



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Jaime Ary Molchansky

A importância do design da malha de aterramento no ambiente de alta frequência.

CAMPINAS

2020

Jaime Ary Molchansky

A importância do design da malha de aterramento no ambiente de alta frequência.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Orientador: Professor Doutor José Pissolato Filho

Este trabalho corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Jaime Ary Molchansky, orientada pelo Prof. Dr. José Pissolato Filho.

CAMPINAS 2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M731i Molchansky, Jaime Ary, 1956-
A importância do design da malha de aterramento no ambiente da alta frequência. / Jaime Ary Molchansky. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: José Pissolato Filho.
Coorientador: José Antonio Donizeti Rossi.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Correntes elétricas - aterramento. 2. Dissipação de energia. 3. Pára-raios. 4. Condutores elétricos. 5. Eletromagnetismo. I. Pissolato Filho, José, 1951-. II. Rossi, José Antonio Donizeti. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: The importance of grounding design in the high frequency environment.

Palavras-chave em inglês:

Electric currents - grounding

Power dissipation

Lightning rod

Electrical conductors

Electromagnetism

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

José Pissolato Filho [Orientador]

Anderson Ricardo Justo de Araujo

José Antônio Donizete Rossi

Data de defesa: 05-11-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-7732-4842>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8458102618436499>

COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Jaime Ary Molchansky RA: 760422

Data da defesa: 05 de novembro de 2020.

Título da dissertação: “A importância do design da malha de aterramento no ambiente de alta frequência”.

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente)

Prof. Dr. Anderson Ricardo Justo de Araújo (interno)

Prof. Dr. Jose Antônio Donizete Rossi (externo)

A Ata de Defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

DEDICATÓRIA:

Este trabalho é dedicado à memória do meu filho Bruno Molchansky Z'L., cuja partida precoce nos levou a uma maior introspeção, e a motivação para buscar uma melhor compreensão da natureza, e assim também ao aprofundamento no estudo sobre os campos e as suas frequências.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me permitiu chegar a este tempo, superar dificuldades e poder vivenciar muitos aprendizados.

Aos meus pais, Rosa Z"l e Abrão Z"l Molchansky, pela dedicação e esforços empreendidos durante suas vidas para proporcionarem educação a todos os seus filhos.

Profunda gratidão ao Prof. Pissolato pela imensa paciência a mim dedicada e pelo privilégio de poder receber seus preciosos ensinamentos e orientações.

Ao Prof. Rossi pelo valoroso apoio e sugestões que tanto viabilizaram como também auxiliaram na organização e direcionamento desta dissertação.

A minha esposa Cláudia, companheira de todos os momentos da vida, pelo apoio e ajuda nas revisões textuais deste trabalho.

Aos meus filhos Victor, Laura e a minha nora Carolina pelos estímulos ao longo destes anos.

Aos meus irmãos Eliezer, Mauro e Clarice que sempre me apoiaram.

Aos meus bons e verdadeiros amigos pelo incentivo constante.

Epígrafe:

O entendimento do eletromagnetismo exige maturidade.

Um dia, o Professor Dr. Jaime Szajner me explicou.

RESUMO

Esta dissertação tem a finalidade de explicar o benefício técnico da utilização de fitas chatas de cobre em forma de grade no projeto das malhas de aterramento para a dissipação de surtos de alta frequência, conforme a teoria desenvolvida por Niels R. Hiltén-Cavallius e Trinh N. Giao, a qual serviu como base no projeto que foi desenvolvido para a malha de aterramento do Laboratório de Extra Tensão da Universidade Federal do Pará.

Na literatura especializada estão publicadas recomendações para que o comprimento do condutor que modula e forma a malha de aterramento esteja limitado entre $\lambda/20$ e $\lambda/10$ para o amortecimento de surtos de alta frequência. Contudo nestas publicações não se encontram as explicações para estas relações.

Tanto para entender a teoria de Cavallius como para explicar a recomendação para este limite de extensão para o condutor que gera a modulação da malha de aterramento são utilizados conceitos do eletromagnetismo clássico, tais como: a vinculação entre o comprimento de onda do surto e a extensão do condutor; e a relevância da indutância no modelo de linha de transmissão para condutores com baixas perdas; as reflexões da onda do surto entre os limites soldados dos condutores.

Elaborou-se uma simulação de uma onda de tensão em alta frequência em um condutor na forma de uma fita chata de cobre. O resultado mostrou o surgimento de elevadíssimas amplitudes de corrente na extensão entre $\lambda/20$ e $\lambda/10$, o que mostrou que neste intervalo de comprimento do condutor da malha de aterramento a amplitude da onda de tensão se reduziu severamente.

Diante da relevância da indutância no ambiente da alta frequência e do resultado obtido nesta simulação, também foi discutido de forma sucinta o emprego generalizado da expressão “Equipotencialidade de Tensão”, ao se analisar os efeitos dos surtos neste ambiente.

Palavra-chave: Malha de Aterramento, amortecimento, dissipação.

ABSTRACT

The importance of the grounding grid design in the high frequency environment.

This dissertation has the proposal to explain the technical benefits with the use of copper flat stripes in the shape of grids into design of grounding for dumping high frequency surges, according to the theory developed by Niels R. Hiltén-Cavallius and Trinh N. Giao.

Recommendations are found in the specialized literature so that the length of the conductor forming the grounding grid is limited between $\lambda/20$ and $\lambda/10$ for damping of high frequency surges. However, in these publications, these relations are not explained.

So much to understand Cavallius's theory and to explain these recommendations for the grounding limited conductor, concepts of classical electromagnetism are used, as well as the relevance of inductance in the transmission line model for low loss conductors.

A high frequency wave traveling simulation through a conductor in form of a flat copper strip was developed. The result of this simulation showed the occurrence of highest current amplitudes in the range of $\lambda/20$ and $\lambda/10$, which showed that in this range of the grounding loop the amplitude of the voltage wave was severely reduced.

Given the relevance of inductance and the result obtained in this simulation, the widespread use of the expression "Equipotentiality of Voltage" was also briefly discussed when analyzing the effects of surges in the high frequency environment.

Key Word: Grounding grid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES:

- Figura 1 – Modelo elétrico simplificado para uma malha de aterramento para solicitações de baixa frequência.38
- Figura 2 – Representa o modelo elétrico de parâmetros distribuídos para uma malha de aterramento para solicitações de alta frequência. 39
- Figura 3 – Representa o modelo de Linha de Transmissão (L.T.) com parâmetros distribuídos, condutor com baixas perdas [10] para a simulação de uma Onda trafegando em um trecho de uma malha de aterramento para solicitações de alta frequência.....42
- Figura 4 – Apresenta de forma esquemática: o circuito com o gerador de impulso com amplitude V_0 e a fita de cobre com a sua diferença de potencial nas extremidades. Na sequência, a forma de onda gerada para o impulso de tensão e o comportamento da onda aplicada na fita com o respectivo amortecimento, conforme a literatura indica..... 46
- Figura 5 – Apresenta o resultado gráfico da Onda de corrente que trafega na extensão limitada da fita de cobre que forma a malha de aterramento proposta para o LEAT. 47 e 96
- Figura 6 – Apresenta a comparação entre as indutâncias de condutores se secção redonda e de um condutor com secção chata. 48 e 113
- Figura 7 – Detalhe construtivo da malha de aterramento principal do LEAT. 63
- Figura 8 – Detalhe construtivo da malha de aterramento periférica no entorno da malha de aterramento principal. 64
- Figura 9 – Planta do projeto executivo da malha de aterramento principal. 65
- Figura 10 – Planta do projeto executivo da malha de aterramento secundaria ligada a ferragem negativa da armação da laje de piso.66

Figura 11 – Planta do projeto executivo da malha de aterramento terciária.....	67
Figura 12 – Planta de detalhes de execução do sistema de aterramento.....	68
Figura 13 - Foto da malha de aterramento em execução. Ao fundo a malha periférica e no centro a malha de aterramento principal.....	69
Figura 14 – Foto do pórtico para entrada de equipamentos e da malha de aterramento em execução.....	70
Figura 15 - Detalhe do ponto de conexão da malha de aterramento principal ao eletrodo vertical de aterramento.....	71
Figura 16 - Recomposição de polos por Willian Gilbert em 1600, o qual resgatou as ideias de Pierre de Maricourt.....	78
Figura 17 - A "Terrella" de Willian Gilbert.....	79
Figura 18 - O gerador de Otto Von Guericke.....	80
Figura 19 - Experimento do “Cubículo de Segurança” – Construído em 1749 por Benjamin Franklin.....	85
Figura. 20 – Foto de Benjamin Franklin em sua casa, com o detector de descargas ligado ao para-raio.....	86
Figura 21 – Em junho de 1754 o padre Procopius Diviss erigiu na Moravia (República Checa) o primeiro para raio europeu aterrado.....	89
Figura 22 – Foto do primeiro oscilograma realizado no Laboratório de Alta Tensão da Unicamp, em 11 de maio de 1981.	92

Figura 23 – Apresenta os valores obtidos para a determinação da estratificação do solo no local do LEAT.....100

Figura 24– Apresenta os pontos onde foram medidos os valores da resistividade do solo no local do LEAT.....101

LISTA DE TABELAS:

Tab. 1 – Tipos de condutores e suas resistividades.....	25 e 33
Tab. 2 – Apresenta os parâmetros de cálculo da secção transversal mínima para o condutor utilizado na malha de aterramento.....	62
Tab. 3 – Apresenta os parâmetros e premissas adotadas para a simulação da onda de Tensão no condutor em forma de fita de cobre.....	93
Tab. 4 – Apresenta os resultados dos parâmetros e premissas adotadas para a simulação da onda de Tensão no condutor em forma de fita de cobre.....	94
Tab. 5 – Apresenta os valores obtidos na medição da resistividade do solo pelo método de Wenner.....	58 e 99
Tab. 6 – Apresenta os parâmetros para comparação de indutâncias.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

L.T. Linha de Transmissão.

LAT – Laboratório de Alta Tensão da Unicamp.

LEAT – Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará.

SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.

Z”L - Acróstico da expressão hebraica “Zichrono Livracha, que significa: “Que seu nome seja sempre lembrado para a benção”.

NEC – National Electric Code.

IEEE – Institute of Electrical and Eletronics Engineers.

NBR – Norma técnica brasileira.

LISTA DE SÍMBOLOS

R, Resistencia, ohm, (Ω).

l, Comprimento, metro, (m).

ρ , Resistividade, Ohm.metro, (Ω .m).

σ , Condutividade, Siemens/m, (S/m).

σ^* , Condutividade com dependência da frequência.

ω , Frequência Angular, radiano/segundo, (rad/s).

ϵ_0 , Permitividade ou Permissividade do vácuo, (F/m).

ϵ_r , Permitividade ou Permissividade relativa, adimensional.

ϵ , Permitividade ou Permissividade do meio, (F/m).

H, Intensidade de Campo Magnético, (A/m).

E, Intensidade de Campo Elétrico, (V/m).

μ_0 , Permeabilidade Magnética do meio, (H/m).

μ_r , Permeabilidade Magnética relativa, adimensional.

μ , Permeabilidade Magnética do meio, (H/m).

$\tan(\delta_c)$, Tangente de perdas, adimensional.

Φ , Fluxo Magnético associado ao circuito elétrico, Weber, (Wb).

L, Indutância, Henry, (H).

C, Capacitância, Farad, (F).

G, Condutância, Siemens, (S).

t, Tempo, segundo, (s).

Z, Impedância, Ohm, (Ω).

X, Reatância capacitiva ou Reatância indutiva, (Ω).

β , Constante de fase da onda, (rad/s).

λ , Comprimento de Onda, (m).

α , Constante de Atenuação da Onda, Neper/metro, (Np/m).

χ , Constante de Propagação da Onda, um/metro, (1/m).

Up, Velocidade de Propagação da Onda, (m/s).

δ , Profundidade de Penetração do Campo Eletromagnético produzido pela Onda no meio de propagação, (m).

I, Corrente, Amper, (A).

V, Tensão, Volt, (V).

f, Frequência, Hertz, (1/s).

$L_{\text{circuito}}/\lambda_{\text{operação}}$ – Relação entre o comprimento ou extensão de um circuito ou rede elétrica em (m) e o comprimento da Onda emitida na fonte distante (m). Expressão também conhecida como Comprimento Elétrico, adimensional.

L_{fita} , Comprimento do condutor de cobre em forma de fita chata (m).

w, Largura do condutor de cobre em forma de fita chata (m).

t_h , Espessura do condutor de cobre em forma de fita chata (m).

R_{ca} , Resistência do condutor em corrente alternada, (Ω).

R_s

SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução e Motivação.....	18
Capítulo II – Conceitos sobre malhas de aterramento.....	29
Capítulo III – Literatura consultada	51
Capítulo IV – O projeto do LEAT.....	56
Capítulo V – Conclusões e referência para trabalho posterior.....	72
Referências Bibliográficas.....	75
Apêndice I: Resgate histórico do Aterramento	77
Apêndice II: Dados da Simulação da Onda no condutor de cobre.....	93
Apêndice III Estudo de Prospecção geoletrica do solo em duas camadas pelo método de Wenner e Memoriais Descritivos para a execução das obras.....	97
Apêndice IV – Comparação entre valores das Indutâncias para condutores de secção redondo e retangular.....	112

Capítulo I - Introdução e Motivação.

Introdução:

Este trabalho tem a finalidade de explicar a utilização da Teoria desenvolvida por Niels R. Hiltén-Cavallius para aplicação em malhas de aterramento, e mostrar que o emprego de suas premissas conduz ao amortecimento e à dissipação de surtos de alta frequência na malha de aterramento projetada para o Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará.

Há também o propósito de fornecer aos colegas que atuam na área de instalações elétricas os passos que nos levaram ao entendimento dos conceitos envolvidos neste projeto e que são úteis para as diversas soluções técnicas que podem envolver malhas de aterramento.

Ao longo da nossa vivência profissional na área de instalações elétricas observa-se que existem diversas especificações para sistemas de aterramento com expressões estranhas, as quais muito despertaram nossa curiosidade e nos desafiaram a entender se estas faziam algum sentido ou não, tais como:

- i. Malha de terra limpa.
- ii. Malha de terra isolada.
- iii. Malha de terra separada.
- iv. Malha de terra pura.
- v. Malha de terra quieta.
- vi. Elemento auto aterrado.

Na medida que se aprofundavam os conhecimentos na área acadêmica constatava-se que muitas destas expressões não tinham consistência técnica.

Entre os anos de 2006 e 2007 o professor José Pissolato Filho iniciou a coordenação de uma equipe técnica dedicada à implantação do Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará (LEAT).

Prof. Pissolato conhecia o meu interesse por malhas de aterramento e a disposição em me aprofundar neste assunto. Por esta razão me convidou para integrar a equipe multidisciplinar que se formava sob sua orientação.

A mim foi confiado à elaboração do projeto da malha de aterramento do campo de testes e ensaios do LEAT, surgindo uma grande oportunidade para o aprimoramento em

termos acadêmicos nesta vertente tecnológica da eletricidade, um enorme e motivador desafio, o qual se mostrou altamente gratificante.

A elaboração de um projeto e posteriormente a execução de uma malha de aterramento com topologia dedicada ao amortecimento e dissipação de surtos de baixa e alta frequência é parte fundamental na infraestrutura que integra o sistema de energia de um laboratório de alta tensão, pois neste ambiente de testes são geradas normalmente descargas elétricas impulsivas de alta magnitude. Assim como, os conceitos utilizados para se elaborar esta malha de aterramento podem e devem ser empregados para qualquer ambiente ou instalação em que se deseja alta eficiência no amortecimento de surtos.

A malha de aterramento precisa ser eficaz para garantir a dissipação ou atenuação em níveis aceitáveis das induções e de eventuais distúrbios ou interferências indesejáveis durante os testes com o gerador de impulso, a fim de não comprometer a segurança das pessoas, bem como assegurar que as medições e os testes fiquem isentos de interferências indesejáveis.

Portanto podemos acrescentar sem exageros, que a malha de aterramento se constitui na “espinha dorsal” de um laboratório de alta tensão bem como de outras instalações que requerem bom nível de qualidade de energia.

Constata-se no meio profissional que as especificações consideradas para as malhas de aterramentos são quase todas muito parecidas entre si, superficiais, como se fossem carimbadas e tudo pudesse ser tratado sempre com a mesma “receita de bolo” para qualquer que fosse a finalidade desta malha. Desta forma não são considerados a natureza do distúrbio elétrico a ser tratado (de baixa ou alta frequência) e muito menos os aspectos da impedância associada aos condutores empregados.

Neste contexto, este é um assunto sobre o qual muitos falam prontamente, de forma vaga, genérica, e principalmente sobre o qual poucos se dedicam a estudar e conhecer com a profundidade necessária.

As malhas de aterramento se tornam temas que despertam curiosidades e geram polemicas entre profissionais envolvidos com as diversas áreas da tecnologia, e ironicamente é o que geralmente recebe menos atenção na fase de planejamento das instalações elétricas.

Diferente do cotidiano profissional, no meio acadêmico o aprofundamento no eletromagnetismo clássico se mostrou como a fonte segura para o entendimento do comportamento dos eventos elétricos que ocorrem nas malhas de aterramento.

As considerações com todos os parâmetros elétricos que envolvem os condutores, a forma dos seus agrupamentos, as frequências da fonte de distúrbio se mostraram fundamentais para o design da malha de aterramento, pois o seu desempenho se reflete na segurança das pessoas, na referência de potenciais próximos ao nível da terra, bem como na redução do ruído elétrico, requisitos fundamentais no complexo ambiente dos ensaios e testes, bem como em qualquer instalação que necessite alta qualidade de energia.

Percebe-se que uma boa razão para a existência de tamanha polêmica e confusão sobre este tema surge na própria palavra “aterramento”, pois essa adquire diversos significados dentro da eletricidade e é empregada em um amplo espectro da tecnologia [1]. Citamos alguns exemplos destas aplicações:

- A de um condutor ligado a uma ou várias hastes metálicas enterradas e que é utilizada para a proteção contra o choque elétrico nos circuitos energizados;
- Nos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas para o encaminhamento controlado destas ao solo.
- Como um plano de terra (como referência de tensão), em uma placa de circuito digital impresso.
- Na barra de referência de tensão na origem de uma fonte de energia elétrica ou de uma instalação consumidora.
- No casco de uma embarcação;
- Na carroceria de um veículo;
- Na fuselagem de uma aeronave.

Contudo, para determinados circuitos eletrônicos sensíveis as malhas de aterramento em muitas situações podem se constituir em uma possível fonte de ruído elétrico indesejável.

Diante da constatação de diversas aplicações e de suas complexidades, surgiu uma fonte altamente motivadora para o aprofundamento nas pesquisas e para o aprendizado nesse assunto.

Assim, se o evento em estudo é em baixa frequência, o modelo a ser aplicado para sua análise segue a teoria simples de circuitos elétricos com parâmetros concentrados. No caso do choque elétrico os parâmetros de tensão e corrente analisados na extensão de um corpo tocado por um condutor energizado fazem sentido e são úteis. A resistência que o circuito caracterizado pelo corpo, eventuais acessórios de proteção podem apresentar são importantes, e são relevantes os valores das resistividades das camadas do solo condutor.

No caso de eventos ligados a alta frequência, tais como uma descarga atmosférica em uma rede de distribuição de energia, o modelo a ser considerado para esta análise é o de parâmetros distribuídos. Nesta situação, as características sobre a forma da secção transversal do condutor, a sua extensão, a condutividade do material empregado neste são de extrema importância, deve-se considerar a impedância do caminho, a conexão dos condutores e o projeto da malha de aterramento e o amortecimento das sobretensões.

Em uma planta industrial, por exemplo, na área metalúrgica onde se empregam máquinas e equipamentos de grande porte para cortes e tratamentos de chapas metálicas com comandos extremamente sensíveis deve-se empregar uma malha de aterramento no solo para a proteção do potencial de toque e passo para os operadores destas máquinas, e outra via suplementar a esta malha de segurança, que pode ser representada por um condutor dedicado cuja função é manter a mesma referência de potencial para as portas de comunicação dos controladores de sinais destes equipamentos e, neste caso tudo ligado e referido a mesma barra na origem da malha de aterramento.

Daí a importância do cuidado com a escolha da topologia adequada da malha de aterramento para cada finalidade, a qual frequentemente recebe pouca atenção nas fases iniciais das instalações, sobretudo as dedicadas a equipamentos com tecnologia sensível.

A falta deste planejamento ou mesmo de sua execução descuidada conduzem aos conhecidos acidentes devido ao choque elétrico nas pessoas e animais, aos danos nos equipamentos e as panes nos sistemas de potência.

Portanto a malha de aterramento adquire função importante por:

- Garantir a proteção à vida das pessoas e animais, principalmente para evitar o percurso e os efeitos altamente danosos da corrente elétrica no corpo, quando este fica submetido ao contato com partes energizadas

[2]. Neste caso a malha de aterramento adquire função de segurança e destacam-se duas situações para contato com partes energizadas:

1. Tensão de toque: Normalmente ocorre ao se tocar um elemento energizado. Se estabelece uma tensão entre mãos e pés, conseqüentemente poderá surgir uma corrente elétrica através do braço, tronco e pernas, trata-se do choque elétrico. É uma ocorrência comum em cabos energizados com danos na isolação, e nas cercas aramadas que recebem um cabo energizado da rede aérea quando este se rompe atingindo as cercas.
2. Tensão de passo: Ocorre na descarga de uma corrente elétrica no piso ou no solo. Neste caso formam-se gradientes de tensão no entorno da descarga e poderá surgir uma circulação de corrente entre os pés de uma pessoa ou na chamada tensão de pata no caso de animais.

Ocorrências como estas são comuns em campos de futebol em dias de tempestades quando há quedas de raios, ou nos pisos próximos a invólucros metálicos energizados não aterrados.

- Nos requisitos de qualidade de energia para equipamentos de eletrônica sensível;
- Na infraestrutura da energia de sustentação da vida dos pacientes em situação crítica nos hospitais e centros clínicos;
- Para o funcionamento confiável dos dispositivos de proteção dos circuitos alimentadores de energia elétrica;
- Na referência de sinais para os drivers dedicados ao controle de processos automatizados;
- Na eliminação ou minimização de danos causados pelas descargas atmosféricas nas estruturas prediais, na prevenção contra incêndios;
- Interferir no tempo de vida útil dos componentes empregados na microeletrônica.

Escopo e delimitação:

Nesta dissertação são apresentados e explicados os conceitos que embasaram a elaboração do projeto da malha de aterramento do Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará.

Este trabalho foi baseado na teoria desenvolvida por Hiltén-Cavallius, publicada em 1969 e denominada Floor Net Used as Ground Return in High – Voltage Test Areas, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. págs. – 88, nº 7. [3]. Cavallius foi um grande construtor de laboratórios de alta tensão em diversos países, os quais figuram entre os principais centros de referência e de certificação.

Cavallius avalia a relação entre o desempenho para o amortecimento do campo eletromagnético em uma placa metálica e em uma grade formada por condutores redondos, todos estes em cobre. Conclui que as diferenças na performance do amortecimento entre estas duas possibilidades são pequenas, por outro lado o custo de se executar a malha de aterramento através da grade de condutores é de 15% do custo da execução com placas.

O projeto desenvolvido para o LEAT contemplou as seguintes premissas:

- I. O projeto de malhas de aterramento com a topologia em forma de uma grade ou de reticulados de quatro pontos. Esta topologia de malha também foi empregada no Laboratório de Alta de Tensão da Unicamp (LAT).
- II. O emprego de condutores elétricos de cobre com secção transversal retangular (fitas chatas) na concepção da malha de aterramento.
- III. A análise do efeito da indutância nos condutores de secção chata.
- IV. A utilização das soldas exotérmicas nas extremidades da grade que gera a malha de aterramento, como contrapesos para atenuação da onda de corrente na malha.

Ao longo deste trabalho são também analisados e explicados os conceitos do eletromagnetismo clássico envolvidos no comportamento da energia que é induzida na malha de aterramento do LEAT.

Também é demonstrado que o projeto elaborado garante a confiabilidade para a segurança das pessoas envolvidas neste ambiente e para os resultados nos testes do laboratório.

Em face da limitação desta dissertação, as medições e os testes de comissionamento da malha executada não pertencem ao objeto desta.

A estruturação deste trabalho foi elaborada conforme o seguinte:

No capítulo I são mostradas as motivações que nos inspiraram.

No capítulo II são abordados os conceitos fundamentais que embasaram o desenvolvimento do projeto da malha de aterramento.

No capítulo III destacamos na teoria desenvolvida por Cavallius a parte dedicada a topologia da malha de aterramento que foi aplicada no projeto da malha do LEAT e comentamos de forma resumida a literatura consultada,

No capítulo IV é mostrado em detalhes o projeto desenvolvido para o LEAT (estudo de caso).

No capítulo V são apresentadas as conclusões desta dissertação e é proposto um tema para trabalho futuro.

No Apêndice I apresentamos um resgate histórico do aterramento, no qual se observa que as primeiras ligações a terra se confundem com a própria história da eletricidade como ciência.

No Apêndice II é mostrada a planilha de dados desenvolvida para a simulação do comportamento da onda induzida na fita chata de cobre utilizada na malha de aterramento e amortecimento do Laboratório.

No Apêndice III são apresentados os estudos de prospecção geoletrica do solo realizados no local do LEAT e que foram importantes para o dimensionamento dos eletrodos verticais de aterramento, bem como os memoriais descritivos necessários para execução das obras.

Motivação:

A maior motivação deste trabalho foi vencer o grande desafio e a responsabilidade que naquele momento se apresentava para elaborar um projeto de malha de aterramento para um laboratório de Extra Alta Tensão, e oferecer a esta instalação uma solução técnica confiável e que envolvesse o compromisso de custos viáveis para sua execução.

A revisão do eletromagnetismo clássico trouxe os fundamentos que constituem os parâmetros de uma malha de aterramento e foram os passos iniciais. Depois a leitura de trabalhos de pesquisadores que se debruçaram sobre este tema e entre estes estão os que se dedicaram muitos dos seus anos de vida na pesquisa desta vertente tecnológica.

Nesta jornada para aprimoramento de conhecimento surgiram fatos curiosos ligados ao tema da malha de aterramento, e que mostram que existem mais mitos

relacionados a este assunto do que em qualquer área da engenharia elétrica, conforme seguem os mais comuns [1]:

1. “*O solo é um caminho de baixa impedância para a corrente de terra*”. Falso, a impedância da terra é maior em muitas ordens de magnitude que a impedância de um condutor comum de cobre, isto fica bastante claro quando se observa a Tab. 1 – Tipos de condutores e suas resistividades.

Tab. 1 – Tipos de materiais condutores e suas resistividades [7]:

Material	Resistividade ρ (Ωm)
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	$5 \text{ a } 20 \times 10^3$

2. “*A terra é uma equipotencial*”. Falso, isto é claramente uma inverdade como um resultado de 1.

