, L. F. e FEITEIRA, J. R. An experience on grounding design for plants including electric, electronic and communication systems. In: Ground'2000 International Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, UFMG, LATER, SB-RAI, DELT, p. 153-157, 2000.

SARTIN, A. C. P. e SANT' ANNA, C. J. Sistema de proteção de equipamentos de tecnologia da informação. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, ano XXVII, n. 303, p 64-73, junho 1999.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 REVISÃO DA LITERATURA

Publicou **Leon** em seu livro, que o valor de resistividade em ohm x metro era numericamente igual a uma resistência de um cubo de 1 metro de aresta. O valor da resistividade do solo é influenciado pelo tipo do solo, pela sua composição, temperatura, capacidade de retenção de água e variações sazonais. O solo é um elemento totalmente heterogêneo, de modo que seu valor de resistividade varia de uma direção à outra, conforme o material de que é composto, segundo a profundidade de suas camadas e a idade de sua formação geológica. Uma propriedade importante da terra é a capacidade de retenção da umidade, influenciada por sua vez, pela porosidade do terreno, esta capacidade permite que, durante a passagem de altas correntes, o aquecimento resultante não provoque uma evaporação tão rápida, não perdendo assim a terra, sua propriedade principal que é de dispersora de correntes, sem elevar os potenciais além dos níveis permissíveis. Quando o condutor atinge 100°C, a água ao seu redor se evapora e a resistividade tende a aumentar. Por isso, a seção dos condutores e eletrodos deve ser tal que não aumente a temperatura acima de 100°C durante um intervalo de tempo maior que o da duração da falta, pois o aquecimento e conseqüente evaporação, ainda gastam para eliminar seus efeitos, pelo menos o dobro do tempo de duração da falta (inércia térmica). (LEON,1982)

CIPOLI, no seu livro sobre distribuição de energia elétrica, mostra que as sobretensões devido às descargas atmosféricas são as causas dos inúmeros desligamentos que ocorrem nos sistemas elétricos, sejam eles de transmissão

ou distribuição. Mostra também que são pequenas as probabilidades das descargas incidirem diretamente na linha de distribuição e conseqüentemente nos pára-raios, o que os deixaria sujeitos a elevadas correntes, não compatíveis com a sua construção. Normalmente, os pára-raios são expostos a correntes de surto bem menores que as inseridas devido às descargas diretas, isso porque uma parte dessa corrente é atenuada pelas disrupções do tipo flashovers nos isoladores, outra parte é distribuída no condutor, metade para cada lado da linha e outra parte é devido às atenuações do chamado fenômeno da pré-descarga. (CIPOLI, 1993)

Mostra **MAMEDE** em seu livro que, quando uma descarga atmosférica atinge diretamente uma rede aérea, ou qualquer ponto nas proximidades, surge duas ondas de tensão de impulso denominadas ondas transientes, que caminham em sentidos opostos. O valor de crista dessas ondas de tensão está limitado a TSI da rede. Ondas com valor de crista superior à TSI do sistema, provocam descargas nos primeiros isoladores de sua trajetória, resultando na limitação da onda à tensão suportável de impulso da rede. Estas ondas transientes, mesmo amortecidas pela impedância característica da rede ou impedância de surto, atingem os equipamentos, notadamente os transformadores. Uma onda transiente é definida pelo tempo decorrido para que a onda assuma seu valor de crista e pelo tempo para que a tensão na cauda adquira metade do valor da tensão de crista. Assim uma onda normalizada de 1,2/50 μ s, significa que a tensão de crista ocorre após decorridos 1,2 μ s e a tensão média relativa à cauda se dá para um tempo igual a 50 μ s. As ondas transientes de impulso atmosférico apresentam uma velocidade de propagação nas linhas de energia elétrica com cabos nus, da ordem de 300 m/ μ s e em cabos isolados, cerca de 150 m/ μ s. As correntes correspondentes às tensões de impulso atmosférico são limitadas pela impedância característica de surto do sistema. Quando essas correntes não atingem diretamente a linha de energia elétrica, a onda transiente de corrente é aproximadamente dez vezes menor, que o correspondente valor alcançado pela descarga atmosférica direta, pois a parcela maior dessa corrente é conduzida para a terra, restando somente uma onda de tensão induzida na linha. (MAMEDE 1994)

PAULINO em sua tese de doutorado mostra que em 1957 foi apresentada por Sune Rusck uma teoria para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas. Mostra também que ao longo dos anos, vários questionamentos foram apresentados a esta teoria e várias outras teorias, algumas derivadas da teoria de Rusck e outras independentes foram propostas, várias dissertações de mestrado analisaram muitas dessas teorias propostas e concluíram que a teoria mais completa e consistente é a proposta por Sune Rusck. Existem dificuldades para se validar completamente a teoria de Rusck para o cálculo de tensões induzidas, pois faltam dados experimentais. Desde 1978 na África do Sul, utilizando uma linha de distribuição, vários pesquisadores estão trabalhando no estudo dos dados compilados. Um dos pesquisadores mais atuantes nessa área de estudos é o Prof. S Yokoyama, que propôs uma metodologia capaz de calcular tensões induzidas em redes com cabos aterrados e com pára-raios. Paulino (1994) mostra no seu trabalho de doutorado que as afirmações do Prof. Yodoyama sobre a não validade dos dados pesquisados por Rusck, referente a tensões induzidas, não está bem fundamentada e cita outro pesquisador que coordena o projeto de pesquisas da África do Sul, Eng. Hendi Geldenhuys, que afirma existir muita controvérsia sobre o efeito dos cabos guardas frente às tensões induzidas, porém ele estudou esses efeitos com várias configurações e acredita nas pesquisas de Rusck. O autor no seu trabalho de doutorado discorre sobre a Teoria de Rusck, os principais questionamentos e apresenta que a principal vantagem é o fato de a Teoria de Rusck, fornecer uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida. O fato da Teoria de Rusck fornecer uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida, em qualquer ponto da linha, permite um processo rápido sendo apenas necessário calcular a tensão nos pontos de interesse. (PAULINO, 1994)

KINDERMANN e **CAMPAGNOLO** definem que a resistividade do solo é influenciada por vários fatores: tipo de solo, mistura de diversos tipos de solo, solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes, teor de umidade, temperatura, compactação e pressão, composição química dos sais dissolvidos na água retida e concentração de sais dissolvidos na água retida. As diversas combinações acima resultam em solos com características diferentes e conseqüentemente, com valores de resistividade

distintos. Assim, solos aparentemente iguais, têm resistividade diferente. Os solos, na sua grande maioria, não são homogêneos, mas formados por várias camadas diferentes. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995)

LEITE e PEREIRA FILHO mostra a vantagem da utilização do aço existente no concreto, mostrando como o concreto é alcalino e higroscópico, quando enterrado e que apresenta uma baixa resistividade, estando ela na faixa de 30 a 100 ohms x metro. Mostram também que o uso da armadura de aço embutida no concreto, é estável, grátis, não aparente e ao conduzir uma carga impulsiva, como a da descarga atmosférica, a ferragem do concreto pouco se aquece. Podem ocorrer problemas quando o aterramento se destina ao sistema elétrico na frequência de 60 Hz, onde a corrente permanece até que o mecanismo de proteção consiga atuar. Porém mostram que existem medições e tabelas que o profissional pode recorrer para verificar se a quantidade de ferro existente atende as correntes de curto-circuito na frequência de 60 Hz. (LEITE e PEREIRA FILHO, 1995)

A TELEBRAS publicou uma norma para o sistema de telecomunicações, denominado Manual PROTEL. Para esta dissertação foi utilizada uma cópia do **MANUAL PROTEL NA TELESP**. Devido existirem ocorrências de danos de origem elétrica na rede externa de telecomunicações, se fazia necessário desenvolver estudos para utilização do poste de concreto em uso mutuo com a rede elétrica. Um dos itens em que o grupo de estudos atuou foi o cabo mensageiro, que antes era sustentado no poste por presilha metálica. A partir dos estudos do grupo que desenvolveu o manual PROTEL (1995), passou-se a instalar um isolador de louça ou porcelana, tipo roldana 76 x 79 mm, isolado para 500 volts, como suporte do cabo mensageiro. O desenvolvimento teórico mostra que as correntes de surtos e as correntes devido às faltas, utilizam os postes de concreto como caminho para o solo. Essa ação foi necessária para aumentar o NBI das redes externas de telecomunicações. (MANUAL PROTEL, 1995)

SEKIOKA et al, desenvolveram um estudo experimental para conhecer as características do poste de concreto como: a resistência de aterramento e a impedância, utilizando uma fonte de Corrente de Impulso. O experimento utilizou

um poste de concreto, onde os aços de construção do interior do poste estão todos interligados. Na conclusão eles afirmam que a impedância do poste de concreto está por volta de 200 Ω e que a onda de tensão aplicada no poste, viaja na velocidade da luz. A resistência de aterramento do poste de concreto é mais alta para baixas correntes e vai reduzindo conforme se vai aumentando a corrente. Para baixas correntes a impedância do poste de concreto é mais capacitiva e para altas correntes passa a ser mais indutiva. (SEKIOKA et al, 1995)

ALMEIDA e CORREIA de BARROS relacionaram a ionização do solo ao redor do eletrodo de aterramento com a diminuição dos valores de resistência de terra dos eletrodos, quando estes são submetidos a elevados valores de correntes, tais como as ocasionadas pelas descargas atmosféricas. Mostram a teoria do Eletrodo de Geometria Variável, onde um eletrodo imerso em um solo ionizado, se equivale a um eletrodo de maiores dimensões colocado em um solo não ionizado, mantendo-se constante a resistividade do solo, obtendo-se uma diminuição da resistência de terra, à custa de um aumento da seção transversal do eletrodo. O modelo empírico do IEEE/CIGRÉ, também relaciona a ionização do solo e a geometria do eletrodo de aterramento. O modelo que considera a Resistividade do Solo Variável, da qual Liew, A. C. e Darveniza, M. foram os precursores, mostra que a diminuição da resistência de terra próxima ao eletrodo, está associada ao decréscimo da resistividade do solo na região ionizada, considerando-se um solo homogêneo. Essas teorias explicam como as descargas atmosféricas se encaminham a um terminado sistema de eletrodos de aterramento. As curvas da tensão no topo do poste, provenientes das descargas atmosféricas, são praticamente insensíveis ao comprimento do eletrodo. Os autores, simulando uma linha de transmissão, utilizando o ATP, obtiveram dados que ressaltam que o comprimento do eletrodo vertical, no cálculo da resistência de terra, pouco influencia, principalmente para as descargas atmosféricas. Evidenciam também a necessidade de contemplar o efeito da dinâmica dos fenômenos de ionização do solo face às descargas atmosféricas. O valor de pico atingido pela tensão no topo do poste está diretamente relacionado com a taxa de crescimento da corrente de descarga, sendo tanto maior quanto maior for a taxa de crescimento da corrente. Esse valor está entre 0,5 a 1,5 MV. (ALMEIDA e CORREIA de BARROS, 1996)

CORREIA de BARROS, em sua apostila do curso de subestações, descreve que um eletrodo de aterramento pode ser representado por uma resistência de terra não linear, R_1 , de forma a contemplar a diminuição da resistência de terra observada para correntes de elevada intensidade, a qual é devida à ionização do solo provocada por tais correntes. O eletrodo pode ser representado, devido a sua não linearidade através da relação empírica, de acordo com a equação 2.1:

$$R_1 = R_0 \times \left(1 + \frac{1}{I_g} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Quando R_0 é o valor da resistência do eletrodo para baixos valores da corrente I_g , ambos para solo não ionizado, calcula-se R_0 pela equação 2.2:

$$R_0 = \frac{?}{2pL} \times \left[\ln \left(\frac{4L}{r_0} \right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Sendo r_0 o raio de cada eletrodo em metros, "L" o seu comprimento em metros, e r a resistividade em Ωm . Conforme as aproximações possíveis, a corrente I_g em kA é de acordo com a equação 2.3:

$$I_g = \frac{rE_g}{2pR_0^2} \quad (2.3)$$

Em que E_g representa o campo elétrico limiar da ionização do solo e é considerado igual a 400 kV/m. (CORREIA de BARROS, 1997)

DARVENIZA, mostra a vantagem em se utilizar a blindagem da linha de distribuição através do cabo guarda. Mostrou também dados comparativos da

mesma linha, provando que com o uso da blindagem, recuou para praticamente zero o número de interrupções daquela linha. Para provar então a vantagem de se utilizar o cabo guarda, utiliza a equação 2.4, de cálculo da incidência de descargas na linha com o fator de blindagem, sendo este um redutor do número de incidências:

$$N_1 = 0,1N_g (b + 28h_t^{0,6}) \times (1 - S_f) \quad (2.4)$$

Onde:

- N_1 é o número de incidências de descargas atmosféricas na linha $T_d/100\text{km/ano}$; (T_d = nível de trovoadas por ano)
- N_g é a densidade de descargas para a terra: descargas/ km^2/ano ;
- h_t é altura da linha em metros; e
- S_f é o fator de blindagem, definido por um número que está entre 0,4 e 0,8.

Na apresentação do seu trabalho, Darveniza (1997) mostrou algumas linhas de distribuição em que os problemas de desligamento devido às descargas atmosféricas, só foram resolvidos, após a instalação da blindagem, através de cabo guarda.(DARVENIZA, 1997)

LACERDA apresentou um método de cálculo do efeito "skin" ou pelicular em condutores cilíndricos, fitas metálicas e tubos, percorridos por corrente alternada. Suas conclusões reafirmam que fitas metálicas ou condutores retangulares apresentam resistência efetiva, dez vezes menor que os condutores cilíndricos de mesma seção transversal, para frequências da ordem de 1 kHz, e que essa diferença aumenta com o aumento da frequência. (LACERDA, 1997)

MAMEDE em seu livro mostra que os varistores são resistências não lineares dependentes da tensão, com características logarítmicas definidas de tensão x corrente. A elevação da tensão reduz a resistência e conseqüentemente, aumenta a corrente. A tensão no varistor é um dos seus parâmetros mais importantes. Corresponde à tensão entre os seus terminais capaz de fazer fluir uma corrente de fuga de valor predefinido. A tensão do

varistor é caracterizada por uma faixa de tensão com valores máximos e mínimos. Ao se definir a tensão máxima do varistor, que caracteriza a sua tensão nominal, define-se a chamada tensão do varistor. Dois são os materiais conhecidos que atendem às características não lineares necessárias para as funções de supressão de surtos de tensão nos sistemas elétricos: o carboneto de silício e o óxido de zinco. O coeficiente de linearidade expressa a quantidade de variação da resistência do varistor em função da tensão aplicada em seus terminais. A vida útil de um varistor é em função da quantidade de surtos de tensão aos quais poderá ficar submetido e da energia agregada correspondente. A máxima dissipação de energia que um varistor pode suportar está associada à tensão nominal do mesmo, bem com as suas características físicas. Uma característica importante dos varistores reside na redução da sua vida útil em função do número de descargas que conduzir ao longo do tempo. Para que um varistor se mantenha dentro dos limites de tempo de sua vida útil esperada, ele pode receber no máximo 7 surtos de tensão com valor de crista 35% de I_p que é o valor máximo da corrente de pico suportável, ou 100 surtos de tensão com valor de crista 7% de I_p , ou 1000 surtos de tensão com valor de crista 5% de I_p . (MAMEDE, 1997)

Segundo **PIANTINI** e **JANISZEWSKI**, o emprego de pára-raios ao longo das linhas de distribuição de energia elétrica de média tensão é uma das alternativas de proteção contra as descargas atmosféricas indiretas. Os autores desenvolveram um modelo em escala reduzida, que facilita a obtenção de dados experimentais, controlados, visando o estudo de surtos induzidos nas redes aéreas de distribuição de média tensão, devido às descargas atmosféricas nas proximidades, descargas indiretas. Através do modelo desenvolvido, conseguiu-se pela primeira vez, dados em quantidade significativa e controlados, possibilitando uma avaliação do efeito dos pára-raios inseridos nas redes de distribuição. Houve a validação dos métodos existentes para cálculo das tensões induzidas em rede protegidas por pára-raios. (PIANTINI e JANISZEWSKI, 1997).

Os engenheiros e técnicos da CESP, através do **PROQUIP** Programa de Qualificação de Materiais e Equipamentos, realizaram estudos sobre o

desempenho dos pára-raios de distribuição classe 15 kV. Através dos ensaios realizados em pára-raios retirados dos sistemas de distribuição, foi comprovada a ocorrência de alterações significativas no desempenho ao longo do tempo, comprometendo a confiabilidade dos sistemas. Foram avaliados os pára-raios novos, através de amostras retiradas de lotes de produção dos fabricantes, onde verificaram a uniformidade de produção e o atendimento às normas técnicas de construção. Através desses resultados foi demonstrado que determinados pára-raios podem satisfazer todos os requisitos normativos, mas os fabricantes devem manter a uniformidade no processo de produção e aquisição dos componentes, porém para ensaio de corrente elevada, os pára-raios disponíveis no mercado não apresentam resultados satisfatórios. (PROQUIP, 1997).

O grupo de trabalho número cinco do **CIRED/CIGRE**, apresentou um trabalho sobre a proteção dos transformadores, onde foram utilizados pára-raios de linha a base de óxido de zinco e um dimensionamento correto do comprimento dos cabos de ligação do transformador às linhas de média e baixa tensão, onde o grupo mostrou que se pode reduzir consideravelmente a amplitude e a rampa de sobretensão induzida, desde que se utilizem os parâmetros corretos. O grupo então classificou as sobretensões atmosféricas nas redes de MT e BT em duas categorias:

- Sobretensões por descargas diretas: por causa dos níveis de isolamento relativamente baixos das redes de MT e BT, uma descarga no condutor fase, no neutro ou na estrutura de suporte, gera disrupções do isolamento na linha. A sobretensão no condutor é pouco influenciada pelo ponto de impacto.
- Sobretensões por descargas indiretas, tensões induzidas: descargas indiretas a terra ou às estruturas próximas, induzem sobretensões na rede que podem ser maiores que os níveis de isolamento. Diferentemente do caso das descargas diretas, aqui a presença de condutores neutros e cabos suspensos entre outros componentes, pode influenciar a sobretensão induzida.

O grupo avaliou também as amplitudes e formas das sobretensões por descargas diretas. Uma descarga atmosférica direta num condutor fase injeta

ondas de corrente em ambas as direções. A tensão correspondente é igual à metade da corrente, multiplicada pela impedância característica, que é da ordem de 400 Ω. Como mais de 90% das descargas atmosféricas apresentam corrente de pico de pelo menos 10 kA, nesses casos a sobretensão ultrapassará 2000 kV. Essas tensões têm um valor muito acima do nível de isolamento a impulso atmosférico da linha NBI. Nas linhas aéreas de BT a amplitude das sobretensões por descargas diretas é menor, bem como a probabilidade de descargas atmosféricas diretas. Apesar da amplitude reduzida das sobretensões em BT, elas são maiores que o NBI dos aparelhos a elas ligados, poucos kV para eletrodomésticos, de modo que muitas disrupções perigosas ocorrem nos aparelhos conectados à linha, com isso reduzindo muito a impedância de aterramento e a amplitude das sobretensões. Outro índice interessante e muito utilizado pelas concessionárias é o Número Esperado de Descargas Diretas N_d a cada ano por 100 km, para uma linha de distribuição em terreno plano que pode ser avaliado pela equação 2.5:

$$N_d = K_o \times N_g \times \left(b + 10,5H^{0,75} \right) \times \frac{1}{10} \quad (2.5)$$

onde:

N_g = densidade de raios na região (número de raios por km² por ano);

H = altura média da linha, em metros;

b = distância horizontal entre os condutores das extremidades, em metros; e

K_o = coeficiente orográfico. Quando o coeficiente orográfico não é conhecido, adota-se para K_o o valor de 1,8 sugerido pelo grupo de estudos do CIRED/CIGRÉ (1998).

O índice Blindagem por Objetos Próximos devido a árvores, prédios, outras redes de distribuição, etc., pode ser muito eficiente na redução da incidência de descargas diretas, porém pode aumentar a incidência de sobretensões induzidas. O grupo considerou o efeito da Blindagem dos Objetos próximos apenas sob o ponto de vista do número de descargas diretas. O efeito da blindagem é representado pelo fator S_i , que permite avaliar o número de

descargas diretas em uma linha blindada. Através da equação 2.6, obtém-se o valor de N_d^S .

$$N_d^S = N_d \times (1 - S_f) \quad (2.6)$$

Onde:

N_d^S = é o número esperado de descargas diretas; e

S_f = varia entre 0 e 1. Onde 1 corresponde a uma blindagem perfeita. Geralmente o efeito de um único objeto sobre o desempenho em relação às descargas na linha pode ser desprezado. Esse índice se torna importante em caso de muita arborização e muitos edifícios.

O grupo apresenta um meio de se determinar a distância mínima para raios indiretos D , para qual um raio atinge o solo, ao invés da linha, esse cálculo depende principalmente da altura H da linha e da amplitude da corrente da descarga atmosférica I . Quanto mais alta a linha e a corrente, maior a distância de interceptação lateral máxima D da linha. Para objetivos práticos e para alturas médias entre 5 e 15 metros, as relações entre D , H e I , podem ser aproximadas. Utilizando-se a equação 2.7, calcula-se a distância D :

$$D = H + 0,27 \times H^{0,6} \times I^{0,8} \quad (2.7)$$

onde, D e H estão em metros e I em kA

Se a distância entre a linha e o ponto de impacto das descargas atmosféricas for conforme a equação 2.8, então existe a possibilidade das descargas atmosféricas atingirem a linha:

$$D < H + 0,27 \times H^{0,6} \times I^{0,8} \quad (2.8)$$

(CIRED/CIGRE, 1998)

OSPINA utiliza informações da geologia para mostrar como se processa a condução da corrente na maioria dos solos da superfície terrestre. Mostra que essa condução é quase sempre eletrolítica e que os íons pelos quais se conduz a corrente elétrica resultam da dissociação dos sais em água. Cada íon é capaz de transportar somente uma quantidade definida de carga e com o aumento do número de íons obviamente aumentará a carga transportada. Define então que a condutividade elétrica do solo se processa pelo movimento de uma carga elétrica de um lugar para outro e que os corpos eletricamente condutores no solo permitem esse movimento. (OSPINA, 1998)

Em seu livro **VISÁCRO FILHO**, professor da UFMG, define alguns parâmetros que influenciam no valor da resistividade do solo como:

- tipo do solo: os solos não são claramente definidos na natureza, e por isso não é possível atribuir um valor específico de resistividade a um tipo de solo, pois a experiência mostra que, usualmente, são encontrados valores diferentes de resistividade para a mesma variedade de solo em localidades distintas;
- umidade do solo: tem efeito na resistividade do solo, pois a condução do solo se faz basicamente por mecanismos eletrolíticos e para que a eletrólise se estabeleça é essencial a existência de água e dos sais no solo, que irão prover os íons da mistura, assim, com o aumento da umidade do solo, teremos uma diminuição da sua resistividade;
- concentração e tipos de sais dissolvidos na água: sendo a resistividade de um solo dependente da quantidade de água retida neste e conhecendo-se o fato de que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos nessa solução eletrolítica, conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo;
- compactidade do solo: um solo mais compacto apresenta uma maior continuidade física, o que proporciona um menor valor de resistividade;
- granulometria do solo: a presença de grãos de diversos tamanhos contribui para uma baixa ou alta resistividade, pois haverá menor ou maior capacidade de retenção de água nas camadas do solo dependente da granulometria e da continuidade física do solo, uma granulometria maior tende

a aumentar a resistividade, pois teremos menor capacidade de retenção de água no solo;

- temperatura do solo: exerce grande influência na resistividade, a temperatura do solo, pois uma temperatura elevada provoca maior evaporação, diminuindo a umidade do solo, então com baixas temperaturas a resistividade do solo diminui, porém com solo a 0°C e abaixo, temos também o aumento da resistividade do solo, isto é, o gelo não é bom condutor; e
- estrutura geológica: a composição do solo é geralmente estratificada em várias camadas de formação diferente e com diferentes resistividades.