3. “*A impedância de um condutor é determinada pela sua resistência*”. Falso, o que acontece então com o conceito de reatância indutiva?

4. “*Para operar com baixo ruído elétrico, um circuito ou sistema de energia precisam estar conectados a uma malha de aterramento*”. Falso, porque aviões, satélites, carros e computadores portáteis operam bem sem conexão a terra.

De fato, em algumas situações a malha de aterramento é a causa do ruído elétrico. Muitos dos problemas de ruído elétrico em sistemas eletrônicos são resolvidos pela remoção ou isolamento de um circuito do aterramento do que pela sua conexão neste.

5. “*Para reduzir o ruído elétrico, um sistema eletrônico deveria ser conectado a uma malha com aterramento quieto e separado*”, pelo uso de isoladas e separadas hastes de aterramento. Falso, além de ser inverídico, está prática é perigosa e viola os requisitos de segurança do NEC. “*Malha com aterramento quieto*” significa uma malha de aterramento livre ou imune a interferências ou de qualquer circulação de correntes indesejáveis, também cujos eletrodos estejam “*distantes o suficiente*” para não receberem interferências ou distúrbios indesejáveis.

6. “*A malha de aterramento é unidirecional, com corrente fluindo para o solo*”. Falso, porque a corrente na malha circula em loops.

7. *“Um receptáculo metálico isolado em relação ao circuito de sinais não está aterrado”*. Falso, neste caso o termo isolado, quando se trata de sinais elétricos, se refere ao método do aterramento para sinais, e não se este involucro está aterrado por razões de segurança.

8. *“Um projetista pode nomear condutores de aterramento pelo tipo de corrente que eles deveriam levar (isto é, sinais, energia, descargas atmosféricas, dados digitais, dados analógicos, ruídos elétricos), e os elétrons vão cumprir e somente fluírem nos apropriados e designados condutores”*. Falso obviamente.

Henry Ott publica [1] com clareza e simplicidade o seguinte; **“Malhas de aterramentos caem em duas categorias”**:

- 1- Malhas de aterramento para segurança;
- 2- Malhas de aterramento para sinais.

Esta segunda categoria provavelmente não deveria ser chamada como malha de aterramento, mas preferivelmente como malha para retorno de sinais.

Contudo o uso comum entre os profissionais ligados as áreas de projetos e execução de instalações elétricas consagrou a expressão malha de aterramento, que se refere a todos estes usos.

Na maioria dos casos, uma malha de aterramento de segurança não conduz corrente, com exceção quando do surgimento das faltas (contato ou arco acidental entre partes submetidas a potenciais diferentes e/ou de uma ou mais dessas para a terra, num sistema ou equipamento elétrico [5]). Diferente disto, a malha de aterramento para sinais conduz corrente durante a operação normal do circuito. Esta distinção é muito importante.

Importante entender que uma malha de aterramento voltada para a segurança nem sempre assegura um ambiente livre da interferência do ruído elétrico [1] e reciprocamente uma malha de aterramento voltado para eliminação do ruído elétrico não necessariamente oferece segurança para as pessoas.

Atente-se para o fato de que quando a malha de aterramento para segurança é solicitada pela ocorrência de um problema de isolamento em um condutor energizado ou um curto circuito em condutores energizados existirá a circulação de uma corrente e de suas harmônicas constituindo-se em um evento de baixa frequência.

Diferente da situação apresentada anteriormente, no caso da indução de um surto causado pelos impulsos produzidos por um gerador empregado para a simulação de uma descarga atmosférica, ou pela indução dos derivativos do campo eletromagnético (taxa da variação temporal do campo eletromagnético) produzidos em um laboratório de alta

tensão ou ainda pela interferência de sinais de alta frequência, nestes casos haverá o tráfego de uma onda eletromagnética.

Desta forma, o planejamento de uma malha de aterramento confiável envolve conceitos ligados à compatibilidade eletromagnética, o que acarreta certa complexidade e o conhecimento do eletromagnetismo clássico, isto também explica por que este tema é na maioria das vezes ignorado ou evitado pelos engenheiros de projetos.

As consequências com esta desconsideração surgem quase sempre após a conclusão das obras de execução, quando as plantas industriais já estão produzindo e os hospitais e as clínicas já estão em plena atividade.

Nestes casos os problemas se tornam aparente pelo surgimento de ocorrências desastrosas, tais como: os choques elétricos que produzem traumas nos corpos de pessoas e animais, no “ruído elétrico” que interfere tanto no controle de máquinas como nas falhas dos exames médicos por imagem.

Nestas situações quando os ambientes já estão ocupados pelos seus usuários todo o diagnóstico técnico e a reparação a ser feita se torna muito mais difícil e dispendiosa.

A atenção com o projeto e execução da malha de aterramento é fundamental primeiro para a preservação da vida de pessoas e animais, bem como para a prevenção e diminuição aos riscos e danos nos ativos tecnológicos e patrimoniais conforme exemplificamos:

Na segurança dos operadores de máquinas e equipamentos industriais. Devido às falhas na isolação dos cabos de energia que estão próximos aos invólucros das máquinas ou equipamentos (as chamadas carcaças metálicas). O contato das pessoas com estes invólucros quando energizados e não aterrados produzem os choques elétricos e os consequentes acidentes do trabalho, os quais poderão trazer perdas de movimentos, queimaduras e muitas vezes o comprometimento da vida.

Nos danos tecnológicos e patrimoniais causados pela sobretensão induzida nas linhas de energia e sinais, representados pelas queimas de placas de controle e a suas implicações econômicas além da paralisação de equipes de trabalho e as perdas nas pesquisas científicas.

Nos focos de incêndio que surgem pelos centelhamentos perigosos devido à diferença de grandes potenciais de tensões induzidas entre estruturas não aterradas de forma conveniente.

Na perturbação ou interferência nos sinais de controle para máquinas e equipamentos de tecnologia sensível conhecida como “ruído elétrico”.

Nos riscos de vida a que os pacientes debilitados estão expostos nos ambientes hospitalares, devido a falhas de isolamento nos equipamentos eletrônicos invasivos no corpo, portanto ao choque elétrico que pode levar a fibrilação ventricular.

Nas explosões ocasionadas por centelhamentos devido aos altos potenciais de cargas eletrostáticas que surgem nas estruturas metálicas destinadas ao transporte de grãos nos edifícios graneleiros, quando esses não estão ligados à uma malha de aterramento.

Pesquisas e reflexões foram fundamentais para o entendimento do modelo eletromagnético aplicado ao sistema de malhas de Aterramento do LEAT e seguem no capítulo II alguns dos questionamentos que surgiram ao longo da concepção e desenvolvimento do projeto do LEAT e foram de grande importância.

Capítulo II – Conceitos sobre malhas de aterramento.

Neste capítulo são apresentados inicialmente os estudos e pesquisas realizadas, bem como os conceitos atualmente envolvidos sobre malhas de aterramentos.

Nas pesquisas sobre a história do aterramento constata-se que o surgimento da eletricidade como ciência e os primeiros experimentos com aterramentos estão intimamente conectados. No anexo I é apresentado um resumo sobre as origens destes primeiros experimentos, e a evolução das malhas de aterramento.

A caminhada pelo conhecimento desta vertente tecnológica se transformou num roteiro para aprendizado desta, e para o desenvolvimento do projeto da malha de aterramento do LEAT conforme segue exposta:

O que é de fato aterrar?

Conforme o IEEE Std 80™-2013 [4], o aterramento é caracterizado como o ponto de ligação intencional ou acidental de um sistema elétrico e o solo local.

Na primeira situação, a ligação entre o sistema de energia e o solo se faz através de um condutor metálico. Na segunda situação, no caso acidental, a ligação se faz pelo próprio uso do corpo das pessoas ou de animais como elemento condutor entre o sistema de energia e o solo.

A NBR1575 Sistemas de Aterramentos de Subestações – Requisitos de 2009[5], em seu escopo limita e especifica os requisitos para dimensionamentos do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica, acima de 1,0 (kV), quando sujeita a solicitações de frequência industrial.

Qual a finalidade de se aterrar algo em eletricidade?

São várias, e as finalidades mais importantes de um aterramento são [4]:

- i. As que conferem proteção à vida e integridade das pessoas e/ou animais, ao desviar destes uma corrente elétrica de falta, reduzindo o risco dos efeitos danosos que esta corrente propicia ao atravessar o corpo (choque elétrico);

- ii. A que garante a pronta atuação do sistema de proteção dos circuitos elétricos quando submetidos à corrente de falta para o solo sem exceder quaisquer limites de operação dos componentes de uma instalação.
- iii. O escoamento dos transitórios das descargas atmosféricas para o solo.
- iv. A manutenção do potencial como referência aproximadamente igual ao potencial da terra.

Por que se usa uma malha de aterramento, e não um aterramento de ponto único?

O modelamento e a medição da associação de eletrodos horizontais (cabos ou fitas) com os eletrodos verticais (hastes) que formam a malha mostraram que os valores de resistência ou de impedância desta associação são quase sempre muito mais baixos do que o aterramento de um ponto único.

As exceções neste caso ficam para locais onde a camada de menor resistividade do solo está localizada no nível muito profundo, onde a perfuração do terreno é muito difícil e onerosa e em casos específicos no tratamento de ruídos elétricos, justificando nestes casos o aterramento de ponto único.

Assim as ligações a terra servem para vários propósitos [6] os quais dependem da natureza do circuito e do objetivo que se pretende com esta ligação, como se observa nas seguintes situações:

- A malha de aterramento é empregada para prevenir e limitar excessivas diferenças de potenciais entre estruturas metálicas e a terra, seja através de eventuais faltas, ou induções durante a operação normal destas;
- Para prover um caminho de baixa impedância e assim garantir a rápida atuação dos dispositivos de proteção do sistema de energia;
- Na inserção de uma impedância ou de um resistor para limitar a corrente de neutro;
- Para conduzir a indução eletromagnética provocada pelas descargas atmosféricas para o solo e assim proteger as estruturas prediais;
- Para limitar tensões induzidas em linhas de transmissão/distribuição de energia ou de sinais por cabo;
- Na possibilidade do uso do solo como condutor de retorno em um caso particular do sistema monofásico;

- No escoamento para a terra das cargas que surgem pela elevação dos potenciais eletrostáticos nos ambientes de alto risco de explosões e sujeitos a emissão de gases inflamáveis;
- Na prevenção e proteção aos efeitos da corrosão a que as tubulações metálicas instaladas em contato com o solo estão sujeitas;

Como é constituída uma malha de aterramento?

A malha de aterramento é o ponto de conexão intencional entre o sistema elétrico e o solo.

Constitui-se pelas conexões entre duas partes condutoras que se complementam e dão origem ao sistema de aterramento. Uma parte aplicada normalmente no solo através de condutores metálicos nu de cobre formando uma grade (em algumas situações em lajes de concreto) na posição horizontal e outra parte constituída por hastes ou tubos cravados na vertical e conectados aos condutores horizontais.

O sistema de aterramento é constituído de três componentes básicos que descrevemos [7]:

I. Eletrodos de aterramento:

Os eletrodos horizontais de aterramento são os elementos condutores metálicos interligados (aplicados na posição horizontal ou vertical) [5], em contato direto com a terra com o propósito de garantir ligação da parte do sistema elétrico que se deseja aterrar com o solo adjacente.

Como eletrodos horizontais são empregados os condutores de cobre eletrolítico nu e os mais utilizados são os de secção redonda representada pelos cabos encordoados ou os de secção retangulares como as fitas chatas. Podem ser empregados também condutores de outros materiais como a tela de aço de construção civil envolto no concreto que é comumente aplicada na armação da estrutura de lajes e pisos.

Para os eletrodos verticais são utilizados mais comumente as hastes de aço cobreadas, os tubos de cobre e o aço de construção civil envolto em concreto utilizado nas fundações prediais e com reservas devido à corrosão, as cantoneiras de ferro zincado a fogo.

II. A terra:

Representada pela massa condutora de solo que envolve o eletrodo de aterramento [5].

A grandeza que caracteriza o solo local é a sua resistividade elétrica cuja variação é significativa, pois a mesma pode apresentar valores da ordem de 5 a 20.000 ($\Omega.m$) [7].

De forma sucinta podemos dizer que contribuem para esta variação, o tipo do solo, a umidade, a concentração e os tipos de sais dissolvidos na água retida pelo solo, a compactação (quanto mais compactado o solo, melhor a continuidade física), a granulometria, a temperatura e a estrutura geológica com as suas camadas estratificadas.

Desta forma, a característica do solo tem grande influência na passagem da corrente elétrica e é de fundamental importância na análise do comportamento do aterramento elétrico [8].

O valor da resistividade do solo [9] é obtido através de medições em campo, utilizando-se métodos de prospecção geoelétricos, os quais modelam o solo em camadas, e entre estes o mais conhecido e utilizado é o método de quatro pontas de Wenner.

III. Conexões:

São as ligações elétricas entre as partes metálicas condutoras sejam cabos ou fitas, ou entre estes e as hastes verticais. Estas ligações elétricas entre as partes condutoras têm fundamental importância na eficiência do aterramento.

Podem ser executadas através de fusão molecular (solda exotérmica), por compressão e com reservas através de pressão.

Para a conexão entre as partes metálicas através de solda exotérmica é empregado um molde de grafite (cadinho) onde estas peças são colocadas e no qual é adicionado o metal para a solda que é uma mistura composta de óxido de cobre, alumínio e material ignitor.

Para a conexão por compressão é necessário o emprego de uma ferramenta de compressão de alta capacidade hidráulica, a qual possui um acessório de molde, no qual se insere as peças a serem comprimidas para formar as conexões.

Um risco que se corre nos aterramentos executados por conexão por aperto ou por pressão e que é desprezado por falta de conhecimento, é a corrosão nas conexões por este processo, ainda assim, a maioria das conexões é feita por

aperto. Ao longo do tempo a corrosão forma uma película de oxido, isolando as partes a ser conectada a terra.

Por falta de conhecimento, confunde-se aterramento elétrico com aterramento mecânico, conforme [9].

Ou de outra forma, para se obter eficácia no aterramento para alta frequência [8] a ligação entre os metais é molecular e não se dá por pressão superficial.

A resistência oferecida à passagem da corrente elétrica através dos eletrodos para o solo pode ser resumida pelas características dos eletrodos, das características físico-químicas do solo e pelo tipo de conexão entre condutores e eletrodos: [7]

Observa-se na tabela a seguir a discrepância na variação de grandeza entre a condução dos metais e o solo (da ordem de bilhões de vezes).

Tab. 1 – Tipos de materiais condutores e suas resistividades [7]:

Material	Resistividade ρ (Ωm)
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	$5 \text{ a } 20 \times 10^3$

O mero enterrar algo é suficiente? Ou melhor, enterrar algo é o mesmo que aterrar?

Os caminhos da corrente elétrica no solo apresentam uma geometria complexa e ao analisar o solo como um condutor de corrente [7] não se tem a mesma simplicidade de tratamento existente no caso dos condutores metálicos lineares.

A resistividade do solo é um dos fatores críticos que afetam o projeto de um sistema de aterramento elétrico, principalmente para proteções nas baixas frequências.

Em baixas frequências os parâmetros elétricos constitutivos da natureza do solo, tais como condutividade (σ), permissividade (ϵ) e permeabilidade (μ), são

considerados invariantes no tempo. Nestas condições o parâmetro com maior relevância é a resistividade do solo ρ cuja unidade é expressa em ($\Omega \cdot m$), onde $\rho = 1/\sigma$. (1)

Nas altas frequências é relevante a ocorrência de fenômenos transitórios, neste caso deve-se levar em conta a dependência dos parâmetros elétricos dos meios condutores com a frequência, bem como os efeitos de propagação no solo caracterizados pela distorção e atenuação do campo eletromagnético que se propaga através do eletrodo de aterramento (horizontal e vertical) submetido ao transitório.

A condutividade no meio condutor da malha de aterramento será representada da seguinte maneira [8]:

$\sigma^* = \sigma + j\omega\epsilon(\omega)$. (2). A expressão $\epsilon(\omega)$ explicita a dependência da permissividade elétrica do meio condutor com a frequência.

Explorar esta expressão é importante, pois nos auxilia na compreensão do que ocorre com a condutividade no ambiente da frequência [8].

Para isto consideramos que na aplicação de um transitório eletromagnético, surgirá uma densidade de corrente $\vec{j} = \sigma\vec{E}$ (3), onde \vec{E} representa o campo elétrico devido as cargas que fluirão neste meio simples e condutor ($\sigma \neq 0$), e podemos também escrever:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4a).$$

Esta equação indica que o campo elétrico \vec{E} variando no tempo dará origem ao campo magnético \vec{H} . A expressão $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ que representa a corrente de deslocamento nesta análise por uma questão de simplificação é desprezada.

Utilizando-se a notação fasorial obtemos a seguinte expressão que facilita as operações:

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} = j\omega\left(\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}\right)\vec{E} \quad (4b)$$

Onde σE representa a densidade de corrente de condução e $j\omega\epsilon E$ representa a densidade de corrente de deslocamento [10].

Podem-se definir arbitrariamente três condições sobre o comportamento do meio em relação à condução [11]:

$$\omega\epsilon \gg \sigma; \quad (5)$$

$$\omega\epsilon \cong \sigma; \quad (6)$$

$$\omega\epsilon \ll \sigma; \quad (7)$$

Na primeira situação a corrente de deslocamento é muito maior do que a corrente de condução, o meio se comporta como um dielétrico.

Por outro lado, na terceira situação, quando a corrente de condução é muito maior que a corrente de deslocamento, o meio se comporta como condutor.

Sob a condição que esteja entre estas duas, quando a corrente de condução é da mesma ordem de grandeza que a corrente de deslocamento, o meio pode ser classificado como um quase condutor.

Podemos ser mais específicos e classificar arbitrariamente os meios segundo a razão $\sigma/\omega\epsilon$ (8) conforme segue:

Dielétricos: $\sigma/\omega\epsilon < 1/100$ (9).

Quase Condutores: $1/100 < \sigma/\omega\epsilon < 100$ (10).

Condutores: $1/100 < \sigma/\omega\epsilon$ (11).

A razão $\sigma/\omega\epsilon$ é adimensional.

A classificação dos meios também pode ser considerada conforme a permissividade ϵ :

$$\nabla \times H = j\omega\epsilon_c E \quad (12)$$

$$\epsilon_c = \epsilon - j\epsilon \frac{\sigma}{\omega} \quad (\text{F/m}) \quad (13)$$

ϵ_c - Permissividade complexa.

A permissividade complexa faz todo o sentido [10], pois quando um campo externo e variável no tempo é aplicado a um material, pequenos deslocamentos nas fronteiras das cargas são registrados, dando surgimento a uma densidade volumétrica de polarização. Este vetor de polarização variará com a mesma frequência do campo aplicado.

Como a frequência aumenta, a inercia das partículas carregadas tende a evitar que os deslocamentos das partículas fiquem em fase com as mudanças do campo aplicado, conduzindo a um mecanismo de amortecimento friccional que causa perda de potência porque trabalho tem que ser feito para superar as forças de amortecimento.

Este fenômeno de polarização fora de fase pode ser caracterizado pela suscetibilidade elétrica e daí a permissividade complexa ϵ_c .

Onde ϵ' e ϵ'' podem ser funções da frequência.

$$\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (14) \quad (\text{F/m}).$$

Alternativamente nós podemos definir uma condutividade representando todas estas perdas como: $\sigma = \omega\epsilon''$ (15) (S/m).

Com base na expressão $\epsilon_c = \epsilon - j\epsilon \frac{\sigma}{\omega}$ (13) um meio é considerado bom condutor se $\sigma \gg \omega\epsilon$ (13), e um bom isolante se $\sigma \ll \omega\epsilon$ (16). Portanto um material pode ser um bom condutor em baixas frequências, mas pode ter propriedades de um dielétrico com perdas em frequências muito altas.

A razão ϵ''/ϵ' (17) é chamada tangente de perdas, porque é uma medida da perda de potência no meio.

$$\tan(\delta_c) = \epsilon''/\epsilon' \approx \sigma/\omega\epsilon \quad (18)$$

δ_c - Pode ser chamado de ângulo de perdas.

Argumentos similares de perdas são aplicados para a existência de um componente fora de fase de magnetização sob a influência de um campo magnético variável no tempo, de forma que a permeabilidade pode ser complexa em altas frequências:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (19).$$

Qual a importância do contato da superfície dos eletrodos da malha com o solo?

A resistência de contato entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo normalmente é de valor desprezível se o eletrodo estiver isento de qualquer cobertura isolante, como tintas, óleos e gordura, e se a terra estiver bem comprimida no encontro da superfície do eletrodo.

A resistência da terra circunvizinha é componente fundamental e que efetivamente determina o valor da resistência de uma malha de aterramento bem executada, e depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição da corrente provinda do eletrodo, sendo esta determinada principalmente pela forma e dimensão do mesmo.

De que forma uma malha de aterramento responde a fontes com frequências tão diferentes, seja no caso de prevenir contra um choque elétrico no ambiente residencial, comercial ou industrial, como no caso de manobras em linhas de transmissão ou de descargas atmosféricas?

A malha de aterramento está sujeita a diferentes solicitações por quatro fontes principais;

Dentro do sistema industrial, quando na ocorrência de defeitos para a terra.

Por tensões ou por correntes impressas, e estas fontes são basicamente representadas pelos transitórios eletromagnéticos.

Por manobras de chaveamento no sistema de potência.

Pelo escoamento e dissipação da elevação do potencial gerado por cargas eletrostáticas.

Surgem através destas fontes, eventos com larga faixa de frequências para serem conduzidos a terra e as malhas de aterramentos devem ser projetados para escoar e dissipá-los com eficiência no solo [8].

Nesta situação, na qual devem existir topologias distintas para os diferentes distúrbios, os aterramentos se complementam e são interligados através da chamada “Barra de Equipotencial Principal” – BEP pelo costume comum, e que melhor seria denominada, se esta barra fosse chamada de Barra de Referência Principal.

Pode-se dividir esta faixa de frequência dos distúrbios em três grupos principais [8]:

Frequências industriais (solicitações lentas) abrangem os requisitos dos projetos para o alívio de potencial eletrostático, para a correta atuação na proteção de defeitos a terra e no curto-circuito fase-terra do sistema de energia (representado pelas baixas ordens de harmônicos de 50 ou 60 Hz).

Frequências médias que surgem devido aos transitórios oscilatórios (5 a 500 kHz) que ocorrem em geral nas manobras de chaveamento dos circuitos do sistema de potência:

Frequências altas que têm como causa principal os transitórios impulsivos que surgem com as descargas atmosféricas (0,5 a 500 MHz) [8].

É importante ressaltar que no caso das correntes sejam elas devidas a descargas atmosféricas ou também pela proximidade das ligações das armaduras energizadas de máquinas ao aterramento, estas correntes originam gradientes de tensão (na malha ou no solo), e esta diferença de potencial entre os membros inferiores possibilitam a penetração de correntes elétricas que circulam através dos corpos que estejam próximos criando riscos para as pessoas e de forma similar para os animais.

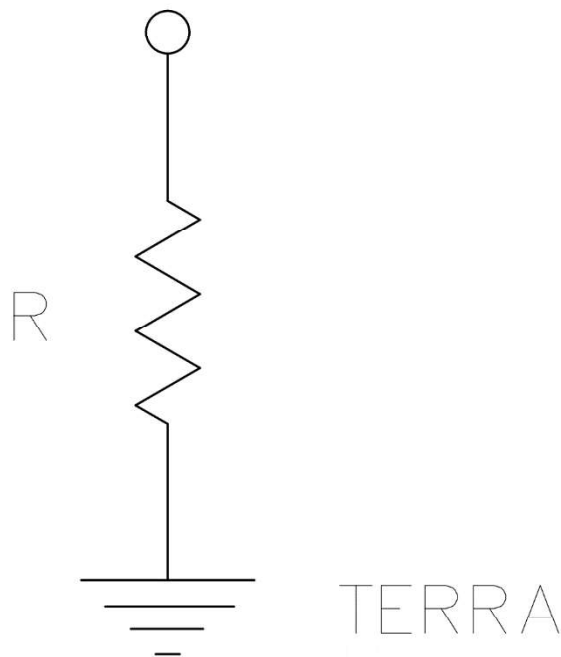
Desta forma, ainda que possa parecer que existem vários aterramentos, com malhas distintas para atendermos as diferentes solicitações de faltas a que o sistema de energia está sujeito, surtos de sobretensão e a dissipação de cargas eletrostáticas, este pensamento é válido apenas no estudo inicial da proteção dedicado a compreensão de cada necessidade.

O que devemos considerar; valor da resistência ou da impedância de terra?

Em face da frequência da fonte de distúrbio, a conexão a terra apresenta resistência, capacitância e indutância [7], cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para o solo. Portanto, a princípio não se deve pensar apenas numa resistência de aterramento, mas numa impedância.

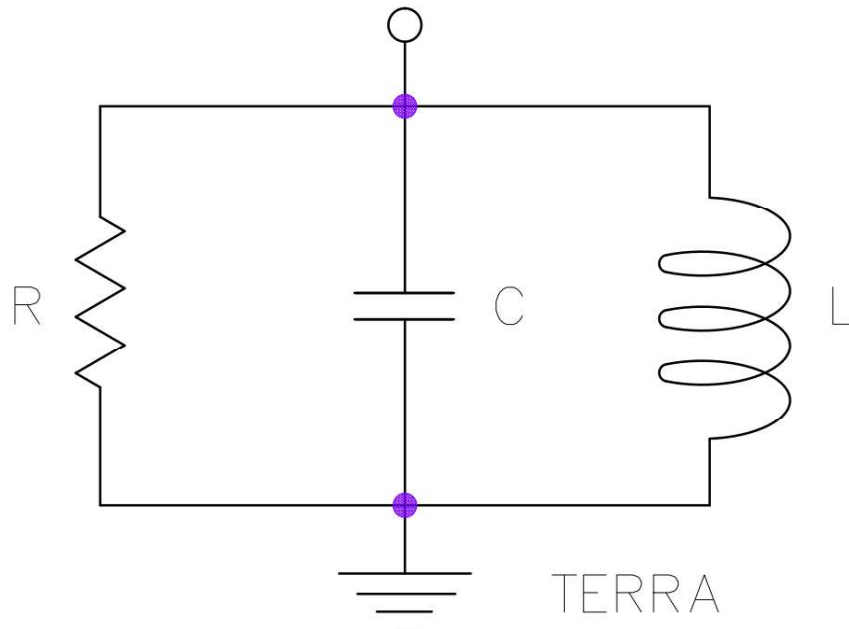
Especificamente para solicitações lentas ou de baixa frequência, o sistema de aterramento envolvendo hastes e cabos horizontais podem ser representados por sua resistência ôhmica [8], conforme a figura a seguir.

Figura 1 – Representa o modelo simplificado para uma malha de aterramento para solicitações de baixa frequência [8].



No caso mais geral, para surtos extremamente rápidos com frente de onda íngreme, todos os três elementos R, L e C do sistema de aterramento terão influência, resultando no circuito a seguir.

Figura 2 – Representa o modelo de parâmetros distribuídos para uma malha de aterramento para solicitações de alta frequência[8].



Como evoluiu o aterramento ao longo do tempo?

Observa-se que as ligações a terra apresentaram modificações em virtude das necessidades de segurança das pessoas e depois pela evolução da tecnologia. Resumidamente, seguem de forma simplificada algumas das fases da evolução do aterramento:

O aterramento intencional surgiu com Benjamin Franklin [12] (em 1752) com a ligação a terra para o seu mastro com ponta captora. Este procedimento se mostrou bastante eficaz na proteção das edificações e sua aplicação se disseminou nos Estados Unidos da América e pela Europa.

Também na Europa, Carl August Steinheil que era professor na Universidade de Munique criou em 1838 o primeiro telegrafo regular que utilizava a terra como condutor de retorno.

Por volta de 1890 o uso do solo para as telecomunicações (telegrafo) e para a tração elétrica por corrente contínua estavam em franca utilização nos grandes centros.

Nos primeiros anos da distribuição de energia em corrente alternada houve muita discussão entre “experts” se este sistema de energia deveria ou não ser aterrado.

A disputa entre a distribuição de energia em corrente contínua era liderada por Thomas Edson e a distribuição em corrente alternada que foi concebida por Nikola Tesla ocorreu nas duas últimas décadas do século XIX, e ficou conhecida como a “Guerra das Correntes Elétricas”.

O termo aterrar nesta época referia-se apenas a ligação ao solo de um dos condutores de corrente, o qual foi chamado de “Neutro”.

Em 1892 o conselho de incêndio de Nova York emitiu um relatório condenando a prática de aterrar o neutro como ato perigoso e ordenou que esta prática fosse suspensa [4].

A única especificação mandatória da primeira edição do “National Electric Code - NEC” (1897) foi somente para aterrar os para-raios [4].

Somente 16 anos mais tarde, em 1913 o NEC tornou mandatório o aterramento do neutro, e refere-se a ele como condutor aterrado [4].

Em 1915 com a contribuição oferecida pelo método de estratificação do solo em camadas desenvolvido por Frank Wenner, foram possíveis os estudos para o conhecimento das técnicas de distribuição de tensão no solo, e nesta época surgiram os primeiros modelos para os arranjos de condutores para os aterramentos.

Em 1949 é publicada a primeira edição do livro de Erling D. Sunde [6] que reúne em seus capítulos as expressões matemáticas que modelam e formulam as associações entre condutores horizontais com os eletrodos verticais, que compõem a malha de aterramento.

Desde então o sistema de aterramento através do uso das malhas de aterramento apresentou evoluções na sua finalidade e topologia [13] e são elas:

Utilização da malha de aterramento para redução dos potenciais de toque e passo nas faltas do sistema de energia.

Utilização da malha de aterramento do sistema de energia também para a proteção de equipamentos sensíveis.

Utilização de malhas de aterramentos independentes, “isolando” o aterramento de equipamentos sensíveis da malha de aterramento do sistema de energia.

Utilização da malha de aterramento radial de “ponto único”.

Utilização da malha de terra de referência (M.T.R.), também conhecida como “signal reference grid”.

O projeto da malha de aterramento desenvolvida para o LEAT foi baseado na Teoria de Cavallius publicada em 1969 [3]. A simulação para a avaliação da solução do projeto desta malha é baseada nas equações gerais do modelo eletromagnético com parâmetros distribuídos das Linhas de Transmissão [10].

Como se pode entender o comportamento dos surtos ao trafegar nos condutores?

O modelo de linhas de transmissão difere do modelo ordinário de circuitos elétricos num aspecto essencial.

Embora as dimensões físicas das redes elétricas sejam menores que o comprimento de onda da fonte em operação, as linhas de transmissão são usualmente uma fração considerável de um comprimento de onda e pode na sua extensão ser de muitos comprimentos de onda.

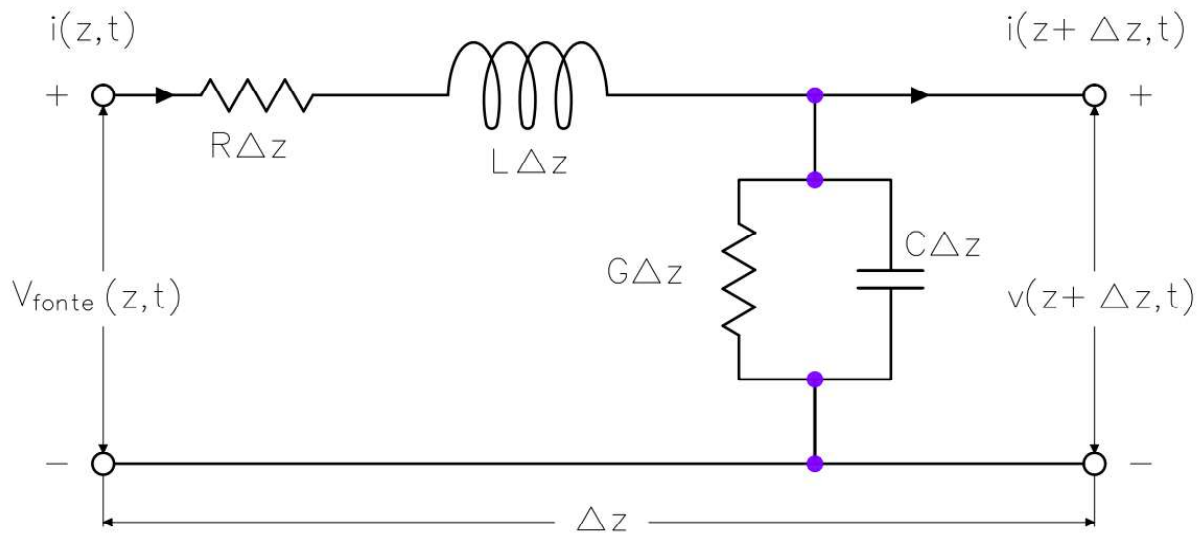
Os elementos de circuitos elétricos ordinárias podem ser considerados agrupados ou discretos e desta forma descritos como parâmetros concentrados. Assume-se que a corrente fluindo nos circuitos com elementos concentrados não varia espacialmente sobre os elementos e que as ondas estacionárias não existem nesta situação [11].

Por outro lado, uma linha de transmissão é uma rede elétrica de parâmetros distribuídos e deve ser descrita pelo modelo de circuitos distribuídos através do seu comprimento.

Na aplicação do projeto da malha de aterramento quadriculada aplicado no LEAT, o seu modelamento eletromagnético pode ser simplificado focando-se na situação específica dos transitórios em linhas de transmissão. Neste caso prático, as fontes não são harmônicas no tempo e tampouco existe regime estável.

Os repentinos impulsos de tensão que são produzidos pelo gerador do laboratório ou pelos surtos atmosféricos que são objeto de estudos e testes no laboratório fizeram convergir o projeto da malha de aterramento para o modelo de linhas de transmissão com baixas perdas.

Figura 3 – Representa o modelo de Linha de Transmissão (L.T.) com parâmetros distribuídos, condutor com baixas perdas [10] para simulação de uma Onda trafegando em um trecho de uma malha de aterramento para solicitações de alta frequência.



Neste caso consideramos um comprimento diferencial Δz para a linha de transmissão que é descrita pelos quatro seguintes parâmetros [10]:

R, resistência por unidade de comprimento (em ambos os condutores), (Ω/m).

L, indutância por unidade de comprimento (em ambos os condutores), (H/m).

G, condutância (do meio) por unidade de comprimento, (S/m).

C, capacitância por unidade de comprimento, (F/m).

Ressalte-se que R e L são elementos em série e G e C são elementos em derivação (shunt).

As quantidades $v(z, t)$ e $v(z + \Delta z, t)$ representam tensões instantâneas em z e $z + \Delta z$, respectivamente. De maneira similar $i(z, t)$ e $i(z + \Delta z, t)$ representam correntes instantâneas em z e $z + \Delta z$, respectivamente [10].

Aplicando a lei de tensão de Kirchhoff, obtemos: .

$$v(z, t) - R \Delta z \cdot i(z, t) - L \Delta z \cdot \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} - v(z + \Delta z, t) = 0, \quad (20).$$

O que conduz a:

$$- [v(z + \Delta z, t) - v(z, t)] / \Delta z = R i(z, t) + L \Delta z \cdot \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (21)$$

No limite de $\Delta z \rightarrow 0$, obtemos:

$$- \frac{\partial v(z, t)}{\partial z} = R i(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} \quad (22)$$

Similarmente, aplicando a lei de corrente de Kirchhoff para o nó N, obtemos:

$$i(z, t) - G \Delta z \cdot v(z+\Delta z, t) - C \Delta z \cdot \partial v(z+\Delta z, t) / \partial t - i(z+\Delta z, t) = 0 \quad (23)$$

Dividindo-se tudo por Δz e fazendo-se o limite de $\Delta z \rightarrow 0$, obtemos:

$$- \partial i(z, t) / \partial z = G \cdot v(z, t) + C \cdot \partial v(z, t) / \partial t \quad (24)$$

As equações:

$$- \partial v(z, t) / \partial t = R \cdot i(z, t) + L \Delta z \cdot \partial i(z, t) / \partial t \quad (25)$$

e

$$- \partial i(z, t) / \partial z = G \cdot v(z, t) + C \cdot \partial v(z, t) / \partial t \quad (26)$$

São as equações gerais das linhas de transmissão, às vezes referidas como equações do telegrafista ou equações do telegrafo.

Para as linhas com baixas perdas [10], $R \ll \omega L$ (27), $G \ll \omega C$ (28) e estas condições são em geral satisfeitas nas altas frequências.

Desta forma a impedância característica,

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \cong [1 + 1/2j\omega \cdot (R/L - G/C)]; \quad (29)$$

Resulta:

$$R_0 \cong \sqrt{(L/C)} \quad (30), \text{ também chamada Impedância de Surto } Z_s \text{ [8].}$$

$$X_0 \cong [1/2j\omega \cdot (R/L - G/C)] \cong 0 \quad (31).$$

A tensão e a corrente se propagam ao longo da linha com velocidade $u_p = \omega/\beta$ (26).

$$u_p \cong 1/\sqrt{(LC)} \quad (32).$$

Dentro destas premissas para o modelo de Linha de Transmissão com baixas perdas, considerou-se a seguinte expressão para análise do comportamento de um surto em alta frequência em um trecho da malha projetada para o LEAT:

$$Z = \sqrt{(L/C)} + \omega L \quad (33).$$

Como a modulação do comprimento dos condutores que formam a grade de uma malha de aterramento com o uso de fitas chatas é escolhida de forma apropriada?

Procurar entender como a geometria do condutor que forma a modulação da grade metálica tem importância no comportamento e propagação de um surto foi parte instigante do trabalho.

Destaca-se a publicação [17], na revisão sobre a indutância: Oliver Heaviside certa vez comentou que a melhor maneira de medir a indutância é com uma "Fita Métrica".

Ele estava chamando a atenção para o fato de que a Indutância é essencialmente uma propriedade geométrica do circuito.

$$L = \Phi/I \text{ (34).}$$

A Indutância de um condutor representa o fator de proporcionalidade entre o fluxo magnético produzido por linhas fechadas do campo magnético por unidade de corrente associada a este condutor.

Na literatura especializada recente são encontradas apenas citações que relaciona o comprimento da onda emitida e a previsão da sua atenuação no meio condutor. Porém não se encontra nestes trabalhos nenhuma demonstração deste fato. Elencamos algumas destas citações:

De longe a melhor maneira de se obter uma conexão de baixa impedância para um sinal, na ampla faixa de frequências, é ligando-o a um sólido plano metálico de terra.

A impedância do plano será de três a quatro ordens de grandeza menor do que a de qualquer condutor individual. Isto produz um verdadeiro sistema multiponto de aterramento e é frequentemente referido como ZSRP (zero signal reference point), ou ponto de referência de sinal zero ou nulo [1].

A segunda melhor maneira de se obter uma conexão de baixa impedância é usar uma grade metálica como forma da malha de aterramento.

Uma grade pode ser considerada como um plano repleto de orifícios em si (A essência da Teoria de Cavallius [3]). À medida que os orifícios na grade são menores que o comprimento de onda ($L_{\text{condutor}} < \lambda/20$) na alta frequência de interesse, a grade tanto mais se aproximará do comportamento de um plano metálico e será frequentemente mais fácil de ser implementada [1].

A melhor definição para um aterramento de sinais é ser considerado como caminho de baixa impedância para o retorno da corrente para a fonte [1].

Pesquisas que estabeleceram que “se o comprimento do condutor não for maior que 1/10 a 1/20 do comprimento de onda do sinal emitido, então a diferença de potencial estabelecida entre as extremidades do condutor é praticamente desprezível” [13].

Em frequências muito altas, o condutor da grade funciona como um perfeito curto circuito para a onda [15].

Para visualizar o comportamento de uma onda de alta frequência que é representada por um impulso de tensão trafegando em um condutor de cobre eletrolítico na forma de uma fita de cobre, foi elaborada uma simulação cujos parâmetros dados estão

apresentados na tabela 2 no Anexo II, a figura 4 ilustra a ideia da simulação, a qual foi elaborada com os seguintes parâmetros:

$$V_0 = 1,0 \text{ (MV)}.$$

$$V1 = V_0 \cdot \cos(\omega t - \beta l). \quad (35).$$

$$V2 = V_0 \cdot e^{-\alpha l} \cdot \cos(\omega t - \beta l). \quad (36).$$

$$f = 10,0 \text{ (MHz)}.$$

$$\omega = 2\pi f \quad (37).$$

$$C = L / (R_0)^2. \quad (38).$$

$$L = 0,002 \cdot l \cdot [2,303 \cdot \log(2 \cdot l / (w+t)) + 0,5 + 0,235 \cdot ((w+t) / 2)] \text{ (}\mu\text{H) (cm)}. \quad (39).$$

$$\alpha = (1/2) R \sqrt{C/L} \quad (40).$$

Dimensões da fita de cobre:

t - espessura 0,2 (cm).

W - largura 2,0 (cm).

l - comprimento 20,0 (cm).

Figura 4 – Apresenta o esquema do circuito elaborado para a simulação; como fonte o gerador de impulso com amplitude V_0 1,0 (MV), $f = 10,0$ (MHz), e a fita de cobre utilizada na malha de aterramento projetada para o LEAT. Na sequência abaixo, a forma de onda gerada para o impulso de tensão e o comportamento da onda aplicada na fita com o amortecimento previsto na literatura.

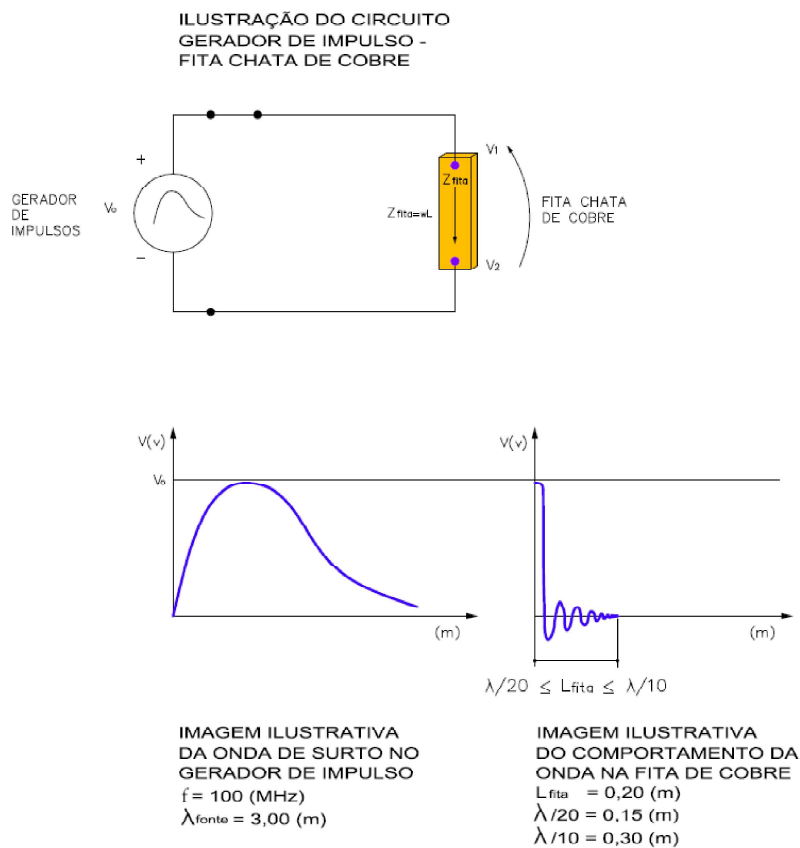
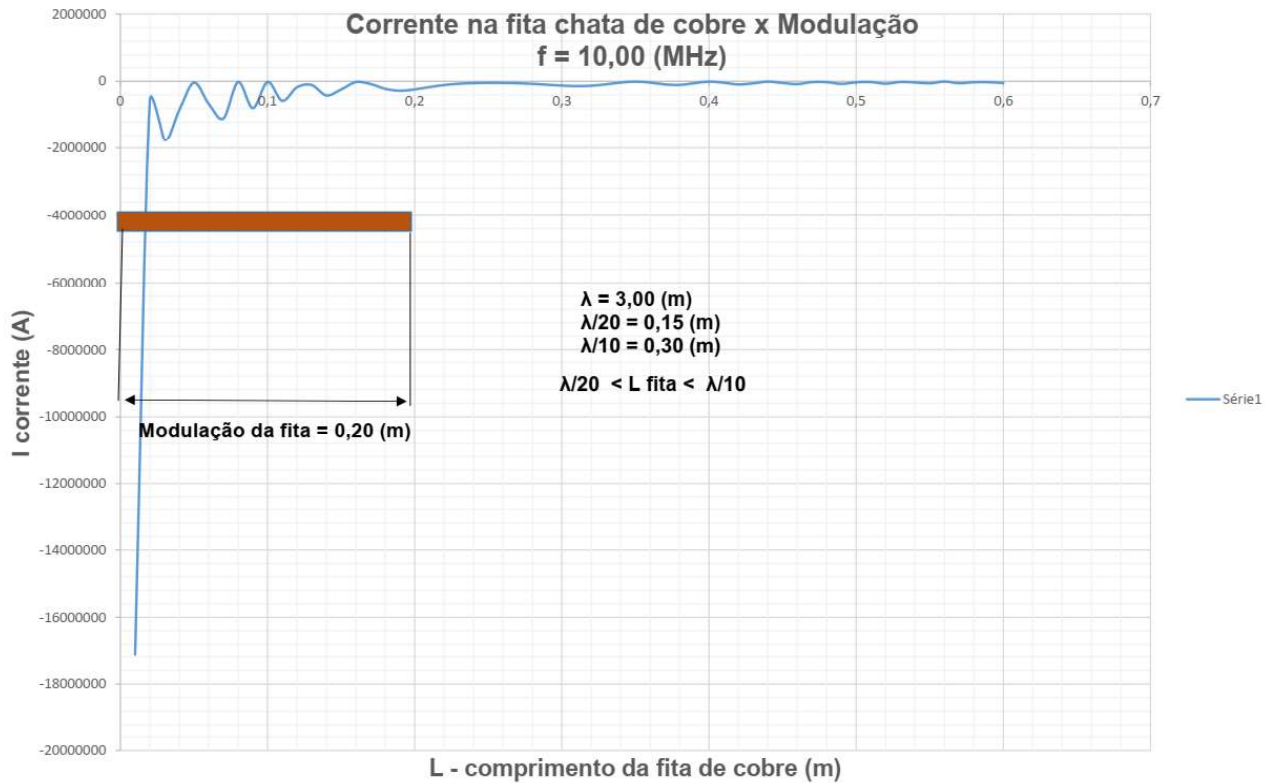


Figura 5 – Apresenta o resultado gráfico obtido da simulação da Tensão aplicada na fita chata de cobre.

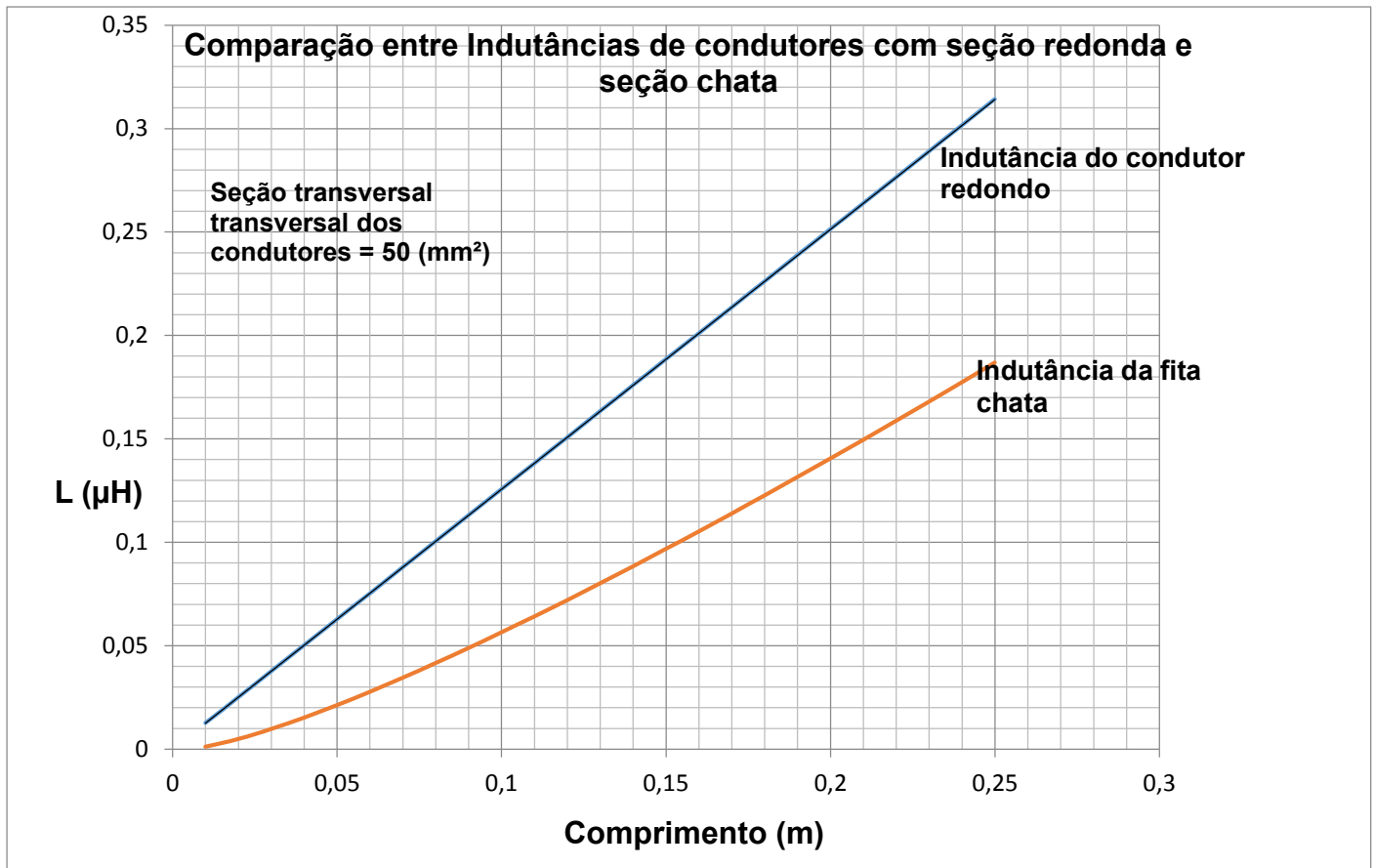


Fonte: o próprio autor.

1) Observa-se que a aplicação de uma onda de tensão com amplitude de 1,0 (MV) e frequência de 10,0 (MHz) no trecho estudado na fita chata de cobre revelou forte atenuação em relação a amplitude inicial da onda aplicada.

2) O fato desta simulação apresentar altíssimas amplitudes de corrente (valor inicial de 1,73 (MA)) e suas oscilações no trecho analisado do condutor revelam um comportamento equivalente a um curto circuito franco, no qual a tensão praticamente se anula, portanto obteve-se o efeito desejado.

Figura 6 – Comparação entre as indutâncias de condutores:



Fonte: o próprio autor.

Conclusão: Para as mesmas seções transversais e mesmos comprimentos constatam-se que a indutância do condutor de seção reta é significativamente menor que o condutor de seção redonda. “Menor indutância, menor tensão induzida.

Equação utilizada para o cálculo da indutância da fita de cobre:

$$L_{\text{fita}} = 0,002 \cdot l \cdot [2,303 \cdot \log (2 \cdot l / (w+t)) + 0,5 + 0,235 \cdot ((w+t) / 2)] \text{ (}\mu\text{H) (cm) [1].}$$

Equação utilizada para o cálculo da indutância do condutor redondo de cobre:

$$L_{\text{cabo}} = (\mu_0 \cdot l) / (8\pi) \text{ (}\mu\text{H) [22].}$$

Existe de fato Equipotencialidade? Ou em que limites de frequências e de comprimentos de ondas faz sentido falar de Equipotencialidade?

A palavra equipotencial está ligada ao conceito de iguais potenciais, ou melhor, à falta de diferença de potencial ou de tensão entre dois pontos. O chamado ponto de equipotencial se refere ao ponto onde a tensão não muda independente da corrente aplicada ou impressa nele [1].

Logo vem à mente a clássica imagem dos pássaros pousados sobre os cabos do sistema de distribuição de energia, nos induzindo ao uso desta expressão. Disto percebemos a relação que nosso cérebro faz com esta imagem do cotidiano, porém este conceito de equipotencial em termos práticos, só faz sentido na baixa frequência e quando o comprimento elétrico do circuito é extremamente pequeno ($L_{\text{circuito}}/\lambda_{\text{operação}} \ll 1$).

Atente-se neste caso para o fato de que no ambiente da baixa frequência a dimensão do valor do comprimento de onda no espaço livre é maior por muitas ordens de grandeza que o comprimento dos circuitos envolvidos, e no caso dos sistemas de distribuição e transmissão o valor do comprimento de onda $\lambda = 5.000,00$ (Km), alcança a ordem de centenas de vezes maior do que o comprimento dos cabos envolvidos nestes circuitos.

A corrente que flui através destes circuitos cujos parâmetros elétricos (RLC) são concentrados não varia espacialmente sobre estes seus elementos (“a corrente é a mesma em todas as partes do circuito”).