O autor então desenvolveu um método computacional que inclui todos os efeitos relativos ao solo e que gerou dois resultados principais:

- a impedância do aterramento vista do ponto de injeção da corrente; e
- a distribuição de potenciais na superfície do solo e nos eletrodos.

Quanto ao valor da impedância, Visacro Filho (1998), mostra que o principal fator que influencia na diminuição do valor de impedância de aterramento é a extensão da área coberta pelos eletrodos do sistema de aterramento. Para fenômenos rápidos, a atenuação do campo eletromagnético ao longo da extensão dos eletrodos torna o aumento dessa área, além de determinada extensão, não efetivo para fins de redução da impedância de aterramento, pode-se observar isso, através do conceito de comprimento efetivo do aterramento. No caso, a ação deve ser concentrada na região próxima do ponto de injeção de corrente, com o objetivo de se aumentar as correntes de condução e capacitiva nessa região. No caso de pontos específicos de injeção de corrente, proveniente das descargas atmosféricas, é importante promover o aumento da densidade de condutores na região do solo próxima a tais pontos de conexão. (VISÁCRO FILHO, 1998)

BASSI mostra em sua dissertação de mestrado que os maiores valores de corrente e energia acontece dentro do trecho da rede de distribuição de BT, devido às descargas atmosféricas. Ressalta que a colocação de DPS nos terminais secundários do transformador, provê proteção a ele próprio, sem trazer

melhoria sensível para as reduções das sobretensões nas instalações dos consumidores ao longo da rede. Ressalta também que a instalação de DPS nas extremidades do circuito de BT, provoca diminuição sensível nos valores de sobretensões e que a redução das sobretensões a valores seguros em equipamentos junto à entrada das instalações dos consumidores, medidores de energia, somente é alcançada com a instalação de DPS em todas as instalações. Mesmo com a injeção de correntes, simulando as descargas atmosféricas, diretamente na rede secundária, obtiveram-se valores de corrente e energia elevados nos pára-raios localizados junto do ponto de injeção da descarga e valores bastante reduzidos nos demais pontos.(BASSI, 1999)

PEREIRA mostra alguns aspectos relacionados com a modelagem de pára-raios de ZnO (óxido de zinco), para o ATP, nos estudos de sobretensões de manobra e na determinação da energia absorvida, os quais são necessários para a correta especificação do pára-raios. As características não-lineares dos pára-raios de ZnO fornecidas pelos fabricantes, geralmente apresentam curvas de tensão residual para diferentes tipos de correntes de condução, caracterizando sobretensões de manobra, sobretensões atmosféricas e sobretensões de manobra de longa duração. Essas curvas geralmente apresentam uma faixa de variação, inerentes ao processo de fabricação do óxido metálico usado para a confecção dos blocos de ZnO. Os pára-raios de ZnO são dispositivos de proteção contra sobretensões transitórias, são utilizados desde a década de 70 e não utilizam centelhador em série como os pára-raios de SiC, carbureto de silício. A determinação da capacidade de absorção de energia, implica na utilização do correto número de colunas em paralelo, no modelo de pára-raios com ZnO para o ATP. Para essa finalidade é necessário conhecer a capacidade de absorção de energia de cada coluna e a variação possível da corrente entre as colunas paralelas. (PEREIRA, 1999)

A **CPFL** publicou uma instrução para seus engenheiros e técnicos, onde mostra como são os tipos de sistemas de eletrodos de aterramento em várias circunstâncias no seu sistema de MT. Em sistema de neutro multiaterrado, é utilizado apenas uma haste terra, de aço galvanizado, comprimento 2,40 metros, perfil L em cada ponto de aterramento. (CPFL, 2000)

VASCONCELOS em sua tese de doutorado mostra que as propriedades elétricas dos varistores dependem basicamente da microestrutura e dos processos que ocorrem nos contornos de grãos do semicondutor matriz, bem como de sua condutividade elétrica. O ZnO satisfaz essas qualidades e vem sendo utilizado comercialmente como o componente básico para formação do varistor. O varistor é o componente básico dos DPS. (VASCONCELOS, 2000)

KANASHIRO mostra que as sobretensões devido às descargas atmosféricas estão entre as principais causas dos desligamentos em linhas de distribuição. Portanto, é fundamental que o fenômeno seja estudado para que as soluções técnicas mais adequadas sejam adotadas, procurando-se evitar interrupções no fornecimento de energia elétrica. Os estudos dos fenômenos transitórios são complexos e requerem o auxílio de programas computacionais especialmente desenvolvidos para essa finalidade como o EMTP ou a sua versão para computadores do tipo PC denominado ATP. Esses programas utilizam modelos para representar os diversos componentes de um sistema elétrico. Representar em modelos computacionais o transformador é um modo de baratear os estudos dos fenômenos transitórios que trafegam nesses equipamentos, pois desenvolver modelos reais de transformadores para estudar seu comportamento em condições transitórias requer altos investimentos. (KANASHIRO, 2001)

A ABNT através da **NBR-5419**, mostra que o uso do aço embutido nas estruturas de concreto das edificações como eletrodo de aterramento e como condutor das corrente provenientes das descargas atmosféricas é um método natural, pois o aço existe e está à disposição do projetista. A norma entra em conflito quando considera uma normalidade o uso do aço em edifícios já construídos, em que a resistência de contato entre os aços seja inferior a 1 (um) ohm e quando sugere colocar um condutor de cobre nas colunas, vigas e fundações de um edifício em construção. (NBR 5419, 2001)

SÁNCHEZ et al, da Universidade da Colômbia, mostram que o estudo dos fenômenos de interferência eletromagnética e as soluções dos problemas estão adquirindo notável relevância no desempenho dos sistemas elétricos. Pode-se

definir interferência eletromagnética, como qualquer perturbação que se manifesta ocasionando o mau funcionamento dos equipamentos elétricos. Os transitórios eletromagnéticos, ou picos de tensão, normalmente são originários das descargas atmosféricas, podendo ocorrer também com abertura e fechamento de disjuntores, chaves e são responsáveis por muitos desligamentos de linhas, mesmo que essas linhas contenham os pára-raios. Os defeitos nos transformadores de distribuição são problemas constantes para as concessionárias de distribuição de energia elétrica, necessitando de investigações constantes por parte dos pesquisadores, tanto para tornar os transformadores mais eficientes como para instalação de DPS e pára-raios de linha, que minimizem as sobretensões nos enrolamentos. (SÁNCHEZ et al, 2001)

A **CPFL** publicou o procedimento onde mostra como é o sistema de eletrodos de aterramento para o consumidor, próximo do QM, quando ele é alimentado em tensão secundária de distribuição, 220/127 ou 380/220 volts, com neutro multiterrado, seja residencial, comercial ou pequena indústria. O fornecimento em tensão secundária de distribuição atinge consumidores com até 75 kW de carga instalada. Nesse procedimento o consumidor deve instalar uma haste tipo copperweld, haste tipo cantoneira de ferro galvanizado ou haste perfil cilíndrico de aço, para servir como eletrodo de aterramento na entrada de energia elétrica, próximo do QM. Neste mesmo procedimento enfatiza que o consumidor não deve conectar o condutor PE no eletrodo de aterramento da entrada de energia elétrica. (CPFL, 2002)

DE CONTI et al, mostraram a transferência de sobretensões atmosféricas da média tensão para a baixa tensão, na estação transformadora das redes de distribuição de energia elétrica, por acoplamento direto entre os circuitos dos enrolamentos do transformador e pelo fluxo de corrente drenada pelos pára-raios de óxido de zinco da média tensão, em função da elevação de potencial no sistema de eletrodos de aterramento da estação transformadora. Mostraram também a importância do sistema de eletrodos de aterramento junto da estação transformadora da rede de distribuição, devido as correntes drenadas pelos pára-raios de média tensão. Mostraram através das simulações, as correntes

drenadas pelos pára-raios e as que transitam pelo enrolamento transformador. Com relação as sobretensões de origem atmosférica em consumidores, podem originar de três mecanismos básicos:

- as descargas diretas e as tensões induzidas na baixa tensão;
- a transferência de surtos originados na média tensão através do transformador de distribuição; e
- a incidência de descargas diretamente sobre as edificações.

(DE CONTI et al, 2002)

SALARI conclui através do relatório técnico do CEPEL, que os cálculos mais precisos no estudo do desempenho de linhas de distribuição e de transmissão, quando ocorrem incidências de descargas atmosféricas diretas, são os que abordam o domínio da frequência, com as adequadas transformações, tempo e frequência, dessa forma são abordados os parâmetros do solo com a frequência, necessários para o cálculo das impedâncias de aterramentos das torres, eletrodos de aterramento. De qualquer maneira, é de comum senso que a estimativa do desempenho da linha de distribuição ou transmissão frente às descargas atmosféricas enquadra-se no caso em que se conhece mais sobre os resultados esperados do que sobre as causas. Mesmo que se formule com a maior precisão possível a propagação das ondas, o comportamento dos isolamentos, efeito corona, entre outros, a incidência das descargas atmosféricas na linha ou os parâmetros característicos da descarga sempre serão determinados aproximadamente e terão que ser tratados estatisticamente. (SALARI, 2002)

PIANTINI et al mostraram que é necessário conhecer as características das sobretensões em função de parâmetros como: impedância de aterramento, características dos transformadores, comportamento dos isoladores, pára-raios e outros equipamentos, possibilitando a instalação de DPS de baixa tensão, que permitem reduzir as sobretensões não apenas nos equipamentos da rede, mas também nos dos consumidores. A eficácia dessa proteção depende da forma de instalação dos dispositivos e de uma correta especificação dos mesmos. A forma de utilização dos dispositivos de proteção de baixa tensão e o tipo de sobretensões na rede de distribuição, depende do esquema de aterramento

utilizado. No esquema TN, em que o aterramento dos equipamentos é ligado ao neutro da rede de alimentação, as grandezas de maior importância são as tensões entre os condutores de fase e principalmente, entre a fase e neutro. No esquema TT, onde o aterramento dos equipamentos é independente, não ligado ao neutro da rede, as tensões em relação à terra adquirem grande importância. No estudo implementado pelo autor, foi utilizado o esquema de aterramento TN nas instalações dos consumidores de baixa tensão. Dessa forma os dispositivos de proteção foram conectados entre a fase e o neutro. (PIANTINI et al, 2003)

Segundo **POHL DA SILVA** et al, os métodos utilizados para melhorar o desempenho das redes de distribuição quando estas são atingidas por descargas indiretas, nem sempre são efetivos, quando essas redes são atingidas por descargas diretas. Ao contrário, os métodos utilizados para melhorarem o desempenho das linhas de distribuição, quando atingidas pelas descargas diretas, reduzem significativamente os desligamentos associados às descargas indiretas. O custo para implementar a alternativa associada às descargas diretas é sempre muito elevado, levando às concessionárias a um impasse na aplicação dos métodos de mitigação. A probabilidade de as descargas diretas e indiretas produzirem desligamentos está associada à probabilidade da descarga disruptiva de impulso romper o dielétrico da rede de distribuição, isso quer dizer que uma parcela das descargas disruptivas não consegue provocar o desligamento das redes. Pode-se considerar que entre 50% e 60% das descargas disruptivas ocorrem entre as fases externas das redes de distribuição de média tensão, 13,8 kV, equipadas com cruzetas de madeira, isso devido a posição da mão francesa estar próxima do pino de suporte do isolador. Já a fase próxima da mão francesa tem 90% probabilidade de ocorrer interrupção. A partir de dados inseridos no trabalho, devido a desligamentos de alimentadores de 13,8 kV, pode-se verificar que as descargas indiretas têm efeito predominante no desempenho do alimentador de média tensão, provocando um maior número de descargas disruptivas em relação às descargas diretas. Aumentar o nível de isolamento da rede de distribuição vem a ser uma medida significativa para reduzir os desligamentos, devido às descargas diretas e indiretas. (POHL DA SILVA et al, 2003)

Segundo **ROUSSEAU**, muitos são os casos de instalação de DPS, porém é necessário um estudo para verificar se essa instalação é útil ou não. A confusão sobre o uso dos DPS está no receio dos profissionais, pois a utilização tem apresentado riscos aos usuários, sendo necessário uma clareza quanto a sua instalação, quase sempre não encontrada nos catálogos dos fabricantes. Pode-se utilizar o método de avaliação de risco para implementar a instalação do DPS, um método descrito na IEC 61 662. No caso de instalação de DPS em estrutura protegida por um SPDA, é necessário um sistema de equipotencialização das linhas de instalações elétricas. Linhas blindadas ou em condutos fechados não precisam ser equipotencializadas. A NBR 5410 (2004), sugere a instalação de uma barra de cobre para a necessária equipotencialização das linhas de instalações elétricas. Todos esses sistemas devem estar equipotencializados com o SPDA. Na prática, toda vez que um sistema de proteção contra descargas atmosféricas SPDA, é instalado para proteger uma estrutura, é necessário a instalação de DPS na entrada das linhas que chegam à edificação que está sendo protegida. Esses DPS servem mais para a equipotencialização das linhas que servem à edificação, com os eletrodos de aterramento, no caso de descarga direta no SPDA. (ROUSSEAU, 2003)

HIRAI et al, divulgaram uma pesquisa feita durante cinco anos onde os autores observaram de forma contínua os fenômenos de descargas atmosféricas nas linhas de distribuição de uma concessionária no Japão. A observação foi feita com câmeras fotográficas e sensores de monitoramento de surtos de descargas atmosféricas, verificando a frequência com que ocorrem as descargas atmosféricas diretas e indiretas em linhas de distribuição e a frequência de interrupções ao longo dos isoladores. Em razão do NBI dos equipamentos de distribuição ser menor que dos equipamentos da transmissão, para se estudar a proteção efetiva contra as descargas atmosféricas deve ser levado em consideração as descargas diretas e as descargas indiretas (tensões induzidas). Como as linhas de distribuição têm altura inferior às linhas de transmissão, as árvores e edificações afetam as distâncias de rompimento do dielétrico formado pelo ar. Na região do Japão em que foi palco do experimento, foi observado um número de descargas à terra de 3,5 descargas/km²/ano. Observou-se que no período da pesquisa, do total de 160 descargas, 33 foram descargas diretas e

127 foram descargas indiretas. Durante o período de estudos de 1996 a 2000, ocorreram 33 descargas diretas e 127 descargas indiretas. Houveram 17 faltas devido às descargas diretas e 4 faltas devido às descargas indiretas. A linha de distribuição em questão tem cabo guarda e aterramento em cada poste. O autor considera que a redução das interrupções seja devido a essa questão e ao fato dos isoladores da linha terem nível de isolamento de 120 kV. Os valores de pico das correntes das descargas atmosféricas diretas ficaram em 25 kA, no verão do ano de 2000. (HIRAI et al, 2004)

A ABNT através da **NBR-5410**, define como eletrodo de aterramento preferencial o aço embutido nas estruturas de concreto das edificações. Define que em cada edificação deve ser realizada uma equipotencialização principal e que junto ou próximo do ponto de entrada da alimentação elétrica deve existir um barramento denominado BEP. (NBR 5410, 2004)

ROUSSEAU mostra que um aterramento de segurança não é necessariamente um bom aterramento para descargas atmosféricas. O raio é um fenômeno de alta frequência, com conteúdo de até 1 MHz. Em tal caso, um condutor de 10 metros pode levar a uma diferença de potencial de 10 kV, portanto o que se supõe conectado a terra, se encontra na verdade, a uma tensão perigosa. Geralmente o que se procura é uma resistência de aterramento baixa, próxima dos 10 Ω , porém o comportamento desse sistema de eletrodos de aterramento para frequências altas não é tão bom quanto o esperado. Em um modelo de linha comum, em que os parâmetros por unidade são descritos como uma resistência R, uma indutância L e uma capacitância C, a resistência R não é o que se conhece como resistência de aterramento, mas sim do condutor no solo, geralmente de cobre, que é baixa por definição, portanto de pequena importância. Deve-se notar que em altas frequências o efeito pelicular desempenha papel importante e apenas uma parte do condutor, a periferia, é usada para deixar fluir a corrente. Rousseau (2004), observa que um condutor, com perfil retangular, apresentará comportamento melhor perante as altas frequências do que um condutor, com perfil cilíndrico. O que importa então com relação às descargas atmosféricas, é a impedância da onda. É necessário ter uma impedância Z baixa, isto é: condutância G alta, resistência de aterramento

R baixa, indutância L baixa e capacitância C alta. Nas medições normais do sistema de eletrodos de aterramento, utilizando equipamentos de medidas em baixa frequência, não são considerados os parâmetros L e C. Para melhorar a capacitância, pode-se aumentar a superfície do eletrodo, uma placa ou uma malha se comportarão melhor que um único condutor. Para diminuir a indutância deve-se utilizar vários condutores em paralelo, em vez de um único condutor de comprimento total equivalente, por exemplo: três condutores em forma de fita de 3 metros cada, terão uma indutância significativamente melhor do que um único de 9 metros. Basicamente, o comportamento em alta frequência não depende do material do eletrodo. O uso do aço puro, aço revestido de cobre, ou cobre, é mais relacionado às condições de corrosão no solo. O autor executou algumas medidas elétricas em diversos experimentos e foram observadas algumas particularidades:

- as malhas têm bom comportamento em altas frequências;
- as malhas em solos tratados apresentaram performance melhor, provavelmente porque melhorou o acoplamento capacitivo com o solo;
- o sistema de hastes em triângulo aberto (pé de galinha) mostrou-se satisfatório para descargas atmosféricas; e
- um comprimento maior de fita é útil para diminuir a resistência de aterramento, porém não é eficiente com as altas frequências.

(ROSSEAU, 2004)

SUETA e BURANI, desenvolveram um estudo sobre as conexões dos aços de construção embutidos no concreto, utilizados na construção de edifícios no Brasil, aços esses que, conforme a NBR 5419 (2001), podem ser utilizados como eletrodos de aterramento, condutores e captos das correntes provenientes das descargas atmosféricas. As cinco amostras montadas para os testes apresentaram resultados altamente satisfatórios para serem utilizados como eletrodos de aterramento, condutores e captos.

As montagens foram: emenda com solda exotérmica, emenda feita por meio de amarração com arame de aço torcido, emenda feita por meio de luva especial par conexão de ferragens e emenda feita com solda elétrica. Foi também desenvolvido uma montagem com as barras transpassadas, sem emendas, existindo uma distância de 5 mm entre elas. (SUETA e BURANI, 2004)

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTOS E SIMULAÇÕES

3.1 MODELAGEM EXPERIMENTAL DA PESQUISA SOBRE ELETRODOS DE ATERRAMENTO, TIPO HASTE COPPERWELD E TIPO BLOCO DE CONCRETO.

Este experimento mostra o comportamento dos eletrodos de aterramento do tipo haste copperweld e do tipo bloco de concreto com aço de construção, diante da medição da resistência de aterramento para frequência de 60 Hz e diante da medição da indutância a uma frequência de 1 KHz.

Desde que as normas, NBR 5410 (2004) e NBR 5419 (2001), possibilitaram a utilização do aço da armadura do concreto das fundações, baldrame, vigas e colunas dos edifícios, como eletrodos de aterramento, é constante a pergunta sobre o valor da R_{at} e o valor da impedância do conjunto. Quanto ao tipo de conexão, SUETA e BURANI (2004) demonstraram que o aço embutido no concreto pode ser utilizado normalmente como condutor e eletrodo de aterramento, independente da conexão: seja soldado, amarrado, conectado ou transpassados sem nenhum contato.

A utilização do aço existente no concreto, como eletrodo de aterramento, sempre causa uma certa preocupação, pois não existe muita bibliografia a respeito. Estão sendo desenvolvidas por diversos pesquisadores, medições para entender o que acontece ao aço e ao concreto quando eles são utilizados como eletrodos de aterramento, condutor de descida das descargas atmosféricas e também quando são utilizados para drenar as correntes de curto-circuito da ordem de alguns kA, na frequência de 60 Hz. Mesmo sabendo que a R_{at} desses blocos de concreto e aço são baixas, para as correntes de curto-circuito ainda se

depara com o desconhecido e isso dificulta a utilização do aço existente no concreto para esses casos. No caso das descargas atmosféricas, parece ser consenso entre todos, que nada acontece ao aço e ao concreto.

3.1.1 Elaboração e preparação experimental

A experiência realizada necessitou de uma preparação antecipada, como:

- verificação do local onde serão instaladas: a haste e o bloco, para que eles pudessem estar acessíveis por uns 10 anos, com o objetivo de novas medições de acompanhamento da performance dos eletrodos;
- condições financeiras para aquisição dos materiais; e
- preparação dos aparelhos de medições. Esses aparelhos foram emprestados, pois não se dispunha deles para se efetuar as medições.

3.1.2 Aparelhos para as medições

Foi utilizado um aparelho tipo Terrômetro MDT 20kW da MEGABRAS, número de série GA3930B, com escalas de 20 ohms, 200 ohms, 2000 ohms e 20000 ohms, calibrado na Skill-tec em 04/junho/2002, para medir a resistência e possibilitar o cálculo da resistividade, no local onde foram instalados a haste e o bloco de concreto.

Para medir a resistência de aterramento foi utilizado um medidor de resistência de terra, analógico, da marca YEW – Yokogawa Electric Works, LTD, tipo Earth Testes Type – 3235, ano 1974, com escala de medição de 0 O até 1.000 O, esse aparelho pertence à LP Transformadores de Ipaussu, Estado de São Paulo.

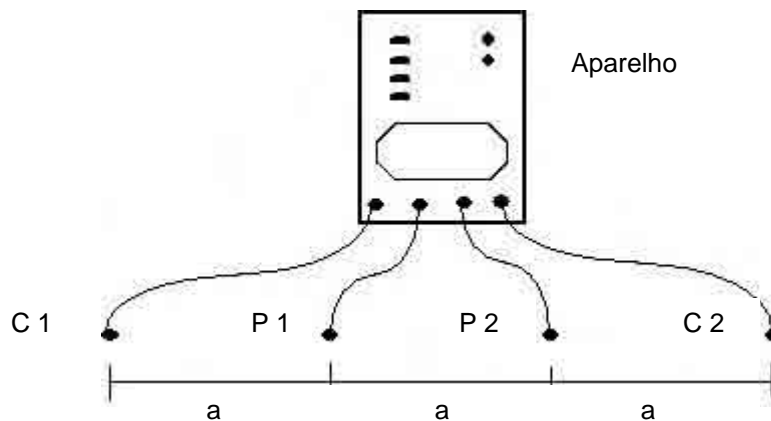
Para medir a resistência de terra e a indutância foi utilizado um medidor de resistência de terra da marca Instrum do Brasil Ltda, modelo, DEIM – 1K, método vetorial, com demodulação sincrônica em fase/quadratura, fonte da corrente através de conversor transistorizado, escalas de medição de 10mO até 2.000O e 1µH até 200mH, frequência de teste em 1KHz \pm 1%, esse aparelho pertence à UNIMAR.

3.1.3 Medição da resistividade do solo

A resistividade do solo é influenciada por vários fatores, porém o teor de umidade e os sais dissolvidos na água que se encontram no solo são fatores que têm influência predominante no valor da resistividade do solo. A propriedade mais importante do solo é a capacidade de retenção da umidade, influenciada pela porosidade do terreno que permite a passagem da altas correntes e não provoca a evaporação rápida da água. A condução da corrente na maioria dos solos da superfície terrestre é quase sempre eletrolítica e os ions pelos quais se conduz a corrente elétrica resultam da dissociação dos sais em água.

A medição da resistividade do solo nos fornece elementos suficientes para projetar os sistemas de aterramento, para correntes de curto-circuito nas freqüências de 60 e 50 Hz, porém ainda não há consenso das vantagens em se medir a resistividade do solo, para se projetar SPDA para altas freqüências.

A Figura 3.1, mostra o arranjo para medir a "resistividade do solo", onde C1 é o ponto de entrada da corrente no solo, C2 é o ponto de entrada da corrente ou retorno, P1 e P2 são pontos de potencial e "a", distância entre os eletrodos de medição.



a = distância entre os eletrodos em metros

Figura 3.1 – Medição da resistividade através do método de Wenner

Na medição da resistividade do solo realizada para esta experiência, foi utilizado o método dos quatro pontos de Frank Wenner, onde ele considera um solo homogêneo. Dessa forma, quando se faz uma medição a um determinado

valor "a" de afastamento entre os eletrodos de medição, temos um valor da resistência elétrica correspondendo a uma profundidade "a".

A medição ocorreu na área da Prefeitura Municipal de Ipaussu, na zona rural, na localidade de Ipaussu, no Estado de São Paulo, no dia 07 de junho de 2003, a Figura 3.2, mostra o local e o arranjo das medições. Esse local é isento de construções num raio de alguns quilômetros. O solo estava úmido quando foram realizadas as medições, e o tipo de solo que predomina no local e região é a terra roxa, um composto basáltico, de baixa resistividade.

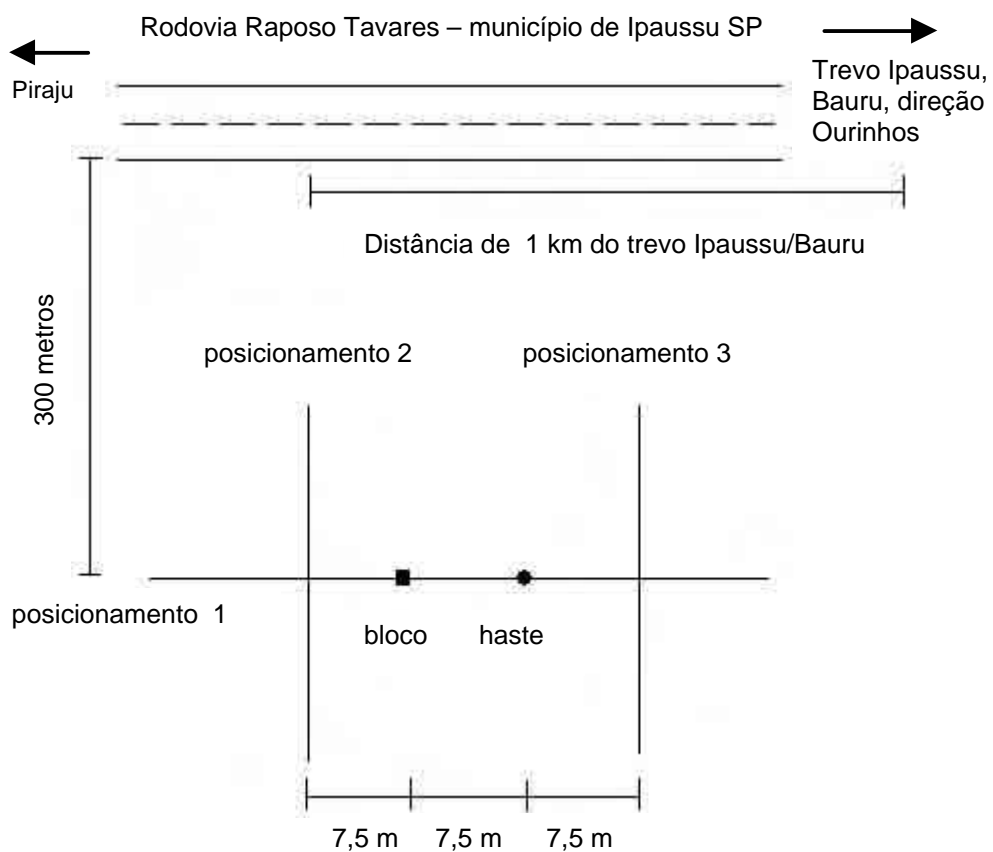


Figura 3.2 - Posicionamentos das medições das resistividades e posicionamento da haste e do bloco

Foram feitas três medições para se conhecer a resistividade na área de teste, conforme os posicionamentos 1, 2 e 3, antes de serem cravados a haste tipo copperweld e o bloco de concreto.

3.1.4 Haste copperweld e bloco de concreto

A Figura 3.3 mostra a haste, uma barra tipo copperweld de 2000 milímetros de comprimento e 16 mm de diâmetro, sendo o aço recoberto com uma espessura de 0,254 µm de cobre.



Figura 3.3 – Haste tipo copperweld

O bloco em concreto armado foi confeccionado utilizando 8 aços com 1900 mm de comprimento e 9,53 mm de diâmetro, como condutores longitudinais e arame de 4,76 mm de diâmetro para a estrutura de contorno, normalmente denominado de estribo, em número de 5, como está mostrado na Figura 3.4. O concreto utilizou areia, pedra e cimento, para a confecção do agregado, na proporção ou traço 4, 3, 1.

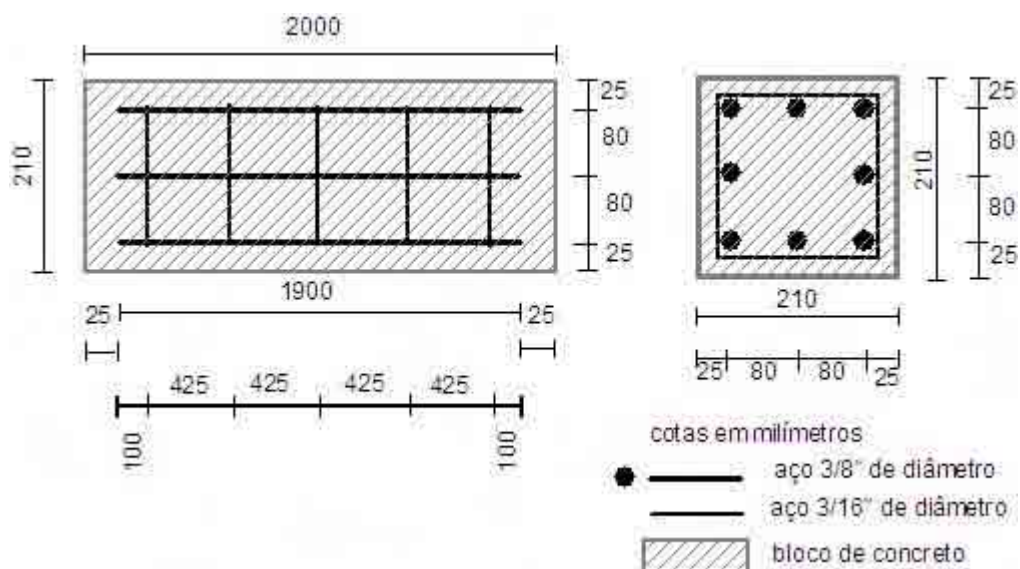


Figura 3.4 - Desenho do aço embutido no bloco de concreto

Nesse bloco de concreto, num dos aços de 9,53 mm de diâmetro, foi soldado um cabo de cobre isolado de bitola 35 mm² e em outro aço de 9,53 mm de diâmetro, foi enrolado um cabo de cobre isolado 16 mm², conforme mostrado na Figura 3.5.

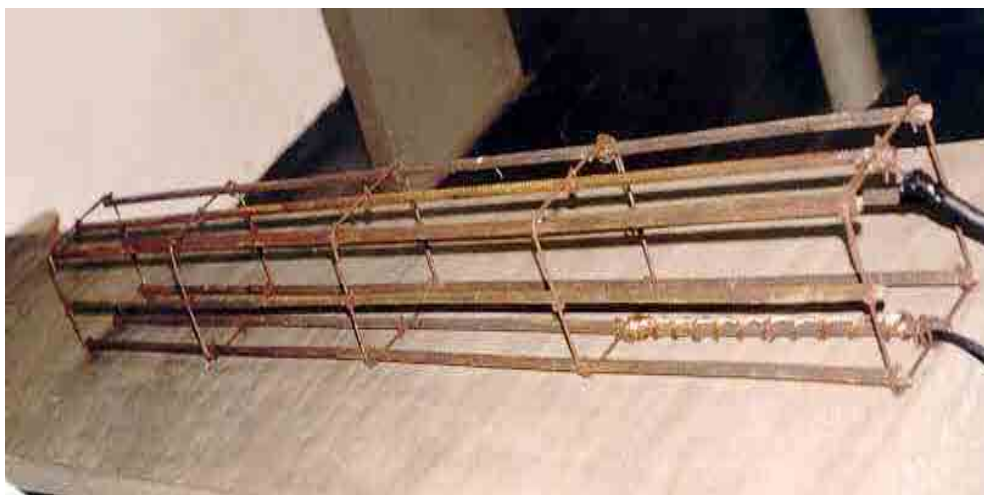


Figura 3.5 – Armadura de aço para confecção do bloco de concreto

O concreto, sendo alcalino e higroscópico, dentro do solo, apresenta baixa resistividade, até 200 Ωm . O aço que se encontra dentro do concreto, pouco se aquece ao conduzir as correntes devido ao surtos produzidos pelas descargas atmosféricas e se calculado corretamente, atende à condução das correntes de curto-circuito, LEITE et al (1995).

3.1.5 Medições da resistência de aterramento e da indutância

Após a instalação da haste tipo copperweld e do bloco de concreto, conforme consta da Figura 3.2, aguardou-se 30 dias para proceder as medições de resistência de aterramento e da indutância, com isso houve a cura do concreto e o solo se fixou mais ao redor do bloco e da haste.

No dia 18 de junho de 2003, às 16 horas, tempo seco, a uma temperatura ambiente de 28°C, foram realizadas quatro medições, conforme descrições nos itens abaixo:

3.1.5.1 Medição 1 – Resistência de aterramento do bloco

A medição da resistência de aterramento do bloco de concreto, foi realizada através do instrumento de medição de resistência de terra da marca YEW, quando obteve-se os valores para o cabo soldado no aço e para o cabo enrolado. Para este tipo de medição crava-se o eletrodo de corrente a uma distância pelo menos cinco vezes o maior comprimento do sistema de eletrodos de aterramento e desloca o eletrodo de potencial entre o sistema de eletrodos de aterramento cuja resistência de aterramento se quer conhecer e o eletrodo de corrente. Nesta medição, o eletrodo de corrente foi colocado a 40 metros do eletrodo de aterramento, cujo valor da resistência de aterramento se quer conhecer e deslocou-se o eletrodo de potencial de dois em dois metros.

3.1.5.2 Medição 2 – Resistência de aterramento da haste

Para a medição da resistência de aterramento da haste copperweld, foi utilizado o instrumento de medir resistência de terra, analógico, da marca YEW. Esta medição foi executada do mesmo modo como foi feita a Medição 1 do bloco de concreto.

3.1.5.3 Medição 3 – Resistência de aterramento da haste a uma distância fixa

Para a medição da resistência de aterramento da haste copperweld, foi utilizado o instrumento de medir resistência de terra da marca YEW.

Foi utilizado uma distância fixa, arbitrária, de 23 metros do eletrodo de aterramento que se quer conhecer a resistência de aterramento, para colocação do eletrodo de potencial, mantida o eletrodo de corrente a 40 metros do eletrodo de aterramento, mesmo ponto das medições 1 e 2.

3.1.5.4 Medição 4 – Resistência de aterramento e indutância

Para medição da indutância foi utilizado o medidor de resistência de terra da Instrum do Brasil Ltda, Figura 3.5. Esse equipamento utiliza um cabo longo com 62 metros, blindado, tipo RG 59 e um cabo curto com 38 metros, de cobre, flexível e isolado para 750 volts com 2,5 mm² de seção. Esse tipo de medição foi executado com distâncias fixadas pelo fabricante do aparelho.



Figura 3.6 – Aparelho da INSTRUM DEIM 1K

O eletrodo C, utilizando o condutor RG-59, foi instalado a 60 metros do eletrodo de aterramento e o eletrodo P, foi instalado a 38 metros do eletrodo de aterramento, utilizando o mesmo posicionamento das medições da resistência de aterramento.

3.2 SIMULAÇÕES DAS TENSÕES NA MT E NA BT.

Utilizando um circuito de transformador de 75 kVA, que foi obtido no experimento realizado por KANASHIRO (2001), foram simuladas tensões do lado da MT e do lado da BT, utilizando o programa computacional ATP.

Em todas as simulações, o solo aparece apenas como uma resistência ôhmica, conforme as equações de CORREIA DE BARROS (1997), disponibilizadas no Capítulo 2. Essas equações foram desenvolvidas com o objetivo de simular um solo não linear ao redor do eletrodo. Foi calculada a resistência R_1 , apresentada na equação 2.1, para o bloco de concreto e para a haste.

Os parâmetros abaixo foram considerados no cálculo de R_b para o bloco de concreto e R_h para a haste tipo copperweld. Esses parâmetros foram obtidos com os valores do experimento para a haste tipo copperweld e para o bloco de concreto:

$$r = 260 \Omega\text{m do terreno do experimento do item 3.1;}$$

$$r_{01} = 86 \Omega \text{ do bloco de concreto de 2000 mm de comprimento; e}$$

$$r_{02} = 323 \Omega \text{ da haste copperweld de 2000 mm de comprimento.}$$

Calculando R_b e R_h têm-se:

- para o bloco de concreto $R_b = 11,1547 \Omega \cong 12 \Omega$.
- para a haste copperweld $R_h = 21,6177 \Omega \cong 22 \Omega$.

Com os valores calculados de R_b , resistência de aterramento do bloco, de R_h , resistência de aterramento da haste copperweld e utilizando o circuito para um transformador de 75 kVA, desenvolvido por KANASHIRO (2001), foram simulados, utilizando o programa computacional ATP, os valores dos surtos de tensões do lado na MT, no borne do transformador e a 150 metros do transformador e os valores dos surtos de tensões na BT, próximo do transformador e a 150 metros do transformador. As descargas atmosféricas foram simuladas atuando diretamente na MT, junto ao posto de transformação. Na Figura 3.7, pode ser observado o circuito completo utilizado para simulação através do programa ATP.

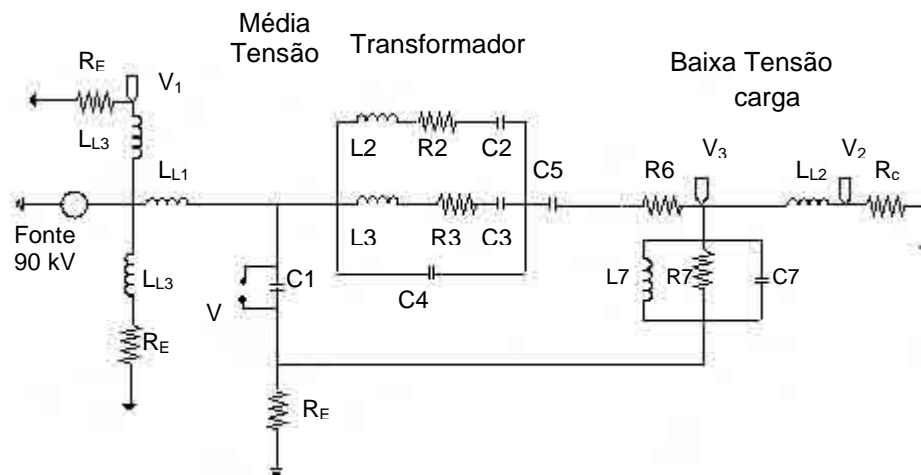


Figura 3.7 – Circuito da MT e BT com diagrama do transformador KANASHIRO (2001)

Onde:

- V - Voltímetros (V, V₁, V₂ e V₃)
- R_E – Resistor que representa os pára-raios, condutores e eletrodos de aterramento, valor calculado R_b e R_h na MT.
- L_{L1} – Indutor de 0,004 mH, representando a parte indutiva do condutor entre a injeção da tensão e o sistema de eletrodos de terra da estação de transformação.
- L_{L3} – Indutor de 0,053 mH, representa o trecho de MT entre a injeção da tensão e o próximo sistema de eletrodos de terra da MT.
- C1 – Capacitor de 480 pF.
- L2 – Indutor de 35 mH.
- R2 – Resistor de 20 kΩ.
- C2 – Capacitor de 804 pF.
- L3 – Indutor de 15 mH.
- R3 - Resistor de 15 kΩ.
- C3 – Capacitor de 220,53 pF.
- C4 – Capacitor de 600 pF.
- C5 – Capacitor de 300 pF.
- R6 – Resistor de 0,35 kΩ.
- R7 – Resistor de 3 kΩ.
- L7 – Indutor de 0,015 mH.
- C7 – Capacitor de 825,8 pF.
- L_{L2} – Indutor de 0,053 mH, representa a indutância do condutor da BT.
- R_c – Resistor de 30 Ω, representa a carga na BT

3.2.1 Surtos de tensões visto do lado da MT

Foram feitas duas simulações, uma simulação com R_E de 12 Ω e outra simulação com R_E de 22 Ω. Esses resistores representaram o conjunto:

pára-raios, condutores e eletrodo de aterramento e os valores utilizados foram os de R_b e R_h calculados para o bloco de concreto e para a haste copperweld. Foi utilizada uma fonte de tensão de 90 kV, para gerar um surto de tensão. Foram obtidos dados da tensão junto ao transformador e num dos ramos da MT, distante 150 metros do transformador.

3.2.2 Surtos de tensões visto do lado da BT

Através das duas simulações da MT, foram obtidos os valores dos surtos de tensão para a BT. No lado da BT foi utilizado um indutor de 0,0035 mH representando o comprimento da BT e o um resistor de 30 Ω representando a carga na BT. Foram obtidos dados da tensão nos bornes secundários do transformador e junto à carga.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 MODELAGEM EXPERIMENTAL DA PESQUISA SOBRE ELETRODOS DE ATERRAMENTO, TIPO HASTE COPPERWELD E TIPO BLOCO DE CONCRETO.

4.1.1 Valores da resistividade do solo

As medidas das resistências obtidas, com as medições demonstradas no Capítulo 3, item 3.1.3, estão expressas nas Tabelas: 4.1, 4.2 e 4.3, referente às medições nos três posicionamentos.

Tabela 4.1 - Valores medidos no posicionamento 1

distância "a" (m)	valor de fundo de escala do aparelho			
	20 k?	2000 ?	200 ?	20 ?
2 m	0,05	7,0	15,9	18,14
4 m	0,06	13,0	10,6	12,47
8 m	0,06	18,0	5,3	7,63
16 m	0,07	23,0	0,6	2,86
32 m	0,07	25,0	1,4	0,72

Tabela 4.2 - Valores medidos no posicionamento 2

distância "a" (m)	valor de fundo de escala do aparelho			
	20 k?	2000 ?	200 ?	20 ?
2 m	0,05	3,0	19,4	-
4 m	0,06	14,0	9,6	11,92
8 m	0,067	18,0	4,9	7,16
16 m	0,07	22,0	0,5	2,69
32 m	0,07	25,0	1,5	0,66

Tabela 4.3 - Valores medidos no posicionamento 3

distância "a" (m)	valor de fundo de escala do aparelho			
	20 k?	2000 ?	200 ?	20 ?
2 m	0,04	11,0	33,9	-
4 m	0,05	6,0	16,9	19,26
8 m	0,06	13,0	8,0	10,26
16 m	0,07	21,0	1,4	3,53
32 m	0,05	24,0	1,4	0,65

Optou-se por utilizar os valores das resistências medidas na escala de 200 ohms, pois esses valores mostraram mais confiabilidade no dia das medições. Os outros valores das escalas diferiram muito, como se pode observar através dos valores das escalas 20 e 2000 ohms. Na escala 20 ohms, alguns valores não puderam ser adquiridos, por isso não foram utilizados. O tipo de solo existente no local das medições é um solo de formação *basáltica, tipo terra roxa*, que normalmente tem uma camada de pedra entre 20 e 40 metros de profundidade, onde retém água, dessa forma, a diminuição da resistência nas camadas mais profundas colaborou para a utilização dos valores medidos na escala 200 ohms, isso pode ser verificado nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3. Os valores das resistências na escala 200 ohms estão marcados nas tabelas em negrito.

Foi calculada a resistência média, depois de verificado os desvios de cada resistência em relação à resistência média e foi observado que um valor ultrapassou o desvio de 50%, optou-se então por desprezar esse valor na posição 16 metros no posicionamento 3. Dessa forma, na posição 16 só foram utilizados os valores dos posicionamentos 1 e 2 para cálculo da $R_{\text{média}}$. Na Tabela 4.4, o valor realçado é o valor abandonado no cálculo das médias.

Tabela 4.4 - Valores das medições das resistências e resistência média

a (m)	posicionamento 1 (?)	posicionamento 2 (?)	posicionamento 3 (?)	$R_{\text{média}}$ (?)
2 m	15,9	19,4	33,9	23,07
4 m	10,6	9,6	16,9	12,37
8 m	5,3	4,9	8,0	6,07
16 m	0,6	0,5	1,4	0,37
32 m	1,4	1,5	1,4	1,43

Foi calculado na Tabela 4.5, o valor da resistividade do solo nas profundidades medidas.

Tabela 4.5 - Cálculo das resistividades

a (m)	R _{médio} (?)	2pa	? = 2paR _{médio} (?m)
2	23,07	12,56	289,76
4	12,37	25,12	310,73
8	6,07	50,25	305,02
16	0,37	100,50	37,19
32	1,43	201,00	287,43

Pode-se verificar no gráfico da Figura 4.1 a curva da resistividade do solo, curva 1, nas profundidades medidas através do método de Wenner e a curva extrapolada, curva 2. Foi feita a estratificação do solo pelo método das curvas padrões e curvas auxiliares, em seguida, utilizando a extrapolação da planilha Excel da Microsoft, foi obtido a curva 2.