Tudo se passa como uma perturbação que se propaga “quase que instantaneamente” ao longo do circuito, e esta suposição somente se sustenta se o comprimento do circuito for pequeno se comparado com o comprimento de onda. Neste caso, a tensão (V) e a corrente (I) têm significados simples, são uteis e bem definidos [11] e as suas avaliações são obtidas através da teoria de circuitos elétricos. Somente dentro desta realidade, o uso da expressão equipotencial faz sentido.

Por outro lado, no ambiente da alta frequência o comprimento de onda é comparável ao comprimento do circuito, e neste caso a variação em corrente e fase do transitório em relação ao circuito torna-se significativa [11]. Sob estas circunstâncias os conceitos simples da teoria de circuitos tendem a tornarem-se inadequados e inexatos.

Deve-se notar também que nesta análise se ignora o efeito da radiação, o qual é importante nas altas frequências. Há então a necessidade de fazermos uma transição do modelo de circuitos elétricos para o modelo eletromagnético da linha de transmissão, ou

seja, dos parâmetros concentrados de resistência, capacitância e indutância para o modelo com estes parâmetros distribuídos continuamente ao longo da linha de transmissão.

Em face da relevância das variações de tensão e fase em relação aos parâmetros distribuídos ao longo do circuito estabelecido para o estudo do comportamento na alta frequência, portanto, no ambiente de alta frequência perde sentido usar a expressão equipotencial.

Desta forma, o emprego corriqueiro e vulgarizado da expressão equipotencial se tornou um vício de linguagem dos profissionais da área e observa-se que o emprego da expressão equipotencial no ambiente da alta frequência gera expectativas que não serão atendidas na proteção das edificações submetidas aos transitórios, sejam eles os surtos internos que trafegam nas enfições das instalações como na dissipação de descargas na estrutura da edificação a ser protegida pelo SPDA. Surge desta má concepção os erros frequentes na coordenação de proteção dos sistemas de energia.

O aterramento para altas frequências [14] tem como objetivo a criação em sua estrutura, de ondas refletidas com polaridade contrária a onda incidente amortecendo ou anulando o surto aplicado no ponto de conexão do aterramento e ao longo da malha.

Neste caso seria muito conveniente a inclusão da palavra “amortecimento” na expressão da malha ou anel de amortecimento e aterramento [8].

Concluindo-se os comentários sobre o uso da expressão “equipotencial”, não se pode deixar de comparar com o uso corriqueiro, contudo inadequado do termo Equipotencialidade na alta frequência, com o consagrado vício de linguagem, tão comum entre os profissionais da eletricidade, de se chamar o condutor de retorno das instalações como “Neutro”, o qual somente é Neutro na especialíssima condição de cargas trifásicas equilibradas nos circuitos de distribuição.

Capítulo III – Literatura consultada.

A leitura e o entendimento da teoria desenvolvida por Niels R. Hiltén-Cavallius e Trinh N. Giao [2], sob o título “Floor Net Used as Ground Return in High Voltage Test Areas”, recomendada por Pissolato, de imediato se mostraram um grande desafio.

Os seus primeiros parágrafos são instigantes e ao mesmo tempo densos em informações, e para melhor compreender a profundidade deste trabalho foram necessárias várias leituras. Cavallius foi um planejador e construtor de laboratórios de alta tensão em diversos países.

Para entender e depois assimilar todo este conhecimento tornou-se imprescindível uma revisão e aprofundamento no eletromagnetismo clássico a fim de poder caminhar entre modelos de condução de eventos com baixa frequência da corrente elétrica no solo e em circuitos convencionais como também para surtos em alta frequência como ondas no modelo de linha de transmissão, e para isto encontra-se suporte nos excelentes livros Field and Wave Eletromagnetics [10] de David K. Cheng e Eletromagnetismo [11] de Kraus e Carver.

O conhecimento do eletromagnetismo de forma mais aprofundada trouxe-nos uma enorme satisfação por compreender melhor a natureza dos fenômenos elétricos, bem como o fortalecimento no aspecto da segurança profissional para poder atuar em projetos de maior complexidade.

De livros e trabalhos de pesquisa que se encontram referenciados na bibliografia foram retirados valiosos ensinamentos e conceitos que possibilitam um alargamento da visão sobre as malhas de aterramento.

A teoria de Cavallius foi o embasamento para a concepção do projeto da malha do LEAT, a qual é apresentada a seguir de forma concisa (texto em itálico):

“Para reduzir problemas e erros de medidas durante testes de impulsos em alta tensão, modernas plantas de testes frequentemente são providas com placas de metal ou malhas colocadas no piso e utilizadas como condutor de retorno a terra”.

É mostrado através de uma análise teórica que tanto através de placas como através de malhas de fitas chatas constituem um considerável avanço sobre condutores convencionais utilizados anteriormente como retorno a terra.

Também é mostrado que a diferença de desempenho entre o uso da placa e a malha é pequena, se a modulação da dimensão dos condutores da malha é escolhida de

forma apropriada. Isto reduz de forma considerável o custo do sistema de aterramento em grandes plantas de testes.

Através dos anos, muito tem sido dito, mas pouco tem sido escrito sobre aterramento de áreas de testes de alta tensão.

Geralmente o problema é associado com o funcionamento dos geradores de impulso, os quais propiciam o surgimento de altas correntes de vários quilo-ampères, e elevadas variações de correntes ($\frac{di(t)}{dt}$ é elevado), da ordem de 10^9 (A/s) e 10^{10} (A/s).

Se neste caso nenhuma providência é tomada surgirão várias dificuldades tais como descargas e danos no sistema de controle ou distúrbios nas medições.

Mas sem dúvida, as mesmas dificuldades podem ser esperadas em qualquer área onde altas correntes e seus derivativos podem ocorrer.

Várias maneiras foram tentadas para contornar as dificuldades causadas pelas variações de altas correntes. Nos bons e velhos tempos, um tipo de arranjo de “somente um ponto de aterramento” era utilizado e o circuito era construído de forma simétrica, com a intenção de reduzir a quantidade de corrente circulando na terra. Tornou-se “uma arte” obter oscilogramas aceitáveis em testes avançados.

Outro método foi utilizar extensas fitas de cobre ao invés de condutores redondos como conexão na terra. Pode ser provado que para a mesma quantidade de metal, a fita tem menor indutância que um condutor redondo, e menores indutâncias implicam em menor tensão induzida no caso de rápidas variações de corrente.

Mais recentemente alguns laboratórios foram projetados com placas de metal ou malhas de metal colocadas sobre o piso ou envolvidas no concreto do piso.

O acesso à malha de metal é feito através de pontos de conexão distribuídos na área de teste. Todos os equipamentos, o gerador de impulso, o objeto de teste, o divisor de tensão estão conectados a estes pontos de contato com a malha de aterramento através de condutores com seção transversal retangular com o mínimo comprimento possível de condutor.

A placa ou a malha servem com condutor de retorno a terra. Um número de fatores afeta a escolha do arranjo apropriado: a malha é menos efetiva, porém menos cara que a placa, e conduz melhor quando envolta em concreto.

O Alumínio é normalmente menos caro que o cobre; entretanto, ele é mais sujeito a corrosão.

Uma malha com cabos finos e de mais larga modulação é menos efetiva, mas também menos cara que uma malha de condutores mais grossos com pequena modulação.

Com o propósito de facilitar a seleção do arranjo mais conveniente, uma análise teórica comparando o desempenho de malhas de metal como retorno da terra com o caso ideal das placas de metal é apresentado. Dois tipos de distúrbios são discutidos.

1) Diferenças de tensão entre diferentes pontos de retorno de terra quando altas correntes ou derivativos de correntes são aplicados em uma área de testes.

2) Erros de medição causados pelo fluxo de parte da corrente de terra ao longo da blindagem de terra dos cabos de medição.

Entretanto, esta análise também pode ser usada para estimar a magnitude de outros distúrbios tais como aquelas que ocorrem em fontes de energia devido às descargas atmosféricas, sistemas de aquecimento com os quais os laboratórios são providenciados.

Esta análise também é aplicável para o caso de cabos acondicionados em eletrodutos metálicos sob a malha de piso, este arranjo é muito recomendado para casos de cuidados severos.

Um assunto não é tratado aqui: o aterramento real (isto é a ligação ao sistema de terra do prédio do laboratório);

“Em um laboratório totalmente blindado e autossuficiente em termos elétricos, qualquer ligação a terra seria desnecessária”.

Entender este comentário de Cavallius tornou-se um enorme desafio e esta observação é instigante pois a primeira ligação da malha de aterramento que nos vem à mente é a conexão intencional com o solo local. Esta análise é objeto de comentário específico nas nossas conclusões do capítulo V.

É verdade que laboratórios usualmente não são autossuficientes; porém as condições para as conexões a terra são as mesmas de qualquer outra instalação elétrica, e este caso não é considerado neste trabalho.

Em síntese, do texto de Cavallius foram de grande importância os seguintes tópicos:

A relevância do uso de fitas chatas ao invés de condutores redondos, pois para uma mesma quantidade de material empregado, a indutância sobre a fita chata é significativamente menor que sobre os condutores redondos, e menor indução significa menos tensão induzida.

A demonstração de que as diferenças dos efeitos de campo eletromagnético entre a placa de metal e a malha de condutor é pequena, e a relação de custos pode variar entre 1:10 até 1:15 a favor da malha, e dependendo da modulação do comprimento dos condutores desta.

A importância que esta topologia de malha tem para absorver correntes dispersas (parasitas) e não apenas como retorno para a terra.

Contudo, constata-se de forma geral nas execuções de malhas a utilização quase que generalizada do uso dos condutores redondos, prática está indicada nas “receitas” de projetos das malhas das subestações e que fazem sentido apenas no ambiente da baixa frequência.

Na literatura existente sobre aterramento destaca-se o livro; EARTH CONDUCTION EFFECTS IN TRANSMISSION SYSTEMS [6], escrito pelo engenheiro Erling D. Sunde, que teve a sua primeira edição em 1949 e a segunda edição revisada pelo próprio autor em 1969. Sunde foi um pioneiro na introdução dos modelos matemáticos para aplicação em malhas de aterramento.

Em especial os ensinamentos abordados nos três primeiros capítulos de Sunde foram fundamentais: i) Conceitos e equações do eletromagnetismo aplicado no modelamento do aterramento; ii) Análise e testes de resistividade no solo; e iii) Modelamento matemático dos diversos arranjos de aterramento; em muito auxiliaram a compreensão da teoria de Cavallius.

Constata-se que o livro de Sunde com a apresentação e desenvolvimento dos fundamentos sobre aterramento tornou-se uma verdadeira “bíblia” para quem estuda este assunto, um livro de referência, no qual a grande maioria dos pesquisadores busca neste a fonte para entendimento dos conceitos e da sua modelagem clássica. Ressalte-se que na ocasião de suas edições não havia a facilidade atual de se simular os modelos em computadores.

Livros que também auxiliaram de forma significativa o desenvolvimento deste trabalho foram Aterramento Elétrico [16] e Choque Elétrico [9] de autoria do professor Geraldo Kindermann, nos quais são explicados de forma simples os efeitos nocivos da corrente elétrica no corpo das pessoas bem como as questões de proteção e segurança da vida com o uso adequado do aterramento.

No livro Aterramentos Elétricos, o professor Silvério Visacro Filho [7] aborda os conceitos básicos, as diferentes técnicas de medição do aterramento e discute as filosofias de aterramento que ampliam o conhecimento deste campo.

Instigantes e ao mesmo tempo esclarecedores são “cases” abordados no livro “Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixa e Alta Frequência” [8], organizada por Marcos Telló, Guilherme A. D. Dias... [et al.], no qual são apresentados recentes trabalhos realizados por este grupo de pesquisadores gaúchos, pois mostram e comentam os roteiros e resultados técnicos conseguidos nos diversos trabalhos executados.

Por fim, porém muitíssimo importante o livro, que através do qual é possível conhecer conceitos usados em compatibilidade eletromagnética e muito aprender sobre as diversas maneiras de se tratar interferências de sinais em alta frequência com os diferentes arranjos de malhas de aterramento. Trata-se do excelente livro “Electromagnetic Compatibility Engineering [1]” de autoria de Henry Ott.

Capítulo IV – O projeto do LEAT.

Ao mesmo tempo que a elaboração deste projeto nos proporcionou uma oportunidade de retorno a academia para estudos orientados e mais aprofundados, também nos trouxe um enorme desafio em face da responsabilidade de se oferecer uma solução técnica confiável para a malha de aterramento de um laboratório de referência e certificação, que garantisse a dissipação dos surtos para a terra e/ou o amortecimento destes de tal forma que não houvesse interferências nos resultados dos testes ali realizados.

Importante conhecer os aspectos da estrutura da edificação e da operação do laboratório conforme segue resumido:

4.1 Características da construção e do sistema de aterramento:

Trata-se de uma edificação com fechamento de paredes com chapas metálicas e estrutura com pilares na sua periferia e cobertura metálica com pé direito elevado.

Todos os seus pilares metálicos existentes estão conectados à malha de aterramento principal com o uso de solda exotérmica. Também estes pilares estão conectados ao sistema de aterramento e proteção contra descargas atmosféricas existente na parte externa.

O planejamento do sistema de aterramento do LEAT abrangeu além da malha de aterramento principal que é objeto desta dissertação, também contemplou o aproveitamento das estruturas de aço para a parte superior da laje de piso em forma de grade (Malha Secundária) e da ferragem de aço de armada na parte inferior desta laje (Malha terciária), de forma que todas estas estruturas de aço se conectam com a malha principal de aterramento do laboratório e que também contribuem para o amortecimento de induções residuais. Também foi projetada a malha de aterramento da subestação de energia predial, a qual está ligada à malha principal.

4.2 Características da operação de um laboratório de testes para extra alta tensão:

Neste tipo de laboratório são realizados os testes para medições dos esforços de rigidez dielétrica para materiais isolantes usados em novos dispositivos e equipamentos utilizados nos sistemas de transmissão de energia.

Estes testes têm especial interesse para desenvolvimentos de novos isoladores ou cadeias de isoladores, nos ensaios de transitórios que simulam chaveamentos em seccionadores e transformadores, na simulação de transitórios produzidos por descargas atmosféricas em pára-raios de linhas e estudos de perdas por efeito Corona, entre outros. O projeto de muitos dos aparatos dos sistemas de potência é governado pelo seu comportamento durante os transitórios.

No caso do projeto do LEAT, o conceito do prédio do foi concebido como uma edificação com paredes de fechamento e teto constituídos por chapas metálicas, portanto foi planejado como uma edificação com uma blindagem natural em relação ao meio exterior.

Para seu ambiente interno foi planejado uma atmosfera climatizada e controlada para toda a área do campo de testes e sala de controle, onde através de um gerador de impulsos podem ser geradas e aplicadas diferentes formas de ondas de tensões as quais podem atingir o valor de 4,0 MV.

Ao lado do campo de testes foi projetada uma sala de comando, onde pesquisadores e técnicos acompanharão com aparelhagem sensível as medições dos ensaios para registrar os resultados obtidos e necessários para emitir as certificações e validações de conformidades referentes aos objetos em prova.

4.3 Etapas do desenvolvimento do projeto.

A elaboração do projeto se deu em etapas, a primeira foi o conhecimento do local onde se construiu o prédio do LEAT.

Foi implantado no campus da Universidade Federal do Pará, em Belém, numa área próxima ao Rio Guamá. Em termos visuais logo se percebe que o local possui um solo rico em umidade.

Medições da resistividade do solo neste local.

Na visita técnica ao local foram efetuadas medidas da resistividade do solo e para estas foi utilizado o método de Wenner. Foram feitas medições com um aparelho terrômetro com quatro hastes e cujos dados são mostrados no Laudo de Estratificação do solo, os quais se encontram no apêndice III.

Algumas informações registradas nestas medições merecem destaque, pois comprovam o acerto da escolha do local do prédio do laboratório, como se observa na planilha de medição e resistividade do solo local da construção do laboratório (tab. 5).

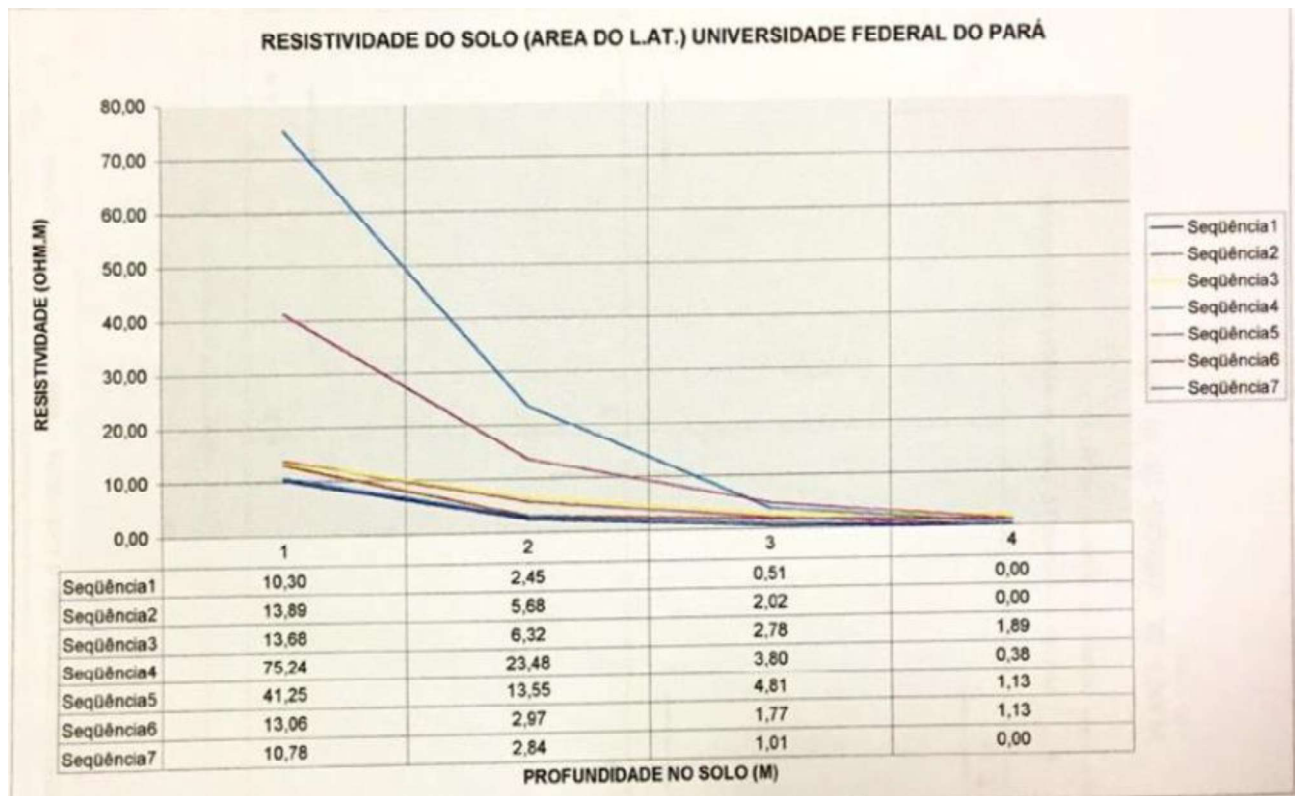
Tab. 5 – Apresenta os valores obtidos na medição da resistividade do solo no local da construção do laboratório, na qual foi utilizado o método de Wenner.

PLANILHA DE MEDIÇÃO DE RESISTENCIA E RESISTIVIDADE DO SOLO			
DATA:		20/12/06	
LOCAL:		UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ	
CLIMA:		UMIDO COM CHUVAS NOS DIAS ANTERIORES	
ASPECTO DO SOLO:		MANGUE	
POSIÇÃO DA MEDIÇÃO	D (M)	R (OHM)	RESISTIV (OHM.M)
PONTO 5	1,00	1,49	10,30
	2,00	0,19	2,45
	4,00	0,02	0,51
PONTO 4	1,00	2,01	13,89
	2,00	0,44	5,68
	4,00	0,08	2,02
PONTO 6	1,00	1,98	13,68
	2,00	0,49	6,32
	4,00	0,11	2,78
	6,00	0,05	1,89
PONTO 14	1,00	10,89	75,24
	2,00	1,82	23,48
	4,00	0,15	3,80
	6,00	0,01	0,38
PONTO 11	1,00	5,97	41,25
	2,00	1,05	13,55
	4,00	0,19	4,81
	6,00	0,03	1,13
PONTO 9	1,00	1,89	13,06
	2,00	0,23	2,97
	4,00	0,07	1,77
	6,00	0,03	1,13
PONTO 2	1,00	1,56	10,78
	2,00	0,22	2,84
	4,00	0,04	1,01

Observa-se nas medições efetuadas que a resistividade média do solo local de $\rho_{(leat)} = 25,46$ (Ωm) é baixa em comparação com amostras de solos comuns mostrados na tab. 1 cujos valores de resistividade ρ variam de 5 a 20×10^3 (Ωm).

Através dos valores obtidos pela medição da resistividade do solo, foi possível a estratificação do solo em duas camadas, $\rho_{p1} = 2,39 (\Omega m)$ em aproximadamente 4,0 (m) e $\rho_{p2} = 1,13 (\Omega m)$ em 6,0 (m) respectivamente. Em face destes resultados, os eletrodos verticais foram projetados com comprimento de 10,0 (m).

A Fig.23 – apresenta a figura dos valores que geram a definição da estratificação do solo em duas camadas ρ_{p1} e ρ_{p2} .



4.4 Concepção e projeto executivo das malhas do LEAT.

Foi baseado totalmente na teoria de Cavallius com a modulação da malha de aterramento com condutores de cobre, na forma de fitas chatas, segue para facilidade o trecho escrito por Cavallius:

..... **“tanto através de placas como através de malhas de fitas chatas constituem um considerável avanço sobre condutores convencionais utilizados anteriormente como retorno a terra. Também é mostrado que a diferença de desempenho entre o uso da placa e a malha é pequena se a modulação da dimensão**

dos condutores da malha de fitas chatas é escolhida de forma apropriada. Isto reduz de forma considerável o custo do sistema de aterramento em grandes plantas de testes”.

Para o desenvolvimento do projeto executivo foram realizadas as seguintes etapas:

- Compreender dentro da técnica o que é e como se comporta uma malha de aterramento diante da aplicação de um surto de alta frequência;
- Entender o comportamento de ondas trafegante no condutor de cobre em forma de fita chata;
- Analisar e escolher o modelo de atenuação da onda e seus parâmetros que melhor refletem o comportamento da onda de tensão neste meio;
- Simular e escolher a modulação adequada da malha de aterramento para o ambiente de testes de simulação para descargas atmosféricas;
- Análise do projeto da malha de aterramento do laboratório de alta tensão da Unicamp.
- Estudo das especificações solicitadas pelo fabricante de equipamentos de testes para laboratórios de alta tensão Haefely.
- Simular os testes da onda em termos de amplitude e frequência para o LEAT;
- Analisar e mostrar graficamente o resultado desta simulação;
- Assegurar tecnicamente que a proposta escolhida é aplicável em termos de eficiência, segurança e viabilidade econômica;

4.5 Etapas principais de cálculo do condutor do projeto do LEAT;

4.5.1 A escolha dos condutores da malha e de sua modulação:

Características:

Material: Cobre macio (eletrolítico).

Forma do condutor: Fita chata.

Dimensão da secção transversal 50 (mm²):

25,0 largura x 2,0 espessura (mm).

Modulação da Malha de aterramento e amortecimento do campo de testes: 20 x 20 (mm).

Modulação da malha periférica ao campo de testes: 100,0 x 100,0 (mm).

Conexões entre as fitas: Solda exotérmica, cujo composição do metal é uma mistura de óxido de cobre e alumínio, não é explosivo e nem está sujeito a ignição espontânea. Este tipo de solda permite o limite de temperatura de até 850°C.

Secção do condutor escolhido 50,00 (mm²).

Ainda que fosse possível utilizar uma secção menor (33 mm²), mais fina, e também devido a baixa penetração do campo elétrico na secção transversal do condutor em face do efeito pelicular na alta frequência envolvida na operação dos testes realizados neste tipo de laboratório (skin effect), optamos por especificar esta seção com um diâmetro maior (50 mm²) para proporcionar mais segurança no processo de execução da malha de aterramento pela resistência mecânica desta seção (robustez mecânica), bem como a facilidade de se encontrar moldes para a solda exotérmica no circuito comercial.

Segue abaixo o dimensionamento térmico do condutor utilizado no projeto da malha principal, o qual apresenta a secção mínima de 33,3 (mm²) com fator de segurança de 30% a menos da temperatura limite para a conexão por solda exotérmica.

Tab. 2 – Apresenta os parâmetros de cálculo da seção transversal mínima para o condutor utilizado na malha de aterramento, [5].

Dimensionamento termico do condutor da malha de aterramento principal

Conforme ABNT NBR 15751:2009, PG 6.

Dimensionamento termico, 6.2.

O condutor deve ter uma seção S capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima If durante um tempo t em que a temperatura se eleve acima de um valor limite suportavel Tm, considerando uma temperatura ambiente TA e que toda energia termica fica retida no condutor devido a pequena duração da corrente de curto.