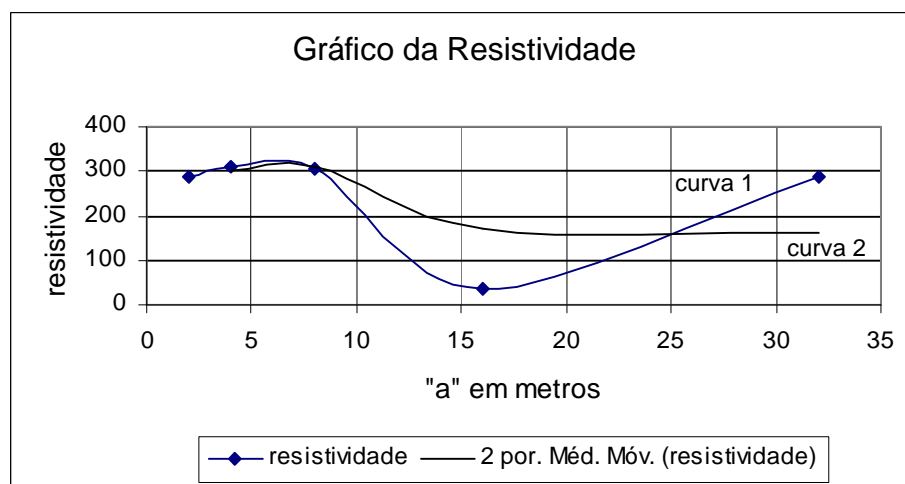


Figura 4.1 - Gráfico da curva da resistividade

Analisando essas curvas, verifica-se que a resistividade da primeira camada é de aproximadamente 260 Ω m com uma profundidade de 6 metros e observando na curva extrapolada, curva 2, temos uma outra camada de

aproximadamente 160 Ω m, entre 16 e 30 metros de profundidade. O tipo de solo, existente no local, *basáltico, tipo terra roxa*, normalmente tem uma camada de pedra numa profundidade 30 a 40 metros. Os valores entre 30 e 35 metros de profundidade tende a valores mais altos de resistividade se comparado com os valores do solo nas profundidades entre 15 e 20 metros, nesses pontos há maior concentração de água, isso pode ser observado na curva 1 da Figura 4.1.

4.1.2 Valores da resistência de aterramento e da indutância

4.1.2.1 Medição 1 – Resistência de aterramento do bloco de concreto

Pode-se observar na Tabela 4.6, que os valores da resistência de aterramento para cada ponto medido, são iguais, seja para a medida feita pelo condutor de cobre de 35 mm² isolado e soldado no aço, ou através do condutor de cobre 16 mm² isolado e enrolado no aço.

Tabela 4.6 – Resistências de aterramento do bloco de concreto

distância em "m"	cabo 35 mm ² soldado no aço (W)	cabo 16 mm ² enrolado no aço (W)
2	65	65
4	75	75
6	80	80
8	80	80
10	83	83
12	84	84
14	85	85
16	86	86
18	86	86
20	87	87
22	88	88
24	89,7	89,7
26	90	90
28	91	91
30	95	95
32	99,5	99,5
34	106	106
36	125	125

A partir da Tabela 4.6, pode-se observar que o eletrodo de potencial foi deslocado de dois em dois metros entre o eletrodo de terra e o eletrodo de corrente, cravado à 40 metros do eletrodo de terra, com isso conseguiu-se um grupo de valores próximos, patamar da resistência de aterramento, como se pode verificar na Figura 4.2.

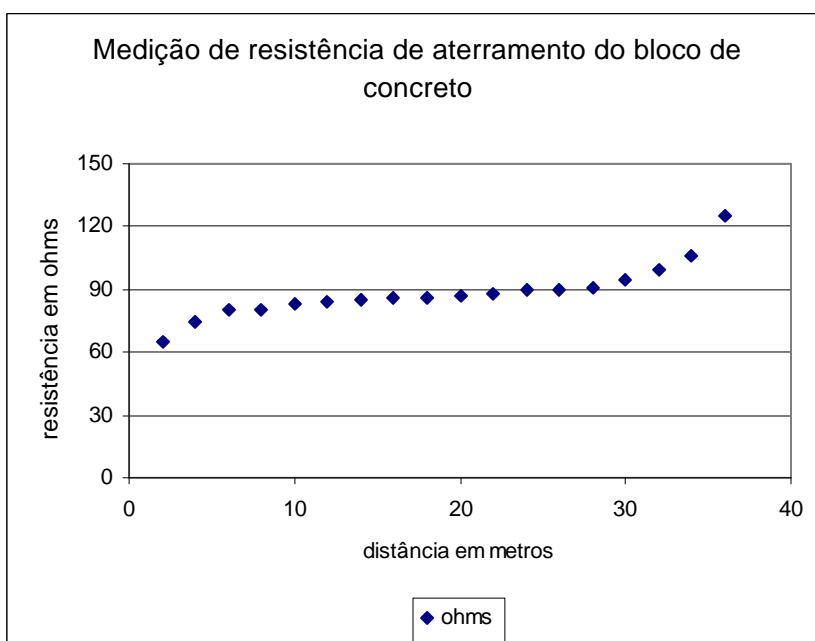


Figura 4.2 – Valores das resistências de aterramento do bloco de concreto

A curva de medição das resistências de aterramento versus as distâncias, possibilita observar que o valor da resistência de aterramento, para o bloco de concreto, situa-se em um patamar próximo de 86 Ω , conseguido a uma distância entre 16 e 20 metros do bloco em teste, eletrodo de terra.

4.1.2.2 Medição 2 – Resistência de aterramento da haste tipo copperweld

Na Tabela 4.7 estão expressos os valores da resistência de aterramento da haste tipo copperweld. Essas medições seguiram o mesmo procedimento aplicado na Medição 1, a diferença é que a primeira medida inicia-se a 6 metros do eletrodo de terra, objeto da medição.

Tabela 4.7 – Resistências de aterramento da haste tipo copperweld

distância em "m"	ohms
6	306
8	313
10	317
12	320
14	321
16	322
18	323
20	323
22	323
24	325
26	326
28	326
30	330
31	328
32	335
34	342

A curva de medição das resistências de aterramento versus as distâncias mostrada na Figura 4.3, possibilita observar que o valor da resistência de aterramento será de 323 ohms para a haste tipo copperweld, medida a uma distância entre 18 e 22 metros da haste em teste, eletrodo de terra.

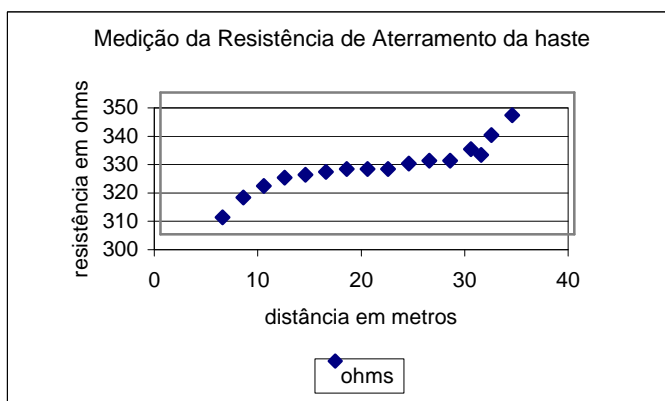


Figura 4.3 – Valores das resistências de aterramento da haste tipo copperweld

4.1.2.3 Medição 3 – Resistência de aterramento da haste tipo copperweld a uma distância fixa.

A tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos na medição da resistência de aterramento da haste tipo copperweld, sendo colocado o eletrodo de

potencial a uma distância fixa de 23 metros em relação à haste, eletrodo de terra. Essa distância de 23 metros foi utilizada arbitrariamente, por ficar próximo da meia distância entre o eletrodo de terra e o eletrodo de corrente, próximo do patamar da curva resistência de aterramento versus distância.

Tabela 4.8 - Resistência de aterramento da haste tipo copperweld a uma distância fixa

distância em "metros" da haste de potencial em relação ao eletrodo de terra	ohms
23	330 à 340

4.1.2.4 Medição 4 – Indutância em mH do bloco e da haste

A Tabela 4.9 expressa os valores obtidos com a medição da haste tipo copperweld.

Tabela 4.9 – Valor da Rat e da Indutância da haste copperweld

valor da resistência	303 ohms
valor da indutância	12, 4 mH

A Tabela 4.10 expressa os valores obtidos com a medição do bloco de concreto.

Tabela 4.10 – Valores da Rat e da Indutância do bloco de concreto

valores da resistência\	84 ohms	enrolado
	84,4 ohms	soldado

valores da indutância	3,13 mH	enrolado
	3,15 mH	soldado

4.2 SIMULAÇÕES DAS TENSÕES NA MT E NA BT.

A Figura 4.4 é idêntica à Figura 3.7, do Capítulo 3, foi novamente colocada, para possibilitar uma melhor compreensão das simulações:

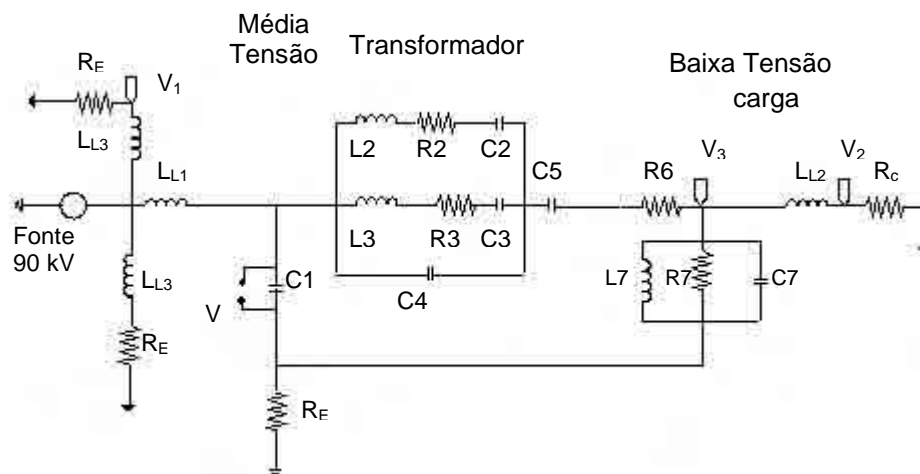


Figura 4.4 – Circuito da MT e BT com diagrama do transformador KANASHIRO (2001)

Onde:

- V - Voltímetros (V, V₁, V₂ e V₃)
- R_E – Resistor que representa os pára-raios, condutores e eletrodos de aterramento, valor calculado R_b e R_h na MT.
- L_{L1} – Indutor de 0,004 mH, representando a parte indutiva do condutor entre a injeção da tensão e o sistema de eletrodos de terra da estação de transformação.
- L_{L3} – Indutor de 0,053 mH, representa o trecho de MT entre a injeção da tensão e o próximo sistema de eletrodos de terra da MT.
- C1 – Capacitor de 480 pF.
- L2 – Indutor de 35 mH.
- R2 – Resistor de 20 kΩ.
- C2 – Capacitor de 804 pF.
- L3 – Indutor de 15 mH.
- R3 - Resistor de 15 kΩ.
- C3 – Capacitor de 220,53 pF.
- C4 – Capacitor de 600 pF.
- C5 – Capacitor de 300 pF.
- R6 – Resistor de 0,35 kΩ.
- R7 – Resistor de 3 kΩ.
- L7 – Indutor de 0,015 mH.
- C7 – Capacitor de 825,8 pF.
- L_{L2} – Indutor de 0,053 mH, representa a indutância do condutor da BT.
- R_c – Resistor de 30 Ω, representa a carga na BT

4.2.1 Surtos de tensões visto do lado da MT

4.2.1.1 Surtos de tensões com $R_E = 12$ ohms.

A Figura 4.5 mostra o desenho da frente de surto do lado da MT. Valores verificados nos bornes de MT do transformador.

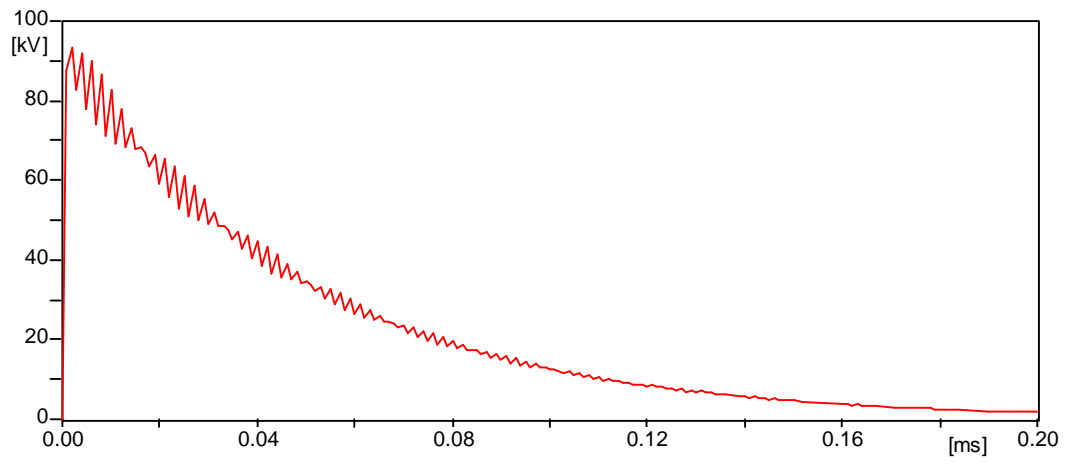


Figura 4.5 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da MT com $R_E = 12 \Omega$.

A Figura 4.6 mostra o desenho da frente de surto do lado da MT. Valores verificados num dos ramos da MT com comprimento de 150 metros.

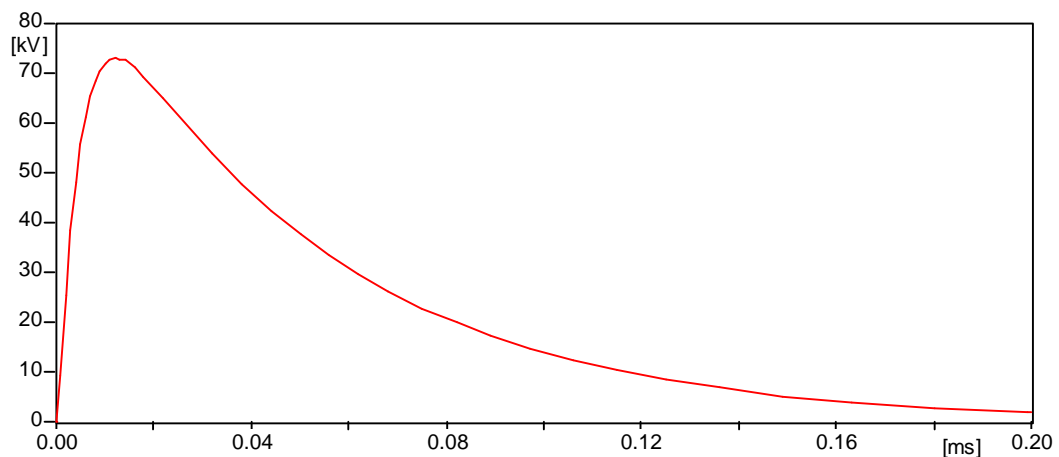


Figura 4.6 – Representações das tensões a 150 metros do transformador do lado da MT com $R_E = 12 \Omega$.

4.2.1.2 Surtos de tensões com $R_E = 22$ ohms.

A Figura 4.7 mostra o desenho da frente de surto do lado da MT. Valores verificados nos bornes de MT do transformador.

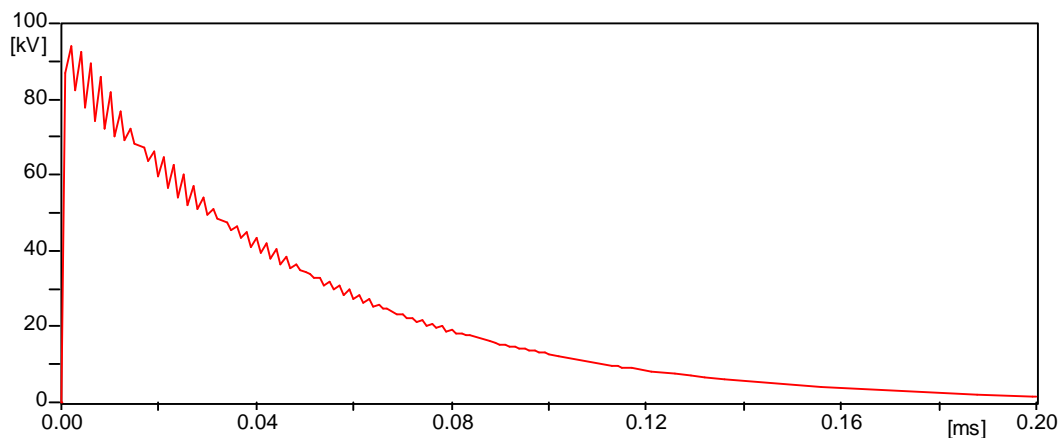


Figura 4.7 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da MT com $R_E = 22 \Omega$.

A Figura 4.8 mostra o desenho da frente de surto do lado da MT. Valores verificados num dos ramos da MT com comprimento de 150 metros.

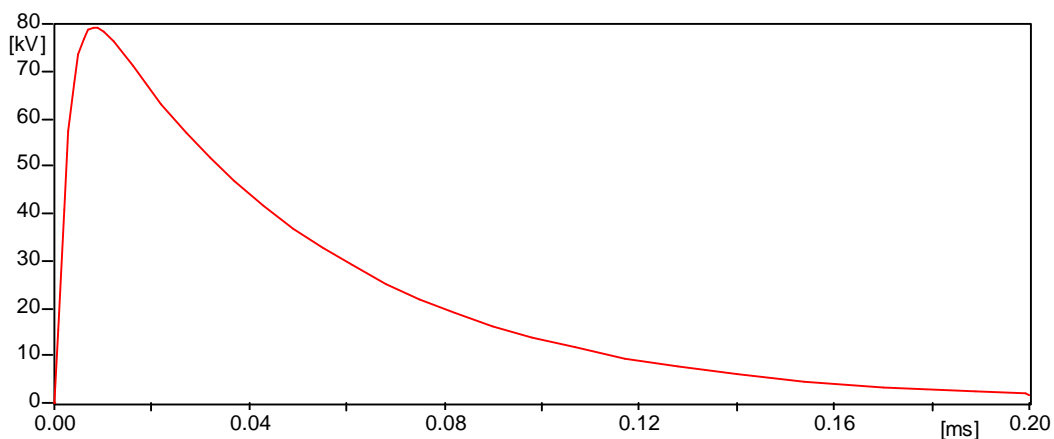


Figura 4.8 – Representações das tensões a 150 metros do transformador do lado da MT com $R_E = 22 \Omega$.

4.2.2 Surtos de tensões visto do lado da BT

4.2.2.1 Surtos de tensões com $R_E = 12 \text{ ohms}$.

A Figura 4.9 mostra o desenho da frente de surto do lado da BT. Valores verificados nos bornes da BT do transformador.

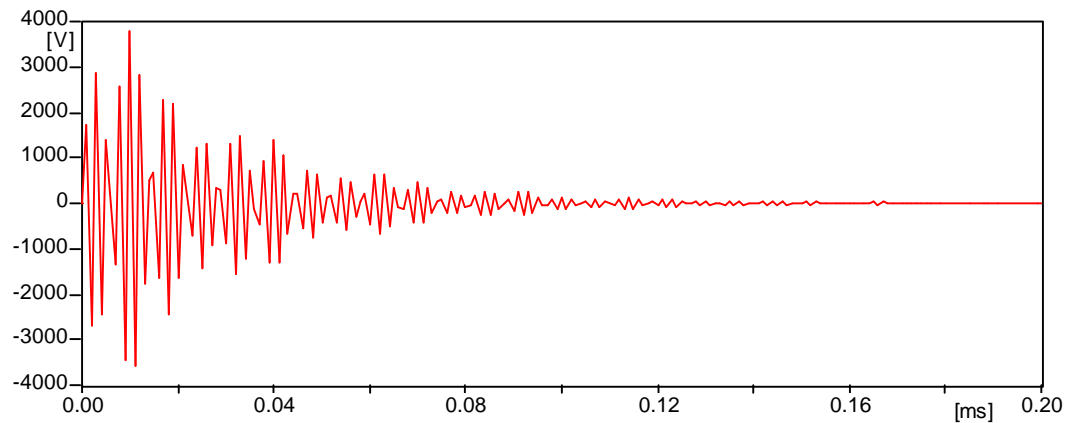


Figura 4.9 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da BT com $R_E = 12 \Omega$.

A Figura 4.10 mostra o desenho da frente de surto do lado da BT. Valores verificados junto à carga.

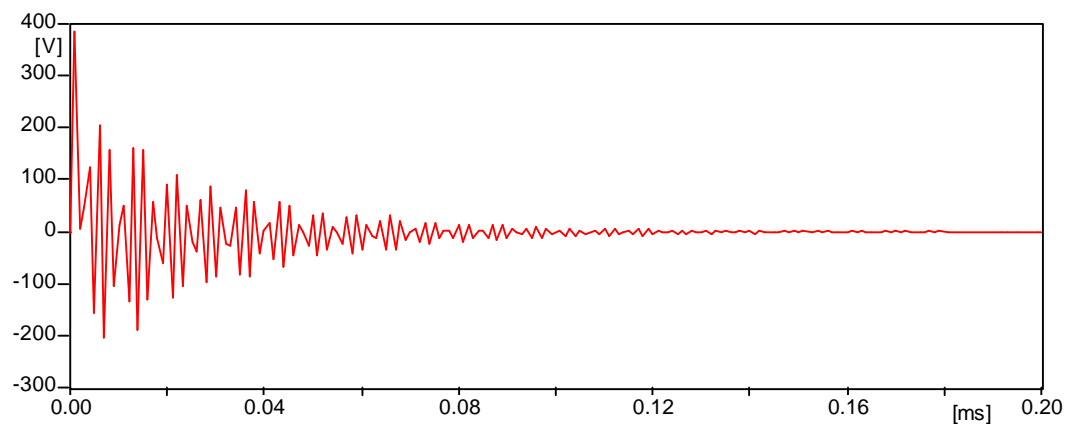


Figura 4.10 – Representações das tensões junto à carga do lado da BT com $R_E = 12 \Omega$.

4.2.2.2 Surtos de tensões com $R_E = 22$ ohms.

A Figura 4.11 mostra o desenho da frente de surto do lado da BT. Valores verificados nos bornes da BT do transformador.

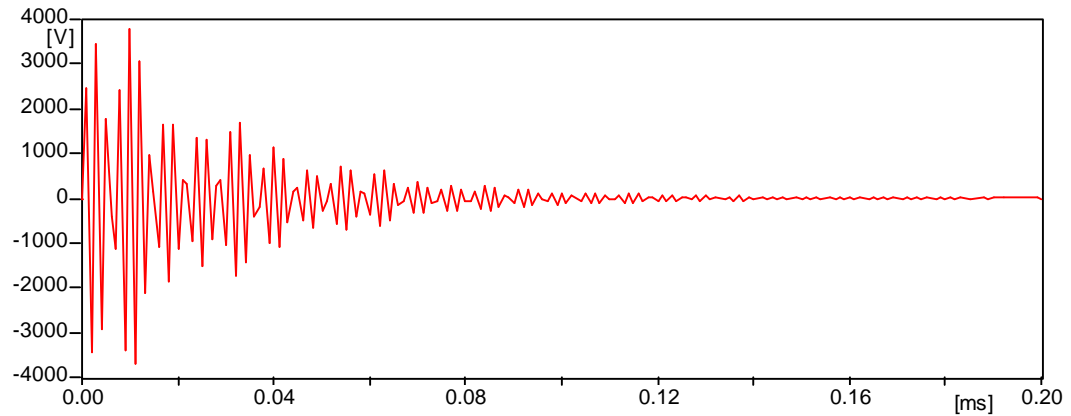


Figura 4.11 – Representações das tensões nos bornes do transformador do lado da BT com $R_E = 22 \Omega$.

A Figura 4.12 mostra o desenho da frente de surto do lado da BT. Valores verificados junto à carga.

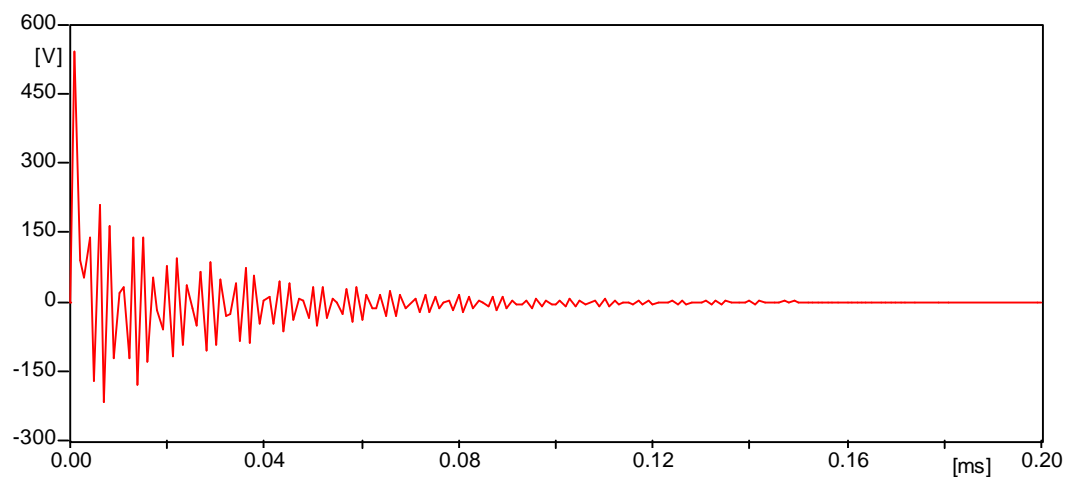


Figura 4.12 – Representações das tensões junto à carga do lado da BT com $R_E = 22 \Omega$.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Serão abordadas, neste Capítulo, as discussões dos resultados das medições das resistências de aterramento e das indutâncias do bloco de concreto e da haste tipo copperweld. Também serão abordados os resultados das simulações computacionais sobre os valores das tensões de surtos na MT e BT.

Serão analisadas as vantagens do eletrodo de aterramento ser composto do aço existente nas estruturas dos edifícios e do uso do bloco com aço e concreto no lugar da haste tipo copperweld. Os sistemas de aterramento de um posto de transformação e do neutro multiaterrado da rede de distribuição, deverão ser analisados e propostas as alterações necessárias, uma vez que esses sistemas de aterramento interferem diretamente nas instalações elétricas dos consumidores. Serão também analisados os sistemas de aterramento das medições de energia elétrica dos consumidores e as do interior das edificações e propostas alterações necessárias. Serão também analisadas as formas de se instalar os dispositivos de proteção que utilizam os varistores de óxido metálico, ZnO.

5.1 DISCUSSÕES DO EXPERIMENTO E DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1.1 Modelagem experimental da pesquisa sobre eletrodos de aterramento tipo haste copperweld e tipo bloco de concreto

5.1.1.1 Valores da resistividade do solo

O valor da resistividade de $260 \Omega\text{m}$ foi obtido através da estratificação dos valores medidos e foi utilizado como valor da resistividade, para estudos comparativos entre a haste copperweld e o bloco de concreto. Como os

eletrodos de aterramento foram cravados a uma profundidade de 2,50 metros, a resistividade da primeira camada atende ao experimento.

A utilização da medição da resistividade para fenômenos como correntes de curto-circuito, que são fenômenos lentos e o desenvolvimento do projeto do sistema de eletrodos de aterramento, utilizando o valor da resistividade do solo se justificam, pois se pode desprezar tanto a reatância longitudinal como a capacitância transversal, sendo que a representação do eletrodo de aterramento passa a ser por meio da condutância, isto é, a resistência equivalente, VISACRO (1998).

Conhecer o valor da resistividade do solo, para fenômenos rápidos como as descargas atmosféricas, pouco colabora no projeto de um sistema de eletrodos de aterramento eficiente para esses fenômenos. O solo ao redor do eletrodo de aterramento, tem seus parâmetros alterados frente às descargas atmosféricas, o que dificulta montar um modelo computacional, devido a isso foram utilizadas as equações para representar um eletrodo de aterramento frente às descargas atmosféricas, CORREIA DE BARROS (1997).

5.1.1.2 Valores da resistência de aterramento e da indutância

Os valores das resistências de aterramento encontradas tanto para o bloco de concreto como para a haste tipo copperweld, são valores válidos para fenômenos lentos, como a corrente de curto-circuito na frequência de 60 Hz. O bloco de concreto apresentou uma resistência de aterramento de 86 Ω e a haste tipo copperweld uma resistência de aterramento de 323 Ω . O valor da resistência de aterramento do bloco é um valor alto para fenômenos lentos, porém com aumento do número de elementos, pode-se conseguir valores menores para a resistência de aterramento, mesmo em pequenas áreas, como a estação de transformador e a entrada de energia do consumidor. Através dos valores medidos da resistência de aterramento, pode-se observar que o bloco de concreto, por ser higroscópico, leva uma grande vantagem sobre a haste, além de atender ao principal requisito para se obter uma baixa impedância, que é o de concentrar o aumento de material condutor, próximo do ponto de injeção da corrente. O objetivo é aumentar as correntes de condução nesse ponto e aumentar os efeitos capacitivos para altas frequências.

Uma outra observação pertinente é que na rede de distribuição, além do eletrodo de aterramento do posto de transformação, existem os eletrodos de aterramento nas instalações elétricas dos consumidores, mais precisamente na entrada de energia elétrica e também a cada 150 a 200 metros na BT, onde o neutro é novamente aterrado. Então para fenômenos lentos, o sistema de aterramento de uma concessionária pode ser considerado ideal, pois tanto a MT como a BT, comportam-se muito bem nesses casos.

O problema aparece quando acontecem as descargas atmosféricas. Normalmente, há a queima de transformadores das concessionárias, existe a danificação dos equipamentos elétricos e eletrônicos dos consumidores, sendo que a solução nesses casos, nem sempre é o aumento do número de hastes.

Diminuir o valor da impedância do sistema de eletrodos de aterramento vem sendo a melhor forma de minimizar os efeitos das descargas atmosféricas.

Foi observado nessas medições, que o valor da indutância da haste e do bloco também são bem diferentes. A haste tipo copperweld, apresentou uma indutância de 12,4 mH e o bloco de concreto de 3,15 mH.

O efeito indutivo do eletrodo de aterramento torna-se importante quanto a corrente elétrica está associada à frequência de alguns quilohertz. A partir de algumas dezenas de quilohertz, o efeito capacitivo do eletrodo de aterramento torna-se significativo. A corrente injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo VISACRO (1998). No que concerne a essa última parcela, corrente longitudinal, são observadas perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos da corrente, no interior e exterior do condutor. Em termos de circuito equivalente, o computo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série e o campo elétrico no solo é que vai determinar o fluxo das correntes de condução capacitiva, que não dependem da geometria dos condutores e sim da quantidade de material ROUSSEAU (2004) e VISACRO (1998). Dessa forma a extensão da área coberta pelos eletrodos do sistema de aterramento, passa a ser o principal fator para a diminuição do valor da impedância.

5.1.2 Simulações das tensões na MT e BT

Para as simulações dos surtos de tensão, provenientes das descargas atmosféricas, utilizando o programa computacional ATP, foi utilizada uma fonte de tensão de 90 kV. Tensões acima desse valor irão danificar o transformador e os valores dos surtos na BT, terão valores não padronizados pelo circuito do transformador validado por KANASHIRO (2001), para o programa computacional ATP.

Nas simulações onde o sistema de aterramento foi representado pelas resistências de 12 Ω para o bloco de concreto e de 22 Ω para a haste tipo copperweld, pode-se observar que os valores do lado da MT têm alterações não muito significativas. Mesmo simulando com resistências de 5 e 50 ohms, as alterações dos valores de surtos do lado da MT não são significativos. Podemos então dizer, que os valores das resistências de aterramento do lado da MT, não são significativos para atender ao estudo dos surtos nas instalações dos consumidores.

Estudando os valores obtidos com as mesmas simulações, porém do lado da BT, os valores obtidos junto ao borne do transformador também não são alterados para as resistências de 12 e 22 ohms. Porém junto à carga, a 150 metros do transformador, foi observado que com a diminuição da resistência de aterramento no posto de transformador, há diminuição dos valores dos surtos de tensão. Então, os valores das resistências de aterramento no posto do transformador, são significativos para as instalações dos consumidores.

Essas simulações vêm confirmar a necessidade de se estudar os sistemas de aterramento focando a impedância.

5.2 ANÁLISES E SUGESTÕES

Para proteção dos equipamentos eletrônicos dos consumidores, é necessário que os estudos se iniciem pelo posto de transformação da rede de distribuição de energia elétrica das concessionárias, com algumas alterações na topologia de conexão dos condutores de aterramento e a utilização de outro tipo de eletrodo de aterramento. Porém, os altos custos para se adequar a rede de baixa tensão e a entrada de energia dos consumidores, além dos altos custos da manutenção, inibem as concessionárias a instalarem os DPS na BT, apesar das

várias pesquisas demonstrarem as vantagens dessa prática, principalmente para o transformador.

5.2.1 Rede de distribuição de MT

Situação atual

Na Figura 5.1, o condutor CF, normalmente é de arame galvanizado, seção 4 BWG ou cabo de cobre nu, seção 2 AWG. O ponto de conexão E é próximo do transformador, aproximadamente 1 a 1,5 metro, estando a uma altura de 5 metros do piso. O condutor DE e a interligação do borne do neutro ao tanque do transformador (massa) no ponto D, são de cabo de cobre nu 2 AWG ou fio de cobre nu 6 AWG. A Figura 5.1 mostra a topologia atual das conexões dos pontos de aterramento em um posto de transformação.

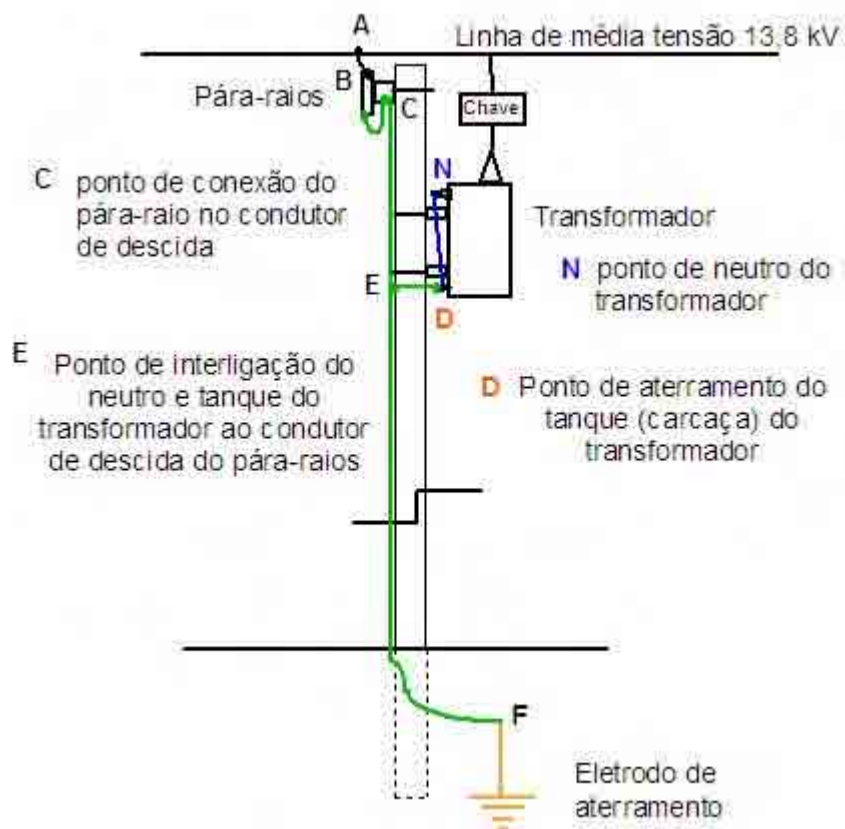


Figura 5.1 – Posto de transformação

O eletrodo de aterramento, normalmente é uma haste cantoneira galvanizada a fogo, com 2.000 mm de comprimento. As concessionárias instalam apenas uma haste por ponto de aterramento, tanto nos postos de transformação como nos pontos de neutro multiaterrado da BT. Algumas concessionárias utilizam uma ou mais haste tipo copperweld de 3000 mm de comprimento.

Sugestão

A Figura 5.2, mostra a proposta de alteração da topologia de conexão do condutor neutro e da carcaça do transformador no eletrodo de aterramento, a substituição da cordoalha de perfil cilíndrico por cordoalha de perfil retangular e a substituição do eletrodo de aterramento.

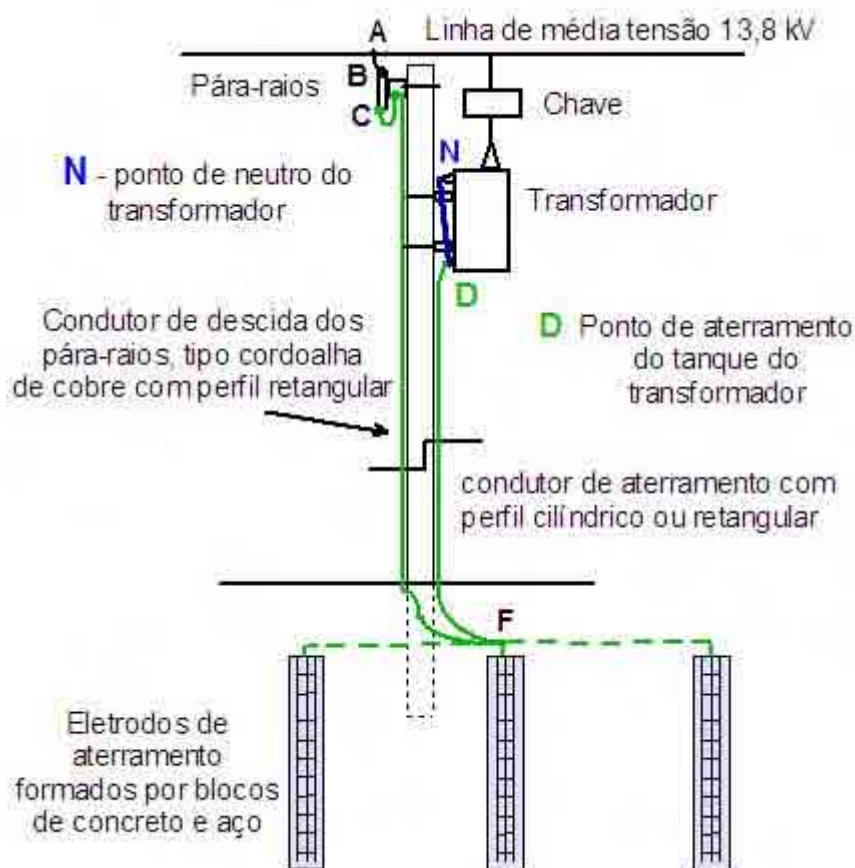


Figura 5.2 – Posto de Transformação com blocos de concreto como eletrodo de aterramento e alteração da topologia do condutor de aterramento

Uma das propostas deste tópico é a alteração da topologia de conexão dos condutores de aterramento. O neutro do transformador, ponto N e a carcaça, ponto D, devem utilizar um condutor independente e conectar-se diretamente no ponto F do eletrodo de aterramento. Como este condutor vai conduzir corrente de curto-circuito do 60 Hz, fenômenos lentos, o perfil pode ser cilíndrico ou retangular, sempre de mesma seção. A seção desse condutor deve ser calculada para suportar as correntes de curto-circuito da rede de distribuição e seu material pode ser cobre ou aço galvanizado.

A outra proposta é a substituição do condutor de descida dos pára-raios, do ponto C, até no ponto F, nos eletrodos de aterramento. Este condutor preferencialmente deve ter perfil retangular, pois as correntes que circularão neste condutor, são devidas aos fenômenos rápidos, como as descargas atmosféricas, fechamento e abertura de chaves, e as frequências serão da ordem de alguns megahertz. Nessas frequências o condutor com perfil retangular têm impedâncias até 10 vezes menores que os condutores com perfil cilíndrico. Esse condutor com perfil retangular pode ser de aço ou de cobre, o material nesses frequências não altera a condução das correntes provenientes dos surtos, ROUSSEAU (2004).

Os blocos possuem impedância menor que as hastes tipo copperweld, além de serem altamente higroscópicos. Dessa forma os blocos de concreto e aço irão manter os valores das resistências de aterramento em patamar bem menor, quando comparado com os valores das resistências de aterramento das hastes. A substituição das hastes tipo copperweld de 3000 mm de comprimento, ou das hastes tipo cantoneira de aço galvanizado de 2,40 metros, por blocos de concreto com a quantidade e seção de ferro necessária, para fazer frente às correntes de curto-circuito do 60 Hz, vem ao encontro com o apresentado no experimento. O aumento de material ferroso, concentrado na região de injeção das correntes provenientes dos surtos, principalmente os derivados das descargas atmosféricas, diminuirão a impedância dos eletrodos de aterramento e com isso os níveis de tensão no sistema de eletrodos de aterramento, tendem a manter-se baixos.

Por outro lado, um poste de concreto utilizado como estrutura do transformador, tem um comprimento de 11 metros ou mais, a parte enterrada é de 1,70 metros. Essa parte enterrada serve como o primeiro eletrodo do

sistema de eletrodos de aterramento do posto de transformação, ou talvez o único. Para a utilização do poste como condutor de descida e como eletrodo de aterramento, é necessário um estudo das seções dos aço presentes nos postes, com o intuito de se verificar se esses aços podem suportar as correntes de curto-circuito do 60 Hz, nos postos de transformação. A Figura 5.3 mostra como pode-se utilizar a estrutura de aço que se encontra no concreto do poste.

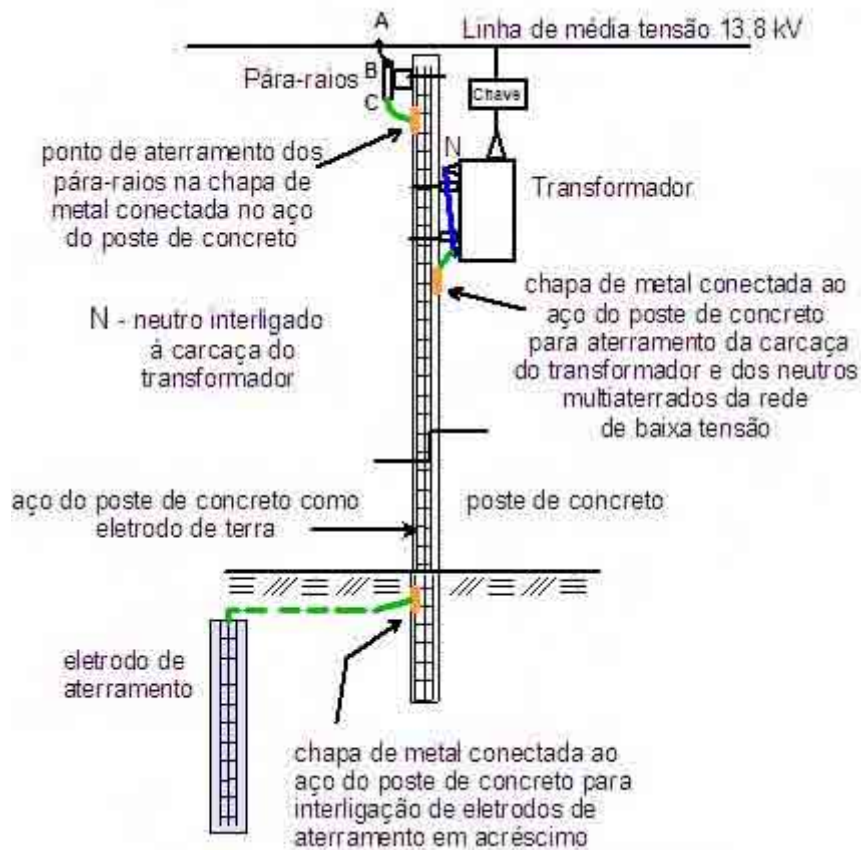


Figura 5.3 – Poste de concreto como eletrodo e condutor de descida

Um valor prático de 200 Ω para a impedância do conjunto: aço no interior do poste de concreto e sua conexão com o solo, obtido com as medições feitas por SEKIOKA et al (1995), mostram que a impedância do poste de concreto é similar à de um condutor vertical. Esses mesmos pesquisadores mostraram as vantagens em se utilizar o poste de concreto como condutor e eletrodo de aterramento, principalmente devido a higroscopia do concreto, material que predomina no poste de concreto. Sua utilização é equivalente a um tratamento do solo e não necessita de manutenção com a mesma periodicidade das hastes.

O aço como condutor e eletrodo de aterramento para escoar as correntes provenientes das descargas atmosféricas, devido à sua utilização em edifícios, vem provando a sua funcionalidade e suas propriedades elétricas.

Como foi mostrado nas simulações computacionais utilizando o programa ATP, o valor da resistência de aterramento, pouco interfere no valor dos surtos de tensões a que os equipamentos estarão sujeitos. A alteração do valor da impedância do conjunto: condutor de descida e eletrodo de aterramento, é que vai propiciar uma qualidade da energia elétrica nos pontos de entrega das edificações dos consumidores.

5.2.2 Rede de distribuição de BT

Situação atual

Nos postos de transformações, o neutro da rede de baixa tensão é conectado no sistema de eletrodos de aterramento e em toda a rede de distribuição de BT o neutro é contínuo e multiaterrado, como se pode observar na Figura 5.4. A distância entre os pontos de aterramento do neutro varia entre 150 a 200 metros.