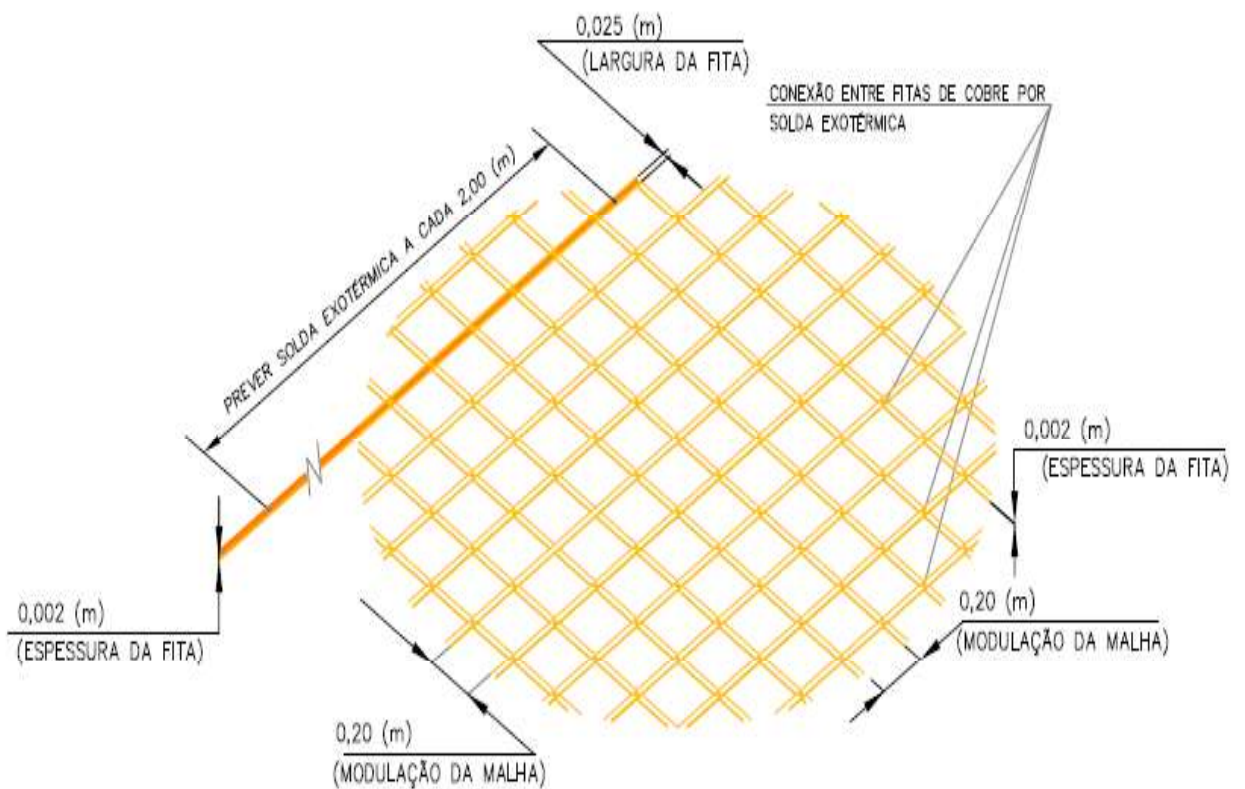
A equação de Onderdonk que permite o calculo desta seção é dada por:

$$S = I_f \cdot \text{Raiz}[(t \cdot \alpha \cdot \rho \cdot 10^{\text{elev}(4)}) / (\text{TCAP} \cdot \text{Ln}((K_0 + T_m) / (K_0 + T_a)))]$$

Tipo do condutor: cobre macio

S	É a seção do condutor, expressa em milímetros quadrados (mm²). (Mínima)	3,33E+01
If	É a corrente de falta fase-terra, expressa em quiloampères (kA).	3,64E+02
t	É o tempo em segundos (s).	4,82E-04
αf	É o coeficiente termico de resistividade do condutor a t °C (1/°C). (20°C)	3,93E-03
ρt	É a resistividade do condutor de aterramento a t °C, expressa em ohm.centimetro (Ωcm).	1,72E+00
TCAP	É o fator de capacidade termica, em joule por centimetro cubico vezes graus °C [J/(cm³.°C)].	3,42E+00
K₀	$K_0 = 1/\alpha_0$ OU $(1/\alpha_r) - T_r$.	2,42E+02
K₀	É o coeficiente termico de resistividade do condutor a 0 °C (1/°C).	
Tm	É a temperatura máxima suportavel, expressa em graus Celsius (°C). Conforme a tab. 2 da NBR15751 para conexões com solda exotermica o limite máximo de temperatura é 850 °C. Para o projeto foi arbitrado um fator de segurança de 30%.	5,95E+02
Ta	É a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C).	2,50E+01
Tr	É a temperatura de referencia das constantes do material, em graus Celsius (°C).	1,08E+03

Figura 7– Detalhe construtivo da malha de aterramento principal do LEAT, área de testes e sala de medição e controle.



DETALHE DA MALHA DA ÁREA DE TESTES

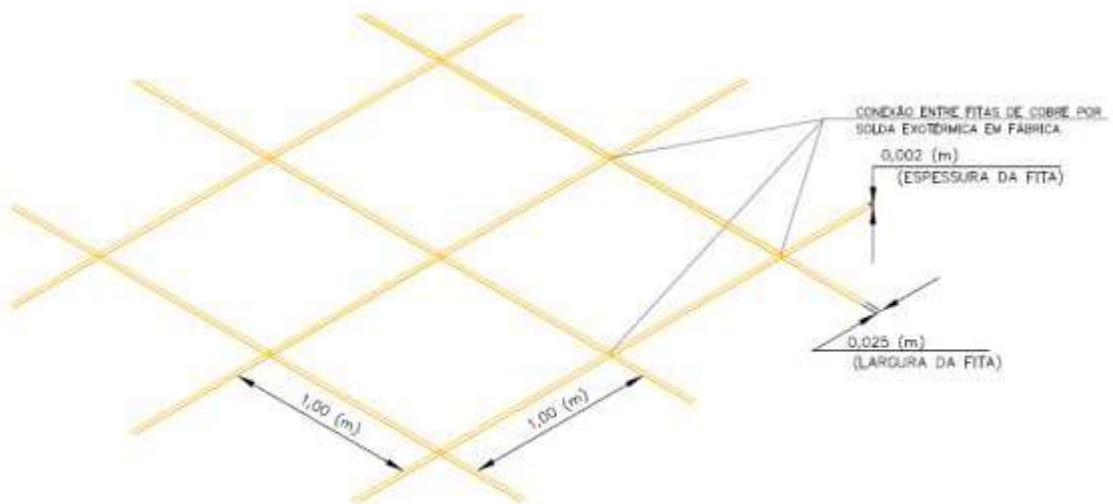
E SALA DE MEDIÇÃO E CONTROLE

DIMENSÕES DA FITA DE COBRE 0,025x0,002 (m)

MODULAÇÃO DA MALHA 0,20 (m) x 0,20 (m)

Detalhes do projeto do próprio autor.

Figura 8 – Detalhe construtivo da malha de aterramento periférica localizada no entorno da malha de aterramento principal.



DETALHE DA MALHA PERIFÉRICA À ÁREA DE TESTES
DIMENSÕES DA FITA DE COBRE 0,025x0,002 (m)
MODULAÇÃO DA MALHA 1,00 (m) x 1,00 (m)

Figura 10 – Planta do projeto executivo da malha de aterramento secundaria ligada a ferragem negativa da armação da laje de piso.

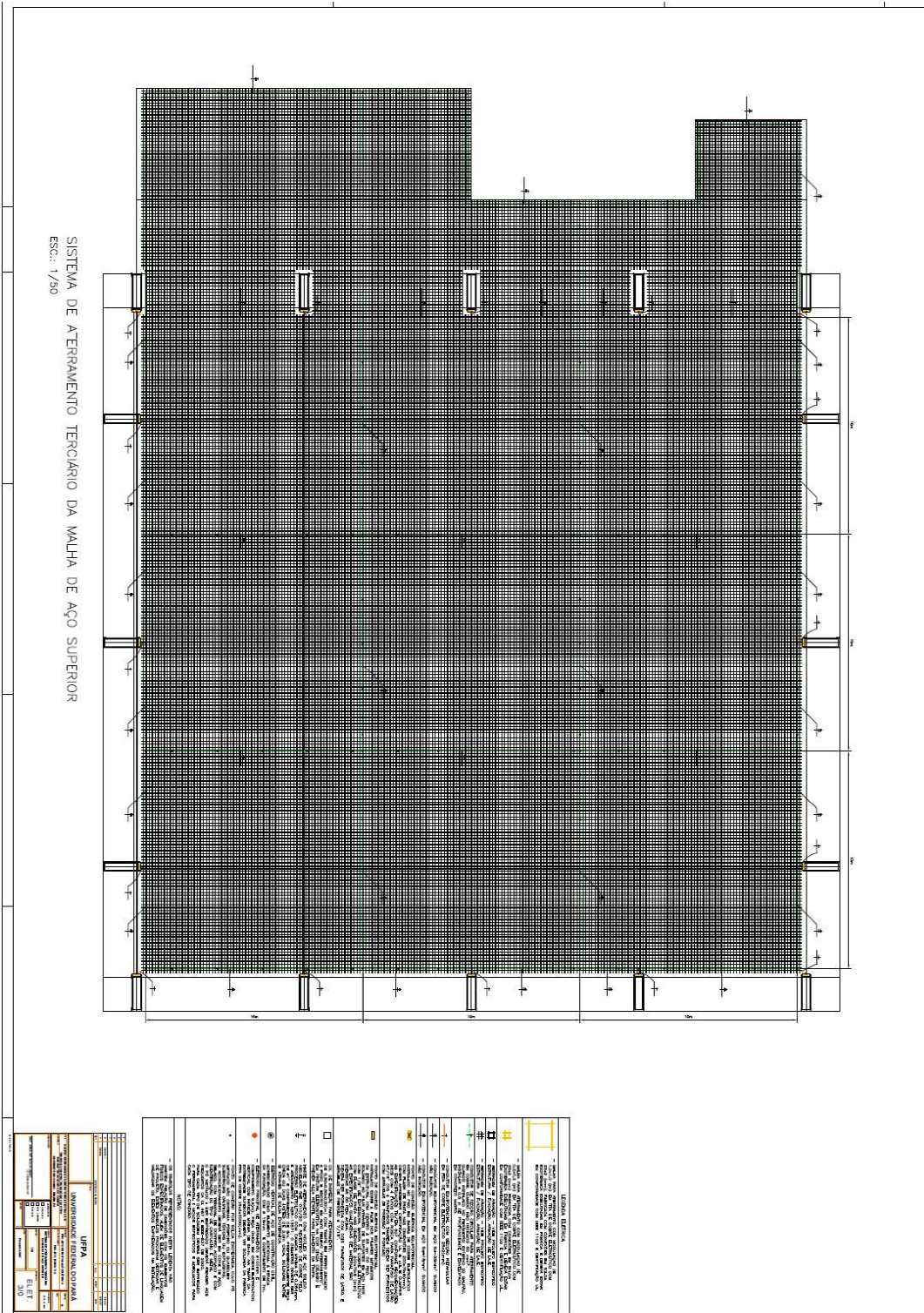


Figura 12 – Planta de detalhes de execução do sistema de aterramento..

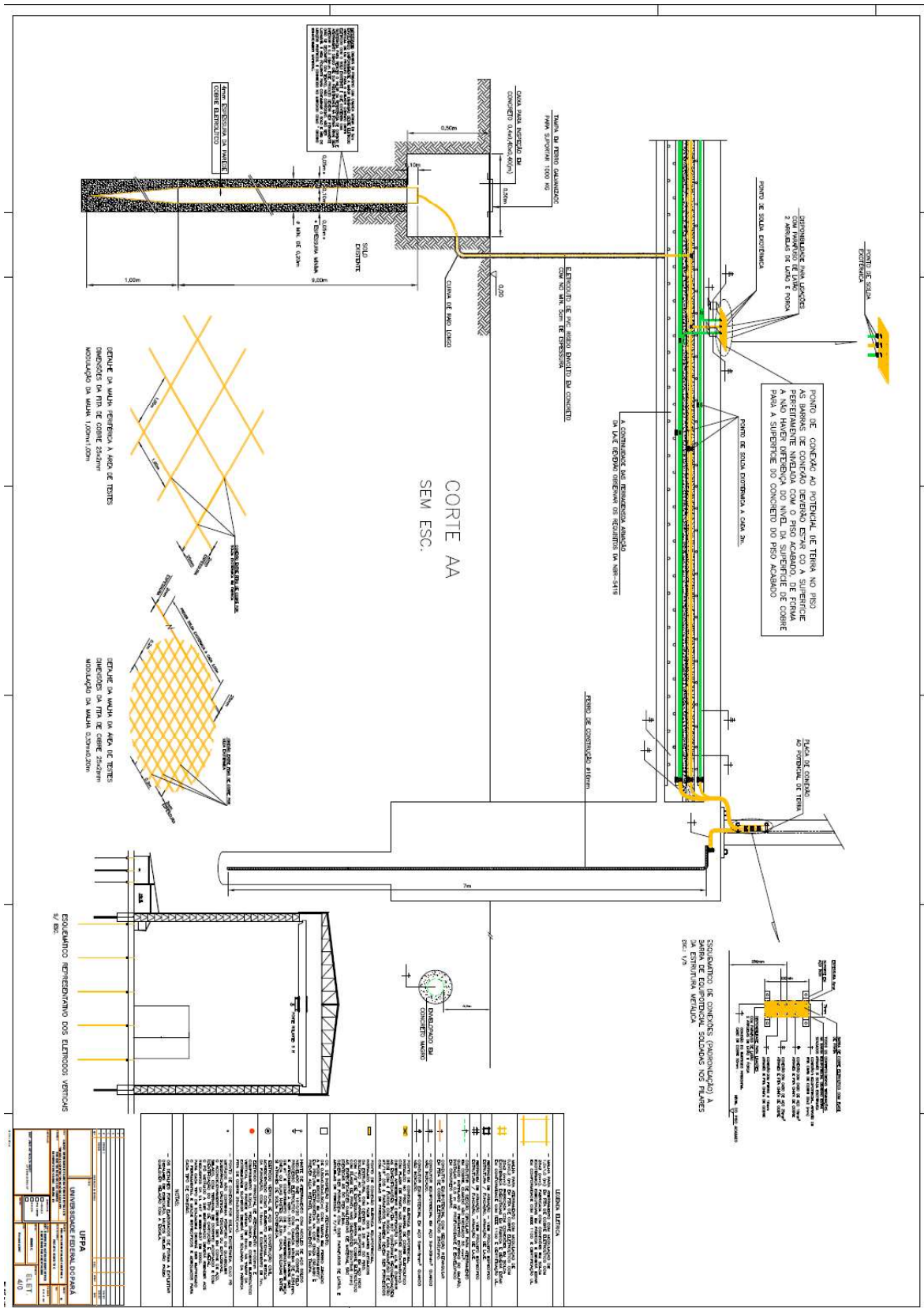


Figura 13 – Foto da malha de aterramento na época da sua execução. Ao fundo a malha periférica e no centro a malha de aterramento principal. Detalhe da malha principal com modulação de 0,20 x 0,20 (m), e no seu entorno a malha periférica lateral com modulação de 1,00 x 1,00 (m), antes do lançamento do concreto para o piso acabado.



Fonte: próprio autor.

Figura 14 – Foto do pórtico para entrada de equipamentos e da malha de aterramento em execução.



Fonte: próprio autor.

Figura 15 - Detalhe do ponto de conexão da malha de aterramento principal ao eletrodo vertical de aterramento.



Fonte: próprio autor.

Capítulo V – Conclusões e sugestão para trabalho posterior.

Conclusões:

As proposições iniciais deste trabalho foram totalmente atingidas. O projeto da malha de aterramento baseado na Teoria de Cavallius para o Laboratório de Extra Alta Tensão da Universidade Federal do Pará foi realizado, sua malha de aterramento executada conforme projetado e este centro de pesquisas e tecnologia encontra-se em plena operação realizando regularmente os ensaios e fornecendo as certificações de seus testes. Este laboratório é hoje o maior centro de testes de extra alta tensão do Brasil.

A jornada pela busca de conhecimento técnico na academia se mostrou extremamente gratificante, ampliou horizontes e trouxe maior segurança profissional. O resultado final destas pesquisas contribuirá para todos aqueles que pretendem aumentar seus conhecimentos nesta vertente tecnológica da eletricidade para a segurança das pessoas e das instalações elétricas.

O aprimoramento acadêmico no eletromagnetismo clássico e as pesquisas que envolveram a compatibilidade eletromagnética foram fundamentais para as simulações realizadas, e que ratificaram plenamente a escolha da técnica utilizada no design da malha de aterramento e amortecimento:

3) A análise do tráfego de uma onda de tensão com amplitude de 1,0 (Mv) e frequência de 10,0 (MHz) através de um condutor na forma de uma fita chata de cobre revelou a forte atenuação para a sobretensão aplicada no trecho do condutor especificado.

4) O fato desta simulação apresentar altíssimas amplitudes (valor inicial de 1,73 (MA)) e suas oscilações de amplitude de corrente no trecho analisado do condutor revelam um comportamento equivalente a um curto circuito franco na extensão escolhida para a modulação em forma de grade para a malha, no qual a amplitude da tensão aplicada praticamente se anulou. Daí termos caracterizado esta malha como de “Amortecimento”.

5) Os resultados obtidos da simulação validaram de forma prática a teoria desenvolvida por Cavallius e o acerto de tê-la considerado

como a premissa básica para a concepção do projeto da malha de aterramento do LEAT.

No trabalho elaborado para o LEAT foram empregados condutores de cobre com secção transversal reta ao invés de condutores redondos mostrados na publicação de Cavallius. Para distinguir esta escolha foi elaborada uma simulação que compara a diferença entre as indutâncias destas secções transversais de condutores, ressaltando a grande vantagem técnica do uso de fitas chatas de cobre, e econômica pela modulação empregada.

A simulação desenvolvida para ilustrar esta comparação demonstra a relevância técnica da citação de Cavallius "Menor indutância, menos tensão induzida".

6) A figura 6 apresenta uma comparação entre as indutâncias do condutor de secção redonda e do condutor em forma de fita chata nas mesmas secções transversais de 50,0 (mm²), considerando-se o comprimento do condutor que modula a malha de aterramento. Constata-se desta simulação que a indutância do condutor de secção reta é significativamente menor, o que contribuiu para a boa performance do desempenho da malha projetada.

7) A análise detalhada dos parâmetros utilizados na simulação da onda de tensão através do modelo de linha de transmissão para condutores de baixas perdas explicou o que apenas é citado na literatura especializada: "*A recomendação para que o comprimento dos condutores da grade da malha de aterramento deve estar no intervalo de $\lambda/20$ e $\lambda/10$ (no caso simulado entre 0,15 e 0,30 (m)), e nesta fração do comprimento da onda emitida ($\lambda/10 < L_{condutor} < \lambda/20$) haverá o amortecimento dos surtos de alta frequência*".

8) Os pontos de solda exotérmica que limitam o comprimento do trecho do condutor em fita, além da função da estruturação mecânica da malha de aterramento, também têm a função de utiliza-los como contrapesos, pois estes pontos de soldas inserem uma diferença de meio condutor e provocam nestes pontos as reflexões de

onda e assim atuam para o seu amortecimento conforme previsto na teoria de L. T. e tão bem ilustrado no diagrama de Lattice.

Por fim, mas a tão importante e instigante explicação para a expressão publicada por Cavallius:

“Em um laboratório totalmente blindado e autossuficiente em termos elétricos, qualquer ligação a terra seria desnecessária”.

Esta expressão se revela no meio técnico como uma verdadeira quebra de paradigma sobre a necessidade do aterramento físico para os impulsos de alta frequência, pois como ficou demonstrado neste trabalho, quando se utiliza uma malha de amortecimento em forma de grade cujas modulações de seus condutores são dimensionadas com os critérios técnicos aqui explicados, a conexão física com o solo pode não ser necessária.

Ao desenvolver as pesquisas para o aprimoramento no conhecimento sobre malhas de aterramento, estas também proporcionaram a elaboração de um resgate histórico dos primeiros aterramentos, os quais facilitarão o entendimento deste assunto para os profissionais interessados nesta área das instalações elétricas.

Sugestão para estudos posteriores na área de Malhas de Aterramento:

1. O desenvolvimento de uma metodologia e análise para investigação da condição de integridade dos condutores das malhas de aterramento construídas em locais classificadas pelo risco de explosão ou de difícil acesso, com solos agressivos para testes invasivos.

2. O desenvolvimento de topologias de malhas de aterramento para os novos sistemas de energias renováveis.

Referências Bibliográficas:

- [1] Electromagnetic Compatibility Engineering, Henry W. Ott - John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2009.
- [2] Kindermann, Geraldo. Choque Elétrico. 2ª Edição, 2000. Porto Alegre, Editora Sagra Luzzato.
- [3] Hyltén-Cavallius, Nills R. and Giao, Trinh N. (1969) Floor Net Used as Ground Return in High – Voltage Test Areas, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. pas – 88, nº 7.
- [4] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Std 80™-2013.
- [5] NBR1575 de 2009 Sistemas de Aterramentos de Subestações – Requisitos;
- [6] Sunde, Erling D. (1968) Earth Conduction Effects in Transmission System. Dover Publications, Inc.
- [7] Aterramentos Elétricos – Conceitos básicos, Técnicas de medição e instrumentação e filosofias de aterramento. Silvério Visacro Filho, 1ª Reimpressão Julho de 2005.
- [8] Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequência com apresentação de casos, Marcos Telló (org.), Guilherme A. D. Dias... [et al.]. – Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.
- [9] Choque Elétrico, Geraldo Kindermann - Porto Alegre: Editora Sagra Luzzato, 2000, 2ª Edição.
- [10] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, 2º Edition, 1992.
- [11] Eletromagnetismo, John D. Kraus, Keith R. Carver – 2ª edição, 1986.
- [12] E. Philip Krider, Benjamin Franklin and the First Lightning Conductors. Institute of Atmospheric Physics, The University of Arizona, Tucson, AZ 85721-0081, U.S.A
- [13] Aterramento Elétrico – Procobre, Instituto Brasileiro do Cobre. Autores: Hilton Moreno e Paulo Fernandes Costa.
- [14] X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia elétrica. Curitiba/Paraná, 1989. Grupo IX - Telecomunicações. – Aterramento do Sistema de Telecomunicação e Sinalização da Ferrovia do Aço. Marcelo S. Campos, S.T. Sobral, C.A.S. Ferreira.
- [15] Eletromagnetismo Aplicado, abordagem antecipada das linhas de Transmissão, Stuart M. Wentworth; tradução Fernando Henrique Silveira – Porto Alegre; Bookman, 2009.
- [16] Aterramento Elétrico Geraldo Kindermann, Jorge Mauro Campagnolo. – 3º Edição: Porto Alegre: Sagra – DC Luzzato, 1995.

- [17] Allan Greenwood, *Electrical Transients in Power Systems*, Second Edition, 1991.
- [18] Umberto Eco, *Como se faz uma tese*; tradução Gilson Cesar Cardoso de Souza – São Paulo: Perspectiva, 2014, 25ª ed. Coleção Estudos.
- [19] Benjamin Franklin's Science, I. Bernard Cohen, First Harvard University Press paperback edition, 1996.
- [20] *Redação Científica: A prática de fichamentos, resumos, resenhas*/ João Bosco Medeiros. – 11º Ed. – 4º reimpr. – São Paulo: Atlas, 2011.
- [21] NBR – 14724 Revisão de 2011 – Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação.
- [22] Mathew N. O. Sadiku, *Elementos de Magnetismo*, 3º Edição, Reimpressão de 2008.
- [23] Raymond A. Serway, *Physics for Scientists & Engineers*, 3º Edition, 1992.

Apêndice I: Resgate histórico do Aterramento

O âmbar é uma substância resinosa que desde os tempos ancestrais tem fascinado o homem, tem sido chamada às vezes de karabe, uma palavra da derivação oriental significando “o que atrai a palha” em alusão ao poder que o âmbar possui de adquirir uma carga elétrica pela fricção. Essa propriedade foi observada no século VI A.C. primeiramente por Thales de Miletus ao esfregar um âmbar a um pedaço de pele de carneiro, ele observou que pedaços de palhas e fragmentos de madeira começaram a ser atraídas pelo próprio âmbar e sugeriu a palavra "eletricidade" do grego elektron.

Outra substância mineral, o magneto (provinha da Magnésia na Tessália) era uma pedra que os antigos gregos conheciam e era capaz de atrair pedaços de ferro. O mesmo Tales a mencionou no diálogo Íon de Platão, Sócrates afirmava que com um pedaço de magneto podia ligar vários anéis de ferro comparando este fenômeno à inspiração poética.

Os gregos e depois os romanos permaneceram nesta constatação não conseguindo atingir o nível da explicação científica e esta limitação de conhecimento manteve-se por toda a idade média. Esta situação somente foi modificada no século XIII, ao ser introduzido no ocidente a bússola pelos chineses que já a conheciam desde o século XI.

Na obra “De Magnete” redigida em 1269 pelo cruzado francês Pierre de Maricourt foi feita uma descrição pormenorizada das propriedades dos ímãs. Com elevado senso de experimentação para a época, Maricourt distinguiu claramente o fenômeno da bipolaridade e verificou que cada um dos polos voltava-se para um dos polos do mundo. Constatou a formação de que quatro polos se reduzem a dois após a recomposição do ímã. Pierre de Maricourt permaneceu praticamente desconhecido por mais de trezentos anos.

No Renascimento, a história do magnetismo sofreu um retrocesso enquanto explicação científica. Gerônimo Cardano (1501-76), por exemplo, sustenta no "De Subtilitate" que as pedras vivem, envelhecem e morrem e que "envelhecida a pedra de Hércules não mais atrai o ferro".

A despeito destas ideias dos filósofos da época, a distinção entre atração elétrica e atração magnética bem como as primeiras medidas de atração e repulsão foram

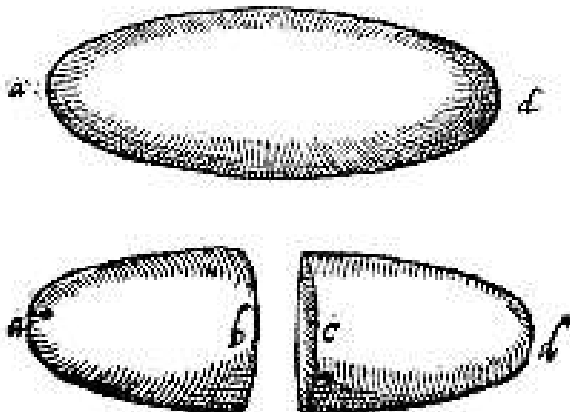
realizadas por Giovanni Battista della Porta (1535-1615), descritas no livro “Magia Naturalis”.

Curiosamente, o personagem responsável pela fundação do magnetismo como ciência não foi um conhecido físico, mas o médico particular da rainha Elizabeth I, William Gilbert. Em sua casa em Colchester, Gilbert costumava reunir um grupo de estudiosos para debater todos os problemas da época. Ao transferir-se para a corte, a fim de atender exclusivamente à rainha, formou na residência londrina uma vasta coleção de livros, instrumentos e minerais, sempre à disposição dos amigos apaixonados pelos mesmos interesses. Era um grande animador de reuniões, que depois se tornaram regulares e mensais. Foram elas que levaram à formação da Royal Society, instituição que exerceu papel fundamental no desenvolvimento da ciência inglesa.

Não foi através da medicina que Gilbert ingressaria na história da ciência; isso aconteceu com a publicação, em 1600, da obra "De Magnete, Magneticisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure - Physiologia Nova".

O maior mérito do "De Magnete" consiste justamente em apresentar mais de seiscentas experiências, em parte feitas pelos predecessores, outras realizadas por ele mesmo sob as orientações de informações recebidas quase sempre de homens do mar. Retomando as ideias de Pierre de Maricourt, Gilbert foi o primeiro a chamar de polos as extremidades de uma agulha que ficam dirigidas para o norte e para o sul da Terra. Definiu como magnéticos os corpos que, como os ímãs, se atraem, e descobriu as afinidades e diferenças entre corpos elétricos e corpos magnéticos, a Gilbert cabe o mérito da distinção entre o magnetismo e a eletricidade.

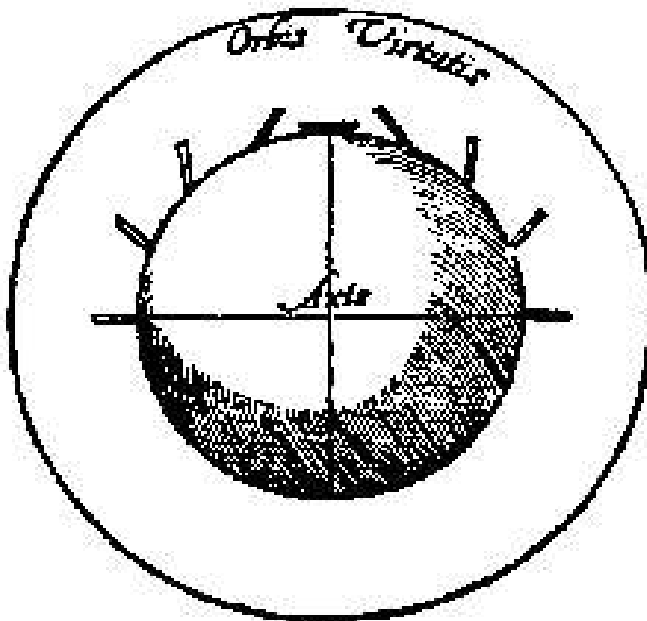
Fig. 16 - Recomposição de polos por Willian Gilbert em 1600, o qual resgatou as ideias de Pierre de Maricourt.



Gilbert escreveu que a razão pela qual o âmbar atritado era capaz de atrair penas era a remoção de um “humor”, o que levava a criação de um “eflúvio” que flutuava em torno dele. Estas palavras hoje em dia parecem estranhas, mas substituindo-as por “carga” e “campo”, ele teria dito que: quando se esfrega o âmbar uma carga lhe é removida e o resultado é uma variação do campo em torno dele.

Especialmente importantes foram as contribuições de Gilbert a respeito do magnetismo da Terra. Servindo-se engenhosamente de um ímã esférico "terrella" como a chamava e sobre cuja superfície apoiava-se uma agulha, estudou suas propriedades e descobriu que correspondiam às da Terra. Daí concluiu ser esta um grande ímã, conseguindo explicar a direção norte, sul da agulha magnética e sua inclinação, bem como definir o eixo de um ímã e as linhas de força da Terra.

Fig. 17 - A "Terrella" de William Gilbert



"Os raios da força magnética distribuem-se por toda parte em zonas concêntricas, e o centro de tais orbes não fica no polo, mas no centro da pedra (de ímã) e da Terrella. Do mesmo modo, o centro da Terra é o centro dos movimentos magnéticos. "

Assim, o ímã não é uma justaposição de dois centros de atração, mas uma unidade. Daí decorre que as linhas de força se estendem também pelo interior do ímã e formam um circuito fechado.

Gilbert rejeita todas as explicações mágicas, as quais eram correntes até então, desenvolvendo assim uma ideia que exercerá enorme influência sobre Kepler, Galileo e Newton: “os corpos atraem-se em virtude de uma força física que pode ser medida e estudada, essa força pode ser constatada nos ímãs e no ferro”.

Otto Von Guericke estudou matemática e direito na Universidade de Leyden, e notabilizou-se pelos seus trabalhos sobre o vácuo e a eletrostática. Em 1672 criou uma máquina eletrostática constituída por uma esfera envolvida por enxofre que podia ser girada em torno de um eixo enquanto era friccionada com sua mão ou na terra seca. O atrito fazia a esfera acumular eletricidade estática que podia ser descarregada na forma de faíscas, assim surgiu o primeiro gerador de eletricidade estática. O que o levou a criar esse aparelho foram as pesquisas realizadas com base nos trabalhos desenvolvidos por Gilbert. Numa carta ao matemático alemão Leibniz, Guericke descreveu os resultados que obteve.

Fig. 18 - O gerador de Otto Von Guericke.



No ano de 1704 Isaac Newton publicou o tratado “Opticks”, cujo texto teve um enorme impacto na época, pois foi escrito numa linguagem muito mais acessível que a publicação anterior do seu tratado “Principia” (escrito em latim), alcançando através deste um público maior de estudiosos.

Opticks trazia descrições minuciosas de experimentos sobre a luz e o calor acompanhados de cálculos matemáticos, e essa metodologia tornou-se desde então um modelo de como fazer ciência. Neste trabalho Newton também inseriu as famosas

“Queries”, indagações filosóficas de forma a instigar os cientistas do século XVIII para questões nas áreas de ótica, fisiologia de plantas e de animais, calor, eletricidade, magnetismo, química e estrutura da matéria, as quais se tornaram fontes de inspiração para estudos científicos mais aprofundados e conduzidos por aqueles que seriam chamados de filósofos Newtonianos, tais como Henry Pemberton em *View of Sir Isaac Newton's Philosophy*, W. Jacob's Gravesande em *Natural Philosophy*, Henry Boerhaave em *New Method of Chemistry*, J. T. Desaguliers em *Experimental Philosophy* entre outros.

Em 1729, o cientista inglês Stephen Gray notou que os resultados de suas experiências com eletrização tinham alguma relação com o material que utilizava. Gray foi o descobridor da eletrização por indução. Ele supunha que materiais como os metais "conduziam" melhor a eletricidade e assim os denominou de condutores. Para outros, como o vidro, ele chamou de isolantes, já que o efeito da eletricidade nestes corpos parecia estar "isolado" por alguma propriedade característica.

Antes da descoberta da condução da eletricidade, muitos autores como Willem Jacob's Gravesande imaginavam que a eletricidade era algo que fazia parte do objeto eletrificado, como uma “atmosfera” presa ao mesmo. Gravesande explicava a sua teoria da seguinte maneira:

“O vidro contém nele e em torno de sua superfície certa atmosfera que é excitada pela fricção e colocada em movimento vibratório, pois atrai e repele corpos pequenos. As menores partes do vidro são agitadas pelo atrito, e por sua elasticidade o seu movimento é vibratório, o qual é comunicado à atmosfera mencionada acima. E essa atmosfera exerce sua ação mais longe, conforme seja maior a agitação recebida pelas partes do vidro quando se atrita esse vidro.”

A interpretação deste conceito de “atmosfera” se tornou inaceitável quando Gray e Desaguliers mostraram, em 1729, que os efeitos elétricos podiam ser transmitidos a grandes distâncias do corpo atritado. Desaguliers passou a descrever a eletricidade como um “fluido”, ou como um “eflúvio” que pode fluir pelos condutores, mas que não fica dentro deles e sim ocupando uma região em volta.

Desaguliers físico inglês de origem francesa era um ardoroso defensor das ideias de Newton e realizou trabalhos com magnetismo, e se tornou o primeiro autor a empregar o termo “condutor” para designar os corpos que permitiam a passagem de cargas elétricas e “isolante” para os que ofereciam grande resistência à passagem destas cargas.

Nesta época, ainda que surgissem filósofos interessados no conhecimento da eletricidade na França, Inglaterra, Holanda, Itália e Alemanha, as populações das cidades

e campos viviam atormentadas por medos e superstições ligados aos fenômenos elétricos da natureza e como exemplo reproduzo o breve relato:

As tempestades e os relâmpagos eram tidos como “A Ira de Deus” e nestas ocasiões os sinos nas torres das igrejas além de alertarem a população sobre a chegada das tempestades também cumpriam o papel de “afastar os demônios que buscavam as crianças malcomportadas”. Registros da época atestaram que muitos sineiros morreram atingidos pelas descargas elétricas. Na mente das pessoas comuns a eletricidade estava associada ao “espírito do fogo”.

Na Europa surgiram apresentações nas salas de espetáculos e nas cortes reais nas quais eram mostrados os efeitos elétricos provocados pela fricção de corpos, bem como sobre a exposição da atração natural de algumas pedras preciosas como a turmalina, à qual se creditava o poder de uma “atmosfera” mágica. A eletricidade era tida como “um brinquedo dos filósofos da época”.

Até então ninguém havia descoberto como a eletricidade podia ser armazenada ou gerada sem ser através de uma máquina de fricção. Em 1745 e quase ao mesmo tempo isto aconteceu de forma independente por dois experimentadores; o primeiro em outubro, Dean Von Kleist em Camin na Pomerania (atual Alemanha), e aproximadamente dois meses depois por Pieter Van Musschenbroek (um dos mais conceituados professores da Europa) em Leyden na Holanda.

Von Kleist descobriu que através de um frasco de vidro no formato de uma botica farmacêutica, e na qual contendo álcool ou mercúrio e uma haste de ferro, que a mesma era capaz de reter a carga de eletricidade após se eletrificar este aparato com uma máquina de fricção. Após o seu experimento, ele enviou a seguinte descrição abaixo para vários cientistas, entre eles, Dr. Lieberkuhn em Berlin e Dr. Kruger em Halle;

“Quando uma haste ou um fio fino de latão é colocado em um pequeno frasco de farmácia eletrificado, efeitos notáveis acontecem, mas o frasco precisa estar bem seco ou quente. Eu comumente o esfrego antecipadamente com meus dedos nos quais coloco um punhado de cal. Se um pouco de mercúrio ou algumas gotas de “espírito de vinho” são colocados dentro do frasco, o experimento acontece de forma mais intensa. Assim que esta haste é removida do vidro eletrificado, ou o condutor principal o qual foi exposto à eletrificação é retirado, origina-se na garrafa uma chama em forma de um feixe de fogo, e por algum tempo no qual permaneci com esta máquina queimando em minha mão, eu andei aproximadamente 60 passos em meu gabinete. Quando este aparato é eletrizado fortemente, eu posso levá-lo a outra sala e lá “disparar os espíritos do vinho” com ele. Se

enquanto o aparato está sendo eletrizado eu coloco meu dedo, ou uma peça de ouro com a qual eu sustento em minha mão, na haste da garrafa de vidro, eu recebo um choque que atordoia meus braços e ombro”. Von Kleist constatou com esta experiência que o seu corpo em muito contribuiu para o efeito do choque conforme registrou em seus escritos.

A descoberta de Musschenbroek foi o resultado de um acidente. Ao realizar uma experiência para determinar a intensidade da eletricidade, ele suspendeu um tambor de balas de metal de uma pistola, o qual ele carregou com eletricidade a partir de um globo de vidro giratório. A partir do final do lado oposto do tambor em relação ao globo havia um fio de latão, que se estendia para dentro de um frasco de vidro parcialmente cheio com água. Musschenbroek sustentava com uma mão esta jarra, enquanto com a outra ele tentava retirar faíscas do tambor. Repentinamente ele recebeu um choque na mão sustentando a jarra, “que o sacudiu como um raio”, e por um momento ele acreditou que “tinha partido desta vida”. Continuando com seus experimentos ele descobriu que se a jarra fosse colocada sobre uma placa de metal em cima de uma mesa, o choque poderia ser recebido ao tocar-se esta peça de metal com uma mão e tocando o fio com a outra, ou seja, o caminho da descarga através do corpo. Este foi praticamente o mesmo experimento realizado por Von Kleist.

Destas duas experiências que resultaram na descoberta do primeiro condensador de eletricidade, os corpos de Von Kleist e Musschenbroek “contribuíram como condutores de ligação a terra”, ainda que de forma não intencional.

Jean-Antoine Nollet foi um físico e clérigo francês também conhecido como Abbé Nollet teve grande interesse na eletricidade e foi um grande popularizador da eletricidade nos salões e na corte francesa, a ele é reputado a fama de ter dado o nome de “Jarra de Leyden” ao primeiro condensador de eletricidade. No período de 1730-32, Nollet colaborou com os estudos de Charles Dufay, que “descobriu a existência de dois tipos de eletricidade e nomeou-as vítrea e resinosa” (que depois ficaram conhecidas como cargas positivas e negativas), bem como o acompanhou na visão da eletricidade como um fluído sutil o suficiente para penetrar na densidade dos corpos.

Em 1746 ele reuniu cerca de duzentos monges em um círculo de quase 1.600 (m) conectando-os com pedaços de ferro, e então descarregou a carga de uma Jarra de Leyden nesta corrente humana observando que cada homem reagiu ao mesmo tempo ao choque elétrico, mostrando desta forma que a velocidade de propagação da eletricidade era muito alta.

Quase duzentos anos decorreram desde que as primeiras experiências na idade média mostraram que as descargas luminosas eram fenômenos elétricos. Nos Estados Unidos, então colônia inglesa, Benjamin Franklin após a realização de numerosas observações e experiências sugeriu em 1750 a ideia de proteger as estruturas dos prédios e casas das descargas atmosféricas ao instalar nas suas coberturas um tubo de ferro em cuja extremidade superior havia uma ponta e que a extremidade inferior deveria estar enterrada no solo. A instalação do primeiro para-raio dois anos depois marcou a primeira aplicação da tecnologia da eletricidade como proteção através do aterramento.

Franklin iniciou sua vida profissional aos doze anos trabalhando como impressor gráfico junto com um irmão. A sua prática da aplicação de mão-de-obra para as ideias explica em grande parte o molde prático de seu pensamento, assim como a forte influência na sua formação através da leitura dos trabalhos de Isaac Newton, principalmente de *Opticks* e suas "Queries". Franklin aprofundou seus estudos nas experiências de Desaguliers sobre a imponderabilidade elástica dos fluidos e nas suas referências à Hale, notável pesquisador em química e física dos gases, e através destes conhecimentos ele passou a tratar a eletricidade como um fluido elétrico que existia dentro e fora dos materiais. Foi também graças à leitura dos filósofos Newtonianos que Franklin aprendeu sobre os princípios de repulsão e atração elétrica.

A significação da relevância dos experimentos e observações conduzidos por Benjamin Franklin e seus colaboradores no século XVIII com as descargas elétricas, ainda nos dias de hoje não são totalmente compreendidos e valorizados. É importante ter em mente que naquela época o assunto da eletricidade não era uma prioridade para os filósofos e estudiosos da natureza, e para muitos era um "brinquedo da física" e seus efeitos eram úteis para os apresentadores de jogos entreterem os curiosos nas salas de espetáculos.

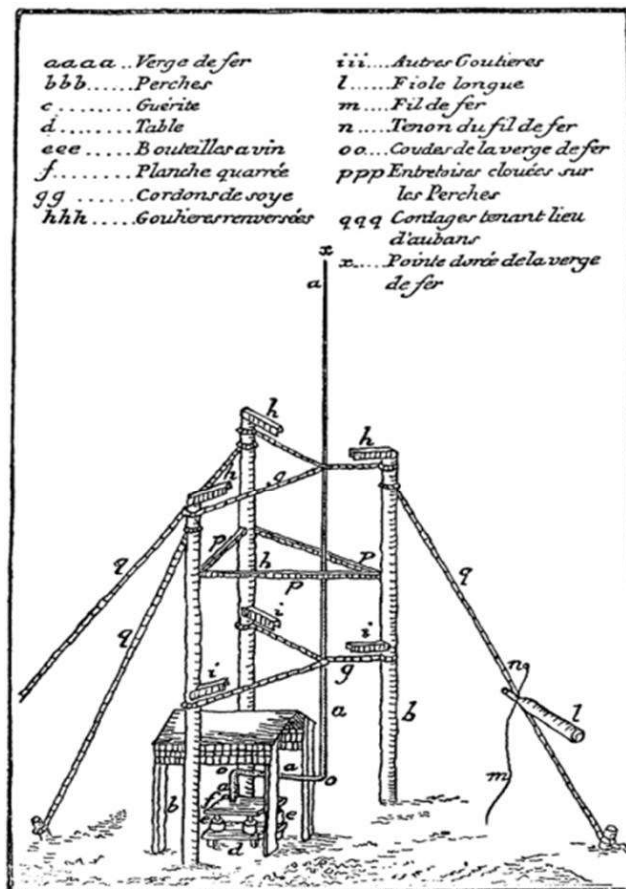
Os experimentos de Franklin foram importantes na história da ciência e na caracterização da eletricidade como tal, pois através destes foi possível mostrar que os fenômenos da eletricidade não ocorriam apenas de forma natural, mas as descargas poderiam ser produzidas por atrito através do âmbar ou do enxofre, ou seja, pela intervenção dos homens. Foi primeiramente com o experimento do "Cubículo de Segurança" em 1749 e depois em 1752 com a "Pipa Metálica" que se comprovou que as nuvens são carregadas de eletricidade e que o relâmpago é uma descarga elétrica.

Em suas correspondências de 1750 endereçadas ao seu amigo e correspondente Peter Collinson junto à “Royal Society of London”, Franklin propunha duas experiências com para raios:

Uma contemplava a montagem do “Cubículo de Segurança”, o qual era um dispositivo não aterrado e foi primeiramente montado na França conforme suas orientações por Jean François Dalibard nos jardins de Marly-la-Ville, em maio de 1752. Este dispositivo tinha o propósito de mostrar que era possível eletrizar objetos com a captação da eletricidade contida nas nuvens.

A outra experiência era com um para raio aterrado e seu propósito era o de retirar o “fogo elétrico de forma silenciosa das nuvens antes que as faíscas das nuvens atingissem os prédios”.

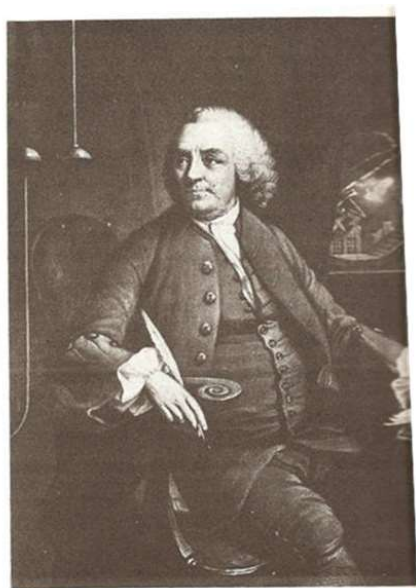
Fig. 19 - Experimento do “Cubículo de Segurança” – Construído em 1749 por Benjamin Franklin.



Segue abaixo um trecho da descrição com recomendações feitas por Franklin:

“Em cada percurso de um raio, eu sou da opinião que o fluxo do fluido elétrico move-se para restaurar o equilíbrio entre a nuvem e a terra, de modo a encontrar a sua passagem, e para marcar, como posso dizer seu próprio curso ou trajeto utiliza-se como seu caminho todos os condutores que pode encontrar tais como metais, paredes úmidas, madeira úmida, etc, e os raios vão muito numa trajetória direta por causa da ajuda de bons condutores, e nesta trajetória realmente move-se de modo silencioso e imperceptível, antes da explosão entre os condutores, e que esta explosão acontece apenas quando estes condutores não podem descarregá-lo tão rápido quanto eles recebem, em razão desta trajetória ser incompleta, desunida entre condutores, condutores muito pequenos, ou não são os melhores materiais para a condução. Haste Metálica, portanto, de espessamento suficiente e que se estende desde a parte mais alta de um edifício até o chão, sendo dos melhores materiais e condutores completos, será penso eu, o necessário para garantir a não construção de danos, seja por restaurar o equilíbrio tão rápido como para prevenir um acidente com explosões. ”

Fig. 20 – Foto de Benjamin Franklin em sua casa, com o detector de descargas ligado ao para-raios.



Portrait of Franklin showing the lightning detector attached to the rod he used in his house in September 1752. This portrait, reproduced from an engraving painted by Mason Chamberlin in 1762, when Franklin was fifty-six years old. Courtesy of the University of Maryland System.

Experiências posteriores em diversas partes do mundo validaram as suposições de Franklin de que barras de ferro com elevada altura e aterradas protegeriam as estruturas dos prédios e igrejas dos estragos dos relâmpagos. O primeiro para raio aterrado foi apresentado ao mundo por Franklin na Filadélfia em 1752 possivelmente em junho, logo após o experimento com a “Pipa Metálica”.

Entre as descobertas de Benjamin Franklin na eletricidade se incluem as seguintes:

A classificação dos materiais entre condutores e isolantes,

A regra do aterramento,

A análise científica da “Jarra de Leyden”,

O design do capacitor de placas paralelas,

O poder dos condutores com formato pontiagudo para retirar e conduzir o “fogo elétrico ou o fluido elétrico” das nuvens,

Coroando todas estas magníficas contribuições à construção da eletricidade como ciência, a Lei da Conservação das Cargas Elétricas.

À Benjamin Franklin se deve o emprego das palavras mais empregadas na eletricidade; Mais, Positivo, Menos, Negativo, Carregar, Descarregar e Bateria Elétrica.

Os primeiros experimentos foram descritos por Franklin a Peter Collinson (membro da Real Sociedade de Londres), através de cinco cartas, as quais foram publicadas em abril de 1751.

1. No primeiro parágrafo da primeira carta, Franklin descreveu “o maravilhoso efeito dos corpos pontiagudos responsáveis pelo desenho e condução do fogo elétrico”. Ele mostrou que os objetos com pontas produziam um efeito visual melhor do que aqueles sem uma forma definida, e que as pontas de objetos de metal eram melhores do às de madeira seca, “que os objetos pontiagudos quando ligados a terra produziam melhores efeitos dos desenhos das descargas elétricas”.

A seguir na carta, Franklin introduziu a ideia de que esfregando vidro em uma máquina de fricção não se criava eletricidade; ou melhor, no instante da fricção o vidro simplesmente tirava “a coisa” do material esfregado (atritado). Algo era acrescentado ao vidro, e em igual quantidade era subtraída da borracha. Os termos mais e menos foram então usados para descrever estes estados de eletrificação, o vidro foi convencionalizado ou assumido como positivamente eletrizado e o material esfregado como negativamente eletrizado.

2. Na segunda carta, Franklin elaborou o conceito de cargas iguais positivas e negativas assumindo o vidro como um perfeito isolante e descreveu o comportamento elétrico da jarra de Leyden, o primeiro capacitor. Ele percebeu a importância da ligação à terra tanto ao carregar como ao descarregar a jarra de Leyden.

3. Na terceira carta, Franklin iniciou o uso de palavras como “carregar e descarregar” na descrição da jarra de Leyden.

4. Na quarta carta, Franklin introduziu o conceito de faiscamento ou estrondo distante. Baseado em sua prévia experiência com o poder das pontas, Franklin especulou que quando uma nuvem eletrizada passa sobre uma região, ela produzirá um efeito de descarregar esta eletricidade nas altas colinas e árvores, altas construções, torres de igrejas, mastros de navios e chaminés. Esta suposição conduziu a um prático conselho que é ainda muito válido hoje em dia; “É perigoso e arriscado procurar abrigo sob uma árvore isolada durante uma tempestade de raios; é mais seguro permanecer no campo aberto”.

5. Na quinta carta, Franklin procurou explicar o poder das pontas. Ele descreveu como as descargas entre condutores com formas suaves ou sem pontas ocorrem com grandes estrondos, em contrapartida, quando com formas pontiagudas descarregam de forma mais silenciosa e produzem grandes efeitos luminosos em distâncias maiores.

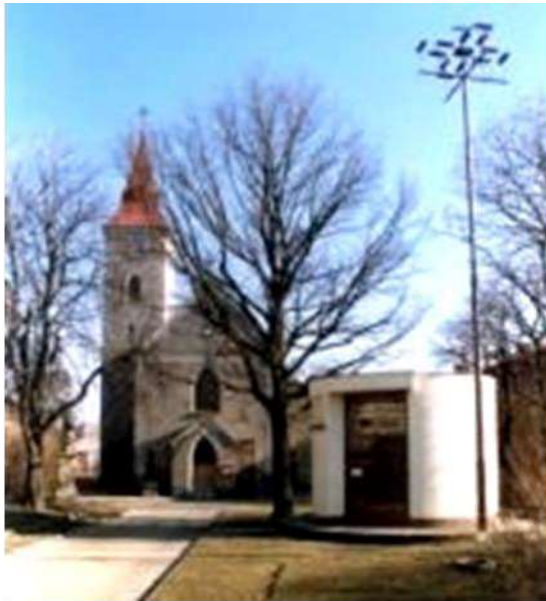
As ideias de Franklin para a proteção dos edifícios sofreram muito preconceito para a sua implementação, porém à medida que o Papa as aprovou e incentivou o uso das pontas aterradas para a proteção das igrejas e catedrais houve uma progressiva desmistificação da eletricidade marcando o seu emprego e o seu estudo como ciência.

Também na Europa, Carl August Steinheil que era professor na Universidade de Munique criou em 1838 o primeiro telegrafo que utilizava a terra como condutor de retorno. É interessante citar que Steinheil por sugestão de Gauss fez experiência para o seu aparelho de telegrafo utilizando os carris da linha férrea como condutores, a qual resultou em fracasso pela fuga de corrente através da terra entre os carris, Isto tornou a exploração destes serviços muito econômica, porém, o surgimento de outras instalações como a da tração elétrica e da telefonia que também utilizavam o retorno da corrente pela terra provocou o surgimento de conflitos de interesses sociais e econômicos devido aos distúrbios por interferência causados de uma instalação na outra.

Em 1754 o Padre Procopius Divis, na Moravia (atual república Checa) também construiu um captor aterrado, ambos não tinham conhecimento do trabalho de um e do outro.

A partir da concepção deste dispositivo que captava e transferia a eletricidade das nuvens para a terra, a humanidade passou a receber uma enorme contribuição para a proteção das aldeias e cidades.

Fig. 21 – Em junho de 1754 o padre Procopius Diviss erigiu na Moravia (República Checa) o primeiro para raio europeu aterrado.



Em 1838 através de Carl August Steinheil que seguindo as aplicações materializadas de indução por Gauss e Weber no telegrafo, criou um aparelho de telegrafo que permitia uma troca de informação regular pela terra.

No final do século XIX com a disseminação do uso da tração elétrica para transporte e da telefonia além das linhas de correntes continua com retorno pelo solo foi ganhando interesse as distribuições de tensão no solo, e o surgimento dos primeiros arranjos de condutores para atenuar este efeito.

Nos primeiros anos da distribuição de energia em corrente alternada houve muita discussão entre “experts” se este sistema de energia deveria ou não ser aterrado.

O termo aterrar nesta época referia-se a ligação ao solo de um dos condutores de corrente, o qual foi chamado de “Neutro”.

Em 1892 o conselho de incêndio de Nova York emitiu um relatório condenando a prática de aterrar o neutro como ato perigoso e ordenou que esta prática fosse suspensa [13].

A única especificação mandatória da primeira edição do “National Electric Code - NEC” (1897) foi somente para aterrar os para-raios [13].

Somente 16 anos mais tarde, em 1913, o NEC tornou mandatório o aterramento do neutro, e refere-se a ele como condutor aterrado[13].

O estudo de prospecção geoletrica do solo (estratificação do solo em camadas) desenvolvido por Frank Wenner no início do século XX e apresentado em 1915, introduziu um método simples e confiável para se conhecer a profundidade da camada melhor condutora do solo (ou menos resistiva). Este conhecimento da característica elétrica do solo abriu portas para o avanço da geologia, ciência dos materiais, agricultura e mais recentemente na localização de lençóis freáticos contaminados.

Através da contribuição oferecida pelo método de estratificação do solo em camadas desenvolvido por Frank Wenner, foram possíveis os estudos para o conhecimento das técnicas de distribuição de tensão no solo, surgiram os primeiros modelos para os arranjos de condutores para os aterramentos.