Figura 5.4 – Rede de distribuição urbana com neutro multiaterrado

O sistema de eletrodo de aterramento do neutro multiaterrado é composto normalmente de uma haste terra tipo copperweld ou de uma haste tipo cantoneira de aço galvanizado e o condutor de conexão do neutro ao eletrodo de aterramento é um cabo de cobre nu, com perfil cilíndrico ou um arame de ferro galvanizado.

Sugestão

Para as correntes de curto-circuito na frequência de 60 Hz, considerados fenômenos lentos, o sistema de neutro multiaterrado existente pode até resultar em um bom sistema de eletrodos de aterramento, mas para altas frequências, considerados fenômenos rápidos, esse sistema passa a ser deficiente.

O sistema de aterramento do neutro da baixa tensão não precisa ser alterado com relação às distâncias entre eles, uma vez que será proposta alteração significativa nas entradas de energia elétrica dos consumidores.

Para um melhor desempenho dos sistemas de aterramento, poderá ser substituído o condutor de perfil cilíndrico de conexão do neutro no eletrodo de aterramento, por condutor com perfil retangular. Deve-se calcular a seção em mm² do condutor com perfil retangular, para atender as correntes de curto-circuito da baixa tensão na frequência de 60 Hz. O material do condutor pode ser de aço ou cobre, pois tem pouca influência na condução das correntes tanto de curto-circuito como na condução das correntes provenientes dos surtos.

Poderá também ser utilizado o aço embutido nos postes de concreto, conforme já detalhado, como condutor de descida e como eletrodo de aterramento, em substituição às cordoalhas.

Quanto aos eletrodos de aterramento, a substituição da haste tipo copperweld ou haste tipo cantoneira de aço, pelo bloco de concreto e aço, vem ao encontro ao experimento e agrega as vantagens do bloco ser higroscópico, ter maior volume de material ferroso próximo da injeção das correntes de surtos e tem resistência ôhmica menor que as hastes.

5.2.3 Entrada de energia elétrica dos consumidores

A partir das simulações e experimentos realizados, bem como pelos trabalhos apresentados no Estudo da Arte, Capítulo 2, um sistema eficiente de

proteção das instalações elétricas dos consumidores, que sofrem com os danos causados pelos surtos de tensão, devido às descargas atmosféricas que incidem direta ou indiretamente na MT e BT, passa obrigatoriamente pelo uso do aço já existente na armadura de concreto das edificações, ou seja: fundações, baldrame, colunas, vigas e lajes. Diante disso quando for referenciado aqui para frente *eletrodo de aterramento*, deve-se entender como condutores conectados no aço existente na armadura de concreto das edificações. O uso do aço embutido no concreto das edificações, vem em muito facilitar a criação do esquema TN-S no interior da edificação e possibilita criar um sistema de equipotencialização, conforme o que foi construído em uma edificação da CTEEP, e publicado no artigo "An experience on grounding design for plants including electric, electronic and communication systems", *anais do Ground'2000 International Conference on Grounding and Earthing*, Belo Horizonte MG (Capítulo 1, item 1.4).

5.2.3.1 – Conjunto de medição sem DPS

Situação atual

Existem muitos padrões de entrada de energia elétrica de consumidores, no sistema de baixa tensão, esses padrões dependem de cada concessionária de energia elétrica. A CPFL (2002) mostra em seu procedimento, como deve ser o aterramento da entrada de energia do consumidor para instalações elétricas de baixa tensão.

Não serão contemplados aqui os sistemas de entrada de energia elétrica de média tensão em edifícios com muitos pavimentos, tanto residenciais, comerciais ou industriais, pois se pode migrar para essas instalações, as propostas aqui apresentadas.

Para estudos, será utilizado um sistema de entrada de energia elétrica residencial, que se assemelha ao de um pequeno comércio ou pequena indústria, com duas fases e neutro, na tensão 220/127 volts ou 380/220 volts, podendo ser até mesmo um sistema trifásico. Esse sistema mostrado pela Figura 5.5, é muito utilizado num país como o Brasil

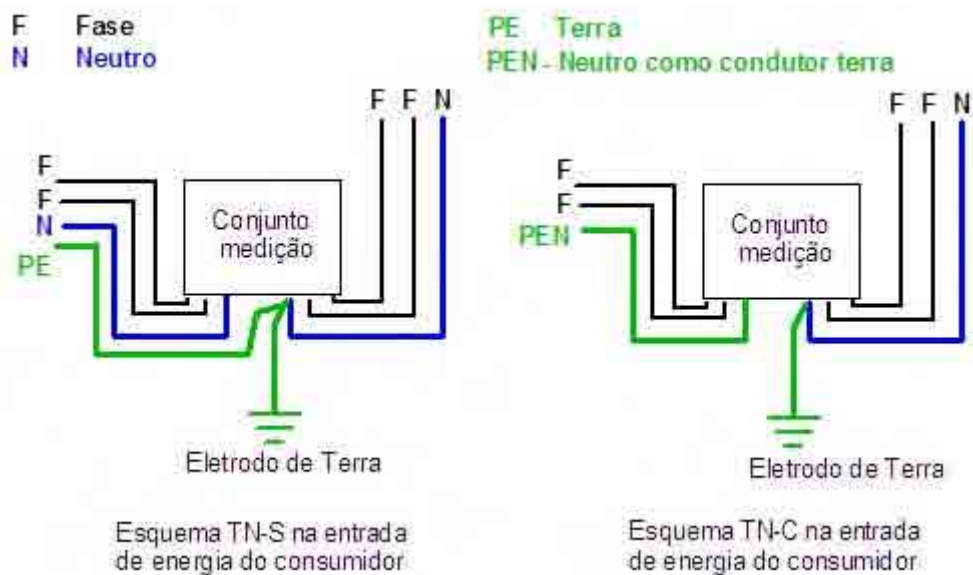


Figura 5.5 – Diagrama da entrada de energia do consumidor

Normalmente as instalações por parte das concessionárias de energia elétrica, não contemplam o condutor PE, elas utilizam o neutro como condutor de aterramento, esquema de ligação TN-C da NBR 5410 (2004), onde o condutor passa a ser denominado de PEN, esse sistema é muito utilizado também pelos consumidores, para aterramento de segurança no 60 Hz.

O esquema TN-S de ligação do condutor terra PE, é criado a partir do neutro da concessionária, no ponto de ligação do neutro na caixa de medição, com o condutor de interligação ao eletrodo de aterramento da entrada do consumidor. Essa topologia de conexão é a que normalmente acontece quando o consumidor se interessa em criar o condutor PE, porém não é a mais indicada, quando há necessidade de proteger os ETI.

O sistema de eletrodos de aterramento na entrada de energia elétrica em BT do consumidor, é composto de uma única haste terra tipo copperweld de 2,00 a 3,00 metros de comprimento, conforme as normas das concessionárias de energia elétrica.

Sugestão

Mesmo não contemplando o uso de DPS no QM, o ideal é montar o esquema de ligação a terra TN-S, passando a existir o condutor neutro e condutor PE em separados.

Deve-se no entanto tomar cuidado ao criar o condutor PE. A sua conexão deve ser diretamente no eletrodo de aterramento e não derivando do ponto de conexão do neutro na caixa de medição, isso também vale para o condutor neutro que adentra as instalações elétricas do consumidor, a Figura 5.6 ilustra bem essa topologia.

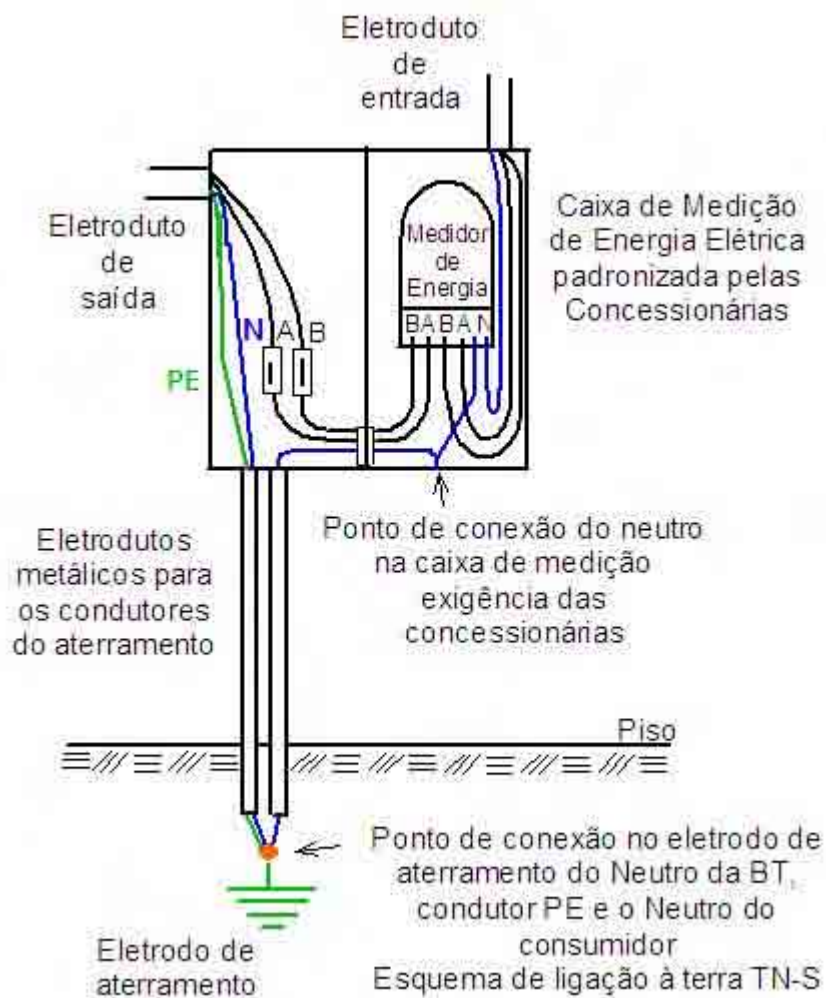


Figura 5.6 – Conjunto de medição de energia elétrica, no esquema TN-S sem DPS

As seções em mm^2 , do neutro e PE, derivam do projeto de instalações elétricas.

Os condutores PE e o neutro do consumidor, devem ser isolados para 750 volts, podem ter perfil cilíndrico devido à distância entre o QD e o QM.

Nessa condição, o condutor PE é criado para aterramento de segurança. Esses dois condutores devem estar separados do condutor neutro derivado da BT, em eletrodutos metálicos diferentes.

Essa forma de montar o esquema de ligação TN-S, visa propiciar às correntes induzidas no neutro, provenientes da BT, um caminho único ao eletrodo de aterramento de baixa impedância, não deixando que as mesmas sejam conduzidas para o interior das instalações elétricas do consumidor pelo neutro ou pelo PE.

A proposta para que os condutores: neutro e PE, conectados ao eletrodo de aterramento, sejam isolados, visa eliminar possíveis ruídos que interferem no sistema de comunicação e no caso de curto-circuito na frequência 60 Hz, não deve haver contato direto entre esses condutores.

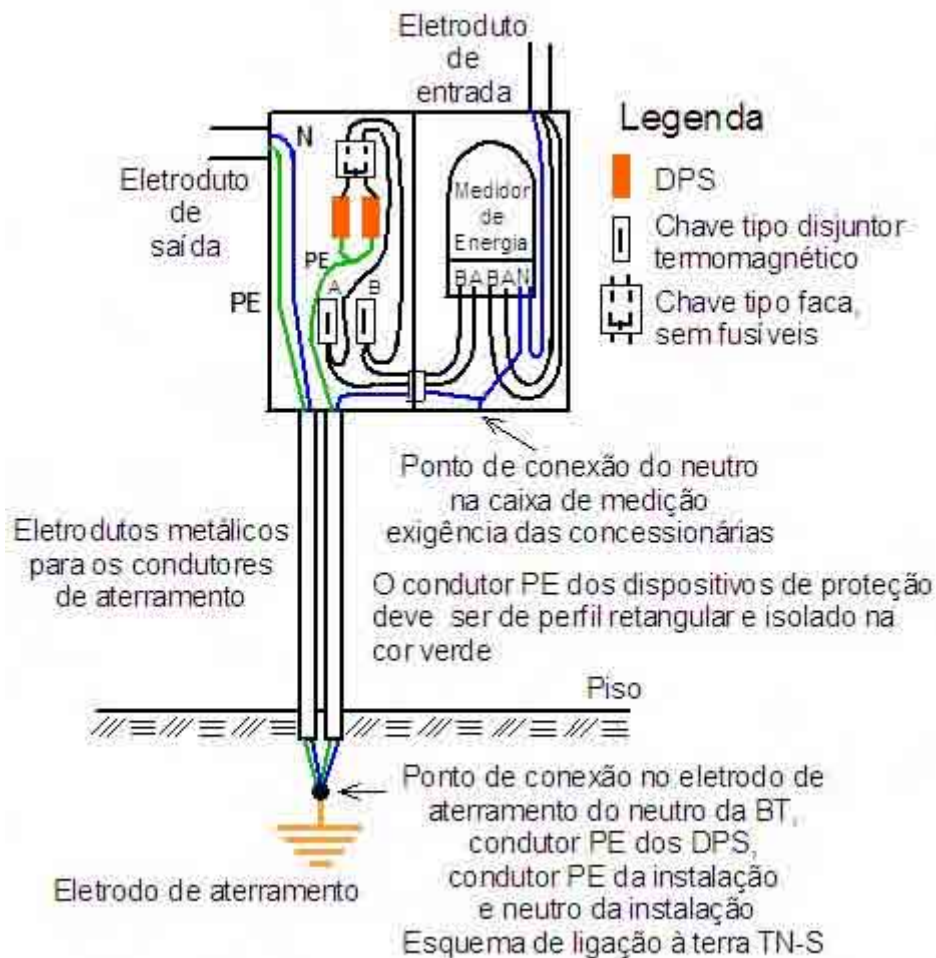
5.2.3.2 – Conjunto de medição com DPS

Situação atual

Normalmente não se encontra na entrada de energia elétrica do consumidor, sistema de proteção contra surtos e o QM é conforme foi mostrado na Figura 5.5. Através da Figura 5.6, da página anterior, foi proposto um novo padrão de QM para o consumidor, utilizando o esquema de aterramento TN-S, porém com uma forma diferente de aterramento do neutro e de como criar o PE.

Sugestão

A Figura 5.7 representa uma forma de instalação dos dispositivos de proteção, junto ao conjunto de medição de energia elétrica na entrada de energia do consumidor. No desenho da Figura 5.7 foram retirados os condutores fases de derivação para a instalação do consumidor, como forma de se observar melhor a instalação dos dispositivos de proteção e seus condutores. A chave sem fusíveis, seca, antes dos dispositivos de proteção é necessária para facilitar a manutenção. Uma vez que não passa corrente normalmente pelos dispositivos de proteção, pode-se manobrar essa chave sem receio, no caso de ser necessário substituí-los.



Obs: todos os condutores a serem conectados ao eletrodo de aterramento devem ser isolados para 750 volts.

Figura 5.7 – Conjunto de medição de energia elétrica, no esquema TN-S com DPS

Observar que a alimentação dos DPS é feita antes dos disjuntores termomagnéticos que servem como chave de manobra e proteção de sobrecorrente das instalações do consumidor, essa prática se faz necessária porque se os DPS fossem conectados após os disjuntores, nas suas atuações frente às descargas atmosféricas, os disjuntores termomagnéticos atuariam, deixando as instalações sem energia elétrica.

Como esta é a primeira fase da cascata de DPS, é necessário que os mesmos tenham capacidade de escoar correntes de surtos da ordem de 40 a

45 kA, na tensão de serviço da BT. A capacidade de dissipação de energia é padronizada pelos fabricantes do varistor de ZnO, devendo estar entre 300 a 400 Joules, para um dispositivo de 40 a 45 kA. É necessário que esse DPS, contenha sinalização, para que o eletricitista de manutenção saiba das condições do dispositivo.

Conforme as medições realizadas no Japão na área urbana, HIRAI et al, (2002), as correntes de surtos devido às descargas atmosféricas estão na ordem de 25 kA. Então, iniciar a cascata com dispositivos tendo a possibilidade de escoar correntes de surtos de até 40 a 45 kA, tende a prolongar em muito a vida útil desses dispositivos. Nas simulações foram obtidos valores inferiores a 25 kA na BT, porém apesar das blindagens por objeto, CIREN/CIGRÉ, (1998), há de se levar em consideração as induções indiretas, que irão se somar às conduzidas pelo transformador, diante disso deve-se trabalhar com DPS cujas capacidades de condução da correntes de surtos estejam entre 40 e 45 kA, apesar de muitos fabricantes de DPS em seus catálogos de produtos proporem DPS entre 8 e 10 kA.

Na zona rural, o primeiro dispositivo da cascata, deve ter possibilidade de escoar correntes de surto da ordem de 80 a 100 kA. Essa informação é de ordem prática, porém se for levado em consideração que praticamente não existem as blindagens por objeto na zona rural, ou se existem elas são esparsas, chegaremos a esses valores na BT.

O condutor PE dos dispositivos de proteção deve ter perfil retangular e sua secção deve estar em torno de 4 mm^2 , pois o tempo a que esse condutor estará exposto durante as correntes das descargas atmosféricas não o danificará. Normalmente utiliza-se condutor com perfil retangular de 2 a 3 mm de espessura e 10 a 15 mm de largura, devido apenas ao esforço mecânico na instalação e manutenção. Esses condutores de preferência devem ser isolados para 750 volts e as suas partes em contato com o solo devem estar estanhada e protegidas com massa de vedação, para evitar um processo rápido de corrosão. A conexão do condutor neutro ou condutor PE, no eletrodo de aterramento pode ser por meio de solda, conexão por pressão ou apenas enrolado no aço da construção.

Em alguns casos é necessária a colocação de uma caixa em chapa de metálica, ao lado da caixa de medição, para abrigar os DPS, devidos às caixas

de medições padronizadas pelas concessionárias serem pequenas, comportando somente os disjuntores e/ou as chaves de manobra e proteção.

O trabalho apresentado no seminário em Belo Horizonte 2000, com o título: "A practical case of lightning protection for sensitive electronic equipment", *anais do Ground'2000 International Conference on Grounding and Earthing*, mostra o projeto de um sistema completo de proteção de ETI, ocorrido em 1998. Através do acompanhamento sistemático do desempenho desse sistema desde a sua instalação, pode-se verificar que não ocorreram danos nos equipamentos eletrônicos, devido às descargas atmosféricas. Antes de se efetuarem as alterações propostas, eram constantes os danos nos equipamentos eletrônicos, frente a qualquer ocorrência de descargas atmosféricas. Essas de instalações estão na zona rural de Bauru SP.

5.2.4 Instalações elétricas internas dos consumidores

As dificuldades em se representar as impedâncias em altas frequências nas instalações elétricas dos consumidores ligados na BT, tornam praticamente impossível a elaboração de um modelo detalhado e absoluto para as condições encontradas na realidade, BASSI (1999). Diante disso, os valores das correntes de surtos provenientes das descargas atmosféricas no interior das instalações elétricas dos consumidores, para a instalação dos DPS, são valores obtidos através das muitas instalações executadas.

Outra situação singular que acontece devido às ocorrências de descargas atmosféricas, é a dificuldade que os consumidores e os profissionais da área elétrica tem em identificar os danos materiais ocasionados por essas descargas atmosféricas, pois não dispõem de documentação, regras e estudos, que mostrem com clareza, como identificar esses danos. Em alguns casos as concessionárias ou as seguradoras, insistem em exigir do consumidor um ponto onde a descarga atmosférica atuou na propriedade do consumidor. Apesar da exigência não ser cabível, muitas vezes ela consta nos contratos, através de uma redação que induz ser necessário identificar o ponto de atuação das descargas atmosféricas. É uma condição difícil de localizar, porque normalmente as descargas atmosféricas não atuam de forma direta nas instalações dos consumidores, sabe-se que são as descargas indiretas e as correntes

conduzidas pela rede de distribuição da concessionária, que atuam nas instalações elétricas dos consumidores. No caso de consumidores na zona rural, até pode ocorrer incidências diretas. Em caso de edifícios com vários pavimentos, a ocorrência de descargas atmosféricas diretas nesses edifícios é quase 100%, porém esse caso deve ser estudado diferente dos edifícios com um ou dois pavimentos. Os edifícios com vários pavimentos são providos de blindagens naturais, devido à quantidade de aço no concreto e as distâncias entre as colunas, vigas e lajes, que dificultam a entrada das frequências entre 500 kHz e 1 MHz.

Quando a descarga atmosférica acontece muito próximo do consumidor, as descargas indiretas, atingem as instalações elétricas no interior da edificação do consumidor, induzido diretamente na fiação dentro da sua propriedade. Porém esse tipo de ocorrência se confunde com as correntes induzidas na rede de distribuição da concessionária, as quais são conduzidas para o interior da propriedade do consumidor pelo ramal de serviço, ficando difícil a separação das exigibilidades entre consumidor, concessionária do serviço público de energia elétrica e as companhias de seguro.

As instalações elétricas dos consumidores, sejam residenciais, prediais, comerciais ou industriais, que se interessem em proteção total das correntes induzidas em suas fiações, devem retornar ao uso de eletrodutos metálicos, pois estes oferecem blindagem total. A própria edificação em alvenaria já é uma blindagem, blindagem por objeto, CIREC/CIGRÉ (1998).

Uma forma de proteção das instalações do consumidor é a proteção por zona, ou efeito cascata. Essa forma de instalação dos dispositivos de proteção consta das normas de diversas empresas concessionárias de energia elétrica e de telecomunicações, tanto no Brasil como no exterior, além de estar presente em muitos artigos e livros publicados por autores nacionais e estrangeiros.

Neste contexto serão utilizados os procedimentos publicados no: Manual de Aterramento e Proteção dos Equipamentos de Tecnologia da Informação, CTEEP (2001), como complementação às idéias aqui desenvolvidas.

Quanto ao uso do aço embutido no concreto das edificações, como eletrodo de aterramento, a NBR 5410 (2004), destaca que "preferencialmente, uso das próprias armaduras do concreto das fundações". Essa norma brasileira, vem afirmar o que a muito já se observa, principalmente na Europa, na utilização

do aço encontrado gratuitamente no concreto das armaduras das edificações: fundações, baldrame, colunas, vigas e lajes.

Para instalação de dispositivos de proteção junto ao ETI, uma boa filosofia é o sistema de ponto único, desenvolvido e apresentado no artigo: Sistema de proteção de equipamentos de tecnologia da informação publicado na Revista Eletricidade Moderna, item 1.4.

Essa filosofia de ponto único foi amplamente divulgada por muitos autores logo que começaram a aparecer os primeiros equipamentos computadorizados no Brasil. Trata-se de um sistema que congrega todos os cabos de aterramento de um conjunto de equipamentos, procurando através de um sistema radial, dificultar o retorno das correntes de surtos para os módulos eletrônicos dos equipamentos. O outro sistema seria a instalação de uma malha equipotencializada, muito difundida e utilizada em centros de computação e estações de telecomunicações. O sistema de utilização do aço embutido no concreto, como foi construído no edifício da CTEEP, conforme mostrado no artigo: An experience on grounding design for plants including electric, electronic and communication systems, item 1.4, faz com que a instalação elétrica passe a contar com uma malha equipotencializada, ou com uma denominação mais apropriada um anel equipotencializado.

A NBR 5410 (2004) destaca que junto ou próximo do ponto de entrada da alimentação elétrica deve ser instalado um barramento BEP, criando-se um ponto único de aterramento, neste caso o BEP. O comprimento do condutor de aterramento é um empecilho para uma possível equipotencialidade, devido à impedância própria do condutor, quando submetido às altas frequências entre 500 kHz e 1 MHz. O BEP, como proposto, funciona mais como ponto de aterramento do 60 Hz, para as correntes de curto-circuito do sistema. Esse sistema de aterramento, da forma como descrito na norma, é um empecilho para proteção dos ETI. A BEP está criada no QM, conforme já foi mostrado.

Ao se optar em utilizar o aço embutido no concreto, com várias interligações dos condutores de aterramento ao aço da construção, em qualquer local que se conecte o ponto de aterramento do ETI, esse ponto estará mais próximo da equipotencialidade do que o conectado ao BEP, onde se têm condutores de aterramento com comprimentos longos.

ROUSSEAU (2000), defende a necessidade de equipotencializar as situações de aterramento de todas partes metálicas, além dos condutores: neutro, de aterramento e do SPDA, conforme determina também a NBR-5410 (2004). Mostra também que, em edificações onde as linhas elétricas e de comunicações não são blindadas, é necessário a utilização do DPS contra os Surtos. Entende que toda vez que se instala um SPDA, é necessário a instalação de DPS na entrada das linhas que chegam a edificação, teoria da proteção por zona ou instalação de DPS em cascata.

As edificações podem ser consideradas um SPDA, NBR 5419 (2001), pois elas são constituídas de vigas, lajes, colunas, baldrame etc, onde se tem aço como um dos agregados.

5.2.4.1 Quadro de distribuição de energia sem DPS

Para aterramento de segurança das pessoas, o esquema TN-C, atende perfeitamente, pois como foi mostrado, o neutro da concessionária de energia elétrica sendo multiterrado, vai operar com uma baixa resistência de aterramento, que atende perfeitamente o escoamento das correntes de curto-circuito. Para proteção dos ETI Equipamentos de Tecnologia da Informação, o esquema TN-S se comporta melhor, pois os equipamentos são normalmente conectados na fase e no neutro e passam dessa forma a contar com um ponto de aterramento de referência, isento de circulação de corrente.

Do mesmo modo como foi proposta a criação do condutor PE na entrada de energia elétrica do consumidor, neste item está se propondo a criação do condutor PE no quadro de distribuição de energia elétrica no interior da edificação, esquema de ligação TN-S, partindo do esquema TN-C da concessionária de energia elétrica e do QM. A Figura 5.8 ilustra essa proposta.

Pode-se observar que do mesmo modo que foi proposto na entrada de energia elétrica, o condutor neutro e o condutor PE, devem ser distintos, até no sistema de eletrodo de aterramento.

O condutor PE, deve acompanhar as mesmas características já descritas para esse tipo de condutor, quando se utiliza DPS, ou se quer aterrar ETI. A conexão do condutor neutro ou condutor PE, no eletrodo de aterramento pode

ser por meio de solda, conexão por pressão ou apenas enrolado no aço da construção.

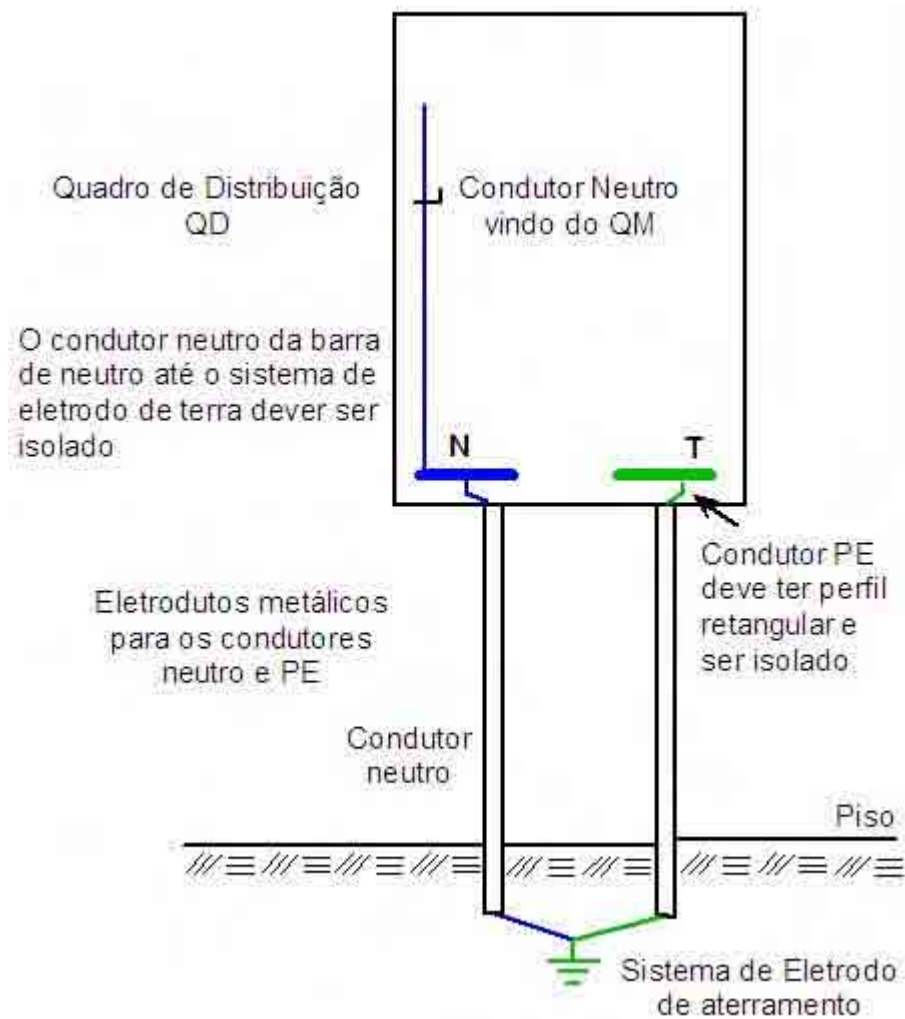


Figura 5.8 - Esquema TN-S no quadro de distribuição a partir do esquema TN-C do quadro de medição

A Figura 5.9 mostra como deve ser montado o esquema TN-S no quadro de distribuição no interior da edificação a partir do esquema TN-S, vindo do quadro de medição de energia.

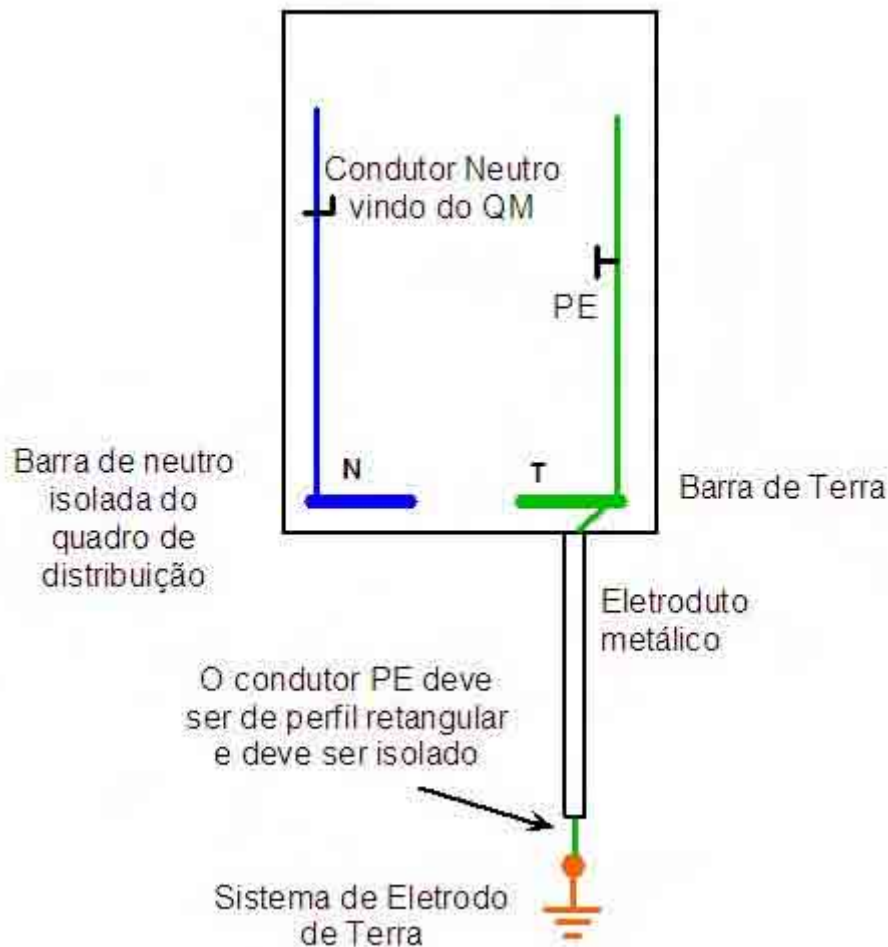


Figura 5.9 - Esquema TN-S no quadro de distribuição a partir do esquema TN-S do quadro de medição

Para proteção dos ETI se faz necessário conectar novamente o condutor PE ao eletrodo de aterramento, junto do equipamento, pois o aumento de conexões do condutor PE no sistema de eletrodos de aterramento, melhora a equipotencialização do condutor PE e diminui a distância entre os pontos de conexão do sistema de aterramento dos equipamentos nos eletrodos.

E necessário que a barra de Terra esteja o mais próximo possível do eletroduto de conexão ao eletrodo de aterramento.

5.2.4.2 Quadro de distribuição de energia com DPS

A Figura 5.10 mostra a forma como devem ser instalados os DPS numa caixa típica de distribuição de energia elétrica, no interior da edificação do consumidor, que utiliza disjuntores termomagnéticos para proteção dos circuitos e utiliza como chave geral "CH", uma chave do tipo pacco, que é uma chave liga/desliga rotativa e sem fusíveis, utilizada somente para manobra.

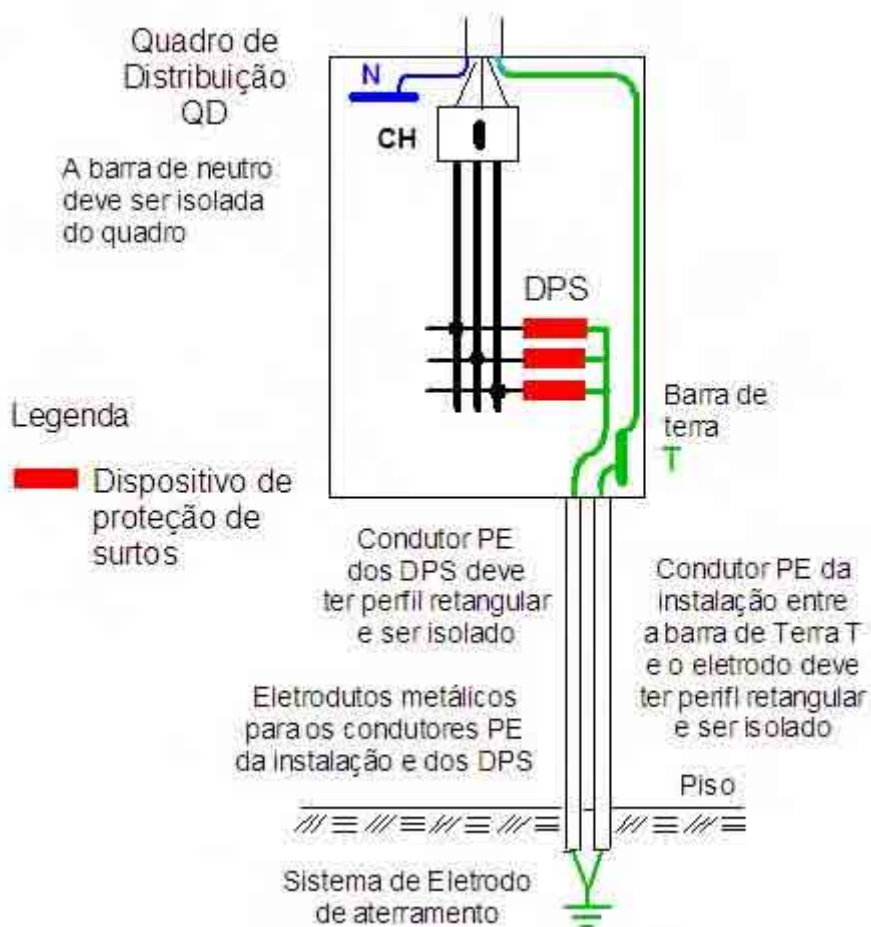


Figura 5.10 – Instalação de DPS em quadro de distribuição com chave rotativa tipo pacco, sem fusíveis

Os DPS, normalmente estão acondicionados em caixa acompanhando o desenho dos disjuntores termomagnéticos de proteção e manobras de circuitos elétricos, as caixas de distribuição tem seus trilhos de conexão padronizados para instalação dos disjuntores.

O fato do condutor PE dos DPS estar diretamente conectado no eletrodo de aterramento e não na barra de terra T, prende-se ao fato do eletrodo de aterramento ser um ponto de com impedância mais baixa que a barra de terra T. Esse arranjo visa eliminar as prováveis correntes indesejáveis que possam trafegar pelos condutores de aterramento.

A Figura 5.11 mostra a forma como devem ser instalados os DPS numa caixa típica de distribuição de energia elétrica para disjuntores termomagnéticos, se a chave geral "DIJ" for do tipo disjuntor termomagnético, utilizado para manobra e proteção.

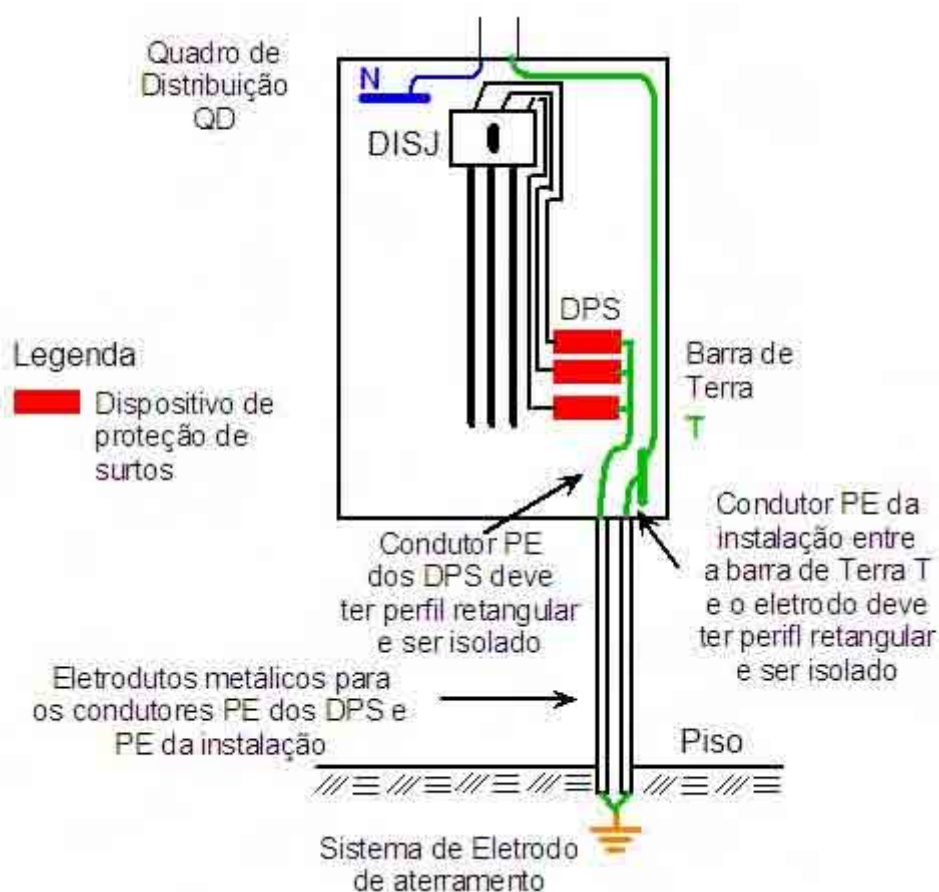


Figura 5.11 – Instalação de DPS em quadro de distribuição com disjuntor termomagnético como chave geral

Nesse caso instalam-se os DPS no trilho dos disjuntores termomagnéticos, mas a alimentação dos mesmos deve ser antes do disjuntor termomagnético geral "DISJ", pois a corrente de surto pode abrir o disjuntor e

deixar a instalação sem energia elétrica. Para substituir os dispositivos de proteção em uma eventual manutenção, deve-se utilizar a chave geral do QM, como chave de manobra.

O condutor PE dos DPS e da instalação deve acompanhar as mesmas características dos demais já descritas.

Não foram representados os condutores fase que entram no disjuntor termomagnético geral do quadro de distribuição, para facilitar a visualização dos condutores de alimentação dos dispositivos de proteção.

Neste segundo estágio da cascata de DPS, eles não necessitam ter uma grande capacidade de escoamento da corrente de surtos, normalmente neste estágio se instala dispositivos de proteção com capacidade de 20 a 25 kA, sendo que a tensão de serviço deve atender a tensão da rede de energia elétrica das instalações. A capacidade de dissipação de energia é padronizada pelo fabricante e pode estar próximo de 250 Joules. É necessário ainda conter sinalização para que o eletricitista de manutenção saiba das condições do dispositivo. Em alguns casos quando se têm vários quadros no interior da edificação, pode-se utilizar protetores com capacidade de escoamento da corrente abaixo de 20 kA, entre 8 e 10 kA, para QD que derivem de um QD geral, pois esses DPS seriam a terceiro estágio da cascata.

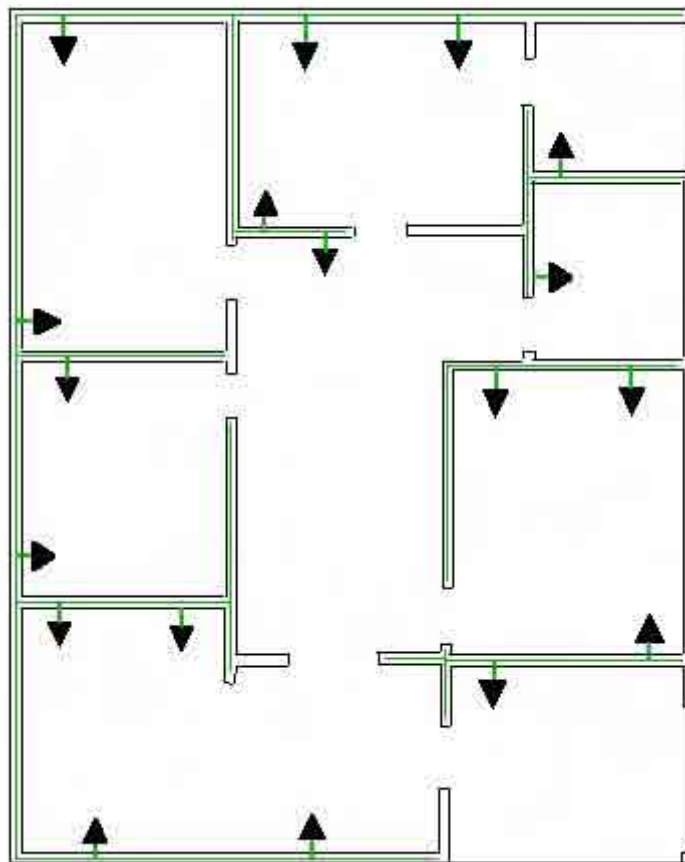
5.2.4.3 Conexão do ponto de aterramento do ETI e do seu DPS no eletrodo de aterramento

A proposta é, a despeito do que já foi feito no edifício da CTEEP, interligar o condutor PE, que parte da barra de terra do quadro de distribuição e que acompanha os condutores fases e neutro de cada circuito elétrico, esquema de ligação da NBR 5410 (2004), ao aço embutido no concreto das edificações, em cada ponto de força, como mostrado na Figura 5.12. Essa forma de aterramento garantirá ao equipamento estar conectado no ponto de força e num ponto de aterramento de baixa impedância, possibilitando uma referência de terra equipotencializada.

O condutor PE de cada circuito vai estar no terceiro pino do ponto de força ou em ponto de aterramento de equipamentos tipo motores, aquecimento de água, etc. Como cada ponto vai estar no eletrodo de aterramento, como já foi

descrito anteriormente, é o aço do concreto das edificações, esse sistema estará totalmente equipotencializado, formando anéis de equipotencialização.

É importante a verificação dos serviços de conexão do condutor no aço do concreto das edificações, antes das conexões serem cobertas com concreto e muito importante, verificar a continuidade elétrica do aço entre todos os elementos que compõem o conjunto estrutural da edificação.



Legenda

- ➔ Ponto de força com o terceiro pino, condutor PE, conectado no eletrodo de aterramento.
- aço do baldrame como eletrodo de aterramento

Figura 5.12 – Pontos de força com terceiro pino equipotencializado através do aço embutido no concreto da edificação

A Figura 5.13, mostra em detalhe como é conectado o condutor PE no aço do concreto das fundações, baldrame, vigas, de uma edificação.

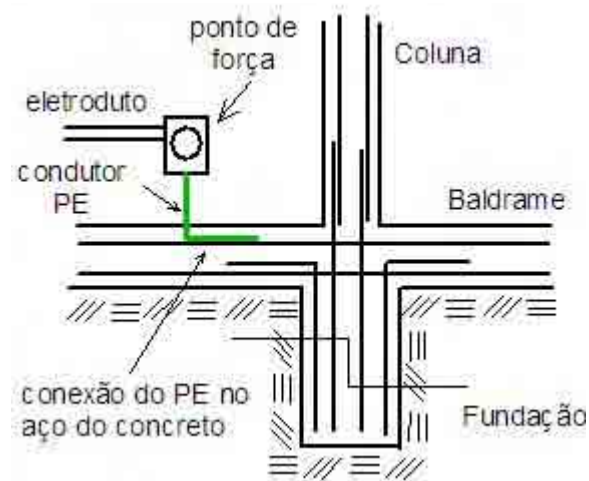


Figura 5.13 – Detalhes do ponto de força com PE conectado ao aço

No ponto de aterramento, terceiro pino da tomada de força, estarão conectados os pontos de aterramento de segurança dos equipamentos elétricos ou eletroeletrônicos. No ponto de aterramento de segurança dos equipamentos está conectado o DPS interno do equipamento, deve-se lembrar que não é regra a existência dessa proteção, que seria o quarto estágio da cascata. No ponto de aterramento, através do terceiro pino da tomada de força, também estará conectado o DPS, que será o terceiro estágio da cascata de protetores. Esses DPS normalmente são as régulas de tomadas de força, utilizadas freqüentemente com os ETI, ou serão os DPS dos equipamentos elétricos ou ETI que não utilizam as régulas de tomadas de força.