Em 1949 é publicada a primeira edição do livro de Erling D. Sunde que reúne em seus capítulos as expressões matemáticas que modelam e formulam as associações de condutores horizontais com os eletrodos verticais, que compõem a malha de aterramento.

Na linha do uso da terra como condutor, é importante citar que nas subestações que atendem sistemas de energia com o neutro do transformador aterrado, possuem significativa proteção baseada na atuação de relés que são sensibilizados pelas correntes de desequilíbrio que fluem para a terra.

Desde então o sistema de aterramento foi recebeu evoluções na sua finalidade e topologia [10]:

1. Utilização do sistema de aterramento para redução dos potenciais de toque e passo nas faltas do sistema de energia.
2. Utilização do sistema de energia para proteção de equipamentos sensíveis com a mesma malha de aterramento do sistema de energia.
3. Utilização de sistemas de aterramentos independentes, “isolando” o aterramento de equipamentos sensíveis do aterramento de energia.
4. Utilização do sistema radial de “ponto único”.

5. Utilização da malha de terra de referência (M.T.R.), também conhecida como “signal reference grid”.

6. O incremento dos programas que permitem através de modelo matemático baseado nos elementos finitos, os quais permitem realizar cálculos de tensões nos diversos pontos das malhas de aterramento.

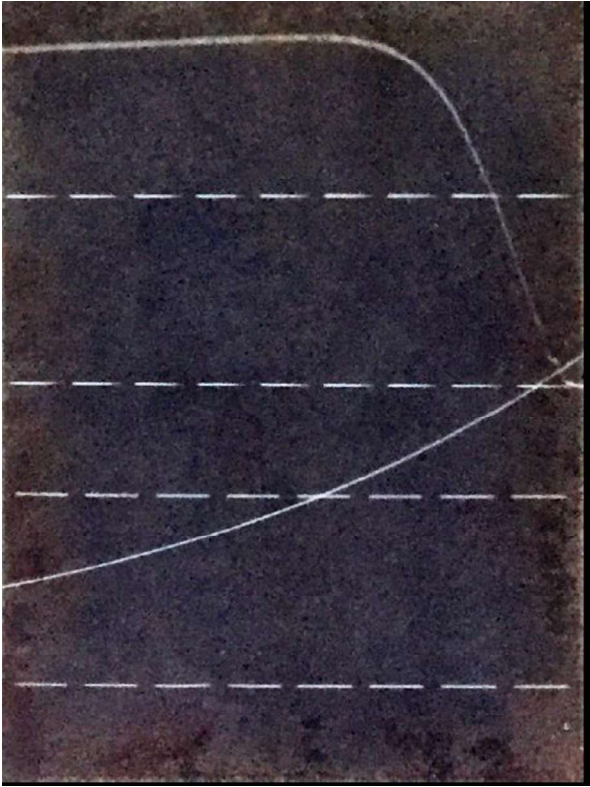
Finalizando este pequeno resumo histórico sobre a eletricidade e o aterramento seguem alguns registros sobre o Laboratório de Alta Tensão da Unicamp (LAT):

O Lat começou com um projeto do professor Dirck Andrea Rheimbolt em 1977. Em 1979 o professor Yochiak Dói deu continuidade neste projeto até os anos de 1986/87, tendo o seu efetivo funcionamento a partir de maio de 1981.

Alguns projetos relevantes de pesquisas que foram realizados em suas instalações foram:

1. Projeto do gerador de testes de centelhador a gás, Projeto Telebrás.
2. Projeto do contador de raios, Projeto Telebrás.
3. Descargas em isoladores poluídos, Cerâmica Santana
4. Parte do projeto do cabo submarino, Padtec.
5. Projeto de contaminação/penetração de umidade em para-raios de distribuição, Energiza.
6. Simulação de efeitos diretos de raios em estruturas aeronáuticas, Embraer.
7. Desenvolvimento de sistema de gerenciamento de ciclo de vida dos ativos operacionais considerando a avaliação de confiabilidade global, Análise de risco e dimensionamento da capacidade das instalações, Eletropaulo.
8. Validação experimental de simulações computacionais de descargas atmosféricas trigadas, Fapesp/CPqD
9. Desenvolvimento de protótipo e dispositivo limitador de correntes de curto circuito para aplicação em subestações de distribuição em 13,8 KV, Elektro
10. Estudos dos impactos de tensão e de corrente resultantes de manobras de paralelismo entre transformadores de Força de diferentes tensões e de fechamento em anel através de subestações diferentes de redes primárias de distribuição. Elektro.

Figura 22 – Foto do primeiro oscilograma realizado no Laboratório de Alta Tensão da Unicamp, em 11 de maio de 1981.



11/05/81
por volta das
4:30 hs da
tarde
1^a foto do LAT

Fonte: Acervo Prof. Pissolato.

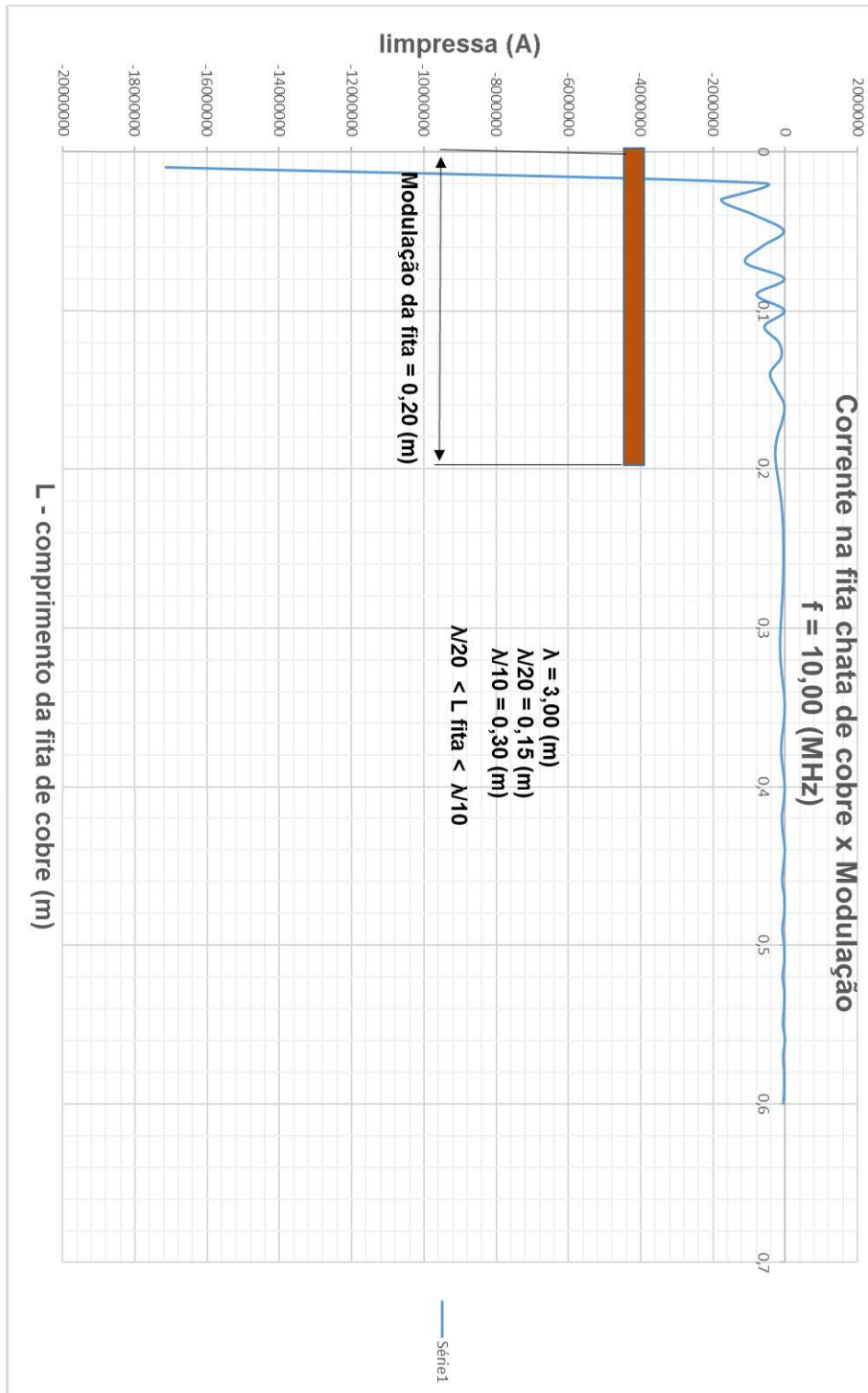
Apêndice II: Dados da Simulação da Onda no condutor de cobre em forma de fita chata.

Tab. 3 – Apresenta os parâmetros e premissas adotadas.

PREMISSAS ADOTADAS PARA A SIMULAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO APLICADA NA FITA DE COBRE:				
1) Fonte Emissora distante.				
2) Meio 1 - Ar.				
3) Meio 2 - Fita de cobre chata.				
4) Modelo Eletromagnético - Linha de Transmissão com baixas perdas (10).				
$Z0=R0+JX0$				
$R \text{ ca fita} = \sqrt{((\pi.f.\mu)/\sigma)}*(L/w) \text{ (}\Omega\text{)}$				
$L \text{ fita chata} = 0,002*\pi*[2,303*\log(2*L/(w+t))+0,5+0,235*((w+t)/L)] \text{ (}\mu\text{H) tudo em (m). Para a faixa de comprimento da fita em análise.}$				
l - Comprimento da fita de cobre em análise Lfita chata (μH)				
w - largura da fita de cobre em análise. l (m) comprimento 1,17E-01				
t - espessura da fita de cobre em análise. w (m) largura 2,00E-01				
$C \cong L/(R0)^2$ th (m) espessura 2,00E-03				
5) Características dos meios 1 e 2.				
Frequencia (Hz) 1,00E+08				
$\omega=2*\pi*f \text{ (rad/s)}$ 6,28E+08				
T (s) 1,00E-08				
V0 fonte afastada (V) 1,00E+06				
Condutividade $\sigma \text{ (S/m)}$				
Permissividade $\epsilon_0 \text{ (F/m)}$				
Permeabilidade $\mu_0 \text{ (H/m)}$				
Velocidade no meio $u_1p \text{ (m/s)}$ $u_p = 1/\sqrt{(\mu_0*\epsilon_0)}$ 3,00E+08				
Compr. de onda $\lambda_1 \text{ (m)}$ $\lambda = u_1.T = 2\pi/\epsilon$ 3,00E+00				
Numero de onda $\epsilon \text{ (rad/m)}$ $\epsilon=(2*\pi)/\lambda$ 2,09E+00				
Atenuação $\alpha \text{ (Np/m)}$ $\alpha = 0$ 0,00E+00				
to (s) 1,00E-06				
Condutividade * $\sigma \text{ (S/m)}$				
Permissividade * $\epsilon_r \text{ (F/m)}$				
Permeabilidade * $\mu_r \text{ (H/m)}$				
Velocidade no meio * $u_p \text{ (m/s)}$ $u_p = \omega/\epsilon =$ 4,65E+00				
Compr. de onda * $\lambda_2 \text{ (m)}$ $\lambda = u_1.T = 2\pi/\epsilon$ 4,65E-08				
Numero de onda $\epsilon \text{ (rad/m)}$ $\epsilon=\omega_1.\sqrt{(L.C)}$				
Atenuação $\alpha \text{ (Np/m)}$ $\alpha = (1/2)R)\sqrt{(C/L)}$				
Prof. de penetração $\delta \text{ (m)}$ $\delta = 1/\alpha$				
6) Limite do comprimento da fita , $N/20 \text{ (m):}$ 1,50E-01				
7) Expressão da Onda trafegante: $V(l,t)=V_0 \exp(-\alpha l) \cos(\omega t - \beta l)$ $V(l,t)=V_0 \exp(-\alpha l) \cos(\omega t - \beta l)$				
8) Amplitude V_0 fonte afastada (v): 1,00E+06				
9) $L \text{ fita chata} = 0,002*\pi*[2,303*\log(2*L/(w+t))+0,5+0,235*((w+t)/2)] \text{ (}\mu\text{H) tudo em (cm). Conforme Henry Ott}$				

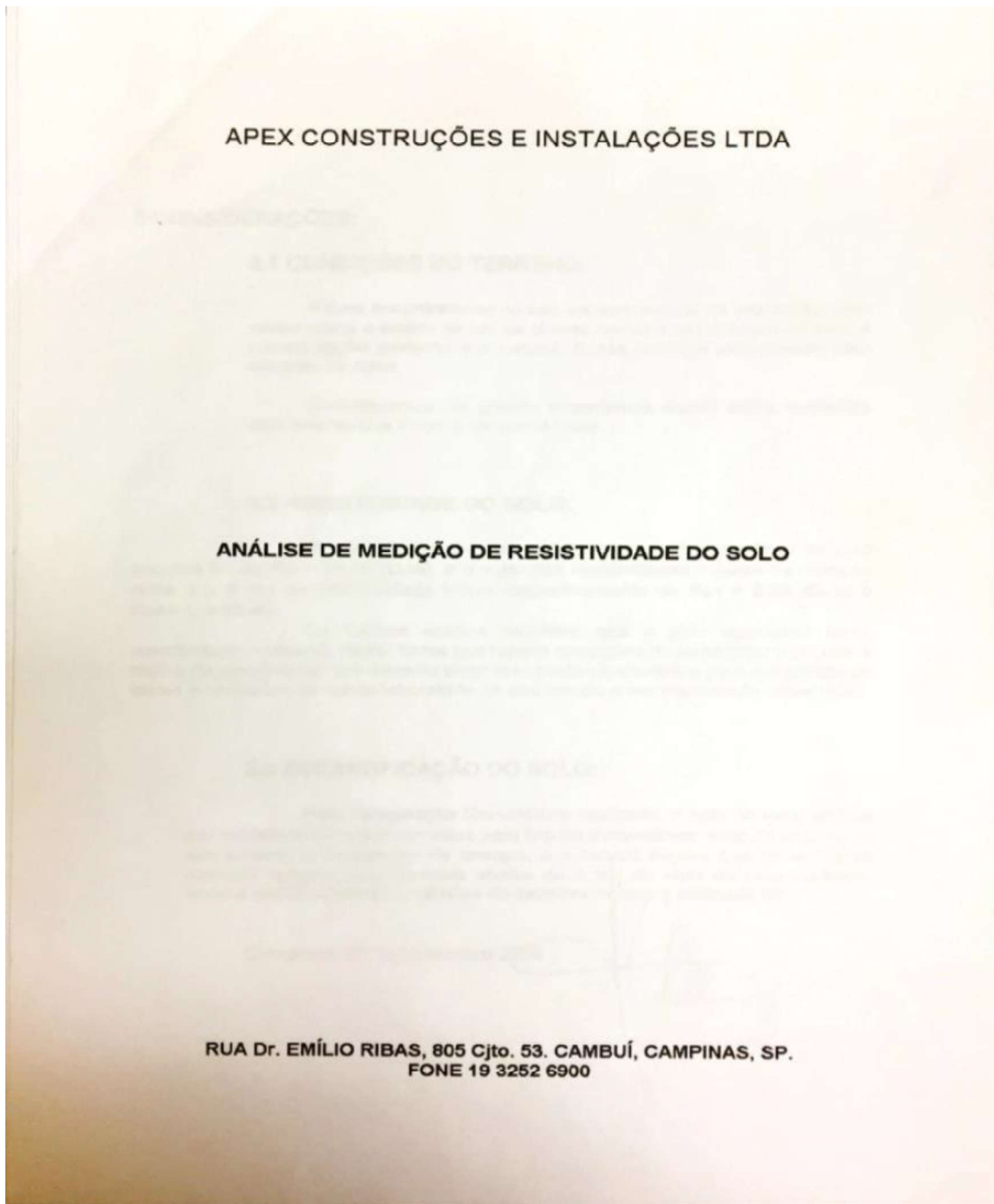
3,73	5,60E-01	5,84E-02	5,84E-02	4,75E-05	1,39E-02	3,67E+07	0,83	1,00E+06	5,05E+05	-4,95E+05	2,98E+04	-1,66E+01
3,80	5,70E-01	5,95E-02	5,95E-02	4,85E-05	1,37E-02	3,74E+07	-0,70	1,00E+06	-4,26E+05	-1,43E+06	3,05E+04	-4,68E+01
3,87	5,80E-01	6,05E-02	6,05E-02	4,96E-05	1,35E-02	3,80E+07	1,00	1,00E+06	6,07E+05	-3,93E+05	3,11E+04	-1,26E+01
3,93	5,90E-01	6,16E-02	6,16E-02	5,06E-05	1,33E-02	3,87E+07	0,25	1,00E+06	1,49E+05	-8,51E+05	3,18E+04	-2,68E+01
4,00	6,00E-01	6,26E-02	6,26E-02	5,17E-05	1,32E-02	3,93E+07	-0,07	1,00E+06	-4,49E+04	-1,04E+06	3,25E+04	-3,22E+01
4,07	6,10E-01	6,37E-02	6,37E-02	5,27E-05	1,30E-02	4,00E+07	0,57	1,00E+06	3,49E+05	-6,51E+05	3,31E+04	-1,97E+01
4,13	6,20E-01	6,47E-02	6,47E-02	5,38E-05	1,28E-02	4,07E+07	0,74	1,00E+06	4,49E+05	-5,51E+05	3,38E+04	-1,63E+01
4,20	6,30E-01	6,57E-02	6,57E-02	5,49E-05	1,27E-02	4,13E+07	-0,96	1,00E+06	-5,80E+05	-1,58E+06	3,45E+04	-4,58E+01
4,27	6,40E-01	6,68E-02	6,68E-02	5,59E-05	1,25E-02	4,20E+07	0,64	1,00E+06	3,91E+05	-6,09E+05	3,51E+04	-1,73E+01
4,33	6,50E-01	6,78E-02	6,78E-02	5,70E-05	1,24E-02	4,26E+07	0,77	1,00E+06	4,67E+05	-5,33E+05	3,58E+04	-1,49E+01
4,40	6,60E-01	6,89E-02	6,89E-02	5,81E-05	1,22E-02	4,33E+07	0,32	1,00E+06	1,95E+05	-8,05E+05	3,65E+04	-2,21E+01
4,47	6,70E-01	6,99E-02	6,99E-02	5,92E-05	1,21E-02	4,39E+07	0,71	1,00E+06	4,28E+05	-5,72E+05	3,72E+04	-1,54E+01
4,53	6,80E-01	7,10E-02	7,10E-02	6,02E-05	1,20E-02	4,46E+07	0,78	1,00E+06	4,73E+05	-5,27E+05	3,79E+04	-1,39E+01
4,60	6,90E-01	7,20E-02	7,20E-02	6,13E-05	1,18E-02	4,52E+07	-1,00	1,00E+06	-6,07E+05	-1,61E+06	3,85E+04	-4,17E+01
4,67	7,00E-01	7,31E-02	7,31E-02	6,24E-05	1,17E-02	4,59E+07	0,94	1,00E+06	5,70E+05	-4,30E+05	3,92E+04	-1,10E+01
4,73	7,10E-01	7,41E-02	7,41E-02	6,35E-05	1,16E-02	4,66E+07	0,13	1,00E+06	7,76E+04	-9,22E+05	3,99E+04	-2,31E+01
4,80	7,20E-01	7,51E-02	7,51E-02	6,46E-05	1,14E-02	4,72E+07	-0,61	1,00E+06	-3,69E+05	-1,37E+06	4,06E+04	-3,37E+01
4,87	7,30E-01	7,62E-02	7,62E-02	6,57E-05	1,13E-02	4,79E+07	-0,42	1,00E+06	-2,52E+05	-1,25E+06	4,13E+04	-3,03E+01
4,93	7,40E-01	7,72E-02	7,72E-02	6,68E-05	1,12E-02	4,85E+07	0,72	1,00E+06	4,37E+05	-5,63E+05	4,20E+04	-1,34E+01
5,00	7,50E-01	7,83E-02	7,83E-02	6,79E-05	1,11E-02	4,92E+07	0,09	1,00E+06	5,65E+04	-9,43E+05	4,27E+04	-2,21E+01
5,07	7,60E-01	7,93E-02	7,93E-02	6,90E-05	1,10E-02	4,98E+07	0,02	1,00E+06	1,04E+04	-9,90E+05	4,34E+04	-2,28E+01
5,13	7,70E-01	8,04E-02	8,04E-02	7,01E-05	1,09E-02	5,05E+07	-0,91	1,00E+06	-5,50E+05	-1,55E+06	4,41E+04	-3,52E+01
5,20	7,80E-01	8,14E-02	8,14E-02	7,12E-05	1,07E-02	5,11E+07	-0,12	1,00E+06	-7,43E+04	-1,07E+06	4,47E+04	-2,40E+01
5,27	7,90E-01	8,24E-02	8,24E-02	7,23E-05	1,06E-02	5,18E+07	-0,12	1,00E+06	-7,14E+04	-1,07E+06	4,54E+04	-2,36E+01
5,33	8,00E-01	8,35E-02	8,35E-02	7,34E-05	1,05E-02	5,25E+07	-0,90	1,00E+06	-5,46E+05	-1,55E+06	4,61E+04	-3,35E+01
5,40	8,10E-01	8,45E-02	8,45E-02	7,46E-05	1,04E-02	5,31E+07	-0,01	1,00E+06	-4,12E+03	-1,00E+06	4,69E+04	-2,14E+01
5,47	8,20E-01	8,56E-02	8,56E-02	7,57E-05	1,03E-02	5,38E+07	0,13	1,00E+06	7,67E+04	-9,23E+05	4,76E+04	-1,94E+01
5,53	8,30E-01	8,66E-02	8,66E-02	7,68E-05	1,02E-02	5,44E+07	0,69	1,00E+06	4,19E+05	-5,81E+05	4,83E+04	-1,20E+01
5,60	8,40E-01	8,77E-02	8,77E-02	7,79E-05	1,01E-02	5,51E+07	-0,46	1,00E+06	-2,81E+05	-1,28E+06	4,90E+04	-2,62E+01
5,67	8,50E-01	8,87E-02	8,87E-02	7,91E-05	1,00E-02	5,57E+07	-0,66	1,00E+06	-3,99E+05	-1,40E+06	4,97E+04	-2,82E+01
5,73	8,60E-01	8,97E-02	8,97E-02	8,02E-05	9,96E-03	5,64E+07	0,06	1,00E+06	3,43E+04	-9,66E+05	5,04E+04	-1,92E+01
5,80	8,70E-01	9,08E-02	9,08E-02	8,13E-05	9,87E-03	5,70E+07	0,96	1,00E+06	5,85E+05	-4,15E+05	5,11E+04	-8,12E+00
5,87	8,80E-01	9,18E-02	9,18E-02	8,25E-05	9,78E-03	5,77E+07	-1,00	1,00E+06	-6,04E+05	-1,60E+06	5,18E+04	-3,10E+01
5,93	8,90E-01	9,29E-02	9,29E-02	8,36E-05	9,69E-03	5,84E+07	0,84	1,00E+06	5,09E+05	-4,91E+05	5,25E+04	-9,36E+00
6,00	9,00E-01	9,39E-02	9,39E-02	8,47E-05	9,61E-03	5,90E+07	0,62	1,00E+06	3,78E+05	-6,22E+05	5,32E+04	-1,17E+01
6,07	9,10E-01	9,50E-02	9,50E-02	8,59E-05	9,52E-03	5,97E+07	0,21	1,00E+06	1,25E+05	-8,75E+05	5,40E+04	-1,62E+01
6,13	9,20E-01	9,60E-02	9,60E-02	8,70E-05	9,44E-03	6,03E+07	0,68	1,00E+06	4,14E+05	-5,86E+05	5,47E+04	-1,07E+01
6,20	9,30E-01	9,71E-02	9,71E-02	8,82E-05	9,36E-03	6,10E+07	0,74	1,00E+06	4,51E+05	-5,49E+05	5,54E+04	-9,90E+00
6,27	9,40E-01	9,81E-02	9,81E-02	8,93E-05	9,28E-03	6,16E+07	-0,99	1,00E+06	-6,00E+05	-1,60E+06	5,61E+04	-2,85E+01
6,33	9,50E-01	9,91E-02	9,91E-02	9,05E-05	9,20E-03	6,23E+07	0,84	1,00E+06	5,08E+05	-4,92E+05	5,68E+04	-8,66E+00
6,40	9,60E-01	1,00E-01	1,00E-01	9,16E-05	9,13E-03	6,29E+07	0,43	1,00E+06	2,61E+05	-7,39E+05	5,76E+04	-1,28E+01
6,47	9,70E-01	1,01E-01	1,01E-01	9,28E-05	9,05E-03	6,36E+07	-0,25	1,00E+06	-1,51E+05	-1,15E+06	5,83E+04	-1,97E+01
6,53	9,80E-01	1,02E-01	1,02E-01	9,39E-05	8,98E-03	6,43E+07	0,06	1,00E+06	3,75E+04	-9,63E+05	5,90E+04	-1,63E+01
6,60	9,90E-01	1,03E-01	1,03E-01	9,51E-05	8,91E-03	6,49E+07	0,98	1,00E+06	5,96E+05	-4,04E+05	5,97E+04	-6,76E+00
6,67	1,00E+00	1,04E-01	1,04E-01	9,62E-05	8,84E-03	6,56E+07	-0,54	1,00E+06	-3,28E+05	-1,33E+06	6,05E+04	-2,20E+01

Fig. 5 – Representação gráfica do comportamento da onda no trecho do condutor em forma de fita de cobre, cujo comprimento está limitado entre $\lambda/20$ e $\lambda/10$.



Apêndice III

Estudo de Prospecção geoletrica do solo em duas camadas pelo método de Wenner e Memoriais Descritivos para a execução das obras.



APEX CONSTRUÇÕES E INSTALAÇÕES LTDA

3 CONSIDERAÇÕES:

3.1 CONDIÇÕES DO TERRENO:

A área encontrava-se no seu aspecto natural de vegetação, com relevo plano e úmido devido às chuvas comuns nesta época do ano. A compactação portanto é a natural. Existe também proximidade com efluente de água.

Consideramos de grande importância repetir estas medições com o terreno já limpo e na época seca.

3.2 RESISTIVIDADE DO SOLO:

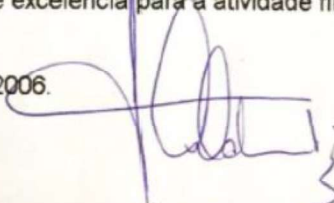
O valor da resistividade média da camada superficial do solo apurada foi de $R_s = 25,46 (\Omega.m)$, e o valor das resistividades médias na camada entre 4 e 6 (m) de profundidade foram respectivamente de $R_{p1} = 2,39 (\Omega.m)$ e $R_{p2} = 1,13 (\Omega.m)$.

Os valores obtidos mostram que o solo apresenta baixa resistividade, indicando desta forma que haverá condições de se projetar eletrodos e malha de aterramento que deverão atuar com bastante eficiência para a atividade de testes e medições no futuro laboratório de alta tensão a ser implantado neste local.

3.3 EXTRATIFICAÇÃO DO SOLO:

Pela Prospecção Geo-elétrica realizada, o solo no local poderá ser modelado em duas camadas para fins de dimensionamento do sistema de aterramento e dissipação de energia, e o estudo sugere que os eletrodos verticais estejam posicionados abaixo de 4 (m) do nível do piso acabado, onde a resistividade adquire nível de excelência para a atividade fim.

Campinas, 27 de Dezembro 2006.


RUA Dr. EMÍLIO RIBAS, 805 Cjto. 53. CAMBUÍ, CAMPINAS, SP.
FONE 19 3252 6900

Tab. 5 – Apresenta os valores obtidos na medição da resistividade do solo pelo método de Wenner.

APEX CONSTRUÇÕES E INSTALAÇÕES LTDA

PLANILHA DE MEDIÇÃO DE RESISTENCIA E RESISTIVIDADE DO SOLO			
DATA:	20/12/06		
LOCAL:	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ		
CLIMA:	UMIDO COM CHUVAS NOS DIAS ANTERIORES		
ASPECTO DO SOLO:	MANGUE		
POSIÇÃO DA MEDIÇÃO	D (M)	R (OHM)	RESISTIV (OHM.M)
PONTO 5	1,00	1,49	10,30
	2,00	0,19	2,45
	4,00	0,02	0,51
PONTO 4	1,00	2,01	13,89
	2,00	0,44	5,68
	4,00	0,08	2,02
PONTO 6	1,00	1,98	13,68
	2,00	0,49	6,32
	4,00	0,11	2,78
	6,00	0,05	1,89
PONTO 14	1,00	10,89	75,24
	2,00	1,82	23,48
	4,00	0,15	3,80
	6,00	0,01	0,38
PONTO 11	1,00	5,97	41,25
	2,00	1,05	13,55
	4,00	0,19	4,81
	6,00	0,03	1,13
PONTO 9	1,00	1,89	13,06
	2,00	0,23	2,97
	4,00	0,07	1,77
	6,00	0,03	1,13
PONTO 2	1,00	1,56	10,78
	2,00	0,22	2,84
	4,00	0,04	1,01

AREA DO FUTURO LABORATORIO DE ALTA TENSÃO

Fig.23 – Apresenta os valores obtidos para a determinação da estratificação do solo no local do LEAT.

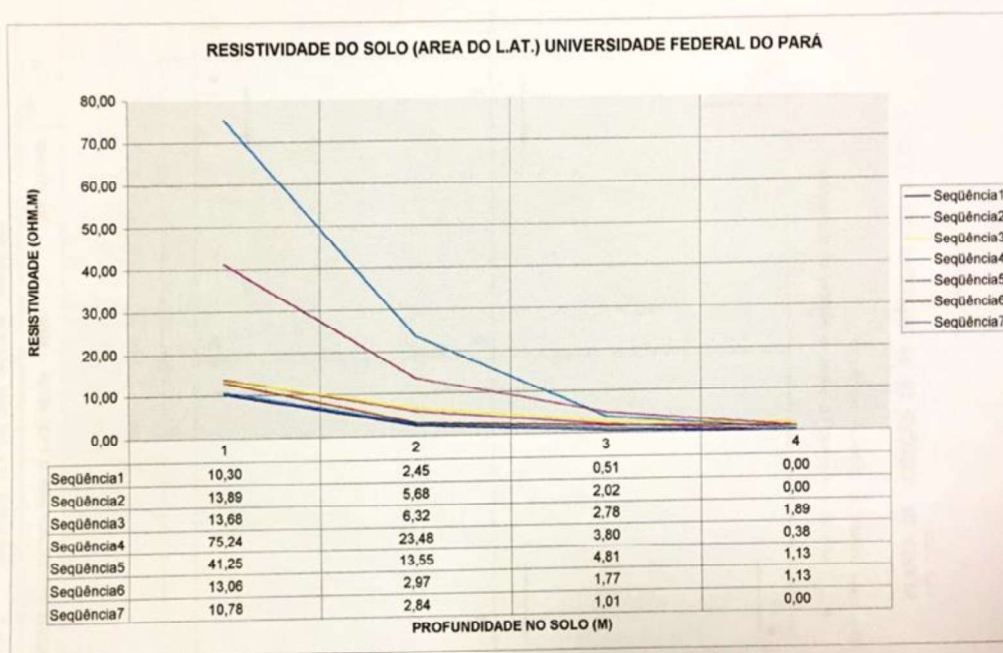
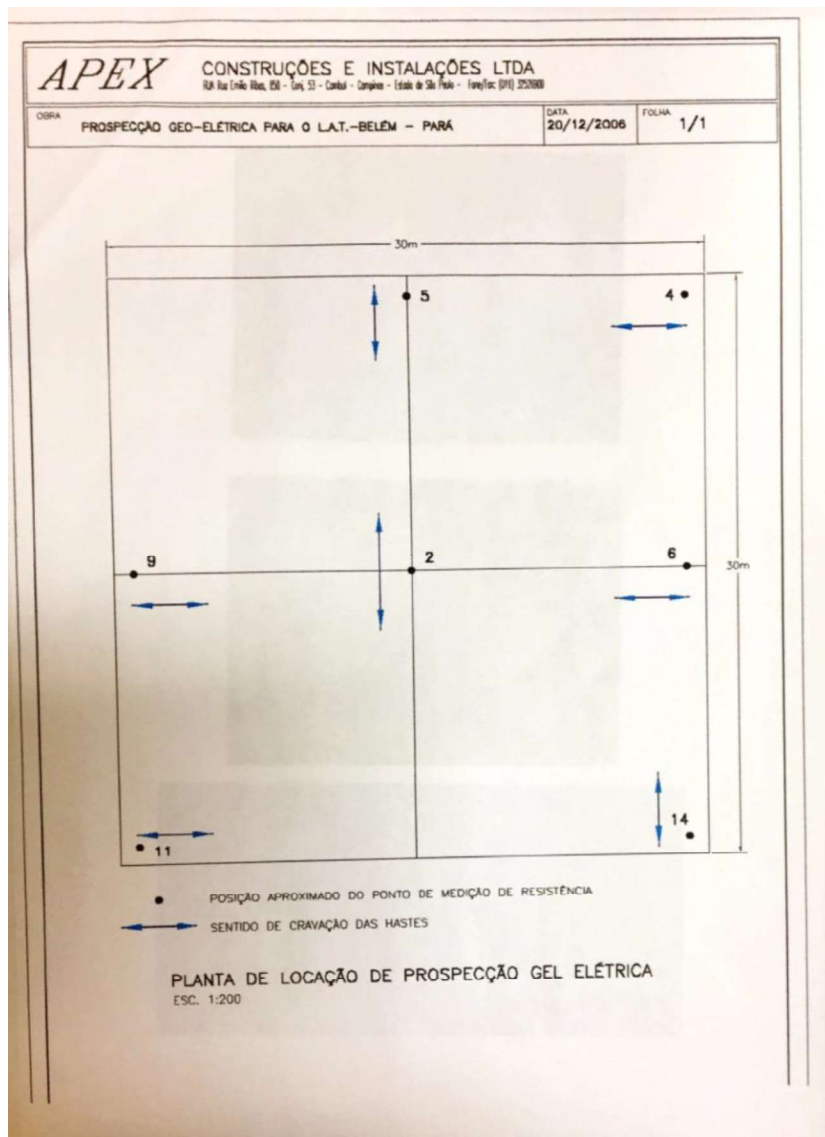


Fig.24– Apresenta os pontos onde foram medidos os valores da resistividade do solo no local do LEAT.



Memorial Descritivo para a Execução da Malha de Aterramento do LEAT.

Etapas do projeto do LEAT:

- Elaboração do Memorial Descritivo para execução de obras.
- Inspeção visual da execução da malha de aterramento no local.
- Laudo da estratificação do solo.
- Projetos Executivos, que são constituídos das seguintes plantas:
- Sistema Principal de Aterramento e Dissipação de Energia.
- Sistema de Aterramento Secundário da malha de aço inferior.
- Sistema de Aterramento Terciário da malha de aço superior.
- Detalhes e Especificações de Dispositivos e Materiais para Montagens.

MEMORIAL DESCRITIVO

PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DO SISTEMA DE ATERRAMENTO E DISSIPACÃO DE ENERGIA

LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE EXTRA ALTA TENSÃO DO CENTRO TECNOLÓGICO DA U.F.PA.

BELÉM-PA

VERSÃO INICIAL FEV-2007

VERSÃO ATUAL REVISÃO 02 – 18/04/2007

SUMÁRIO DA ABRANGENCIA DESTE MEMORIAL:

01 - INTRODUÇÃO

02 – GENERALIDADES

03 – DOCUMENTAÇÃO E BIBLIOGRAFIA TÉCNICA CONSULTADA

04 – PROJETOS E DOCUMENTOS TÉCNICOS RECEBIDOS E UTILIZADOS ATÉ 05 DE FEVEREIRO DE 2007:

05 - PROJETOS DESENVOLVIDOS:

06 – DESCRIÇÃO DO PROJETO:

07 - OBRIGAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

1. INTRODUÇÃO:

O presente memorial tem o objetivo de descrever as soluções técnicas, serviços a serem executados e os materiais a ser empregada nas obras de Instalações Elétricas do Sistema de Aterramento e Dissipação de Energia do Laboratório de Ensaios de Extra Alta

Tensão do Centro Tecnológico da UFPA a serem executadas no Campus Universitário do Guamá na Avenida Perimetral, S/N CIDADE UNIVERSITÁRIA, localizada em Belém - PA.

Assim os projetos foram elaborados levando-se em consideração os lay-outs previstos para os equipamentos de testes, plantas e informações técnicas transmitidas por meio eletrônico pelo coordenador técnico dos projetos até a data de 05 de fevereiro de 2007, bem como as recomendações das Normas da ABNT e demais documentos técnicos e bibliografias citadas.

2. GENERALIDADES:

Diferente do que ocorre nos sistemas de fornecimento e suprimento de energia elétrica, os fenômenos de transitórios elétricos estão associados às sequências rotineiras de ensaios e operações dos Laboratórios de testes e ensaios no nível de alta tensão. Eles ocorrem não somente em testes de impulsos de tensão, mas também em descargas disruptivas em objetos e nos estudos de chaveamentos em AC e DC.

Os fenômenos transitórios podem causar em intervalos de tempo extremamente reduzidos um aumento considerável na amplitude do potencial em relação à referência da terra, das estruturas dos equipamentos necessários para a área de testes de alta – tensão, o que torna de fundamental importância a condução e dissipação deste à terra, bem como também dos demais sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e de surtos de tensão na rede de alimentação da concessionária.

Valores reduzidos destas amplitudes precisam ser mantidos dentro dos limites de segurança à vida dos operadores do laboratório e para a garantia e confiabilidades das técnicas de medições dos ensaios envolvidos.

Assim torna-se essencial e também prioritário ressaltar que o sistema de aterramento descrito a seguir, é item de máxima segurança e importância nas atividades deste Laboratório de Extra Alta Tensão (tratado como LEAT neste memorial), e dentro deste enfoque deverá ser exigida a sua execução através de equipes e profissionais de reconhecida capacitação, e do emprego de materiais especificados em projeto e ferramentais específicos inerentes à sua instalação e comprovada conformidade de especificação.

3. DOCUMENTOS TÉCNICOS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.

NBR 5419 - PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

RECOMMENDATIONS FOR THE INSTALLATION "EARTHING SYSTEMS IN H.V. TEST FIELDS – LDIC AG, SWITZERLAND.

FLOOR NET USED AS GROUND RETURN IN HIGH VOLTAGE TEST AREAS – NILS R. HYLÉN CAVALLIUS AND TRINH N. GIAO

EARTH SYSTEM FOR HIGH VOLTAGE TEST PLANTS – RECOMMENDATIONS FOR THE INSTALLATION - HAEFLAY

HIGH – VOLTAGE ENGINEERING – 2Ed. M. S. NAIDU, V. KAMARAJU

4. PROJETOS E DOCUMENTOS TECNICOS RECEBIDOS E UTILIZADOS ATÉ 05 DE FEVEREIRO DE 2007:

LABORATÓRIO DE TESTE DE ALTA TENSÃO, ESTUDO PRELIMINAR PLANTA, CORTES E DETALHES – UFPA, DESENHO ORIENTATIVO REVISÃO 1 DE 10/08/06.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 07/00, FORMA DO PAVIMENTO TÉRREO.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 09/00, ARMAÇÃO NEGATIVA DA LAJE PAVIMENTO TÉRREO.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 01/00, LOCAÇÃO E CARGA DOS PILARES.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 13/00, ARMAÇÃO DAS VIGAS DO PAVIMENTO TÉRREO.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 11/00, ARMAÇÃO DAS VIGAS DO PAVIMENTO TÉRREO.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 08/00, ARMAÇÃO POSITIVA DA LAJE PAVIMENTO TÉRREO.

PROJETO ESTRUTURAL – CONCRETO ARMADO - UFPA, REVISÃO 0 DE 05/02/2007 REF. 12/00, ARMAÇÃO DAS VIGAS DO PAVIMENTO TÉRREO.

5. PROJETOS DESENVOLVIDOS:

Dada a prioridade para o início das obras e os projetos fornecidos, o projeto global de proteção de surtos e de dissipação e aterramento de energia foi dividido em duas etapas, conforme segue abaixo:

1) SISTEMA DE DISSIPACÃO E ATERRAMENTO.

2) INTERLIGAÇÃO DAS INSTALAÇÕES COMPLEMENTARES, PAREDES METÁLICAS DE FECHAMENTO DO GALPÃO E DE DETALHES PERTINENTES.

Os projetos desenvolvidos constituem-se nas seguintes plantas:

E-01/00 - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS - SISTEMA PRINCIPAL DE ATERRAMENTO E DISSIPACÃO DE ENERGIA, PLANTA BAIXA.

E-02/00 - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – SISTEMA DE ATERRAMENTO SECUNDÁRIO DA MALHA DE AÇO INFERIOR, PLANTA BAIXA.

E-03/00 - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – SISTEMA DE ATERRAMENTO TERCIÁRIO DA MALHA DE AÇO SUPERIOR, PLANTA BAIXA.

E-04/00 - INSTALAÇÕES ELÉTRICAS – DETALHES E ESPECIFICAÇÕES DE DISPOSITIVOS E MATERIAIS PARA AS MONTAGENS

6. DESCRIÇÃO DOS PROJETOS:

6.1 SISTEMA PRINCIPAL DE ATERRAMENTO E DISSIPACÃO DE ENERGIA.

Para a área destinada ao campo de testes e ensaios do LEAT foi projetada uma malha de aterramento e dissipação com fita de cobre com dimensões de 25(L) x 2(E) mm e modulação da grade da malha de 200 x 200 mm .

Para área de tráfego do LEAT foi projetada uma malha de aterramento e dissipação com fita de cobre com dimensões de 25 x 2 mm e modulação da grade da malha de 1,00 x 1,00 m. Esta segunda malha envolve toda a primeira e também a área de alvenaria anexa ao galpão de estrutura metálica do LEAT.

Foi previsto um Condutor de proteção e referência, de secção transversal retangular (fita de cobre com dimensões de 25 x 2 mm) para a transição entre malhas e demais interligações, seja com os eletrodos verticais, seja com as barras de conexão equipotencial. Na transição de malhas deverão ser previstos pontos de solda exotérmica entre o condutor de proteção e as malhas a cada 2,00 m.

Para a dissipação e aterramento da energia foram dimensionados eletrodos verticais em cobre eletrolítico a serem enterrados no solo, abaixo da laje do LEAT, e em cuja planta observa-se as projeções das respectivas caixas de inspeção. As dimensões dos eletrodos verticais são Diâmetro externo 100,00 mm, comprimento 10,00 m e espessura da parede de cobre de 4,00 mm (peça única). Os eletrodos verticais deverão

ser fornecidos fechados nas extremidades, e na superior deverá ser soldado uma fita equipotencial para a conexão na barra equipotencial de piso.

Deverá ser previsto uma camada mínima de 5 cm envolvendo uniformemente a maior dimensão deste eletrodo vertical principal de um produto para o melhor contato destes eletrodos com o solo existente e com substância para reduzir o valor da resistência de contato e aterramento sendo que sua resistividade na forma final seja inferior a 0,2 Ohm.m. Este produto deverá ser permanente (não se decompõe com o tempo), não corrosivo, não ser lixiviável e nem poluente para contaminar o solo e nem os lençóis freáticos.

Para a conexão elétrica e equipotencial dos equipamentos e estruturas a serem utilizados na área de teste ao referencial de terra, foram previstas barras de conexão em cobre, nas dimensões de 200 x 75 x 6 mm a qual está conectada por solda exotérmica com fita de cobre à malha de cobre, e com condutores de seção circular de equipotencial das malhas de aço.

Devido à movimentação na área de testes de equipamentos de grande porte, é imprescindível que esta barra seja fixada na laje de modo a sua face superior não apresentar qualquer desnível ou diferença de altura com o plano do piso acabado na área de testes.

Também nos pilares metálicos da estrutura metálica foram previstas nas suas faces internas a soldagem de uma barra de conexão e equipotencial de medidas iguais à descrita anteriormente que também recebe a fita de conexão com a malha principal, os condutores de equipotencial das malhas de aço, o condutor de cobre que interliga ao ferro de construção adicional às estacas da fundação (diâmetro do ferro 16 mm, comprimento da barra 6,00m) e finalmente o condutor equipotencial do aterramento da estrutura do galpão (seção transversal redonda com 50,00 mm², cobre eletrolítico).

No perímetro do galpão do LEAT, foi projetado um sistema de eletrodos horizontais constituído de um condutor equipotencial de aterramento da estrutura do galpão (seção transversal redonda com 50,00 mm², cobre eletrolítico), e eletrodos verticais em hastes de aço cobreado, diâmetro 1" e comprimento 6,00 m.

Para os laboratórios de ensaios e testes com o nível de amplitudes de tensões e impulsos a serem aplicados como os que serão aplicados neste caso do LEAT (4,00 MV), a medida da Resistência do sistema de aterramento deverá ser $R_a < 1,00 \Omega$, em qualquer época do ano.

É importante observar e constar que foi projetada no ambiente da sala de controle e observação uma blindagem eletromagnética utilizando-se as malhas de aterramento em cobre já descritas para o campo de testes, e a serem aplicadas nas paredes, teto e piso conforme o seguinte:

SALA DE COMANDO E CONTROLE DE TESTES E ENSAIOS:
MALHA DE FITA DE COBRE, COM DIMENSÕES DE 200 X 200 X 2 mm.

Neste ambiente, todas as portas deverão possuir em uma das faces, uma chapa de ferro galvanizada em toda sua extensão, conectada a uma pequena barra de cobre também ligada à equipotencial (75 x 50 x 6 mm) instalada na parede próxima a cada porta, e conectada a esta por jumper de cobre.

Procurando tirar partido da expressiva massa metálica da ferragem de aço armada da laje de térreo do galpão do LEAT, criamos as seguintes malhas para aterramento, para a organização da execução.

6.2 SISTEMA DE ATERRAMENTO SECUNDÁRIO DA MALHA DE AÇO INFERIOR.

Em conformidade com os procedimentos previstos para o uso da ferragem da construção civil descritos na NBR – 5419, a ferragem de aço também integrará o sistema de aterramento de forma global, e para tal estaremos utilizando um condutor para equipotencial de secção transversal redonda de 35,00 mm², que conforme já descrito anteriormente, estará conectado às barras de equipotencial no piso e nos pilares do galpão. Para tal deverá ser previsto ponto a de solda exotérmica deste cabo ao ferro de construção a cada 2,00 m.

Também nesta planta é mostrada a utilização da fundação como eletrodo vertical natural, acrescentando a uma das estadas do bloco de cada pilar metálico um ferro adicional de diâmetro 16 mm e comprimento 6,00 m, também ligado à barra equipotencial soldada no pilar metálico do galpão.

6.3 SISTEMA DE ATERRAMENTO TERCIÁRIO DA MALHA DE AÇO SUPERIOR.

Utilizando-se a ferragem a ser empregada para a proteção mecânica do piso do galpão, e de forma semelhante à malha secundária anteriormente descrita, com o uso de um condutor equipotencial de secção redonda de aço com 16,00 mm² e com pontos de conexão a esta ferragem através de solda exotérmica a cada 2,00 m.

07 - OBRIGAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A execução dos serviços descritos e projetados deverá ser feitos em conformidade com este memorial, não devendo uma parte ser considerada separadamente da outra.

Independentemente da falta de algum detalhe ou de especificação de projeto ou da planilha de sugestão de materiais os equipamentos e dispositivos deverão ser entregues em perfeitas condições de funcionamento e de operação.

Tratando-se de obra de grande complexidade de instalações, o engenheiro responsável deverá elaborar um minucioso planejamento de execução e de cronograma de etapas de obra mostrando sua integração com as várias especialidades envolvidas, em especial a construção civil.

Poderão surgir devido às diversas instalações envolvidas, eventuais necessidades de alterações de traçados ou até mesmo de posições dos meios projetados, principalmente nas posições indicadas para os eletrodos verticais principais os quais poderão ter necessidade de relocação devido às fundações o quais somente poderá ser executado após autorização da comissão fiscalizadora da UFPA e sem nenhum custo adicional ao preço da obra, também não significando qualquer diminuição de responsabilidades do empreiteiro por estas alterações.

A fiscalização da UFPA se reserva o direito de fazer todos os testes que julgar necessários e se eventualmente for constatado necessidade de qualquer retrabalho para o perfeito funcionamento da malha o mesmo será feitos sem nenhum repasse deste custo ao cliente.

Assim, o escopo deste memorial é descrever as soluções técnicas adotadas nos projetos, bem como complementá-los, definir as obrigações e garantias das empreiteiras, visando uma execução em perfeitas condições com as técnicas de instalações atuais e em boa integração e harmonia com os elementos estruturais e equipamentos a serem instalados.

Para os pontos que porventura estejam omissos no presente memorial e projetos, os mesmos deverão ser elucidados em conjunto com a comissão fiscalizadora da UFPA, este projetista bem como a luz das especificações de fabricantes, levando-se também em consideração as Normas Brasileiras Internacionais e das concessionárias locais.

A firma instaladora deverá fornecer os materiais e/ou mão de obra e todas as ferramentas e equipamentos necessários para a perfeita execução dos trabalhos dentro da mais moderna técnica e acompanhamento das indicações dos projetos, bem como da comissão fiscalizadora da obra.

A empresa terá total responsabilidade no levantamento dos materiais necessários para o serviço em escopo, conforme indicado nos projetos, necessidades devidas às especificações de fornecedores de materiais e equipamentos, memoriais e outros itens necessários a perfeita execução e conclusão da obra.

Se houver necessidade de modificações, em consequência das condições locais e após a devida autorização da comissão fiscalizadora da UFPA, bem como do projetista responsável, tais modificações deverão ser lançadas nos desenhos definitivos, para arquivos "AS BUILT".

Quaisquer serviços existentes com mão de obra ou materiais inadequados ou em desacordo com o projeto, deverão ser refeitos pelo Instalador sem qualquer ônus para a UFPA.

A empresa responsável pela execução deverá designar pelo menos um engenheiro eletricitista responsável pela obra, já no ato de sua contratação, inclusive acompanhando na fase da execução da estrutura a perfeita continuidade da instalação de aterramento, o qual deverá emitir "ART" de Engenharia Elétrica junto ao CREA/PA, responsabilizando-se pela sua execução, bem como solicitar e acompanhar as vistorias que se fizerem necessárias até a aceitação final da execução das instalações pela Comissão Fiscalizadora.

Devido à grande complexidade das instalações elétricas envolvidas e a necessidade de cumprimento dos detalhes e cuidados necessários, torna-se fundamental a presença de um engenheiro eletricitista residente na obra em todas as fases de sua execução.

A instaladora deverá garantir as instalações e os materiais por ela fornecidos, pelo mínimo de 12 (doze) meses, durante o qual substituirá os materiais ou as instalações defeituosas, ressalvando-se os casos decorrentes de má conservação, uso inadequado das instalações e aparelhos, bem como dos equipamentos de desgastes.

DO CONHECIMENTO DO LOCAL:

Todos os participantes da concorrência deverão visitar o local, com a finalidade de ter conhecimento das implantações existentes, eventuais interferências e

planejamento da logística da obra. Em especial deverão ser observados os procedimentos de segurança do Ministério do Trabalho e da UFPA.

DA ENTREGA E RECEBIMENTO DA EXECUÇÃO:

A obra será considerada entregue através de documentação formal de avaliação por parte da fiscalização UFPA, de que todos os itens das instalações estão acabados e em perfeitas condições de uso e operação. Lavrando-se nesta oportunidade o laudo de medição do valor de resistência da malha de aterramento obtido, contando a partir desta data o tempo de garantia de responsabilidade do instalador.

Campinas, 18 de abril de 2007.

Eng. Eletricista Jaime Ary Molchansky

Apêndice IV – Comparação entre valores das Indutâncias para condutores de secção redonda e retangular.

Dimensões (m)

Conforme

l = tabela

w= 2,50E-02

t= 2,00E-03

Tab. 6 – Apresenta os parâmetros para comparação de indutâncias.

lcondutor (m)	L c. redondo = $(\mu l)/(8\pi l)$ (μH)			Lfita chata = $0,2 \cdot l \cdot [2,303 \cdot \log(2 \cdot l / (w+t)) + 0,5 + 0,235 \cdot ((w+t)/2)]$ (μH)
0,0100	1,26E-02			1,03E-03
0,0200	2,51E-02			4,84E-03
0,0300	3,77E-02			9,70E-03
0,0400	5,03E-02			1,52E-02
0,0500	6,28E-02			2,13E-02
0,0600	7,54E-02			2,77E-02
0,0700	8,80E-02			3,45E-02
0,0800	1,01E-01			4,16E-02
0,0900	1,13E-01			4,89E-02
0,1000	1,26E-01			5,64E-02
0,1100	1,38E-01			6,41E-02
0,1200	1,51E-01			7,21E-02
0,1300	1,63E-01			8,01E-02
0,1400	1,76E-01			8,84E-02
0,1500	1,88E-01			9,68E-02
0,1600	2,01E-01			1,05E-01
0,1700	2,14E-01			1,14E-01
0,1800	2,26E-01			1,23E-01
0,1900	2,39E-01			1,32E-01
0,2000	2,51E-01			1,41E-01
0,2100	2,64E-01			1,50E-01
0,2200	2,76E-01			1,59E-01
0,2300	2,89E-01			1,68E-01
0,2400	3,02E-01			1,77E-01
0,2500	3,14E-01			1,87E-01

Figura 6 – Apresenta a comparação entre as indutâncias de condutores se secção redonda e de um condutor com secção chata.