O condutor neutro, se aterrado, para as redes de distribuição de energia elétrica cujos transformadores são do tipo triângulo/estrela aterrada, já está conectado ao aço embutido no concreto, na entrada da energia elétrica, conforme esquema de aterramento TN-S, proposto neste trabalho, atendendo ao proposto para criação do BEP, porém via aço embutido no concreto. Deve-se lembrar de interligar os aços embutidos nas fundações e baldrames dos muros das edificações com os aços embutidos no concreto das edificações.

No caso de existir o condutor do SPDA, este também deve conectar-se ao aço embutido no concreto, conforme consta na NBR 5410 (2004) e NBR 5419 (2001), em qualquer lugar, pois o aço embutido no concreto é o meio equipotencializado do eletrodo de aterramento, apesar da NBR 5410 (2004), propor a criação de uma barra de equipotencialização BEP, ou na entrada de energia do consumidor ou próximo dos quadros de distribuição de energia elétrica.

A Figura 5.14 mostra o volume de aço da armadura de concreto de uma edificação com um pavimento.



Figura 5.14 – Aço da armadura de concreto

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho concentrou-se nas instalações elétricas da MT e BT, com referência ao sistema de aterramento do posto de transformação, sistema de neutro multiterrado e na proteção e aterramento das instalações elétricas do consumidor. A partir dos estudos efetuados em trabalhos correlatos, experimentos e simulações computacionais, sugere-se as seguintes alterações:

6.1.1 Posto de transformação:

- Substituir o condutor de descida do cabo de aterramento dos pára-raios de linha, por condutor de cobre ou aço galvanizado com perfil retangular.
- Conectar o neutro e o tanque do transformador diretamente no eletrodo de aterramento.
- Substituir a haste cantoneira ou haste tipo copperweld por um ou mais blocos de concreto e aço, no sistema de eletrodos de aterramento do posto de transformação.

6.1.2 Baixa tensão com neutro multiterrado:

- Substituir a haste cantoneira ou haste tipo copperweld por blocos de concreto e aço, no sistema de eletrodos de aterramento do neutro multiterrado.

- Substituir o condutor de descida do cabo de aterramento do neutro, por condutor de cobre ou aço galvanizado com perfil retangular.

6.1.3 Instalações elétricas do consumidor:

- Confeccionar o esquema TN-C e TN-S na entrada de energia elétrica sem DPS, utilizando o aço existente no concreto das fundações como eletrodo de aterramento, sendo que o neutro do TN-C e o neutro e o PE do TN-S, do lado do consumidor, devem se conectar diretamente no eletrodo de aterramento.
- Confeccionar o esquema TN-S na entrada de energia elétrica com DPS, utilizando o aço existente no concreto das fundações como eletrodo de aterramento, sendo que o neutro e o PE da instalação e o PE dos DPS no esquema TN-S, do lado do consumidor, devem se conectar diretamente no eletrodo de aterramento e o condutor PE dos DPS, deve ser uma cordoalha de cobre com perfil retangular.
- Nos QD, instalar DPS, utilizando o aço existente no concreto das fundações como eletrodo de aterramento, o PE da barra de terra e o PE dos DPS, devem se conectar diretamente no eletrodo de aterramento e esses condutores devem ser do tipo cordoalha de cobre com perfil retangular.
- Formar um anel de equipotencialização, utilizando como sistema de eletrodos de aterramento o aço existente no concreto das fundações e dos baldrames em substituição a BEP, conectando o condutor PE do terceiro pino dos pontos de força, dos circuitos elétricos, no aço existente no concreto das fundações e dos baldrames.

6.2 FUTURAS LINHAS DE ESTUDOS

Como prospecção, vislumbram-se as seguintes linhas de estudos como continuidade desta pesquisa:

- O poste de concreto, para ser utilizado como condutor de aterramento e como eletrodo de terra, deve ter seu projeto estrutural analisado, observando os valores e os tempos de atuação dos surtos de tensão, provenientes das descargas atmosféricas e das correntes de curto-circuito.

- Desenvolvimento de programa computacional para cálculo da impedância do aço existente nos blocos de concreto, nos postes de concreto e nas fundações, baldrame, vigas, colunas e lajes de uma edificação.

- Estudo dos efeitos das correntes de surtos, devido às descargas atmosféricas, no solo, quando se utiliza o bloco de concreto, o poste de concreto e as fundações, vigas, colunas e lajes da edificação, como eletrodo de aterramento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. E.; CORREIA DE BARROS, M. T. Comportamento de resistência de terra face às descargas atmosféricas de elevada intensidade. In: ELAB'96 Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia. 2., 1996, **Anais...** comunicação 62, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410:** Instalações Elétricas e Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 2004. ISBN 85-07-00036-3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419:** Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2001.

BASSI, W. **Estudo de surtos em redes secundárias de distribuição devido a descargas atmosféricas diretas na rede primária.** 1999. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CIPOLI, J. A. **Engenharia de distribuição.** Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda. 1993. 324 p., 23 cm. Bibliografia: p. 165-181, 207-281. ISBN 85-85360-46-1.

CIREN/CIGRE - GRUPO DE TRABALHO N° 5. Sobreensões provocadas por raios em redes de média e baixa tensão. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, ano XXVI, n. 293, p. 70-83, ago. 1998.

CORREIA DE BARROS, M.T. Proteção de subestações contra as descargas atmosféricas. In: SIPDA Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 4, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEE/USP - FEG/UNESP, 1997. p. apêndice.

CPFL – COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **Aterramentos na Distribuição**. Instrução, vs 1.0. Campinas, 2000.

CPFL – COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. **Fornecimento em tensão secundária de distribuição**. Procedimento, vs 1.7. Campinas, 2002.

DARVENIZA M. Lightning protection of sub-transmission an distribution systems. In: SIPDA Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 4, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEE/USP – FEG/UNESP, 1997. p. 263-300.

DE CONTI, A. R., DUARTE, J. V. P., PEREIRA, C., VISACRO FILHO, S. A influência das descargas atmosféricas na qualidade de energia para o consumidor. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, ano XXXI, n. 345, p. 132-146, dez. 2002.

HIRAI, T, TAKINAMI, T E OKABE, S. Monitoramento de descargas atmosféricas em rede de distribuição reais. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, ano XXXII no 362, p 90-103, maio 2004.

KANASHIRO, A.G. **Modelagem de transformadores de distribuição para altas freqüências**. 2001. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KILDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra – D.C. Luzzatto. 1995. 214 p., 23 cm. Bibliografia: p. 209-214. ISBN 85-241-0317-5.

LACERDA, M. Cálculo do efeito skin em condutores de seção retangular. In: SIPDA Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 4, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEE/USP - FEG/UNESP, 1997. p. 133-136.

LEITE, C. M. e PEREIRA FILHO, M. L. **Técnicas de aterramentos elétricos**. São Paulo: Officina de Mydia Editora Ltda. 1995, 95 p., 23 cm. Bibliografia: p. I-48 – I-50.

LEON, J. A. M. **Sistemas de Aterramento**, São Paulo: Érico do Brasil Comercio e Indústria Ltda. 1982. 206 p., 21 cm. Bibliografia: p. 5-92.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. vol 1. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos SA. 1994. 521 p., 23 cm. Bibliografia: p. 1-51.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis**. São Paulo: Editora Érica Ltda. 1997. 318 p., 24 cm. Bibliografia: p. 274-278.

MANUAL PROTEL NA TELESP – Grupo TELEBRAS – 1995. Princípios para projeto de proteção elétrica da rede externa de telecomunicações – Filosofia PROTEL, prática 235-600-002-SP de 1995.

ONSPINA, F. C. **Tierras Soporte de la Seguridad Eléctrica**. Santa Fe de Bogotá: M. Rojas y Asociados.1998. 173 p., 21 cm. Bibliografia: p. 168–173. ISBN: 958–33–0790-4.

PAULINO, J. O. S. **Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por descargas Atmosféricas**. 1994. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PEREIRA, M. P. Modelagem de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) em estudos de sobretensões de manobra. **Revista Iberoamericana Del ATP**. Ano 2, vol. 1, n. 2, jun. 1999.

http://iitree.ing.unlp.edu.ar/estudios/caue/vol1_num2.htm.

PIANTINI, A., BASSI, W., JANISZEWSKI, J.M., MATSUO, N.M. d NOSAKI S. Solicitações elétricas em dispositivos de proteção contra surtos em rede de baixa tensão. **Eletricidade Moderna**. São Paulo. ano XXXI, n. 354, p. 128-137, set. 2003.

PIANTINI, A., JANISZEWSKI, J. M. Simulação de pára-raios em escala reduzida para estudos de sobretensões. In: SIPDA Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, 4, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IEE/USP – FEG/UNESP, 1997. p. 89-94.

POHL DA SILVA, S., GONÇALVES, J., DE FRANCO, J. L. e PIANTINI, A. Avaliação do desempenho de redes de distribuição frente a descargas atmosféricas. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, ano XXXII, n 357, p 86-97, dez 2003.

PROQUIP – Programa de Qualificação de Materiais e Equipamentos da CESP. Avaliação do desempenho elétrico dos pára-raios de distribuição. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, ano XXV, n. 285, p 96-112, dez. 1997.

ROUSSEAU, A. Avaliação de riscos no uso de dispositivos de proteção contra surtos. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, ano XXXII, n. 357, p 114-125, dez 2003.

ROUSSEAU, A. Como obter um aterramento adequado para proteção contra raios. **Eletricidade Moderna**. São Paulo, ano XXXII no 358, p. 118-127, janeiro 2004.

SALARI FILHO, J.C. Desempenho de linhas de distribuição e de transmissão à incidência de descargas atmosféricas diretas. **CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica**, empresa do sistema ELETROBRAS. Relatório Técnico DPP/PER 739/2002 – projeto 1462, 2002, 148 p.

SÁNCHEZ, H. T. et al. **Calidad de la Energía Eléctrica**. Bogotá, Colombia: Editor Asociacion Colombiana de Ingenieros. 2001, 320 p., 24 cm. Bibliografía: p. 22-27, 74-89, 177-196. ISBN 958-33-2948-7.

SEKIOKA, S., YOKOYAMA, S. et al. Measurements of A Concrete Pole Impedance with An Impulse Current Source. In: IPST'95 International Conference on Power Systems Transients, Lisboa Portugal. **anais..3-7**, p. 457-462, 1995.

SUETA, H. E. e BURANI, F. Experimental comparison of steel rebars junctions in concrete columns used as down conductors in lightning protection systems. In: GROUND'2004 International Conference Grounding and Earthing, 2004, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: LRC/ELAT UFMG/CEMIG, 2004. p.133-137.

VASCONCELOS, L.A.S. **Modelagem da formação de barreira de potencial em varistores de ZNO**. 2000. 125 f, 31-43. Tese (doutorado em ciências). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos SP.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos**. Belo Horizonte: Alphagraphics. 1998, 106 p., 24 cm. Bibliografía: p. 103–106.

GLOSSÁRIO

BT.		Rede de distribuição de energia elétrica com classe de isolamento até 1.000 volts em corrente alternada. No Brasil encontramos as tensões de 220/127 e 380/220 volts nas redes de BT, com neutro aterrado e 220/110 volts com neutro isolado.
Captor.		Parte do SPDA destinada a interceptar as descargas atmosféricas (NBR 5419/2001).
Consumidor.		Residência térrea, residência com mais de um pavimento, indústria, comércio, edifícios com vários pavimentos comerciais ou residenciais.
Descargas Diretas.	Atmosféricas	Descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra, mais precisamente direto na rede de distribuição seja de MT ou de BT.
Descargas Indiretas.	Atmosféricas	Descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra, mais precisamente no solo, em árvores ou em estruturas, cuja indução se propague até atingir as redes de MT ou de BT.
Descargas Atmosféricas.		Descargas elétricas de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères (NBR 5419/2001).

DPS.	Dispositivos de proteção de surtos são equipamentos compostos por varistores, diodos, capacitores, bobinas, centelhadores, entre outros componentes, que na presença de surtos de tensão, sobretensões transitórias, conduzem ao eletrodo de aterramento as correntes dos surtos.
Eletrodo de aterramento.	De acordo com a NBR 5410/2004 é preferencialmente, uso das próprias armaduras de concreto das fundações, onde as interligações naturalmente existentes entre estes elementos são suficientes para se obter um eletrodo de aterramento com características elétricas adequadas, sendo dispensável qualquer medida complementar. De acordo com a NBR 5419/2001 é o elemento ou conjunto de elementos do subsistema de aterramento que assegura o contato elétrico com o solo e dispersa a corrente de descarga atmosférica na Terra.
Equipotencialização.	Procedimento que consiste na interligação de elementos especificados, visando obter a equipotencialidade necessária para os fins desejados, por extensão, a própria rede de elementos interligados resultante (NBR 5410/2004).
Esquema TN-C.	Esquema no qual as funções de neutro e de proteção são combinadas em um único condutor, na totalidade do esquema (NBR 5410/2004).

Esquema TN-S.	Esquema no qual o condutor neutro e o condutor de proteção são distintos (NBR 5410/2004).
Haste tipo copperweld.	Haste de aço recoberta com uma camada de 254 µm de cobre.
MT:	Rede de distribuição de energia elétrica com classe de isolamento entre 1.001 à 15 000 volts, em corrente alternada.
Neutro multiterrado da BT.	Neutro da rede de distribuição de baixa tensão, derivado da estrela aterrada do transformador, que a cada 150 metros aproximadamente, é aterrado novamente, isso na extensão toda da rede de baixa tensão de uma cidade ou loteamento.
Pára-raios de linha da MT.	São equipamentos com pastilhas de óxido de zinco, que na presença de sobretensões transitórias, conduzem as correntes dos surtos para o eletrodo de aterramento, porém deixam passar uma tensão residual, cujo valor consta dos dados do fabricante.
Sistema de eletrodos de aterramento da BT (neutro multiterrado).	É o sistema formado pelo condutor de descida e uma ou mais hastes tipo copperweld.
Sistema de eletrodos de aterramento das instalações elétricas dos consumidores.	É o sistema formado pelo condutor de descida e uma ou mais hastes tipo copperweld.
Sistema de eletrodos de aterramento do posto de transformação.	É o sistema formado pelos pára-raios de linha da MT, condutor de descida e uma ou mais hastes tipo copperweld.

SPDA.	Sistema completo destinado a proteger uma estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas (NBR 5419/2001).
Subsistema de aterramento.	Parte do SPDA destinada a conduzir e a dispersar a corrente de descarga atmosférica no solo (NBR 5419/2001).
Subsistema de descida.	Parte do SPDA externo, destinada a conduzir a corrente da descarga atmosférica desde o captor até o subsistema de aterramento (NBR 5419/2201).
Terra Roxa.	Tipo de solo composto de areia, argila, calcário e húmus em quantidade equilibrada.

ANEXO 1

A1 ATERRAMENTOS E PROTEÇÕES DOS EQUIPAMENTOS DE COMUNICAÇÃO

A1.1 Antena para TV, Satélite, Rádio

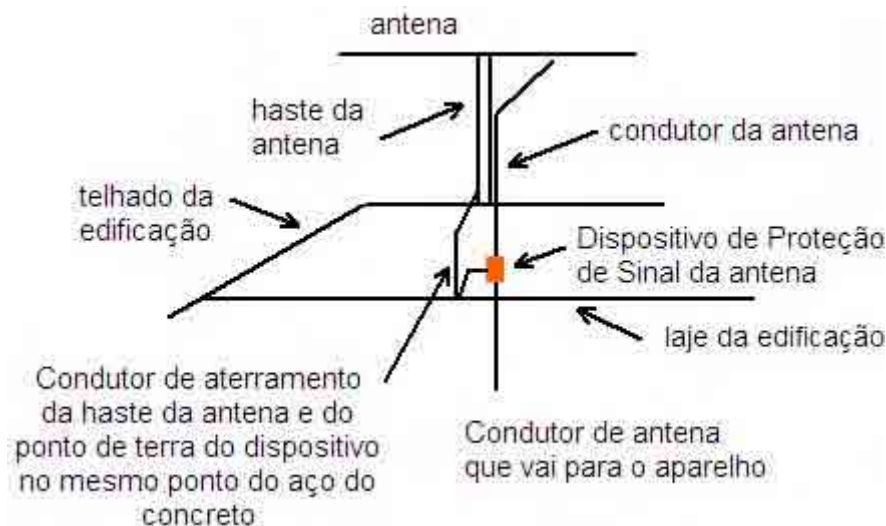
As antenas de TV local, via Satélite, via Rádio ou outras antenas existentes em um edifício, devem ser aterradas no aço embutido no concreto das lajes, das vigas ou colunas da edificação. Em Anexo Figura 1, está mostrado como aterrar a base de uma antena, situada na cobertura da edificação. A NBR 5419 (2004) já enfoca esta e outras medidas.



Anexo Figura 1 – Aterramento das antenas

Mesmos que as antenas sejam instaladas em postes, torres, caixas d'água, e outros locais, essa antenas devem ser aterradas.

É necessário colocar DPS na entrada dos condutores das antenas na edificação, seja condutor de sinal receptor, transmissor (RX/TX) ou sinal de comando, em Anexo Figura 2, está esquematizado essa situação.



Anexo Figura 2 – Colocação de DPS no condutor da antena

Os tipos de DPS serão conforme o tipo de sinal, nível de ruído, nível de tensão. Esses DPS, devem ser colocados logo na entrada dos condutores na edificação e o ponto de aterramento dos DPS deve ser o mesmo de aterramento da antena.

A instalação de DPS, na entrada do condutor da antena no edifício, deve ser seguida da instalação de outro DPS igual, na entrada do condutor da antena no ETI.

Esse sistema de colocação de DPS é interessante pois elimina de vez a possibilidade de danificar o aparelho receptor devido a surtos provenientes das descargas atmosféricas pela antena. A conexão do ponto de aterramento do DPS a ser instalado na entrada do condutor da antena no aparelho receptor (ETI) deve ser no mesmo ponto de aterramento do terra de referência do aparelho receptor (ETI) e no mesmo ponto de aterramento do DPS da CA.

A1.2 Sistema de Telefonia e outras comunicações via cabo metálico

Na entrada do sistema de telefonia e outros tipos de comunicação, na propriedade do consumidor, os pares de fios metálicos de sinal telefônico, ou os positivos dos condutores coaxiais de RF, devem estar conectados aos DPS próprios para sistema de comunicação. Esses DPS devem ter capacidade de drenar correntes altas da ordem de 40 kA, pois serão os primeiros dispositivos do sistema de cascata. Normalmente os DPS encontrados zeram a comunicação quando conduzem as correntes de surtos, para o sistema de eletrodo de aterramento, em casos que não se possa perder o sinal, deve-se procurar o fabricante de DPS para a elaboração de produtos que atendam à finalidade exigida.

Os eletrodutos de um sistema de comunicação devem ser necessariamente de metal, pois será a primeira blindagem dos condutores de comunicação, desde a entrada na propriedade do consumidor até nos ETI.

Em locais onde a Blindagem por Objetos CIREN/CIGRE (1998), não é eficiente os condutores de comunicação devem ter dupla blindagem, além de estarem embutidos em eletrodutos metálicos. As blindagens dos condutores de comunicação devem ser aterradas nos eletrodos de aterramento e devem ser aterradas de um só lado, para evitar a circulação de correntes que provocam ruídos indesejáveis, a não ser que estejam em áreas reduzidas com malha de aterramento, dessa forma as blindagens podem ter as suas duas extremidades aterradas. Deve-se evitar as correntes em forma de círculo, entre as blindagens e a malha de aterramento.

Os pontos de aterramento dos DPS dos condutores de comunicação devem ser o aço existente no concreto da edificação e os condutores de aterramento devem ter perfil retangular.

A1.3 ETI Equipamentos de Tecnologia da Informação

Junto ao ETI, é interessante a criação de um sistema de aterramento observado o esquema de ponto único. Isso se faz conectando o cabo de aterramento do CA do equipamento ou o ponto de terra de referência, mais o ponto de aterramento do DPS do CA e o ponto de aterramento do DPS do

sistema de comunicação, que pode ser: da rede telefônica, rede de computação, cabo coaxial da antena, etc., no ponto de terra da tomada de força, terceiro pino. É importante essa junção de todos os pontos de aterramento, pois evita circulação de correntes que possam danificar os equipamentos.

Para ETI distantes, porém conectados entre si por cabo de rede, deve-se utilizar cabo de rede blindado e conectar a blindagem do cabo em apenas um ponto, evitando circular corrente entre a blindagem e o sistema de eletrodos de aterramento.

Em artigo publicado, "Sistema de proteção de equipamentos de tecnologia da informação", na revista Eletricidade Moderna (1999), pode-se observar a junção de todos os pontos de terra dos equipamentos considerados ETI e os vários cabos de comunicação que chegam e como eles são conectados.

Quanto aos DPS do CA a serem instalados junto ao ETI, pode ser utilizado o tipo de proteção de régua de ponto de força do CA, porém deve-se observar se esse tipo de proteção contém os componentes necessários, que nesse caso pode ser varistor junto com diodo tipo TransZorb. Para o sistema de comunicação, os DPS devem ser escolhidos com muito cuidado, para não gerarem ruídos indesejáveis no sistema de comunicação. Vários fabricantes desenvolvem esses DPS, porém é necessário verificar junto a eles os tipos de componentes e seus níveis de ruídos, se necessário deverá ser desenvolvido DPS especiais para cada tipo de instalação de comunicação.

Este ponto é o terceiro estágio da cascata de DPS e eles devem ter capacidade de escoamento de corrente de surto da ordem de 5 a 8 KA ou até mesmo da ordem de Ampères, dependendo de como foi montada a cascata de DPS.

Alguns ETI, melhores elaborados, são construídos tendo no seu interior, na entrada de energia e na entrada da comunicação, DPS, cujos pontos de aterramento estão conectados no ponto de terra de referência, existente no interior do ETI. Alguns ETI não têm esse tipo de proteção interna. Pode-se dizer que esse é o quarto estágio da cascata de protetores.

Para empresas de comunicação e automação, que optarem por esta topologia de proteção, elas devem fazer constar no pedido de compra, o tipo de componentes de proteção de surtos que necessitam estar acondicionados no

interior dos equipamentos, efetivando dessa forma uma correta cascata de DPS, pois esses equipamentos podem conter os diodos tipo TansZorb de alta qualidade, que dificilmente serão danificados, mas que eliminam qualquer tensão indesejável no equipamento, prolongando em muito a vida útil dos componentes que fazem parte dos circuitos eletrônicos do ETI.

ANEXO 2

Fotografias



Aço da fundação conectado ao aço da coluna e dos baldrames



Ponto de aterramento a ser conectado ao PE da instalação elétrica.



Aço da fundação conectado ao aço da coluna e dos baldrames



Ponto de aterramento do quadro de medição de energia elétrica



Ponto de aterramento a ser conectado ao PE da instalação elétrica.





Abrindo o concreto da coluna para conectar o condutor de aterramento em estrutura existente



Condutor de aterramento colocado na caixa do ponto de força



Ponto de conexão dos condutores de aterramento no aço da coluna



Condutor de aterramento colocado na caixa do ponto de força